

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS A
TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON TEJIDO DE FIBRA DE FIQUE
COMO REFUERZO EN ELEMENTOS DE CONCRETO A COMPRESIÓN

MARIA DE LOS ANGELES ORTIZ FORERO

LAURA NATALIA PICÓN CARRASCAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2021

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS A
TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON TEJIDO DE FIBRA DE FIQUE
COMO REFUERZO EN ELEMENTOS DE CONCRETO A COMPRESIÓN

MARIA DE LOS ANGELES ORTIZ FORERO

LAURA NATALIA PICÓN CARRASCAL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

Director:

Jose Miguel Benjumea Royero
Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirectores:

Javier Gómez Gómez
Dr. en Química
Ricardo Alfredo Cruz Hernández
Dr. en Ciencias Técnicas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2021

*A Dios, por guiar nuestro camino,
A nuestros padres, abuelos y hermanos por su inagotable amor, por la educación
que nos han brindado y por enseñarnos que, aunque el viaje parezca largo y lleno
de obstáculos, con perseverancia lograremos llegar,
A nuestros amigos, que siempre tuvieron una palabra con la cual hacer brotar una
sonrisa del alma.
Finalmente, a todos aquellos que hicieron feliz nuestro paso por la universidad.*

CONTENIDO

Pág

INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 FIQUE	16
2.1.1 Composición química	18
2.1.2 Características físicas y químicas.	21
2.1.3 Propiedades mecánicas	24
2.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	27
2.2.1 Tratamientos químicos	28
2.2.1.1 Alcalinización.	29
2.2.1.2 Injerto de agentes de acoplamiento	30
2.2.1.3 Esterificación	34
2.2.1.4 Pre-impregnación con polietileno	35
2.2.2 Tratamientos físicos	36
2.2.2.1 Hornificación	36
2.2.2.2 Tratamiento con plasma	37
2.2.2.3 Tratamiento Corona	37
2.2.2.4 Tratamiento con enzimas	39

3. EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE.....	40
4. PROCESOS FÍSICOS APLICADOS EN EL COMPUESTO.....	46
4.1 Patrón	47
4.2 Pulido	47
4.3 Resina.....	47
4.4 Arenado	47
4.5 Texturizado	47
4.6 Fijaciones mecánicas.....	48
4.6.1 Sin desplazamiento.....	48
4.6.2 Con desplazamiento permitido.....	48
4.6.3 Nervaduras internas.....	49
5. INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LA ADHESIÓN ENTRE LA MATRIZ POLIMÉRICA Y LAS FIBRAS	50
6. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE FORMA Y ESPESOR EN LA RESPUESTA A COMPRESIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO	58
7. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de la fibra de fique.	19
Tabla 2. Características de la fibra de fique.....	23
Tabla 3. Propiedades mecánicas a tensión de la fibra de fique.	26
Tabla 4. Propiedades mecánicas a tensión del acero y FRP.....	27
Tabla 5. Remoción de componentes evidenciada en ensayos FTIR para fibras tratadas con NaOH.	42
Tabla 6. Efecto de tratamientos químicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique A (Alcalinización), S (Alcalinización +Silanización), P (Alcalinización+Silanización+Preimpregnación).....	45
Tabla 7. Efecto de los tratamientos químicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique.	54
Tabla 8. Efecto de los tratamientos físicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Documentos por año de publicación.....	12
Figura 2. Planta y fibra de fique.	17
Figura 3. Estructura de las fibras vegetales	21
Figura 4. Composición de la pared celular de una fibra natural.	24
Figura 5. Principio de mejora de adhesión interfacial fibra-matriz mediante tratamiento químico.	28
Figura 6. Imágenes SEM fibras tratadas con NaOH 18 p/v% (b) y no tratadas (a).	30
Figura 7. Imágenes SEM fibras tratadas con silanización (2%, 4% y 6%)	31
Figura 8. Imágenes SEM fibras tratadas con peróxidos	33
Figura 9. Imágenes SEM fibras tratadas con anhídrido maleico.....	34
Figura 10. Principio de descarga del tratamiento corona.	38
Figura 11. Espectro FTIR de fibra sin tratamiento (F) vs alcalinización (A).	41
Figura 12. Especímenes para los ensayos de tracción.....	44
Figura 13. Prototipo de fijación mecánica con nervaduras internas.....	49
Figura 14. Ángulo de contacto entre el agua y la superficie de las fibras ensayadas	51
Figura 15. Cilindro de concreto reforzado externamente de fibras de lino.	61
Figura 16. Preparación del espécimen reforzado con tejido de cáñamo.	62

GLOSARIO

FRP: de las siglas en inglés “Fiber Reinforced Polymer”.

PROCESO DE EXTRUSIÓN: es un proceso mecánico usado en la industria de plástico para la producción de materiales moldeados mediante un flujo continuo de presión y empuje.

RETICULACIÓN: formación de enlaces químicos que da origen a una red sólida.

FTIR: Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.

RESUMEN

TÍTULO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS A Tensión DE UN MATERIAL COMPUESTO CON TEJIDO DE FIBRA DE FIQUE COMO REFUERZO EN ELEMENTOS DE CONCRETO A COMPRESIÓN*

AUTORAS: MARÍA DE LOS ÁNGELES ORTIZ FORERO** LAURA NATALIA PICÓN CARRASCAL**

PALABRAS CLAVE: FIBRAS NATURALES, FIQUE, REFUERZO, TRATAMIENTO SUPERFICIAL, MATERIALES COMPUESTOS, ADHESIÓN, MATRIZ POLIMÉRICA.

DESCRIPCIÓN: Durante los últimos años, la búsqueda de desarrollo sostenible en infraestructuras ha fomentado el interés por el uso de fibras naturales en materiales compuestos con matriz polimérica empleados como refuerzo externo de elementos a compresión. Este documento se enfocará en las fibras de fique por sus múltiples ventajas tales como biodegradabilidad, baja densidad, rigidez, bajo costo, fácil obtención y resistencia. Asimismo, se presentará una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas durante los últimos diez años enfocadas en el uso de fibras de fique como refuerzo de matrices poliméricas. Con tal intención, se seleccionaron los tratamientos superficiales químicos que mostraron mayor eficiencia en la mejora de la resistencia máxima a tensión, módulo de elasticidad y elongación última. En segundo lugar, se analizaron los tratamientos superficiales aplicados al compuesto con el fin de obtener las condiciones óptimas de adherencia entre una matriz polimérica y las fibras de fique de refuerzo y finalmente se estudió la influencia de los parámetros de forma y espesor en la respuesta del composite. Evidenciando que, a pesar de las ventajas de las fibras naturales y su aporte mecánico, la información relacionada con los procesos físicos es escasa, así como los ensayos para determinar la geometría ideal del compuesto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero, Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental.

ABSTRACT

TITLE: BIBLIOGRAPHIC REVIEW OF THE TENSILE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE WITH FIQUE FIBER FABRIC AS REINFORCEMENT IN CONCRETE COMPRESSION ELEMENTS*

AUTHORS: MARÍA DE LOS ÁNGELES ORTIZ FORERO** LAURA NATALIA PICÓN CARRASCAL**

KEY WORDS: NATURAL FIBERS, FIQUE, REINFORCEMENT, SURFACE TREATMENT, COMPOSITE, ADHESION, POLYMERIC MATRIX.

DESCRIPTION: During the last years, the search for sustainable development in infrastructures has encouraged the interest in the use of natural fibers in composites with polymeric matrix used as external reinforcement of compression elements. This paper will focus on fique fibers due to their multiple advantages such as biodegradability, low density, stiffness, low cost, readily available and strength. Furthermore, a bibliographic review of the research carried out during the last ten years focused on the use of fique fibers as reinforcement of polymeric matrices will be presented. With this in mind, the chemical surface treatments that showed greater efficiency in the improvement of maximum tensile strength, modulus of elasticity and ultimate elongation were selected. In the second place, the surface treatments applied to the composite were analyzed in order to obtain the optimum conditions of adhesion between a polymeric matrix and the reinforcing fique fibers, finally, the influence of the shape and thickness parameters in the response of the composite was studied. Showing that, in spite of the advantages of natural fibers and their mechanical contribution, the information related to the physical processes is limited, as well as the tests to determine the ideal geometry of the composite.

* Degree work

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: José Miguel Benjumea Royero, Dr. in Civil and Environmental Engineering.

INTRODUCCIÓN

Diariamente se suman esfuerzos en el desarrollo de soluciones innovadoras para evitar las fallas más comunes en elementos estructurales, entre estas, la falla por compresión que afecta el comportamiento de columnas de concreto reforzado y se manifiesta por medio de grietas o fisuras que surgen como respuesta a incremento de cargas, diseños estructurales ineficientes o errores en los procesos de construcción³.

Con el objeto de aumentar la capacidad de carga y ductilidad de los elementos a compresión, se ha implementado como solución, el encamisado con láminas de polímeros reforzados con fibras FRP (Fiber Reinforced Polymer)⁴. Estos polímeros están constituidos principalmente por fibras de carbono, vidrio o aramida, las cuales han demostrado un buen desempeño mecánico, incluso superior al acero⁵. Sin embargo, los FRP presentan desventajas relacionadas con los costos de producción e impacto ambiental⁶. A razón de ello, en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU, con los cuales se busca disminuir la huella energética mediante el desarrollo de estructuras resilientes, sostenibles y fabricadas a partir de materias primas locales, han surgido nuevas alternativas como lo es el refuerzo con fibras naturales, siendo la fibra de fique el enfoque de este documento⁷.

³ DE DIEGO VILLALÓN, Ana, ARTEAGA IRIARTE, Angel y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime. "Modelos de cálculo del hormigón confinado con FRP: estudio comparativo," *Comun. VI Congr. Int. Estructuras. ACHE 2014.*, pp. 157–158, 2014.

⁴ ROUGIER, Viviana Carolina. "CONFINAMIENTO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN CON MATERIALES COMPUESTOS," Universidad Nacional de Tucumán, 2003.

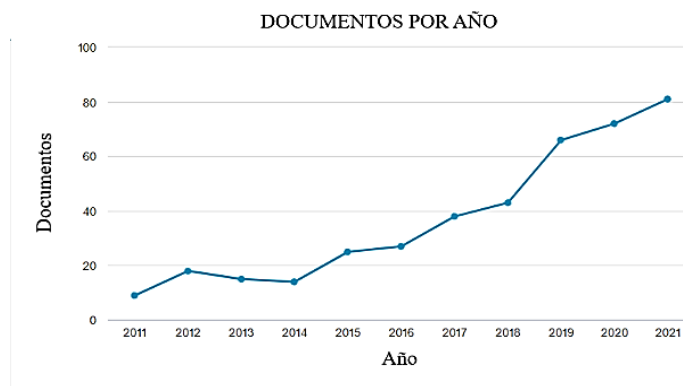
⁵ DE DIEGO VILLALÓN. Op. cit., p. 3.

⁶ VELÁSQUEZ RESTREPO, Sandra, PELAÉZ ARROYAVE G y GIRALDO VÁSQUEZ, Diego. "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," *Inf. Técnico*, vol. 80, no. 1, p. 77.

⁷ ONU. Objetivos de desarrollo sostenible. [En línea]. (Recuperado en 15 septiembre 2021). Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

Esta revisión bibliográfica tiene como objetivo presentar el estado actual de las investigaciones y tendencias sobre las fibras de fique inmersas en matrices poliméricas y su potencial uso como refuerzo externo de elementos sometidos a compresión. Con tal propósito, se inició la búsqueda y lectura de documentos (libros, artículos académicos, científicos, tesis de maestría y doctorado y revistas enfocadas en materiales alternativos de construcción) en bases de datos electrónicas como Scopus, Science Direct, Web of Science, EBSCO y Google Scholar, limitando la investigación a la última década exceptuando aquellos artículos con datos relevantes que no han sido estudiados en ese periodo de tiempo. La búsqueda inicial realizada en Scopus se representa en la Figura 1, donde se observa el número de publicaciones por año de artículos con co-ocurrencia de las siguientes palabras clave (1) fibras, o (2) refuerzo, o (3) fique, o (4) natural, y (5) matriz epóxica, o (6) resina, y (7) composite, y (8) propiedades mecánicas, o (9) comportamiento, y (10) fique. La metodología planteada para el curso del presente proyecto consistió en seis etapas descritas a continuación.

Figura 1. Documentos por año de publicación.



Fuente: Scopus.

En la primera etapa, se realizó una recopilación de documentos en la cual se obtuvo 579 resultados, que fueron filtrados y seleccionados por palabras clave y tipos de ensayo acordes a los objetivos del presente estudio, lo cual arrojó 220 artículos. En este análisis inicial se confirmó el creciente interés por el uso de fibras naturales embebidas en materiales compuestos y su uso como refuerzo, como se representa en la Figura 1, donde se observa el número de publicaciones por año que viene en aumento desde el 2015.

En la etapa dos, se realizó un nuevo filtro mediante la lectura de la introducción y conclusiones y se seleccionaron aquellos que abordaran los temas de interés. Se extrajeron sólo 70 documentos que son el fundamento de este proyecto.

