



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto **Tecnológico**
de Aguascalientes



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

**Acondicionamiento de microfibras de carbón de bajo costo para
desarrollar materiales de refuerzo de alto rendimiento**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

PRESENTA

I.Q. Israel Dávila Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Carlos Tapia Picazo

CO-DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Bonilla Petriciolet

Aguascalientes, Ags., Mayo, 2025



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **19/mayo/2025**

Oficio No. DEPI 395/2025

Asunto: Autorización impresión tesis

C. ISRAEL DÁVILA PÉREZ
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"Acondicionamiento de microfibras de carbón de bajo costo para desarrollar materiales de refuerzo de alto rendimiento"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE

DR. JUAN CARLOS TAPIA PICAZO

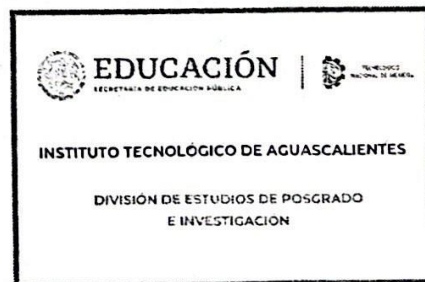
SECRETARIO

DR. ADRIÁN BONILLA PETRICIOLET

VOCAL

DRA. HILDA ELIZABETH REYNEL ÁVILA

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Aguascalientes, Ags., 19/mayo/2025
Asunto: Autorización de uso de derechos

Israel Dávila Pérez, mayor de edad, con domicilio ubicado en Aguascalientes, Ags., en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada "Acondicionamiento de microfibras de carbón de bajo costo para desarrollar materiales de refuerzo de alto rendimiento" quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada "Acondicionamiento de microfibras de carbón de bajo costo para desarrollar materiales de refuerzo de alto rendimiento", a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

SEXTA - DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA - AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica.

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Israel Dávila Pérez
AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.

Juan Carlos Tapia Picazo
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe ISRAEL DÁVILA PÉREZ estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de JUAN CARLOS TAPIA PICAZO y cede los derechos del trabajo “ACONDICIONAMIENTO DE MICROFIBRAS DE CARBÓN DE BAJO COSTO PARA DESARROLLAR MATERIALES DE REFUERZO DE ALTO RENDIMIENTO”, al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Israel Dávila Pérez', is written over a horizontal line.

ISRAEL DÁVILA PÉREZ

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe ISRAEL DÁVILA PÉREZ estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que se responsabiliza de la autenticidad y originalidad del presente trabajo “ACONDICIONAMIENTO DE MICROFIBRAS DE CARBÓN DE BAJO COSTO PARA DESARROLLAR MATERIALES DE REFUERZO DE ALTO RENDIMIENTO”, el cual ha sido presentado para la obtención del grado correspondiente.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Israel Dávila Pérez', enclosed within a large, loopy oval shape.

ISRAEL DÁVILA PÉREZ

Instituto Tecnológico de Aguascalientes



CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Aguascalientes, Ags., el día 9 de abril del año 2025 el que suscribe **I.Q. Israel Dávila Pérez** alumno del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química con número de control G23153086 adscrito al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Juan Carlos Tapia Picazo y cede los derechos del trabajo titulado **“Acondicionamiento de microfibras de carbón de bajo costo para desarrollar materiales de refuerzo de alto rendimiento”** al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación. Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin permiso expreso del autor y director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica juan.tp@aguascalientes.tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo. Los derechos de autor y de explotación de la tecnología son propiedad del autor y responsable del proyecto Dr. Juan Carlos Tapia Picazo en base a **No. de registro ECONOMIA-2003-C01-13119** y otro registro en trámite, por lo que el uso parcial o total de la información presentada en este documento está restringida por sus propietarios. En caso de que se utilice la información sin autorización de los propietarios de la tecnología, se pagará a los propietarios por daños y perjuicios, sin perjuicio de las demás acciones legales que procedan por violación a los derechos de propiedad intelectual o industrial, incluyendo el delito de revelación de secretos contemplado en los artículos 210, 211 y demás relativos del Código Penal Federal o sus correlativos en otros estados.



I.Q. Israel Dávila Pérez

Para ti, Dios.

Para mis padres, Paco y Mary.

Para mis hermanos, Monse, Vale y Uli.

Para mis sobrinos, Dani, Greta, Dieguito, Josecito y Santi.

Para mis abuelos maternos, Ismael y Elvira.

Para mis abuelos paternos, J. Jesús (QEPD) y Carmela.

Para mi familia.

Sólo hay un bien: el conocimiento. Sólo hay un mal: la ignorancia.