A continuación, se realizó un primer análisis de las propiedades mecánicas a tensión de la fibra de fique (resistencia máxima, elongación última y módulo de elasticidad) con el objeto de establecer su posible aporte en términos de resistencia y ductilidad a los miembros estructurales en concreto solicitados a compresión. Posteriormente, se determinaron los tratamientos químicos superficiales que mostraban mayor eficiencia en la mejora de la respuesta mecánica del material a tensión, haciendo énfasis en las condiciones óptimas para realizar cada uno (ej. concentración de la solución, tiempo de exposición, temperatura). Asimismo, se examinó la influencia de los tratamientos superficiales en la compatibilidad y adherencia entre las fibras de fique y el polímero usado como matriz, teniendo en cuenta el tipo de tratamiento y los especímenes ensayados. Finalmente, se comparó el comportamiento a tensión del material compuesto bajo distintas configuraciones de forma y espesor, de tal manera que fue posible identificar la importancia de este tipo de fibras vegetales y su uso como refuerzo.

Este documento proporciona una revisión bibliográfica exhaustiva de más de 60 artículos y permite a los lectores identificar lagunas o falencias en la literatura existente que podrían ser investigadas en futuros trabajos. Cabe resaltar que las fibras objeto de investigación, cuyo comportamiento se encuentra descrito a lo largo del documento, no corresponden únicamente a fibras de fique. Esto debido al reciente interés en tratarlas con procesos no convencionales. Teniendo en cuenta la similitud en componentes de las fibras vegetales, se obtuvieron resultados de fibras como sisal, cáñamo, henequén, entre otras, esperando un comportamiento similar de las fibras de fique, bajo las mismas condiciones de ensayo. A esta sección introductoria le sigue una descripción de las fibras de fique y su composición química, características físicas y químicas y propiedades mecánicas. A continuación, se presenta una visión de los tratamientos superficiales aplicados a estas fibras, los efectos de las fibras de fique tratadas en las propiedades mecánicas a tensión, procesos físicos aplicados en el compuesto, influencia de los tratamientos superficiales en la adhesión entre la matriz polimérica y las fibras y el efecto de los parámetros de forma y espesor en la respuesta a compresión del material compuesto. Las principales conclusiones se resumen al final de este documento.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar las características mecánicas deseables de un material compuesto tubular, reforzado con tejidos de fibra de fique tratado químicamente, que será empleado como refuerzo externo de elementos de concreto a compresión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los tratamientos químicos superficiales más adecuados para mejorar las propiedades mecánicas a tensión del tejido de fibra de fique.
- Reconocer los tratamientos superficiales aplicados al compuesto con el fin de obtener las condiciones óptimas de adherencia entre una matriz polimérica y las fibras de fique de refuerzo.
- Determinar la influencia de los parámetros de forma y espesor del material compuesto en la respuesta a compresión de los elementos de concreto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 FIQUE

El fique es el nombre genérico con el cual se conocen las plantas pertenecientes al género *furcraea*, cuyo origen se remonta a los trópicos de América y su cultivo prevalece en las regiones andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador a causa de sus condiciones climáticas⁸. Esta fibra, también conocida como cabuya, presenta ventajas relacionadas con su origen. Al ser extraída a partir de las hojas se considera una fibra vegetal dura, cuyos hilos están dispuestos en forma de haces superpuestos y adquieren resistencia debido a su grado de lignificación y concentración de componentes⁹.

Las fibras son obtenidas a partir de un proceso de extracción en el cual se separa la corteza de las hojas, dejando las fibras descubiertas para continuar con el lavado y escarmenado. En este último paso se remueven impurezas y se separan los hilos para usos posteriores¹⁰ como se observa en la Figura 2. Debido a su fácil obtención y bajo costo, el uso de la fibra de fique se ha intensificado en diferentes campos de acción que van desde la industria geotextil hasta la construcción¹¹.

⁸ GÓMEZ SUÁREZ, Sergio, RAMÓN VALENCIA, Bladimir y SANTOS JAIMES, Alfonso, "Experimental dynamic characterization of composites reinforced with natural fiber of fique | Caracterización dinámica vibratoria experimental de compuestos reforzados con fibra natural de fique," *Ingeniare*, vol. 28, no. 2, pp. 304–314, 2020.

⁹ VIDAL, Gladys y HORMAZÁBAL, Sujey. LAS FIBRAS VEGETALES Y SUS APLICACIONES. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2016.

¹⁰ PEREIRA, Artur, *et al.* "Izod impact tests in polyester matrix composites reinforced with fique fabric" *The Minerals, Metals & Materials Series*. pp. 365–372. 2017.

¹¹ VIDAL. Op. cit., p. 3.

Figura 2. Planta y fibra de fique.



Fuente: PEREIRA, Artur, *et al.* "Izod impact tests in polyester matrix composites reinforced with fique fabric" *The Minerals, Metals & Materials Series*. 2017.

De acuerdo con Muñoz Vélez et al.¹² el fique es la fibra natural de mayor producción en Colombia, con presencia de cultivos en más de 17000 hectáreas distribuidas en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander y Antioquia, que sumados producen el 98% de la fibra del país^{13 14}. Puesto que el impacto de los tratamientos superficiales y la respuesta mecánica del composite dependerán de las propiedades de la fibra de fique, a continuación, se describe la composición química, características físicas y mecánicas del fique. Asimismo, los tratamientos a los que se suelen someter las fibras para cumplir requerimientos de alta exigencia estructural y sus efectos se detallan en la siguiente sección.

¹² MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. "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, pp. 60-70. 2014.

¹³ *Ibíd.*, p. 9.

¹⁴ DELVASTO, S., *et al.* "An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets". *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 187–192, Feb. 2010.

2.1.1 Composición química. Las fibras naturales pueden considerarse un material compuesto formado principalmente por fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina y en menor proporción otros constituyentes como la hemicelulosa, cenizas e impurezas^{15 16}. En la Tabla 1 se presentan valores típicos de estos componentes en la fibra de fique, según lo reportado por diferentes autores. A lo largo de este artículo, las marcas "--" indican que los datos no fueron reportados en el estudio de la referencia.

Como materia prima de las fibras naturales se encuentra la celulosa, cuya composición porcentual oscila entre 57% y aproximadamente 74% (Tabla 1). Este polímero se encuentra formado por múltiples moléculas de anhidro-d-glucosa, las cuales contienen tres grupos hidroxilo (OH) de alcohol. Estos grupos se destacan por su capacidad para formar enlaces de hidrógeno y reaccionar con los grupos OH presentes en el aire, otorgándole a las fibras su carácter hidrófilo¹⁷. Dicha afinidad por el agua genera incompatibilidad con las matrices poliméricas hidrofóbicas habituales (resinas epoxi, poliéster, poliamida, entre otras), afecta la unión entre las fases (matriz-refuerzo) y debilita la transferencia de esfuerzos, así como el desempeño mecánico del compuesto¹⁸.

Como segundo componente principal, se encuentra la hemicelulosa, que es un conjunto de polisacáridos presente en todas las capas de la pared celular de las plantas. Esta se encarga de formar una matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa, tiene un comportamiento hidrófilo, es soluble en álcalis y fácilmente

¹⁵ AKIL, H. M., *et al.* "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Materials and Design*, vol. 32, no. 8–9. Elsevier, pp. 4107–4121, Sep. 01, 2011.

¹⁶ SUÁREZ CASTAÑEDA, Jose L., *et al.* "Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica," *Rev. Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 57, Jan. 2017.

¹⁷ DE MELO, Renato, *et al.* "Composites of Plasticized Polyamide 66 and Chemically Modified Vegetal Fibers," *Polym. - Plast. Technol. Eng.*, vol. 56, no. 15, pp. 1619–1631, 2017.

¹⁸ LUNA, P., *et al.* "Dry etching plasma applied to fique fibers: Influence on their mechanical properties and surface appearance," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 200, pp. 141–147.

hidrolizable en ácido ^{19 20}. Su presencia en la estructura de las fibras puede alcanzar el 29% (Tabla 1).

Tabla 1. Componentes de la fibra de fique.

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

Fuente: Elaboración propia

¹⁹ DE MELO. Op. cit., p. 10.

²⁰ FERNANDES PEREIRA, Paulo H., et al., "Vegetal fibers in polymeric composites: A review," *Polimeros*, vol. 25, no. 1. Associacao Brasileira de Polimeros, pp. 9–22, Jan. 01, 2015.

²¹ CADENA PRODUCTIVA NACIONAL DEL FIQUE. "Guía ambiental del subsector fiquero" Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A, 2006. ISBN 958-97785-3-4.

²² MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

²³ LUNA, P., et al. "Mechanical behavior of natural fiber textile reinforced mortar sheets," in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2019, vol. 2.

²⁴ TORO, Fernando, et al. "Modeling a bending resistance modulus for a cementitious material compound based on properties in fresh state" *Rev. Ing. Constr.*, vol. 29, no. 1, pp. 115–127, 2014.

²⁵ MINA HERNANDEZ, José H., et al. "Effect of fique fibers in the behavior of a new biobased composite from renewable Mopa-Mopa Resin," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 7, pp. 1–15, 2020.

²⁶ SANKAR, Kaushik y KRIVEN, Waltraud. "Potassium geopolymer reinforced with alkali-treated fique," in *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2014, vol. 35, no. 8, pp. 61–78.

²⁷ JIMÉNEZ BOHÓRQUEZ, Jonny. "USO DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO (FIBRA DE FIQUE)," Universidad La Gran Colombia, 2011.

²⁸ GÓMEZ HOYOS, Catalina, et al. "Fique fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application," *Fibers Polym*, vol. 13, no. 5, pp. 632–640, May 2012.

²⁹ HERRERA ORTIZ, Julián. "DESARROLLO DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICION DE PRODUCTOS DE FIQUE PARA EL EMPLEO DE ESTRUCTURAS EN AMBIENTE AGRESIVO" (February," vol. 2507, pp. 1–9, 2020)

La lignina es el tercer constituyente de las fibras naturales. Esta consiste en un grupo de polímeros hidrocarbonados en forma de red, amorfos y de naturaleza hidrofóbica, encargados de brindar rigidez a la planta³⁰. Es insoluble en la mayoría de los disolventes y en promedio alcanza el 14,5% del contenido de las fibras (Tabla 1).

En menor proporción (<5%) se encuentran las impurezas (pectinas, ceras y extraíbles), las cuales retienen las moléculas de agua de la humedad de la atmósfera e impiden que los grupos hidroxilo reaccionen con la matriz, causando una reducción de la adhesión interfacial³¹. Finalmente está la pectina, un agente aglutinante que suele descomponerse tras el proceso de extracción y otorga flexibilidad a las plantas³².

Como se observa en la Figura 3, las paredes celulares de las plantas están formadas por polímeros basados en azúcares (ej., glucosa, xilosa, galactosa, entre otras) que se combinan con lignina y una mínima cantidad de extraíbles, proteínas, almidones e inorgánicos. Estos componentes se distribuyen a lo largo de la pared celular que está formada por una estructura compleja de capas. En primer lugar, se encuentra una pared primaria fina, formada durante el crecimiento celular que rodea la pared secundaria. Dicha pared está formada por tres capas y una de ellas (la intermedia) es la encargada de determinar las propiedades mecánicas de la fibra. Asimismo, la estructura, el ángulo micro fibrilar, los defectos y la composición química de las fibras son las variables que tienen mayor influencia en el comportamiento general de la misma³³.

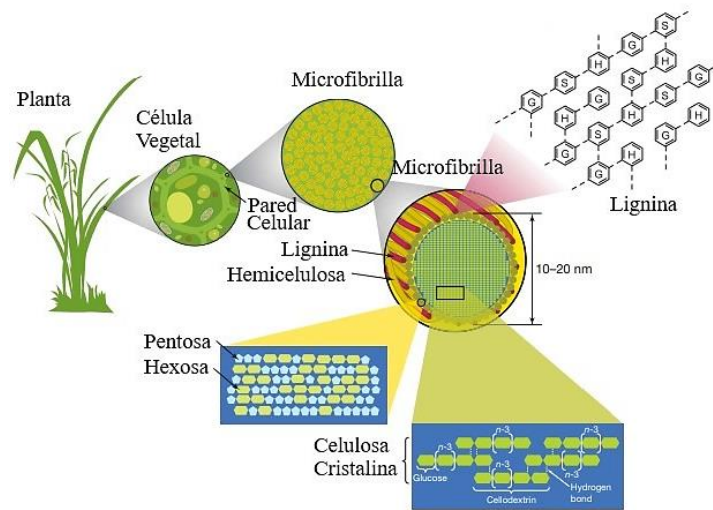
³⁰ ILOMAKI, Kirsti Maria. "Adhesion Between Natural Fibers and Thermosets," 2012.

³¹ *Ibíd.*, p. 12.

³² SALIT, Mohd S., *et al.*, *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites*. Springer International Publishing, 2015.

³³ FARUK, Omar, *et al.* "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11. Pergamon, pp. 1552–1596, Nov. 01, 2012.

Figura 3. Estructura de las fibras vegetales



Fuente: RUBIN, Edward M. "Genomics of cellulosic biofuels," *Nature*, vol. 454, no. 7206. Nature Publishing Group, pp. 841–845, Aug. 14, 2008.

2.1.2 Características físicas y químicas. Algunas ventajas por las cuales se ha intensificado el uso de fibras vegetales como refuerzo en compuestos de matriz polimérica son el bajo consumo de energía durante el proceso de fabricación, baja densidad, naturaleza no abrasiva, bajo coste, renovabilidad, biodegradabilidad, fácil disponibilidad y abundancia de cultivos. No obstante, para conseguir estas cualidades comparables a las fibras sintéticas, es necesaria una buena relación entre forma, tamaño, contenido cristalino, orientación y grosor de las paredes celulares.