Sócrates

Agradecimientos

En primera instancia, gracias, Dios, gracias por el regalo de la vida; por bendecirme con inteligencia; por regalarme serenidad en los momentos de agobio y ansiedad; por acompañarme y guiarme por el buen camino, enseñándome a diferenciar entre lo bueno y lo malo; por la salud mía y de toda mi familia; y por permitirme terminar mis estudios de posgrado.

A mis padres, Paco y Mary, por no dejarme solo en todo el trayecto de mi preparación profesional; por escucharme y entenderme cuando nadie más lo hacía; por cuidarme y guiarme por el camino de una vida digna y espiritual; por ser mi colchón de aterrizaje todas las veces que he caído; por darme el empujón necesario para seguir adelante en los momentos de adversidad y ansiedad; por sus palabras, consejos y regaños que me han forjado como la persona que soy hoy en día.

A mi asesor, el Dr. Juan Carlos Tapia Picazo, por todos los conocimientos que adquirí tanto en sus clases como en la elaboración de esta tesis, por su constante motivación durante toda mi estancia en la maestría y por brindarme la confianza de trabajar bajo su tutela. Dios lo bendiga.

A mis hermanos, Monse, Vale y Uli, por su apoyo incondicional y motivación constante durante esta etapa tan importante en mi vida.

A mis compañeros de clase, Sebastián y Jhon, quienes no solo fueron colegas, sino también amigos y aliados en este intenso pero enriquecedor camino. Gracias por el apoyo mutuo en los momentos más retadores. Su compañía hizo que este viaje fuera mucho más llevadero y memorable.

A mis compañeros del grupo de investigación del laboratorio de polímeros, por brindarme su apoyo, sus conocimientos y su amistad a lo largo de estos años de trabajo. En especial, quiero agradecer al Dr. Daniel Alcalá Sánchez, por brindarme su apoyo incondicional, por compartirme de su amplio conocimiento; por motivarme día con día; por escucharme y aconsejarme en los momentos difíciles; por confiar en mí desde antes incluso de entrar a la maestría; y sobre todo, gracias por su amistad. Dios lo bendiga.

A mi mejor amigo, Aldo Rodríguez, por escucharme y aconsejarme en los momentos difíciles; por motivarme a ser mejor tanto en el ámbito profesional como en lo personal; por su confianza y lealtad; y por regalarme su amistad sincera sin intereses de por medio desde hace ya siete años.

A la M. en C. Ana Iris Peña Maldonado del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) por su ayuda en la obtención de las imágenes de microscopía óptica que fueron de mucha ayuda en la interpretación de resultados de este estudio.

Al personal del Laboratorio Nacional de Materiales Porosos MatPore por su apoyo en la obtención de los espectros de infrarrojo, los cuales permitieron un mejor análisis de los materiales del presente trabajo.

Al Instituto Tecnológico de Aguascalientes y al programa de posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, por brindarme una educación de excelencia con instalaciones y docentes de alto nivel.

Resumen

El presente trabajo aborda el desarrollo y análisis de materiales compuestos reforzados con microfibras de carbón de bajo costo y fibras naturales provenientes del bagazo de agave, un subproducto del proceso de producción de tequila. El objetivo principal fue caracterizar las propiedades mecánicas y micromecánicas de los materiales compuestos, así como evaluar su desempeño en diferentes condiciones experimentales. Las fibras naturales de bagazo de agave se identificaron como una opción sostenible y económica para la fabricación de materiales compuestos. Estas fibras demostraron una capacidad de refuerzo adecuada, aunque con propiedades mecánicas inferiores en comparación con las microfibras de carbón. Por otro lado, las microfibras de carbón exhibieron una resistencia a la tracción superior en comparación con las fibras naturales de bagazo de agave utilizadas en este estudio, consolidándose como una opción ideal para aplicaciones que requieren materiales de alto rendimiento mecánico. El diseño experimental permitió establecer las mejores condiciones dentro del rango de operación para mejorar las propiedades de los materiales. Este análisis incluyó pruebas en condiciones húmedas, donde se observó cómo las variaciones ambientales influyen en el comportamiento de los compuestos. Las gráficas de deformación obtenidas evidenciaron diferencias significativas en los módulos elásticos y las capacidades de carga de los materiales, destacando el rendimiento de los compuestos reforzados con microfibras de carbón. Las imágenes de microscopia electrónica de barrido (SEM) fueron fundamentales para comprender la morfología y distribución de las fibras en la matriz, así como para identificar los mecanismos de falla en los compuestos. En particular, se observó una buena adhesión entre las microfibras de carbón y la matriz polimérica, mientras que los compuestos con fibras de bagazo de agave presentaron una distribución más heterogénea. El análisis comparativo con resinas biodegradables reveló el comportamiento prometedor de los materiales compuestos con fibras naturales, a pesar de sus limitaciones mecánicas en comparación con los compuestos sintéticos. El análisis por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) permitió observar los grupos funcionales presentes tanto en las fibras y en los materiales compuestos, además de obtener relaciones de absorbancias para conocer el contenido de lignina en las fibras naturales y el índice de estabilización de las fibras estabilizadas. Las gráficas de tensión-deformación permitieron el análisis del comportamiento elástico y plástico de las fibras y de los materiales compuestos. Los tratamientos Sol-Gel aplicados a algunas fibras estabilizadas afectaron negativamente en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, sin embargo, el tratamiento de silano obtuvo resultados donde se muestra que mejoraron las propiedades mecánicas del material compuesto. La caracterización de la zona interfacial de los materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas mediante un modelo matemático permitió demostrar la congruencia entre los resultados experimentales y teóricos.

INDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo general.....	6
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.3. Justificación	7
2. Marco teórico.....	9
2.1. Materiales compuestos.....	9
2.1.1. Clasificación	9
2.1.2. Materiales compuestos reforzados con fibras de carbón	10
2.1.3. Materiales compuestos reforzados con fibras naturales.....	13
2.2. Fibra de carbón	14
2.2.1. Fibras de carbón a partir de Poliacrilonitrilo (PAN).....	15
2.2.2. Proceso de fabricación y clasificación.....	16
2.2.3. Propiedades de las fibras de carbón	17
2.2.4. Aplicaciones de fibras de carbón	18
2.2.5. Hilatura en húmedo.....	18
2.2.6. Modificación superficial de la fibra de carbón	19
2.2.6.1. Métodos convencionales	19
2.2.6.2. Funcionalización.....	21
2.3. Fibras naturales	22
2.3.1. Clasificación de fibras naturales	22
2.3.2. Propiedades y aplicaciones de fibras naturales	23
2.3.3. Modificación superficial de las fibras naturales	27
2.4. Caracterización de la zona interfacial en material compuesto	30
2.5. Caracterización de fibras naturales y de carbón	31
2.5.1. Resistencia a la tracción.....	32
2.5.2. Elongación	32
2.5.3. Módulo de Young	32
2.5.4. Análisis de gráfica tensión-deformación	32
2.5.5. Microscopía óptica.....	32
2.5.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	33

2.5.7.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	33
2.6.	Caracterización de materiales compuestos	33
2.6.1.	Pruebas de Humedad	33
2.6.2.	SEM	33
2.6.3.	Resistencia a la tracción.....	33
2.6.4.	Elongación	34
2.6.5.	Módulo de Young	34
2.6.6.	Gráficas de tensión-deformación	34
2.6.7.	Microscopía óptica.....	34
2.6.8.	FTIR.....	34
2.7.	Diseño de experimentos.....	35
2.7.1.	Tipos de diseños experimentales	35
3.	Metodología	38
3.1.	Modificación de la superficie de las fibras	38
3.1.1.	Funcionalización de fibras de carbón	38
3.1.2.	Alcalinización de las fibras naturales	39
3.2.	Caracterización de fibras de carbón y naturales	39
3.2.1.	Resistencia a la tracción.....	40
3.2.2.	Elongación	40
3.2.3.	Gráficas de tensión-deformación	41
3.2.4.	Microscopía óptica.....	41
3.2.5.	Módulo de Young	41
3.2.6.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	41
3.2.7.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	41
3.3.	Preparación de materiales compuestos.	42
3.4.	Caracterización de materiales compuestos	43
3.4.1.	Pruebas de humedad	44
3.4.2.	SEM	44
3.4.3.	Resistencia a la tracción.....	44
3.4.4.	Elongación	45
3.4.5.	Gráficas de tensión-deformación	45
3.4.6.	Módulo de Young	45
3.4.7.	Microscopía óptica.....	46

3.4.8.	FTIR.....	46
3.4.9.	Caracterización de la zona interfacial.....	46
3.5.	Comparación entre materiales compuestos de fibra de bagazo de agave y materiales compuestos de fibra y resina biodegradable.....	47
3.6.	Diseño de experimentos Taguchi L12	47
4.	Resultados	49
4.1.	Caracterización de fibras naturales	49
4.2.	Caracterización de resinas epoxi.....	50
4.3.	Pruebas preliminares de materiales compuestos.....	53
4.4.	Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales....	56
4.4.1.	Análisis estadístico de diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales	66
4.5.	Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales en condiciones de humedad	72
4.5.1.	Análisis estadístico de diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales	78
4.6.	Comparación entre materiales compuestos de fibra de bagazo de agave y materiales compuestos de fibra y resina biodegradable.....	81
4.7.	Fibras de carbón.....	86
4.8.	Fibras estabilizadas con tratamientos Sol-Gel	95
5.	Conclusiones y recomendaciones	103
6.	Referencias bibliográficas.....	106