Algunas de las características y propiedades físicas de las fibras de fique, determinadas por los ensayos realizados en diferentes estudios, se enumeran en la Tabla 2. El diámetro de la fibra de fique presenta variaciones importantes dentro del

mismo lote y en su longitud, siendo esto típico en las fibras naturales³⁴. Las desviaciones estándar relativamente altas reportadas para la resistencia máxima a tracción, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria última de la fibra de fique se asocian a los cambios en la geometría y sección transversal a lo largo de la misma³⁵.

Las fibras naturales cambian sus dimensiones con la variación de humedad, debido a procesos de absorción de agua en los cuales se produce una expansión y contracción de la fibra. Dicho proceso es -perjudicial -para -los compuestos debido a la separación de las fibras respecto de la matriz. El propósito de los tratamientos superficiales, explicados la Sec. 2, es contrarrestar esta problemática³⁶.

³⁴ DELVASTO. Op. cit., p. 9.

³⁵ MUÑOZ. Op. cit., p. 9

³⁶ DELVASTO. Op. cit., p. 9.

Tabla 2. Características de la fibra de fique

Diámetro (mm)	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Referencia
0,16 – 0,42	0,72	--	MUÑOZ ³⁷
0,30	0,723	7,08	TORO ³⁸
0,20 ± 0,04	--	--	GÓMEZ ³⁹
0,0816 ± 0,0231	--	7,71 ± 0,44	HERRERA ⁴⁰
0,21 ± 0,05	1,10	--	MUÑOZ ⁴¹
--	0,72 – 0,87	--	BARROS ⁴²
--	1,43	7,30	DELVASTO ⁴³
0,473	0,72	--	GONZÁLEZ ⁴⁴
0,16	--	--	OLIVEIRA ⁴⁵
0,24	1,47	--	HIDALGO ⁴⁶

Fuente: Elaboración propia.

³⁷ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

³⁸ TORO. Op. cit., p. 11.

³⁹ GÓMEZ. Op. cit., p. 11.

⁴⁰ HERRERA. Op. cit., p. 11.

⁴¹ MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. "Effect of content and surface modification of fique fibers on the properties of a low-density polyethylene (LDPE)-Al/fique composite," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 10, 2018.

⁴² BARROS, F.A., et al. "Numerical and experimental study of flexural behaviour in polymer composite materials reinforced with natural fique textiles," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1247, no. 1.

⁴³ DELVASTO, Silvio, PERDOMO, Fernando y MEJÍA, Ruby. "Ecolaminados de Pead-Fibras de Fiques.," *Ing. Y Compet.*, vol. 3, no. 1, pp. 43–49, May 2011.

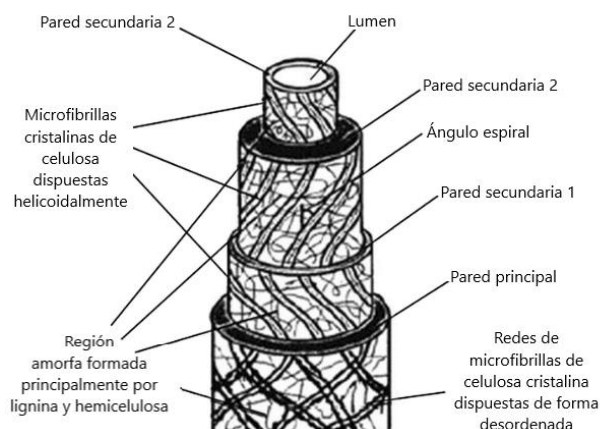
⁴⁴ GONZÁLEZ, Octavio, DÍAZ, German y QUIROGA, Jabid. "Mechanical response and damage of woven composite materials reinforced with fique," vol. 774 KEM. 2018.

⁴⁵ OLIVEIRA, Michelle. "Performance of epoxy matrix reinforced with fique fibers in pullout tests". *The Minerals, Metals & Materials Series*. pp. 729–734. 2019.

⁴⁶ HIDALGO, Miguel, MUÑOZ, Mario y QUINTANA, Karen. "Mechanical behavior of polyethylene aluminum composite reinforced with continuous agro fique fibers | Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 31, no. 2, pp. 187–194, 2011.

2.1.3 Propiedades mecánicas. La eficacia del refuerzo con fibras de fique y sus propiedades mecánicas están estrechamente relacionadas con la naturaleza de la celulosa y su cristalinidad. A lo largo de la fibra, las fibrillas de celulosa están alineadas, lo cual genera rigidez y una máxima resistencia a tracción y flexión⁴⁷. En términos generales, la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras aumentan con el incremento del contenido celulosico. Por otra parte, la rigidez es determinada por el ángulo micro fibrilar, que es el ángulo de la microfibrilla con respecto al eje de la fibra. Las fibras vegetales son más dúctiles al tener una orientación en espiral con respecto al eje de la fibra (Figura 4), mientras que, si están orientadas en paralelo al eje, las fibras serán rígidas, inflexibles y tendrán una alta resistencia a tracción⁴⁸.

Figura 4. Composición de la pared celular de una fibra natural.



Fuente: GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. "A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications," *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

⁴⁷ FARUK. Op. cit., p. 13.

⁴⁸ GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. "A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications," *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras naturales usualmente son caracterizadas mediante ensayos de tracción, esto debido a que la fibra es generalmente usada bajo esfuerzos axiales de tensión.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los rangos típicos de las propiedades mecánicas de la fibra de fique publicados por diferentes autores. A partir de la información contenida en la Tabla 4, se puede concluir que el módulo elástico de las fibras de fique es notablemente inferior que el del acero y el de las fibras de carbono, vidrio y aramida. En cuanto a la resistencia máxima, las fibras de fique muestran una variación entre 43 y 780 MPa, demostrando algunos resultados cercanos a la resistencia máxima del acero, sin embargo, los datos anteriores son considerablemente inferiores a los de las fibras de carbono, vidrio y aramida.

Finalmente, la deformación unitaria última de las fibras de fique tiene valores cercanos al acero y resultados mayores que las fibras de carbono, vidrio y aramida.

La resistencia a tracción de estos compuestos se ve afectada por la adhesión interfacial fibra-matriz. Por tal motivo, la modificación física y química de la fibra con la aplicación de técnicas y tratamientos que serán descritos en las siguientes secciones es necesaria para obtener el comportamiento deseado del composite⁴⁹.

⁴⁹ Ibíd., p. 16.

Tabla 3. Propiedades mecánicas a tensión de la fibra de fique.

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

Fuente: Elaboración propia

⁵⁰ SUÁREZ. Op. cit., p. 10.

⁵¹ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

⁵² TORO. Op. cit., p. 11.

⁵³ SANKAR. Op. cit., p. 11.

⁵⁴ BOHÓRQUEZ. Op. cit., p. 11.

⁵⁵ GÓMEZ. Op. cit., p. 11.

⁵⁶ HERRERA. Op. cit., p. 11.

⁵⁷ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

⁵⁸ BARROS. Op. cit., p. 15.

⁵⁹ GONZÁLEZ. Op. cit., p. 15.

⁶⁰ OLIVEIRA. Op. cit., p. 15.

⁶¹ HIDALGO. Op. cit., p. 15.

Tabla 4. Propiedades mecánicas a tensión del acero y FRP.

	Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación unitaria última (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)
Fique	5.4-25.5	5.7-9.8	43-780
Acero	200	10-12	420
Fibra de carbono	350-500	0.5-0.9	2500-3000
Fibra de vidrio	70	3-4.5	1900-3000
Fibra de aramida	115-130	2.5-3.5	3500-4000

Fuente: Elaboración propia

2.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

El refuerzo de materiales compuestos con fibras naturales es una opción idónea para la elaboración de composites debido a su bajo impacto ambiental y relación resistencia/peso⁶². No obstante, resulta necesario garantizar la compatibilidad (grado de adhesión) entre la fibra y la matriz, puesto que una apropiada interacción será determinante en las propiedades mecánicas y físicas finales⁶³. Algunos de los tratamientos superficiales más estudiados y comunes a los que se someten las fibras se describen a continuación.

⁶² ARDANUY, Mónica, CLARAMUNT, Joseph y TOLEDO, Romildo. "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Construction and Building Materials*, vol. 79. Elsevier Ltd, pp. 115–128, Mar. 15, 2015.

⁶³ ENCISO, B., *et al.* "Influencia del tratamiento superficial en la resistencia y adhesión entre fibras naturales de lino y una matriz termoplástica," *Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos*, vol. 2, no.3, pp. 40–43, 2017.

2.2.1 Tratamientos químicos

El principal factor que afecta las propiedades mecánicas de los composites es la incompatibilidad química entre las moléculas lignocelulósicas hidrofílicas de la fibra natural y las moléculas hidrofóbicas de la matriz⁶⁴. Una alternativa común es recurrir a las modificaciones químicas, desarrollando sobre el área superficial un revestimiento hidrófobo de un polímero compatible antes de ser mezclado con la matriz polimérica. Esto se realiza mediante la activación de grupos hidroxilo y la introducción de moléculas, que permiten optimizar la interfaz de las fibras, mejorar la compatibilidad fibra-matriz y la capacidad de dispersión del refuerzo^{65 66}.

En la Figura 5 se observa este principio de mejora de adhesión interfacial y con tal intención, se usa uno o varios tratamientos sobre las fibras:

Figura 5. Principio de mejora de adhesión interfacial fibra-matriz mediante tratamiento químico.



Fuente: PUITEL, Adrian C., *et al.* "Environmentally sound vegetal fiber-polymer matrix composites," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 45, no. 3–4, pp. 265–274, 2011.

⁶⁴ SEPE, Raffaele, *et al.* "Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 210–217, 2018.

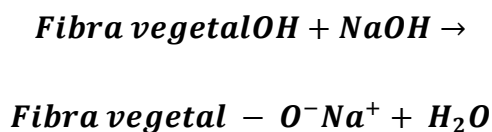
⁶⁵ SALIT. *Op. cit.*, p. 12.

⁶⁶ PUITEL, Adrian C., *et al.* "Environmentally sound vegetal fiber-polymer matrix composites," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 45, no. 3–4, pp. 265–274, 2011.

2.2.1.1 Alcalinización. La alcalinización o mercerización de fibras vegetales es uno de los tratamientos químicos más llamativos debido a su fácil manejo y bajo costo. La mercerización consiste en la inmersión de fibras de celulosa vegetal en soluciones acuosas de NaOH durante un tiempo determinado. La duración del tratamiento y concentración de la solución, son variables que intervienen en el porcentaje de eliminación de hemicelulosa, lignina, pectina, grasas, ceras y extraíbles de la pared celular de la fibra. Además, contribuyen en la despolimerización de la celulosa y en la exposición de cristales de corta longitud⁶⁷
⁶⁸.

Este tratamiento interrumpe los enlaces de hidrógeno en la estructura de la red provocando un aumento de la rugosidad y área de la superficie de la fibra como se muestra en la Figura 6. En el cuadro (a) de la imagen SEM (Microscopia Electrónica de Barrido), se observa la fibra no tratada, mientras que, en el cuadro (b) se puede apreciar una superficie rugosa y orificios del orden de 10 µm⁶⁹. Lo anterior se describe en la siguiente reacción química:

Esquema 1. Ionización del grupo hidroxilo al alcóxido.

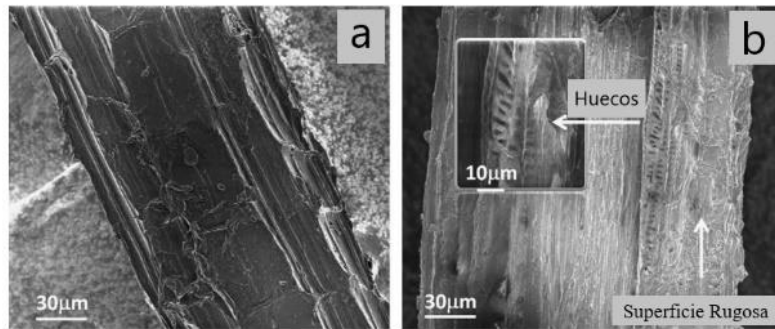


⁶⁷ PUITEL, Adrian, TOFANICA, Bogdan y GAVRILESCU, Dan. "Environmentally friendly vegetal fiber based materials," *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 651–659, 2012.

⁶⁸ PICKERING, K. L., EFENDY, M.G., y LE, T. M. "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83. Elsevier Ltd, pp. 98–112, Apr. 01, 2016.

⁶⁹ PUITEL. Op. cit., p. 21.

Figura 6. Imágenes SEM fibras tratadas con NaOH 18 p/v% (b) y no tratadas (a).



Fuente: GÓMEZ, Catalina, VÁZQUEZ, Amalia. “Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3120–3130, 2012.

Muñoz Vélez et al.⁷⁰ recalca la efectividad de este tratamiento en la mejora de la resistencia máxima a tensión y módulo de elasticidad, sin embargo, causa una aparente rigidización, la cual se atribuye a los cambios en la proporción fibra-matriz tras la eliminación de lignina y hemicelulosa. Por tal motivo, sugiere incorporar otros procesos químicos que contribuyan en la optimización de las propiedades mecánicas y condiciones de adherencia con la matriz^{71 72}.

2.2.1.2 Injerto de agentes de acoplamiento. Los agentes de acoplamiento son un aditivo que actúa entre las fibras y la matriz con el fin de promover la adhesión interfacial y estabilizar el composite⁷³. A su vez, genera un enlace químico estable,

⁷⁰ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

⁷¹ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

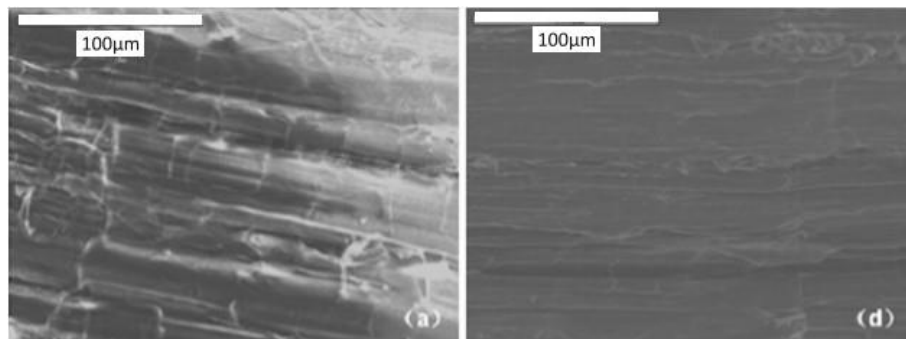
⁷² SUÁREZ, Jose L., RESTREPO, José W. y MERCADO, Fredy A. “In-and-out-of plane mechanical properties of hand lay-up vegetal fiber reinforced polyester resin composites,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 90, pp. 16–27, Dec. 2018.

⁷³ PUITEL. Op. cit., p. 21.

usualmente entre productos orgánicos e inorgánicos⁷⁴. Con frecuencia se utilizan en los tratamientos que serán descritos a continuación.

- **Silanización.** El tratamiento con silanos (SiH_4) consiste en el recubrimiento de una superficie con grupos alquilo reactivos que se unen químicamente para formar adhesivos y a su vez reduce el número de grupos hidroxilos de la celulosa en la interfaz, formando en su lugar una estructura reticulada⁷⁵. En presencia de humedad, el grupo alcoxi (Figura 7) hidrolizable da lugar a la formación de silanoles. El silanol reacciona con el grupo hidroxilo de la fibra, formando enlaces covalentes estables con la pared celular, los cuales se absorben en la superficie de la fibra, restringiendo su hinchamiento y disminuyendo sus propiedades mecánicas⁷⁶.

Figura 7. Imágenes SEM fibras tratadas con silanización (2%, 4% y 6%)



Fuente: GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. “A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

⁷⁴ PEREIRA, Paulo H., *et al.* “Vegetal fibers in polymeric composites: A review,” *Polimeros*, vol. 25, no. 1, pp. 9–22, 2015.

⁷⁵ *Ibíd.*, p. 23.

⁷⁶ DE MELO. *Op. cit.*, p. 10.

Cabe destacar que, para obtener resultados satisfactorios, este tratamiento suele realizarse tras un proceso de alcalinización o mercerización. Una vez alcalinizadas las fibras, se sumergen en una solución de agua-metanol, en la cual se dispersan los agentes de acoplamiento y se mantiene un pH cercano a 4.5, se agita la mezcla y se decanta tras un tiempo determinado. Finalmente se realiza el proceso de secado y curado a la temperatura seleccionada⁷⁷.

- **Tratamiento con peróxidos.** Este tratamiento consiste en un injerto de radicales libres iniciado por peróxidos para inducir el acoplamiento e injertar fibras celulósicas en distintas matrices⁷⁸. Durante el proceso de extrusión, el peróxido se descompone creando radicales libres que pueden reaccionar con las cadenas macromoleculares de la matriz (radicales ternarios) y con los constituyentes de la fibra, generando un efecto de reticulación⁷⁹.

Las fibras se suelen modificar con un porcentaje bajo de peróxido de dicumilo del 2,2% p/p para evitar un bloqueo en la etapa de conformado por reticulación; aun así, la proporción de peróxido es suficiente para aumentar la resistencia máxima, capacidad de deformación y transmisión de esfuerzos en los composites, debido a que este tipo de tratamiento bajo distintas condiciones de pH suele eliminar parte de la lignina, hemicelulosa y demás componentes extraíbles de las fibras vegetales (Figura 8)⁸⁰.

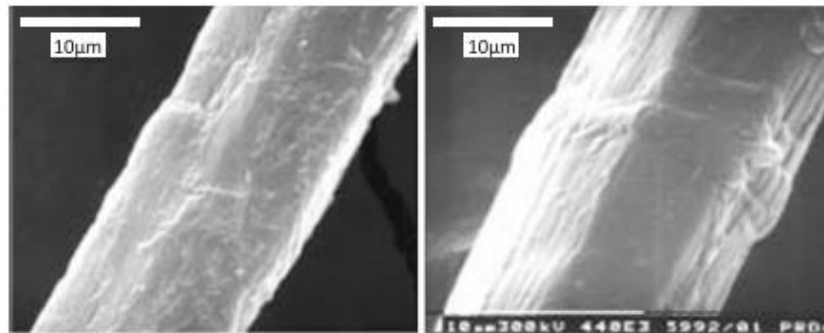
⁷⁷ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

⁷⁸ *Ibíd.*, p. 24.

⁷⁹ RODI, Erica G., *et al.* "Biocomposites based on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBHV) and *Miscanthus giganteus* fibers with improved fiber/matrix interface," *Polymers (Base)*., vol. 10, no. 5, 2018.

⁸⁰ PUITEL. Op. cit., p. 20.

Figura 8. Imágenes SEM fibras tratadas con peróxidos



Fuente: GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. “A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

- **Acoplamiento maleado.** Este tratamiento se usa con frecuencia en la creación de composites y resulta llamativo puesto que no sólo modifica la superficie de la fibra sino también la matriz polimérica, consiguiendo una unión interfacial más fuerte mejorando las propiedades mecánicas del compuesto⁸¹.

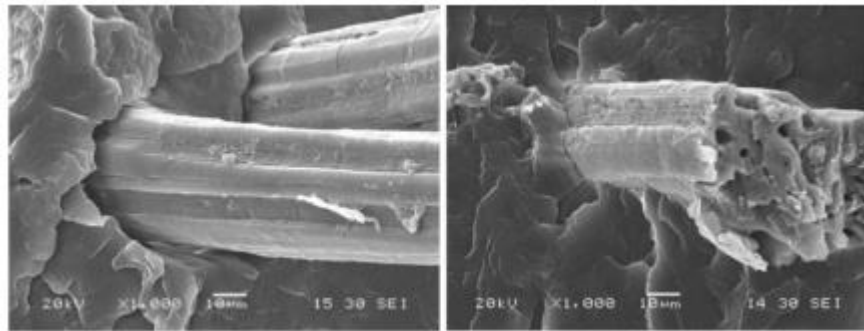
El anhídrido maleico se injerta en el mismo polímero usado como matriz para garantizar la compatibilidad con el agente de acoplamiento. Posteriormente se hace reaccionar la matriz modificada con la celulosa contenida en la fibra, mediante la formación de enlaces covalentes (Figura 9)⁸².

⁸¹ FARUK. Op. cit., p. 13.

⁸² PICKERING. Op. cit., p. 21.

De acuerdo con Franco-Marquès et al.⁸³, este reactivo ha demostrado mejoras notables en la resistencia a tracción, flexión y en la rigidez axial de fibras de fique, de igual modo en la resistencia al impacto.

Figura 9. Imágenes SEM fibras tratadas con anhídrido maleico.



Fuente: GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. “A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

2.2.1.3 Esterificación. Es el nombre genérico del proceso mediante el cual se sintetiza un éster. Un éster es un compuesto generado por la reacción química entre dos reactivos, un ácido y un alcohol⁸⁴.

⁸³ FRANCO-MARQUÉS, E., et al. “Influence of coupling agents in the preparation of polypropylene composites reinforced with recycled fibers,” *Chem. Eng. J.*, vol. 166, no. 3, pp. 1170–1178, Feb. 2011.

⁸⁴ PUITEL. Op. cit., p. 21.

El objeto de este tratamiento es recubrir los grupos hidroxilo de las fibras que causan su carácter hidrofílico, con moléculas de naturaleza hidrofóbica para disminuir la absorción de humedad y estabilizar las fibras⁸⁵.

La esterificación de las fibras vegetales puede realizarse mediante ácidos orgánicos como el anhídrido maleico, acético, ácido propiónico y acrílico. Este proceso es recomendado para incrementar la adhesión interfacial y disminuir la absorción de agua⁸⁶.

Según Salinas et al.⁸⁷, los resultados obtenidos mediante el uso de técnicas espectroscópicas (FTIR) y térmicas (TGA), revelaron la presencia de nuevos grupos carboxilo a lo largo de la fibra, así como la eliminación de hemicelulosa y un aumento en la estabilidad térmica, comprobando la eficacia del tratamiento de esterificación para materiales lignocelulósicos.

2.2.1.4 Pre-impregnación con polietileno. Usualmente, este proceso se lleva a cabo tras un tratamiento superficial de alcalinización y silanización para la modificación de las fibras. Este preparativo previo es requerido para facilitar la humectación e impregnación de las fibras con la matriz en el proceso de composición⁸⁸.

Las fibras se impregnan en monómero líquido y posteriormente estos monómeros se polimerizan con un catalizador, calor o radiación. La elevada viscosidad de la matriz dificulta la impregnación de las fibras, dando como resultado una baja

⁸⁵ FARUK. Op. cit., p. 13.

⁸⁶ PUITEL. Op. cit., p. 20.

⁸⁷ SALINAS, Omar, BENÍTEZ, Ricardo y MARTIN, Jaime. "Chemical Modification of Figue Fiber by Alkalization and Esterification Utilizing Figue Fiber Dust as Residue of the Fiquera Industry," *J. Nat. Fibers*, pp. 1–9, Nov. 2020.

⁸⁸ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

interacción mecánica con la matriz. Para esto se utilizan soluciones de monómeros de baja viscosidad, mejorando las propiedades interfaciales de los compuestos⁸⁹.

2.2.2 Tratamientos físicos

El objetivo de los tratamientos físicos es modificar las propiedades estructurales y superficiales de la fibra, con el fin de influir en la unión mecánica con la matriz. Los métodos físicos incluyen la descarga eléctrica (tratamientos corona y plasma) y la fibrilación superficial (tratamiento con enzimas)⁹⁰.

2.2.2.1 Hornificación. El proceso de hornificación es un pretratamiento al que se someten las fibras, con el fin de mejorar su afinidad para procesos de funcionalización posteriores. Usualmente se realiza tras procesos de humectación, comúnmente con hidróxido de sodio, para la activación de fibras de celulosa abriendo poros y mejorando la superficie interior de las fibras. Al iniciar el tratamiento se lleva a cabo un ciclo de secado que conduce a la reducción de la superficie interfibrilar. Después de la deshidratación de la muestra de celulosa se forman nuevos enlaces de hidrógeno que interconectan las fibras y disminuyen la superficie de sus espacios⁹¹.

La hornificación se realiza mediante prensado caliente de materiales fibrosos húmedos, causando una pérdida irreversible de su carácter hidrófilo tras el secado de celulosa, lo cual produce cambios en la estructura de la pared celular

⁸⁹ BOHÓRQUEZ. Op. cit., p. 11.

⁹⁰ SALIT. Op. cit., p. 12.

⁹¹ HRIBERNIK, Silvo, *et al.* "Tuning of cellulose fibres' structure and surface topography : Influence of swelling and various drying procedures," *Carbohydr. Polym.*, vol. 148, pp. 227–235, 2016.

(contracción y pérdida de poros) durante el proceso de secado/deshidratación-humectación⁹².

2.2.2.2 Tratamiento con plasma. Este tratamiento es un método físico que aprovecha las propiedades del plasma para estimular cambios en la superficie del material⁹³. El plasma es un gas ionizado con partículas positivas, negativas y neutras. Dependiendo del tipo y naturaleza de los gases utilizados, las partículas que son expuestas interactúan químicamente logrando una variedad de modificaciones de la superficie⁹⁴.

Según Sánchez et al.⁹⁵, el tipo de plasma utilizado (argón, metano, etc.) y la duración y condiciones específicas del tratamiento no interfieren en la rugosidad ni afectan la hidrofobicidad de las fibras. Por el contrario, es posible producir radicales libres y grupos reactivos, introducir reticulación externa y aumentar o disminuir la energía superficial⁹⁶.

2.2.2.3 Tratamiento Corona. El tratamiento corona es una técnica sugerente para la activación de la oxidación superficial. Su uso sobre fibras de celulosa y matrices hidrófobas es eficaz en el aumento de la compatibilidad entre las mismas⁹⁷.

⁹² LUO, X. L., et al. "Effects of wet-pressing-induced fiber hornification on enzymatic saccharification of lignocelluloses," pp. 1055–1062, 2011.

⁹³ PICKERING. Op. cit., p. 21.

⁹⁴ FARUK. Op. cit., p. 13.

⁹⁵ SÁNCHEZ, Martha, CAPOTE, G. y CARRILLO, J. "Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, 2019.

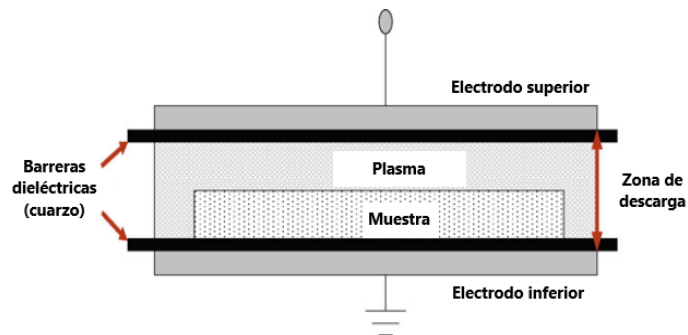
⁹⁶ FARUK. Op. cit., p. 13.

⁹⁷ SÁNCHEZ. Op. cit., p. 29.