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de materiales compuestos (Carballo y col., 2002)	10
Figura 2. Fibra de carbón (Jones, 2021)	15
Figura 3. SEM de fibra de carbón (a) sin tratamiento (b) con tratamiento (Wu y col, 2017)	21
Figura 4. Dispositivo para realizar pruebas de resistencia a la tracción y elongación (Alcalá-Sánchez, 2021)	40
Figura 5. Molde para materiales compuestos	42
Figura 6. Fibras de agave (a) cruda y (b) cocida	49
Figura 7. Espectros de FTIR de las fibras de agave cocida sin tratamiento y cruda sin tratamiento	50
Figura 8. Gráfica de tensión-deformación de resinas	51
Figura 9. Espectros FTIR de las resinas epoxi	53
Figura 10. Gráfica de tensión-deformación de materiales compuestos con fibra cruda sin tratar y tratada	54
Figura 11. Gráfica de tensión-deformación de materiales compuestos con fibra cocida sin tratar y tratada	55
Figura 12. Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos	57
Figura 13. Gráfica de tensión-deformación para diseño de experimentos	60
Figura 14. Espectros de FTIR de fibras de agave del diseño de experimentos L12 con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor	62
Figura 15. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos L12 con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor	63
Figura 16. Imágenes SEM de Experimento 2 del diseño de experimentos en la superficie de fractura del material compuesto. a) zona de interfaz refuerzo-matriz y b) zona de matriz con curado incompleto	64
Figura 17. Imágenes SEM de Experimento 3 del diseño de experimentos en la superficie de fractura del material compuesto. a) zona de interfaz refuerzo-matriz y b) magnificación de zona de interfaz refuerzo-matriz	64
Figura 18. Espectros de FTIR de fibras de agave del diseño de experimentos L12 con respecto a elongación: mejor, medio y peor	65
Figura 19. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos L12 con respecto a elongación: mejor, medio y peor	66
Figura 20. Gráfica de tensión-deformación de los materiales compuestos bajo las mejores condiciones del diseño de experimento para resistencia a la tracción y elongación	71
Figura 21. Comparativo entre materiales compuestos de diseños de experimentos seco y húmedo en términos de resistencia a la tracción	72
Figura 22. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos en condiciones de humedad con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor	74
Figura 23. Comparativo entre materiales compuestos de diseños de experimentos seco y húmedo en términos de elongación	75
Figura 24. Gráfica de tensión-deformación para diseño de experimentos húmedo	76
Figura 25. Espectros FTIR de fibras estabilizadas	87
Figura 26. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos elaborados con fibras estabilizadas	92

Figura 27. Imágenes SEM de material compuesto con fibra estabilizada “AM II”	93
Figura 28. Imágenes SEM de material compuesto con fibra estabilizada “L15 silanizada”	93
Figura 29. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos reforzado con fibra AM II sin y con tratamientos Sol-Gel.....	96
Figura 30. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos reforzados con fibra L15 sin y con tratamientos Sol-Gel.....	97
Figura 31. Espectros de FTIR de fibra L15 final con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti	98
Figura 32. Espectros de FTIR de materiales compuestos con fibra L15 final con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti.....	99
Figura 33. Espectros de FTIR de fibra AM II con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti	99
Figura 34. Espectros de FTIR de materiales compuestos con fibra AM II con tratamiento Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti.....	100
Figura 35. Imágenes SEM de fibras estabilizadas con tratamiento: L15 Sol-gel Silicio (A, B, C); L15 Sol-gel Titanio (D, E, F); AM II Sol-gel Silicio (G, H, I); AM II Sol-gel Titanio (J, K, L).....	101