Como se observa en la Figura 10, esta técnica utiliza plasma obtenido por la aplicación de un alto voltaje a las puntas de electrodos separadas por cuarzo a baja temperatura y presión atmosférica⁹⁸.

Con el tratamiento corona se obtienen modificaciones físicas y químicas de las fibras, incluyendo una mayor polaridad y rugosidad de la superficie de las fibras; sin embargo, se presentan dificultades para su aplicación debido a su superficie tridimensional⁹⁹. Por el aspecto de la fibra, Faruk et al.¹⁰⁰ concluyó que los periodos relativamente cortos son suficientes para mejorar la adhesión. Asimismo, observó que en tratamientos prolongados (mayores a 15 minutos) la superficie de la fibra no muestra cambios, aunque la degradación continúa y podría deteriorarla.

Figura 10. Principio de descarga del tratamiento corona.



Fuente: RAGOUBI, Mohamed, *et al.* "Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof," *Ind. Crops Prod.*, vol. 31, no. 2, pp. 344–349, Mar. 2010.

⁹⁸ PICKERING. Op. cit., p. 21.

⁹⁹ *Ibíd.*, p. 29.

¹⁰⁰ FARUK. Op. cit., p. 13.

2.2.2.4 Tratamiento con enzimas. El uso de tecnología enzimática para el procesamiento de fibras vegetales se ha vuelto muy llamativo debido a la alta especificidad de reacción de la enzima, la cual conduce a una transformación no destructiva en la superficie de la fibra¹⁰¹. Estos tratamientos exhiben múltiples ventajas a diferencia de los métodos químicos, por ejemplo, actúan en condiciones más suaves, disminuyen el consumo de agua y energía, producen aguas residuales menos tóxicas y tienen características biodegradables¹⁰².

Esta alternativa busca mejorar el proceso de enhebrado tradicional con un mayor control de los parámetros de procesamiento, preservando así la estructura natural de la fibra y generando propiedades mecánicas superiores a las tratadas químicamente sin disminuir la calidad¹⁰³. Con la eliminación del material ceroso y la cutícula de la superficie, esta se vuelve más lisa. No obstante, se produce fibrilación debido a la eliminación de los materiales aglutinantes de la superficie de las fibras tratadas¹⁰⁴.

¹⁰¹ *Ibíd.*, p. 30.

¹⁰² FOGORASI, M.S. y BARBU, I. "The potential of natural fibres for automotive sector - Review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 252, no. 1.

¹⁰³ *Ibíd.*, p. 31.

¹⁰⁴ FARUK. *Op. cit.*, p. 13.

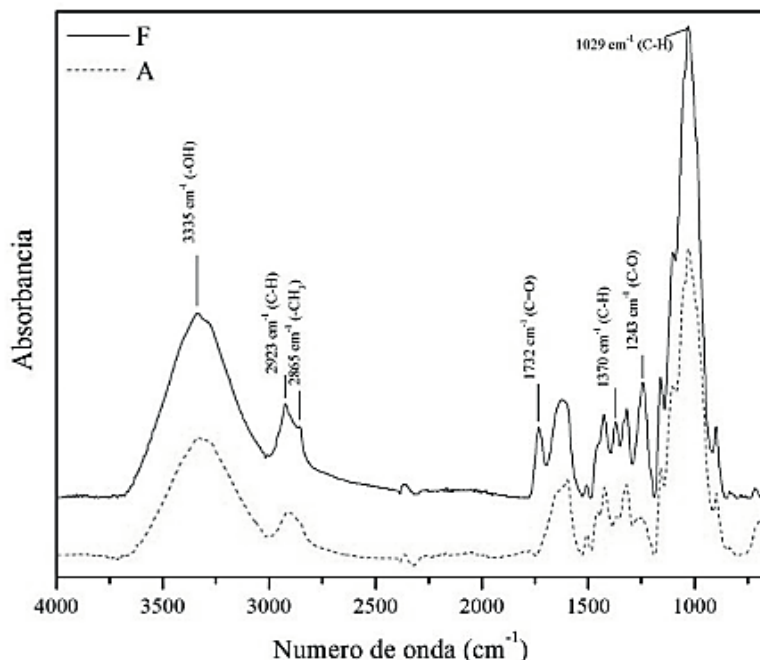
3. EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE

Con la intención de identificar los grupos funcionales presentes en las fibras tratadas y no tratadas, se realizan ensayos de Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), mediante el cual se observan bandas características asociadas a cada componente del refuerzo.

En la Figura 11 se observa el espectro infrarrojo de absorbancia de la muestra ensayada por Muñoz Velez et al.¹⁰⁵, donde la curva con línea continua evidencia las bandas asociadas a la fibra sin tratamiento y la curva punteada muestra el resultado de la alcalinización, la cual indica una disminución de la cantidad de grupos hidroxilo.

¹⁰⁵ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

Figura 11. Espectro FTIR de fibra sin tratamiento (F) vs alcalinización (A).



Fuente: MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. “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, pp. 60-70. 2014.

En la Tabla 5, se presenta un paralelo entre las tendencias obtenidas para la fibra de fique al ser alcalinizada. En dicha tabla, las letras “A” y “D” indican un aumento y disminución, respectivamente, de la concentración de los grupos funcionales, mientras que el símbolo “=” indica que la concentración permaneció igual después del tratamiento. Para el tratamiento con álcalis, los resultados indican que es posible la eliminación de hemicelulosa, mientras que la lignina no puede ser degradada fácilmente debido a la presencia de enlaces carbono-carbono y grupos aromáticos muy resistentes a ataques químicos.

Tabla 5. remoción de componentes evidenciada en ensayos FTIR para fibras tratadas con NaOH.

Frecuencia [cm-1]	Referencias			
	SUÁREZ ¹⁰⁶	GÓMEZ ¹⁰⁷	SEPE ¹⁰⁸	MUÑOZ ¹⁰⁹
Ácidos grasos				
3200-3600	D	--	--	--
1736-1740	D	D	--	--
1596	D	--	--	--
Hemicelulosas				
1654	D	--	--	--
1000-1500	D	D	D	--
1245-1259	D	--	--	--
2918	--	=	--	--
1735	--	D	D	D
Ligninas				
1384	D	--	--	D
2850	--	A	--	D
1234	--	--	--	D
Enlaces B-glicosídicos				
898	D	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

En el análisis realizado por Muñoz Velez et al.¹¹⁰, se sumergieron fibras de fique en una solución de hidróxido de sodio y posteriormente se injertaron con un agente de acoplamiento tipo silano y se pre impregnaron con una disolución de polietileno. Conforme a los resultados de la Tabla 6, para una longitud de ensayo de 6.35 mm,

¹⁰⁶ SUÁREZ. Op. cit., p. 10.

¹⁰⁷ GÓMEZ. Op. cit., p. 11.

¹⁰⁸ SEPE. Op. cit., p. 20.

¹⁰⁹ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

¹¹⁰ Ibíd., p. 32.

fue posible identificar en las fibras alcalinizadas una remoción de hemicelulosa y lignina lo cual causó un aumento en la resistencia máxima y módulo de elasticidad de 8.0% y 30.3%, respectivamente. En concordancia con Mina et al.¹¹¹, esta mejora se atribuye a la concentración de celulosa y variaciones en la orientación molecular de sus cadenas, generadas por el tratamiento. Por otra parte, los resultados de ensayos posteriores sugieren que no existe una mejora significativa en el comportamiento mecánico de las fibras, tras la incorporación de agentes acoplantes y pre-impregnación.

González-Estrada et al.¹¹² realizaron ensayos con hilos formados por aproximadamente 29 filamentos de fique, inmersos en una matriz epóxica. Los autores evaluaron tres tipos de especímenes unidireccional (formado por 2 o más hilos), textil 1 y textil 2, como se muestra en la Figura 12.

En este artículo, para el textil 1 y 2 los autores evidencian el desprendimiento entre las fibras de urdimbre, lo que indica una falta de tratamiento en la preparación de las fibras para la remoción de capas de hemicelulosa y lignina presentes en la superficie de estas. El material falló de manera uniforme y se observaron pocas evidencias de delaminación.

Muñoz-Vélez et al.¹¹³, ensayaron fibras de fique bidireccionales tratadas con hidróxido de sodio (alcalinización), para la eliminación superficial de hemicelulosa, lignina y sustancias externas que pudieron formarse en su producción. En la investigación de los efectos de la modificación superficial se encontró que la resistencia máxima a tracción y el módulo de elasticidad del material compuesto

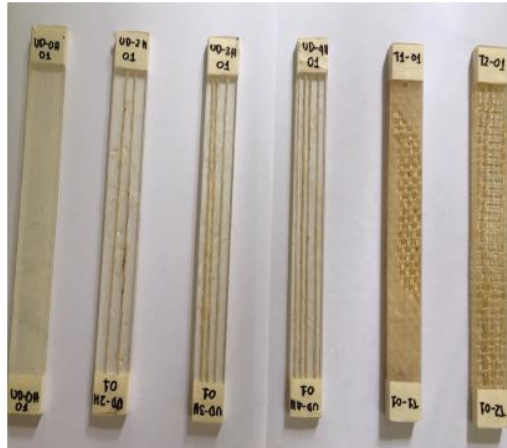
¹¹¹ MINA, Jose, GONZALEZ, Alex y MUÑOZ, Mario. "Micro- and macromechanical properties of a composite with a ternary PLA-PCL-TPS matrix reinforced with short fique fibers," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2020

¹¹² GONZÁLEZ. Op. cit., p. 15.

¹¹³ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

aumentaron, mientras que el porcentaje de elongación disminuyó, con respecto a la fibra sin tratamiento, tal como se observa en la Tabla 5.

Figura 12. Especímenes para los ensayos de tracción.



Fuente: MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. “Effect of content and surface modification of fique fibers on the properties of a low-density polyethylene (LDPE)-Al/fique composite,” *Polymers (Basel)*., vol. 10, no. 10, 2018.

Gañán & Mondragon¹¹⁴ analizaron los efectos en las propiedades físico-mecánicas de fibras de fique con diferentes tratamientos químicos superficiales como alcalinización e injerto de agentes acoplantes. Los autores afirman que la mercerización es un proceso irreversible que aumenta la cantidad de celulosa en la fibra al adherir las estructuras no celulósicas y en conjunto con el injerto de agentes acoplantes, eliminan impurezas presentes en la superficie de la fibra (pectinas y

¹¹⁴ GAÑÁN, Piedad y MONDRAGON, Iñaki. “Surface Modification of Fique Fibers. Effects on Their Physico-Mechanical Properties,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2002.

ceras) y sustancias pertenecientes a la hoja que no fueron extraídas en procesos anteriores.

De igual forma, la mercerización disminuyó algunos de los componentes de la fase no cristalina de la fibra y mejoró su humectación, debido a la reducción de su polaridad.

Tabla 6. Efecto de tratamientos químicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique A (*Alcalinización*), S (*Alcalinización +Silanización*), P (*Alcalinización+Silanización+Preimpregnación*)

	Concentración reactivos	Resistencia máxima a tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Elongación última (%)	Referencias
A	2 p/v %	+8,00%	+30,30%	-15,79%	MUÑOZ ¹¹⁵
	5 p/v %	+56,35%	+35,08%	+10,23%	GÓMEZ ¹¹⁶
	2 p/v %	+8,88%	+20,04%	-17,20%	MUÑOZ ¹¹⁷
S	1% Silano y 0,5% Peróxido de dicumilo	+10,75%	+32,35%	-18,48%	MUÑOZ ¹¹⁸
		+10,37%	+31,62%	-19,35%	MUÑOZ ¹¹⁹
P	1,5% xileno	+7,75%	+52,94%	-26,09%	MUÑOZ ¹²⁰
		+11,14%	+43,93%	-37,36%	MUÑOZ ¹²¹

Fuente: Elaboración propia

¹¹⁵ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

¹¹⁶ GÓMEZ. Op. cit., p. 11.

¹¹⁷ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

¹¹⁸ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

¹¹⁹ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

¹²⁰ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

¹²¹ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

4. PROCESOS FÍSICOS APLICADOS EN EL COMPUESTO

Los denominados “composites” o materiales compuestos están formados por dos o más constituyentes que actúan en conjunto para lograr prestaciones mecánicas que no pueden ser obtenidas por los componentes de manera individual¹²².

Las fases principales del composite son la matriz y el refuerzo. El primer elemento tiene como objetivo transmitir los esfuerzos a las fibras, las cuales aportan resistencia mecánica y rigidez, determinantes para desarrollar un módulo de elasticidad elevado y resistencia a tracción. Asimismo, existen otros componentes como cargas (partículas inertes y de refuerzo) y aditivos que se agregan con base en su uso posterior¹²³.

A partir de investigaciones realizadas por autores como Landa Aviles¹²⁴ y Rougier¹²⁵, se ha determinado que las características finales de los composites dependen en gran medida de los tratamientos realizados, fracción en volumen de los constituyentes, geometría, orientación del refuerzo y grado de dispersión.

Con el propósito de mejorar la adhesión de la interfaz fibra-matriz y compuesto-concreto, se llevan a cabo diferentes procesos físicos superficiales, siendo descritos a continuación algunos de estos.

¹²² AGUILAR, Amalia. “EFECTO DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL POR PLASMA DE ETILENO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS HENEQUEN Y EN SU RESISTENCIA INTERFACIAL AL CORTANTE CON POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD,” Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2014.

¹²³ LÓPEZ, Javier. “Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono,” Universitat Politècnica de València, 2013.

¹²⁴ LANDA, Guillermo. “Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante materiales compuestos,” 2002.

¹²⁵ ROUGIER Op. cit., p. 3.

4.1 Patrón. El material compuesto no es tratado superficialmente, para iniciar el proceso se realiza una limpieza aplicando un disolvente y una hora después se realiza la fabricación del composite¹²⁶.

4.2 Pulido. A fin de abrir el poro de la superficie para una mejor impregnación, es aplicado a la superficie del material compuesto un lijado leve en sentido de la dirección de la fibra y a 90°. Para la limpieza del composite se aplica disolvente antes y después del pulido. La fabricación del composite se realiza una hora después¹²⁷.

4.3 Resina. Se emplean dos tipos de resinas, acrílica líquida y de poliéster. La primera tiene baja capacidad adherente, por esta razón no es recomendada. La segunda, se aplica posterior al pulido con una espátula y un minuto después la fabricación del composite¹²⁸.

4.4 Arenado. Posterior al proceso de pulido y aplicación de resina líquida de poliéster, se espolvorea árido de sílice después de 12 horas de la fabricación del composite¹²⁹.

4.5 Texturizado. Existen diversos tipos, el primero se realiza con una sierra de disco haciendo ranuras en un perfil del compuesto en dirección perpendicular a las fibras que será pulido posteriormente en sentido de las fibras y a 90°.

¹²⁶ ALBIOL, José. "Estudio experimental de la adherencia entre laminados de GFRP y el hormigón," Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2015.

¹²⁷ *Ibíd.*, p. 38.

¹²⁸ *Ibíd.*, p. 38.

¹²⁹ *Ibíd.*, p. 38.

Para el segundo, se realiza el mismo procedimiento con diferencia en la dirección de las ranuras, ya que estas se hacen en la dirección de las fibras. El tercero, se realiza con las ranuras formando un ángulo de 45°. El cuarto, tiene un paso adicional al anterior tipo, que consiste en un recubrimiento con una capa de resina acrílica. En el último tipo de texturizado, se realizan perforaciones^{130 131}

4.6 Fijaciones mecánicas. Es posible desarrollar la unión de tejido de fibra de fique con un material compuesto mediante conectores de corte mecánico¹³². A continuación, se describen algunos procesos de este tipo:

4.6.1 Sin desplazamiento. Son uniones atornilladas en las cuales son requeridos pernos con sus correspondientes tuercas y arandelas para la introducción de estas en el material compuesto. Con espuma de polietileno y plastilina se evita el contacto del composite con las tuercas y arandelas¹³³.

4.6.2 Con desplazamiento permitido. Albiol Ibáñez¹³⁴ formuló un proceso en el que la unión atornillada se realizó con efecto pasador, realizando unas perforaciones de ranura alargada, con el fin de evitar la rotura por cortante. Se realiza el mismo procedimiento de la anterior técnica con pernos y sus respectivas arandelas y tuercas. El par de apriete es realizado sobre el material compuesto¹³⁵.

¹³⁰ Ibid., p. 38.

¹³¹ CALVET, Víctor. "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón," Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2014.

¹³² MIRMIRAN, Amir., *et al.* "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete," *J. Compos. Constr.*, vol. 2, no. 4, pp. 175–185, Nov. 1998.

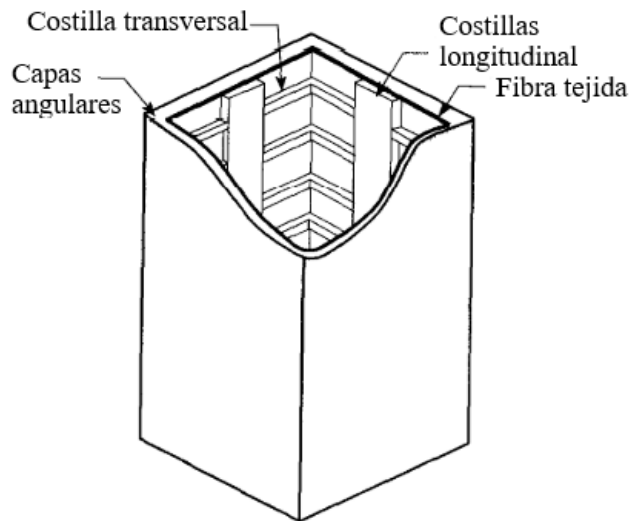
¹³³ ALBIOL. Op. cit., p. 38.

¹³⁴ Ibid., p. 40.

¹³⁵ Ibid., p. 40.

4.6.3 Nervaduras internas. Es posible proporcionar una unión entre el hormigón y el recubrimiento con fibras mediante nervaduras de conexión de corte en la superficie interior del tubo. Las nervaduras son fabricadas de pasta de poliéster (Figura 13). Estas se crean con el fin de mejorar la capacidad de carga del tubo distribuyendo las presiones de confinamiento eficazmente alrededor de este. Las costillas longitudinales mostradas en la Figura 13, actúan como largueros ayudando a resistir cargas axiales y laterales. Los paneles que se crean por las divisiones de las nervaduras y largueros aumentan la resistencia a compresión y pandeo y detienen el crecimiento de grietas [5].

Figura 13. Prototipo de fijación mecánica con nervaduras internas.



Fuente: MIRMIRAN, Amir., *et al.* "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete," *J. Compos. Constr.*, vol. 2, no. 4, pp. 175–185, Nov. 1998.

5. INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LA ADHESIÓN ENTRE LA MATRIZ POLIMÉRICA Y LAS FIBRAS

La composición química de las fibras es uno de los factores más importantes que afectan las características y el rendimiento de los materiales compuestos con fibras vegetales. Algunos investigadores han examinado la idoneidad, competitividad y capacidad de las fibras naturales integradas en matrices poliméricas. Así mismo, han estudiado el efecto de las modificaciones de la superficie de la fibra y procesos de fabricación para mejorar la compatibilidad con la matriz¹³⁶.

Muñoz-Vélez et al.¹³⁷, indicaron que se logró un aumento de la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad en la adhesión mecánica debido a la formación de enlaces covalentes con el agente de acoplamiento tipo silano entre los grupos hidroxilo de la fibra y el grupo órgano funcional de una matriz de polietileno de baja densidad. También se generó un aumento de la compatibilidad fibra-matriz debido al tratamiento de pre-impregnación de las fibras, disminuyendo la polaridad de estas para una mejor adaptación con las matrices termoplásticas apolares.

El tratamiento realizado con alcalinización, silanización y pre-impregnación obtuvo un mejor rendimiento que la fibra sin tratar, en cuanto a la resistencia máxima a tracción y módulo de elasticidad. Esto debido a que el tratamiento de pre-impregnación promueve la humectabilidad de las fibras con el polímero y aumenta la interdifusión de la fase polimérica, mejorando la interacciones fibra-matriz.

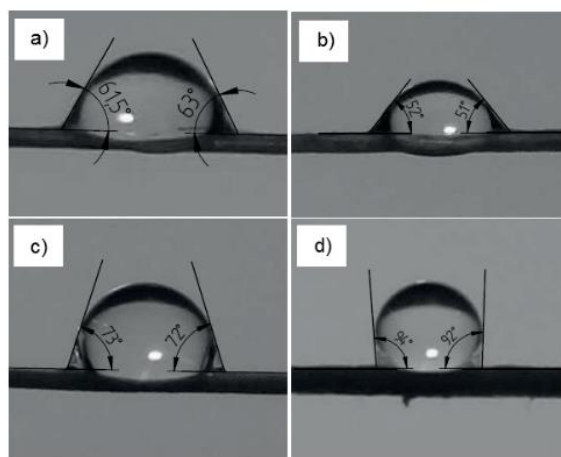
Con la intención de determinar el grado de hidrofiliidad de las fibras, los autores anteriormente mencionados midieron el ángulo de contacto entre los hilos y el agua como se observa en la Figura 14. El valor de 57,3° correspondiente a la fibra sin

¹³⁶ MOHAMMED, Layth. "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, pp. 1–15, 2015.

¹³⁷ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

tratar, demostró una polaridad y mojabilidad alta, características de materiales hidrofílicos. Por el contrario, las fibras tratadas con silano y polietileno mostraron una gran disminución en la polaridad de la fibra, logrando un ángulo de $86,7^\circ$, valor característico de superficies hidrófobas, compatibles con matrices de naturaleza apolar¹³⁸.

Figura 14. Ángulo de contacto entre el agua y la superficie de las fibras ensayadas.



Fuente: MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. "Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial". *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 12, no. 2, pp. 60-70. 2014.

Le Troëdec et al., Suárez Castañeda et al.^{139 140} y otros, sugieren que el tratamiento alcalino es el más efectivo para aumentar la fuerza de adhesión fibra-matriz, debido

¹³⁸ Ibíd., p. 42.

¹³⁹ SUÁREZ. Op. cit., p. 10.

¹⁴⁰ LE TROËDEC, M. et al., "Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 356, no. 1, pp. 303–310, Apr. 2011.

a la remoción de impurezas y aumento en la rugosidad de la superficie de los hilos (Figura 6).

Autores como Rodi et al.¹⁴¹, prepararon biocomposites con fibras de *Miscanthus giganteus* en presencia de peróxido de dicumilo para la optimización de la adhesión interfacial entre el refuerzo y la matriz y de esta forma mejorar las propiedades mecánicas del materia, como se evidencia en la Tabla 7. Los biocomposites se prepararon variando el contenido de fibras (5 y 20% en peso), longitud de fibras de 1mm y 45 μ mm y contenido de peróxido de dicumilo (0, 0.25 y 2.2% en peso). Los resultados mostraron una disminución del módulo de elasticidad y disminución de la masa molar, indicando degradación de la matriz. Fue comprobado que el contenido ideal de peróxido de dicumilo es de 2.2% en peso para lograr una buena adhesión de la fibra-matriz, con la posterior mejora de la resistencia final y el alargamiento a la rotura de los biocomposites.

Mishra et al.¹⁴², esterilizaron las fibras vegetales con anhídrido maleico y evaluaron el efecto de este tratamiento en las propiedades mecánicas de los compuestos de polímeros con fibras vegetales. Las proporciones de fibra-resina fueron de 60/40, 55/45, 50/50, 45/55, 40/60 (peso/peso). Los autores concluyeron que es posible conseguir una mejor calidad de los materiales compuestos con el tratamiento de anhídrido maleico, que actúa como compatibilizador, reduciendo la absorción de agua y vapor en gran medida. En cuanto a las propiedades mecánicas del composite, este tratamiento muestra un incremento en el módulo de elasticidad (Tabla 7), módulo de flexión, dureza y resistencia al impacto. Mishra et al.¹⁴³, esterilizaron las fibras vegetales con anhídrido maleico y evaluaron el efecto de este

¹⁴¹ RODI. Op. cit., p. 24.

¹⁴² MISHRA, S, NAIK, J.B, PATIL, Y.P. "The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 1729–1735, Jul. 2000.

¹⁴³ *Ibíd.*, p. 44.

tratamiento en las propiedades mecánicas de los compuestos de polímeros con fibras vegetales. Las proporciones de fibra-resina fueron de 60/40, 55/45, 50/50, 45/55, 40/60 (peso/peso). Los autores concluyeron que es posible conseguir una mejor calidad de los materiales compuestos con el tratamiento de anhídrido maleico, que actúa como compatibilizador, reduciendo la absorción de agua y vapor en gran medida. En cuanto a las propiedades mecánicas del composite, este tratamiento muestra un incremento en el módulo de elasticidad (Tabla 7), módulo de flexión, dureza y resistencia al impacto.

Aguilar Ríos¹⁴⁴ analizó el efecto del tratamiento con plasma en las fibras de Henequén, el autor afirma que la resistencia a tensión de las fibras depende principalmente de la exposición al plasma cuantificado mediante: el tiempo de exposición, interacción tiempo-caudal y frecuencia-caudal. También fue posible identificar que las fibras que tienen un tratamiento previo con hidróxido de sodio (alcalinización) se ven afectadas por las variables anteriormente mencionadas, debido a que la resistencia a tensión es inversamente proporcional a la frecuencia y tiempo de exposición y directamente proporcional al caudal de etileno.

¹⁴⁴ AGUILAR. Op. cit., p. 37.

Tabla 7. Efecto de los tratamientos químicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique.

	Concentración reactivos	Resistencia máxima a tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Elongación última (%)	Referencias
Peróxido de dicumilo	0,25-2,2 p/p%	+39,24%	+7,18%	+23,08%	RODI ¹⁴⁵
Acoplamiento maleado	0,5% Anhídrido maleico en tolueno	+62,75%	+4,67%	-48,49%	MISHRA ¹⁴⁶
Esterificación	Anhídrido maleico	-40,51%	+10,86%	-70,76%	KARABULUT ¹⁴⁷
	Ácido acrílico	-19,83%	+48,56%	-41,37%	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la resistencia a tensión de las fibras sin tratamiento previo son constantes cuando el flujo de etileno es bajo, por el contrario, cuando el flujo es alto la resistencia depende del tiempo de exposición. Mientras que, en las fibras mercerizadas con ambas tasas de flujo de etileno se observa una dependencia inversamente proporcional de la resistencia con el tiempo de exposición. En cuanto al módulo de elasticidad se observó que las fibras con y sin tratamiento alcalino reaccionan similarmente con respecto al efecto de las variables planteadas. La autora concluye que el tratamiento con plasma de las fibras, con y sin tratamiento alcalino, mejora la adherencia de las fibras con una matriz polimérica.

¹⁴⁵ RODI. Op. cit., p. 24.

¹⁴⁶ MISHRA. Op. cit., p. 44.

¹⁴⁷ KARABULUT, Narin, AKTAS, Mehmet, BALCIOGLU, Ersen. "Surface Modification Effects on the Mechanical Properties of Woven Jute Fabric Reinforced Laminated Composites," *J. Nat. Fibers*, vol. 16, no. 5, pp. 629–643, 2019.

Pizzi et al.¹⁴⁸ afirman que el tratamiento corona produce una superficie más rugosa al levantar capas superficiales de la misma, y el agarre mecánico del sustrato por la resina y la superficie del sustrato tendrían una mejora significativa con dicho tratamiento. Los resultados de este estudio indican que la máxima rotura y el módulo de elasticidad del composite en flexión y tensión no se producen con el mismo tiempo de exposición del tratamiento corona. La resistencia a la rotura por tracción obtiene su máximo a los 5 minutos del tratamiento y pasado ese tiempo disminuye rápidamente. En el trabajo se concluyó que los periodos relativamente cortos de tratamiento corona son suficientes para mejorar la adhesión a las fibras con la matriz y a su vez, se puede presentar la degradación de las fibras con la exposición a este tratamiento, del mismo modo se afirma que la apertura de la superficie de la fibra, después de 15 minutos, no mejora más.

En la investigación realizada por Ferreira et al.¹⁴⁹, concluyen que la resistencia a tracción de las fibras de sisal aumenta con los tratamientos de hornificación, y atribuyen este resultado a el cambio en la cristalinidad de la celulosa y la creación de enlaces entre diferentes cadenas poliméricas presentes en las microfibrillas. El número de ciclos es un factor para considerar, debido a que la excesiva repetición de los ciclos promueve la disminución de la resistencia a tracción. Los autores afirman que con el tratamiento se alcanzó una mayor unión fibra-matriz, cuyos resultados obtenidos con este tratamiento se presentan en la Tabla 8.

En el proceso de preparación del material compuesto, se aplicaron algunos de los procesos físicos mencionados anteriormente (pulido, arenado, texturizado, entre otros). Calvet Rodríguez¹⁵⁰ dedujo que cualquier longitud de adherencia sería válida para estudiar la relación de adherencia/deslizamiento en la interfaz matriz-refuerzo.

¹⁴⁸ PIZZI, A, et al., "High resin content natural matrix–natural fibre biocomposites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 30, no. 2, pp. 235–240, Sep. 2009,.

¹⁴⁹ FERREIRA, Saulo, et al., *Effect of natural fiber hornification on the fiber matrix interface in cement based composite systems*, vol. 668. 2016.

¹⁵⁰ CALVET. Op. cit., p. 39.

El uso de resina implicó una tensión de adherencia elevada (8 MPa) con deslizamientos inferiores a 0.5mm bajo ensayos de tracción, no obstante, se presentaron roturas frágiles.

Con el tratamiento de arenado, el composite mantuvo un buen comportamiento, duplicando la tensión de adherencia con respecto al patrón inicial, y el resultado fue independiente de la resistencia del composite y longitud de adherencia, de igual forma se evidenció un modo de fallo ideal por deslizamiento que confiere ductilidad al sistema, obtenido tras un ensayo pull-out. A su vez, el texturizado confirió un comportamiento similar al arenado y mejoró el fallo en un 10%. Las combinaciones de procesos físicos incrementaron en un 40% la tensión adherente fibra-matriz, sin embargo, presentaron una rotura frágil^{151 152}

En lo que respecta a las fijaciones mecánicas, aquellas que permiten el desplazamiento de los tornillos evitan su rotura por cortante y dotan la estructura de un modo de fallo dúctil. Por otro lado, el par de apriete sobre el material contribuye en un leve aumento de la capacidad de adherencia. asimismo, el postensado de las fijaciones logra que el composite confine activamente el refuerzo y de esta forma, se tripliquen las tensiones de adherencia.

¹⁵¹ ALBIOL. Op. cit., p. 38.

¹⁵² CALVET. Op. cit., p. 39.

Tabla 8. Efecto de los tratamientos físicos superficiales en las propiedades mecánicas de la fibra de fique.

	Parámetros del ensayo	Resistencia máxima a tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Elongación última (%)	Referencias
Hornificación	80°C por 16h	+5,15%	+66,67%	-12,70%	FERREIRA ¹⁵³
Tratamiento con plasma	60 s	-8,13%	+4,17%	--	AGUILAR ¹⁵⁴
	1000s	-9,89%	--	--	
Tratamiento corona	10 min	+32,17%	-4,05%	+12,60%	PIZZI ¹⁵⁵
		+66,80%	--	--	

Fuente: Elaboración propia

¹⁵³ FERREIRA. Op. cit., p. 46.

¹⁵⁴ AHUILAR. Op. cit., p. 37.

¹⁵⁵ PIZZI. Op. cit., p. 46.

6. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE FORMA Y ESPESOR EN LA RESPUESTA A COMPRESIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Con la intención de caracterizar los parámetros geométricos de las fibras, autores como Calvet Rodríguez¹⁵⁶, Ballesteros et al.¹⁵⁷, Mina et al.¹⁵⁸, Gómez et al.¹⁵⁹ y Gómez Hoyos et al.¹⁶⁰ realizaron cortes en las fibras previamente embebidas en resina para obtener su sección transversal y observarla mediante fotografías aumentadas por un microscopio óptico (Figura 6). Con la medición de áreas de un grupo de muestras, determinaron un diámetro equivalente, suponiendo una sección circular.

Suárez Castañeda et al.¹⁶¹ hallaron que el área y diámetro de la sección transversal alcalinizada disminuyeron en un 32,7% y 18,2% respectivamente, resultado que confirma la remoción de componentes. Las grandes desviaciones estándar son explicadas por Delvasto et al.¹⁶², quien ha reportado la variabilidad de diámetros en las fibras a lo largo de su longitud y en un mismo lote.

De acuerdo con Muñoz Velez et al.¹⁶³, la longitud del filamento influye en las propiedades a tensión de las fibras naturales. La resistencia máxima y deformación aumentan en cuanto disminuye la longitud del hilo, mientras que el módulo de elasticidad exhibe la tendencia contraria. Este comportamiento se relaciona con la presencia de irregularidades en la fibra, por lo tanto, una menor longitud, conduce

¹⁵⁶ CALVET. Op. cit., p. 39.

¹⁵⁷ BALLESTEROS, Eduardo. *et al.*, "Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 52–60, 2019.

¹⁵⁸ MINA, Op. cit., p. 34.

¹⁵⁹ GÓMEZ. Op. cit., p. 8.

¹⁶⁰ GÓMEZ. Op. cit., p. 11.

¹⁶¹ SUÁREZ. Op. cit., p. 10.

¹⁶² DELVASTO. Op. cit., p. 9.

¹⁶³ MUÑOZ. Op. cit., p. 9.

a menos probabilidades de encontrar defectos en el filamento ensayado y, por ende, propiedades mecánicas superiores.

En los estudios realizados por González-Estrada et al.¹⁶⁴, la tensión última y el módulo de elasticidad aumentan con el número de hilos que son agregados al tejido, mientras que la deformación disminuye, siendo esto coherente con la respuesta esperada del material. Con los refuerzos de tejidos de fibra se observó un aumento en el módulo de elasticidad y la tensión última, por otra parte, la capacidad de deformación disminuye. En lo que respecta al entramado, la urdimbre del tejido presenta mayor tensión mientras que la trama (hilos transversales) muestran una tensión inferior. Se concluyó que el material compuesto falla porque la tensión en la matriz supera la tensión última.

Muñoz-Vélez et al.¹⁶⁵ afirman que las interacciones mecánicas de anclaje predominantes en composites a partir de tejidos de fibras, aumentan debido a las altas relaciones de aspecto de las fibras y su disposición. En un análisis estadístico con 10%, 20% y 30% de fibra de fique, se estableció una dependencia entre el contenido de fibra y la modificación de la superficie y se pudo concluir que, con el aumento de la cantidad de fibras en el composite, la resistencia máxima y el módulo del material aumentan, independientemente de la técnica de modificación superficial utilizada en las fibras.

En el estudio realizado por Rodi et al.¹⁶⁶ Las fibras que fueron tamizadas con tamiz 45 μmm (la de menor tamaño) muestran la mayor mejora de las propiedades mecánicas, sin embargo, con estas fibras es expuesta una gran área interfacial. Lo anterior llevó a la elección de la mezcla con 20% en peso de fibras largas y 2,2% en peso de peróxido de dicumilo como la mejor alternativa en cuanto a mejores

¹⁶⁴ GONZÁLEZ. Op. cit., p. 34.

¹⁶⁵ MUÑOZ. Op. cit., p. 15.

¹⁶⁶ RODI. Op. cit., p. 24.

resultados mecánicos obtenidos; menor degradación de la matriz durante el proceso y ningún cambio significativo en el grado de cristalinidad.

Nain et al.¹⁶⁷ en su estudio ensayó cilindros con una envoltura de 1, 2 y 3 capas de fibras de vidrio bajo compresión axial y concluyó que el aumento de la relación de confinamiento a medida que se agrega un mayor número de capas conduce a un aumento de la resistencia y deformación última.

De igual modo, Yan¹⁶⁸ evaluó el rendimiento de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados externamente con tejidos de fibras de lino para elementos de concreto (Figura 15), considerando espesores de 2, 4 y 6 capas del tejido. El autor concluyó que el material compuesto con tejido externo es adecuado para el refuerzo de estructuras de concreto y el mejor resultado se obtuvo con 6 capas de tejido, mejorando en un 134% la resistencia máxima. También afirma que el aumento de la resistencia última es directamente proporcional al aumento del número de capas de malla.

¹⁶⁷ NAIN, Monika, ABDULAZEEZ, Mohanad, EIGAWADY, Mohamed. "Behavior of high strength concrete – filled hybrid large – small rupture strains FRP tubes," *Eng. Struct.*, vol. 209, p. 110264, Apr. 2020.

¹⁶⁸ YAN, Libo. "Plain concrete cylinders and beams externally strengthened with natural flax fabric reinforced epoxy composites," *Mater. Struct.* 2015 496, vol. 49, no. 6, pp. 2083–2095, May 2015.

Figura 15. Cilindro de concreto reforzado externamente de fibras de lino.



Fuente: YAN, Libo. "Plain concrete cylinders and beams externally strengthened with natural flax fabric reinforced epoxy composites," *Mater. Struct.* 2015 496, vol. 49, no. 6, pp. 2083–2095, May 2015.

Finalmente, Ghalieh et al¹⁶⁹, utilizaron tejidos de cáñamo bidireccional. Las telas se solaparon a la mitad de su perímetro, posteriormente, los tejidos y las superficies de concreto fueron saturadas con epoxi, para facilitar la aplicación a mano en húmedo de los tejidos a la superficie de las columnas (Figura 16). Todas las muestras (1, 2 y 4 capas) se comprimieron axialmente hasta el fallo y mediante el análisis de los autores, se comprobaron diferentes parámetros que pueden afectar el comportamiento de la columna reforzada como lo son, el número de capas de confinamiento y la relación de esbeltez de la columna. La eficacia del confinamiento aumentó en un 9,1%, 13,3% y 21,7% para las muestras con 1 capa, 2 capas y 4 capas respectivamente. Tras el aumento de la expansión lateral por efecto de la compresión, el encamisado de cáñamo confinó el núcleo de concreto y a mayor cantidad de capas mejoró su rendimiento. Asimismo, encontró que el área bajo la

¹⁶⁹ GHALIEH, Lea, HELMI, George, MABSOUT, Mounir. "Concrete Columns Wrapped with Hemp Fiber Reinforced Polymer – An Experimental Study," *Procedia Eng.*, vol. 200, pp. 440–447, Jan. 2017.

curva carga-desplazamiento aumentó con el número de capas de confinamiento, dando lugar a un incremento de la ductilidad de la probeta de cáñamo confinada.

Figura 16. Preparación del espécimen reforzado con tejido de cáñamo.



Fuente: GHALIEH, Lea, HELMI, George, MABSOUT, Mounir. "Concrete Columns Wrapped with Hemp Fiber Reinforced Polymer – An Experimental Study," *Procedia Eng.*, vol. 200, pp. 440–447, Jan. 2017.

7. CONCLUSIONES

La aplicación de tratamientos superficiales sobre las fibras usadas como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica, es una técnica de reforzamiento prometedora para mejorar sus propiedades mecánicas y condiciones de adherencia, debido a su bajo costo, tiempos cortos de procedimiento y facilidad para implementarse a gran escala. En este trabajo se llevó a cabo una revisión del estado actual de las investigaciones y tendencias sobre las fibras de fique en su estado individual e inmersas en matrices poliméricas, hallando las siguientes contribuciones:

La aplicación de tratamientos superficiales sobre las fibras usadas como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica es una técnica de reforzamiento prometedora para mejorar sus propiedades mecánicas y condiciones de adherencia, debido a su bajo costo, tiempos cortos de procedimiento y facilidad para implementarse a gran escala. En este trabajo se llevó a cabo una revisión del estado actual de las investigaciones y tendencias sobre las fibras de fique en su estado individual e inmersas en matrices poliméricas, hallando las siguientes contribuciones:

- En perspectiva, se ha mostrado un mayor interés en el estudio de los cambios introducidos por el tratamiento alcalino, siendo este el que logra mejores prestaciones mecánicas del refuerzo. La revisión mostró que las fibras tratadas con una solución de NaOH al 5 p/v% aumentan en mayor medida la resistencia máxima a tensión y módulo de elasticidad, sin embargo, presentan una mayor desviación estándar, que puede ser corregida mediante el tiempo de inmersión en hidróxido de sodio. Cabe destacar que este proceso no requiere la aplicación de disolventes orgánicos y tiene múltiples ventajas como su bajo costo y simplicidad de la técnica.

- La adhesión interfacial del material compuesto está estrechamente relacionada con el tipo de tratamiento realizado sobre las fibras de fique, parámetros de forma y espesor y las características de la resina usada como matriz. De acuerdo con las imágenes SEM y ángulos de contacto determinados en los artículos de la revisión, se observó que la alcalinización no disminuye en gran proporción la polaridad de las fibras, por ende, resulta necesario el injerto de agentes de acoplamiento y el recubrimiento de los hilos con polietileno, para generar una mayor compatibilidad con la matriz polimérica.

- Se analizó una correlación entre los parámetros de forma de las fibras y las propiedades mecánicas del composite. Con el incremento de la cantidad de fibras de refuerzo, la resistencia máxima y el módulo de elasticidad aumentan debido a la mejora en la distribución de esfuerzos. No obstante, la presencia de irregularidades a lo largo de las fibras exige trabajar con filamentos de corta longitud. De acuerdo con Yan¹⁷⁰, Ghalieh et al.¹⁷¹ y Nain et al.¹⁷², los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales son óptimos para su uso como encamisado externo de elementos a compresión, debido a su efecto de confinamiento que aumenta la resistencia máxima, ductilidad y deformación última con el incremento de capas de tejidos de fibras.

- Es posible la aplicación de materiales compuestos con fibras de fique como refuerzo de elementos estructurales debido a sus prestaciones mecánicas comparables a las fibras sintéticas del mercado. No obstante, es necesario realizar futuras investigaciones sobre matrices poliméricas y posibles aditivos que contribuyan en el aumento del módulo de elasticidad del composite, siendo este el valor más desfavorable de los estudiados en este artículo.

¹⁷⁰ YAN. Op. cit., p. 50.

¹⁷¹ GHALIEH. Op. cit., p. 51.

¹⁷² NAIN. Op. cit., p. 49.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, Amalia. “EFECTO DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL POR PLASMA DE ETILENO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS HENEQUEN Y EN SU RESISTENCIA INTERFACIAL AL CORTANTE CON POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD,” Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2014.

AKIL, H. M., et al. “Kenaf fiber reinforced composites: A review,” *Materials and Design*, vol. 32, no. 8–9. Elsevier, pp. 4107–4121, Sep. 01, 2011.

ALBIOL, José. “Estudio experimental de la adherencia entre laminados de GFRP y el hormigón,” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2015.

ARDANUY, Mónica, CLARAMUNT, Joseph y TOLEDO, Romildo. “Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research,” *Construction and Building Materials*, vol. 79. Elsevier Ltd, pp. 115–128, Mar. 15, 2015.

BALLESTEROS, Eduardo. *et al.*, “Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 52–60, 2019.

BARROS, F.A., et al. “Numerical and experimental study of flexural behaviour in polymer composite materials reinforced with natural fique textiles,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1247, no. 1.

CADENA PRODUCTIVA NACIONAL DEL FIQUE. “Guía ambiental del subsector figuero” Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A, 2006. ISBN 958-97785-3-4.

CALVET, Víctor. “Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón,” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2014.

DE DIEGO VILLALÓN, Ana, ARTEAGA IRIARTE, Angel y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime. “Modelos de cálculo del hormigón confinado con FRP: estudio comparativo,” Comun. VI Congr. Int. Estructuras. ACHE 2014., pp. 157–158, 2014.

DE MELO, Renato, et al. “Composites of Plasticized Polyamide 66 and Chemically Modified Vegetal Fibers,” Polym. - Plast. Technol. Eng., vol. 56, no. 15, pp. 1619–1631, 2017.

DELVASTO, S., et al. “An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets”. Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 2, pp. 187–192, Feb. 2010.

DELVASTO, Silvio, PERDOMO, Fernando y MEJÍA, Ruby. “Ecolaminados de Pead-Fibras de Fiques.” Ing. Y Compet., vol. 3, no. 1, pp. 43–49, May 2011.

ENCISO, B., et al. “Influencia del tratamiento superficial en la resistencia y adhesión entre fibras naturales de lino y una matriz termoplástica,” Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos, vol. 2, no.3, pp. 40–43, 2017.

FARUK, Omar, et al. “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11. Pergamon, pp. 1552–1596, Nov. 01, 2012.

FERNANDES PEREIRA, Paulo H., et al., "Vegetal fibers in polymeric composites: A review," *Polimeros*, vol. 25, no. 1. Associacao Brasileira de Polimeros, pp. 9–22, Jan. 01, 2015.

FERREIRA, Saulo, et al., Effect of natural fiber hornification on the fiber matrix interface in cement based composite systems, vol. 668. 2016.

FOGORASI, M.S. y BARBU, I. "The potential of natural fibres for automotive sector - Review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 252, no. 1.

FRANCO-MARQUÉS, E., et al. "Influence of coupling agents in the preparation of polypropylene composites reinforced with recycled fibers," *Chem. Eng. J.*, vol. 166, no. 3, pp. 1170–1178, Feb. 2011.

GAÑÁN, Piedad y MONDRAGON, Iñaki. "Surface Modification of Fique Fibers. Effects on Their Physico-Mechanical Properties," Universidad Pontificia Bolivariana, 2002.

GHALIEH, Lea, HELMI, George, MABSOUT, Mounir. "Concrete Columns Wrapped with Hemp Fiber Reinforced Polymer – An Experimental Study," *Procedia Eng.*, vol. 200, pp. 440–447, Jan. 2017.

GHOLAMPOUR, Aliakbar y OZBAKKALOGLU, Togay. "A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications," *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 3. Springer New York LLC, pp. 829–892, Jan. 01, 2020.

GÓMEZ HOYOS, Catalina, et al. "Fique fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application," *Fibers Polym*, vol. 13, no. 5, pp. 632–640, May 2012.

GÓMEZ SUÁREZ, Sergio, RAMÓN VALENCIA, Bladimir y SANTOS JAIMES, Alfonso, "Experimental dynamic characterization of composites reinforced with natural fiber of fique | Caracterización dinámica vibratoria experimental de compuestos reforzados con fibra natural de fique," *Ingeniare*, vol. 28, no. 2, pp. 304–314, 2020.

GONZÁLEZ, Octavio, DÍAZ, German y QUIROGA, Jabid. "Mechanical response and damage of woven composite materials reinforced with fique, vol. 774 *KEM*. 2018.

HERRERA ORTIZ, Julián. "DESARROLLO DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICION DE PRODUCTOS DE FIQUE PARA EL EMPLEO DE ESTRUCTURAS EN AMBIENTE AGRESIVO" (February," vol. 2507, pp. 1–9, 2020).

HIDALGO, Miguel, MUÑOZ, Mario y QUINTANA, Karen. "Mechanical behavior of polyethylene aluminum composite reinforced with continuous agro fique fibers | Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 31, no. 2, pp. 187–194, 2011.

HRIBERNIK, Silvo, et al. "Tuning of cellulose fibres' structure and surface topography: Influence of swelling and various drying procedures," *Carbohydr. Polym.*, vol. 148, pp. 227–235, 2016.

ILOMAKI, Kirsti Maria. "Adhesion Between Natural Fibers and Thermosets," 2012.

JIMÉNEZ BOHÓRQUEZ, Jonny. "USO DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO (FIBRA DE FIQUE)," Universidad La Gran Colombia, 2011.

KARABULUT, Narin, AKTAS, Mehmet, BALCIOGLU, Ersen. "Surface Modification Effects on the Mechanical Properties of Woven Jute Fabric Reinforced Laminated Composites," J. Nat. Fibers, vol. 16, no. 5, pp. 629–643, 2019.

LANDA, Guillermo. "Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante materiales compuestos," 2002.

LE TROËDEC, M. et al., "Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres," J. Colloid Interface Sci., vol. 356, no. 1, pp. 303–310, Apr. 2011.

LÓPEZ, Javier. "Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono," Universitat Politècnica de València, 2013.

LUNA, P., et al. "Dry etching plasma applied to fique fibers: Influence on their mechanical properties and surface appearance," in Procedia Engineering, 2017, vol. 200, pp. 141–147.

LUNA, P., et al. "Mechanical behavior of natural fiber textile reinforced mortar sheets," in Sustainable Construction Materials and Technologies, 2019, vol. 2.

LUO, X. L., et al. "Effects of wet-pressing-induced fiber hornification on enzymatic saccharification of lignocelluloses," pp. 1055–1062, 2011.

MINA HERNANDEZ, José H., et al. "Effect of fique fibers in the behavior of a new biobased composite from renewable Mopa-Mopa Resin," Polymers (Basel)., vol. 12, no. 7, pp. 1–15, 2020.

MINA, Jose, GONZALEZ, Alex y MUÑOZ, Mario. "Micro- and macromechanical properties of a composite with a ternary PLA-PCL-TPS matrix reinforced with short fique fibers," *Polymers (Basel)*., vol. 12, no. 1, 2020.

MIRMIRAN, Amir., et al. "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete," *J. Compos. Constr.*, vol. 2, no. 4, pp. 175–185, Nov. 1998.

MISHRA, S, NAIK, J.B, PATIL, Y.P. "The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 1729–1735, Jul. 2000.

MOHAMMED, Layth. "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, pp. 1–15, 2015.

MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. "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, pp. 60-70. 2014.

MUÑOZ VÉLEZ, Mario, HIDALGO SALAZAR, Miguel y MINA HERNANDEZ, Jose. "Effect of content and surface modification of fique fibers on the properties of a low-density polyethylene (LDPE)-Al/fique composite," *Polymers (Basel)*., vol. 10, no. 10, 2018.

NAIN, Monika, ABDULAZEEZ, Mohanad, EIGAWADY, Mohamed. "Behavior of high strength concrete – filled hybrid large – small rupture strains FRP tubes," *Eng. Struct.*, vol. 209, p. 110264, Apr. 2020.

OLIVEIRA, Michelle. "Performance of epoxy matrix reinforced with fique fibers in pullout tests". The Minerals, Metals & Materials Series. pp. 729–734. 2019.

ONU. Objetivos de desarrollo sostenible. [En línea]. (Recuperado en 15 septiembre 2021). Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

PEREIRA, Artur, et al. "Izod impact tests in polyester matrix composites reinforced with fique fabric" The Minerals, Metals & Materials Series. pp. 365–372. 2017.

PEREIRA, Paulo H., et al. "Vegetal fibers in polymeric composites: A review," *Polimeros*, vol. 25, no. 1, pp. 9–22, 2015.

PICKERING, K. L., EFENDY, M.G., y LE, T. M. "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83. Elsevier Ltd, pp. 98–112, Apr. 01, 2016.

PIZZI, A, et al., "High resin content natural matrix–natural fibre biocomposites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 30, no. 2, pp. 235–240, Sep. 2009.

PUITEL, Adrian C., et al. "Environmentally sound vegetal fiber-polymer matrix composites," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 45, no. 3–4, pp. 265–274, 2011.

PUITEL, Adrian, TOFANICA, Bogdan y GAVRILESCU, Dan. "Environmentally friendly vegetal fiber based materials," *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 651–659, 2012.

RODI, Erica G., et al. "Biocomposites based on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) and *Miscanthus giganteus* fibers with improved fiber/matrix interface," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 5, 2018.

ROUGIER, Viviana Carolina. "CONFINAMIENTO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN CON MATERIALES COMPUESTOS," Universidad Nacional de Tucumán, 2003.

SALINAS, Omar, BENÍTEZ, Ricardo y MARTIN, Jaime. "Chemical Modification of Fique Fiber by Alkalization and Esterification Utilizing Fique Fiber Dust as Residue of the Fiquera Industry," *J. Nat. Fibers*, pp. 1–9, Nov. 2020.

SALIT, Mohd S., et al., *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites*. Springer International Publishing, 2015.

SÁNCHEZ, Martha, CAPOTE, G. y CARRILLO, J. "Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, 2019.

SANKAR, Kaushik y KRIVEN, Waltraud. "Potassium geopolymer reinforced with alkali-treated fique," in *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2014, vol. 35, no. 8, pp. 61–78.

SEPE, Raffaele, et al. "Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 210–217, 2018.

SUÁREZ CASTAÑEDA, Jose L., et al. "Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica," *Rev. Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 57, Jan. 2017.

SUÁREZ, Jose L., RESTREPO, José W. y MERCADO, Fredy A. "In-and-out-of plane mechanical properties of hand lay-up vegetal fiber reinforced polyester resin composites," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 90, pp. 16–27, Dec. 2018.

TORO, Fernando, et al. "Modeling a bending resistance modulus for a cementitious material compound based on properties in fresh state | Modelación del módulo de la resistencia a la flexión de un material compuesto cementicio a partir de propiedades en estado fresco," Rev. Ing. Constr., vol. 29, no. 1, pp. 115–127, 2014.

VELÁSQUEZ RESTREPO, Sandra, PELAÉZ ARROYAVE G y GIRALDO VÁSQUEZ, Diego. "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," Inf. Técnico, vol. 80, no. 1, p. 77.

VIDAL, Gladys y HORMAZÁBAL, Sujey. LAS FIBRAS VEGETALES Y SUS APLICACIONES. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2016.

YAN, Libo. "Plain concrete cylinders and beams externally strengthened with natural flax fabric reinforced epoxy composites," Mater. Struct. 2015 496, vol. 49, no. 6, pp. 2083–2095, May 2015.