Índice de tablas

Tabla 1. Técnicas convencionales para elaboración de materiales compuestos (Almushaikeh y col, 2023)	12
Tabla 2. Clasificación de fibras de carbón (Frank y col, 2017)	16
Tabla 3. Consumo mundial de fibra de carbón en toneladas (X. Huang, 2009)	18
Tabla 4. Lista de fibras naturales y sus aplicaciones (Khan y col., 2024).....	26
Tabla 5. Propiedades mecánicas de resinas.....	50
Tabla 6. Resultados de pruebas preliminares	53
Tabla 7. Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales	56
Tabla 8. Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos	57
Tabla 9. Microscopía óptica de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos	58
Tabla 10. Análisis de regresión de diseño de experimentos: Resistencia a la tracción (Minitab 18) 67	
Tabla 11. Análisis de varianza diseño de experimentos Taguchi L12 teniendo la resistencia a la tracción como variable de respuesta.....	67
Tabla 12. Comparación entre mejor experimento obtenido en el diseño de experimento contra mejores condiciones para resistencia a la tracción.....	68
Tabla 13. Análisis de regresión de diseño de experimentos: Elongación (Minitab 18)	69
Tabla 14. Análisis de varianza diseño de experimentos Taguchi L12 teniendo la elongación como variable de respuesta	69
Tabla 15. Comparación entre mejor experimento obtenido en el diseño de experimento contra mejores condiciones para elongación.....	70
Tabla 17. Fotografías con microscopía óptica tomadas a diseño de experimentos húmedo	77
Tabla 18. Análisis de regresión de diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18).....	79
Tabla 19. Análisis de varianza diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18).....	79
Tabla 20. Análisis de regresión de diseño de experimentos en condiciones de humedad: elongación (Minitab 18)	80
Tabla 21. Análisis de varianza de diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18).....	81
Tabla 22. Valores máximos de resistencia y deformación a la rotura para las formulaciones de compuestos de base biológica estudiadas (Sánchez Morales y col., 2024).....	83
Tabla 23. Valores máximos de resistencia y deformación para las muestras del material compuesto sin aditivo y las muestras del material compuesto con aditivo de las mezclas de mejor rendimiento (Sánchez Morales y col., 2024).....	85
Tabla 24. Caracterización y descripción de fibras estabilizadas	88
Tabla 25. Resultados de pruebas mecánicas en materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas	89
Tabla 26. Fotografías con microscopía óptica tomadas a materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas	91
Tabla 27. Resultados de resistencia de adherencia de materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas: mejor, medio y peor.	94

Tabla 28. Resultados de pruebas mecánicas en materiales compuestos con fibras estabilizadas con tratamientos Sol-Gel.....	96
--	----

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los materiales en general son muy importantes para el desarrollo tecnológico en los equipos de última generación en diversos campos, como el aeroespacial, el automóvil y muchos otros sectores. Dentro del sector automovilístico, anteriormente el hierro fundido era el material por excelencia para la fabricación de los coches, aumentando el peso y, por ende, el costo en combustible. Sin embargo, al pasar los años se realizaron muchos avances, por mencionar uno, las aleaciones de aluminio sustituyeron muchas piezas del motor (Chethan y col., 2018; Hegde y col., 2019) y al pasar de los años se ha ido modificando mediante la integración de muchos materiales para la combinación de sus propiedades, y, por lo tanto, ha ido evolucionando el material compuesto. Los materiales compuestos son una combinación de dos o más materiales para obtener ciertas propiedades de la mezcla de los materiales y su aprovechamiento para el fin que se le quiera dar (Chethan y col., 2018; Gupta y col., 2016).

Los materiales compuestos se destacan principalmente por su ligereza y su alta resistencia. En cuanto a las resinas utilizadas en materiales compuestos, las resinas termoestables líquidas son las más prominentes. Además, se consideran las resinas termoplásticas, las cuales se encuentran en estado sólido a temperatura ambiente y deben ser calentadas para convertirlas en líquido antes de su utilización en cualquier proceso. En particular, las resinas epoxi son clasificadas como difuncionales (Miravete, 2011).

Dentro de los materiales compuestos de matriz polimérica, es posible clasificarlos en dos categorías según el tipo de polímero que actúa como matriz: termoplásticos y termoestables. La distinción entre estos dos tipos se basa en su comportamiento dependiendo a los cambios de temperatura. Los termoplásticos experimentan cambios significativos en sus propiedades mecánicas a medida que aumenta la temperatura, mientras que los termoestables muestran una resistencia constante a estos efectos. Esta diferencia en comportamiento está directamente vinculada a la estructura química de los polímeros y es donde radica la distinción entre ellos (Gómez, 2008).

En el caso de los materiales con matriz termoestable, su estructura se compone de cadenas poliméricas que están entrecruzadas, formando una red molecular tridimensional. Por otro lado, los termoplásticos carecen de entrecruzamiento entre sus cadenas poliméricas, lo que los convierte en un conjunto de moléculas independientes, aunque pueden interactuar mediante fuerzas cohesivas más débiles que los enlaces químicos. Esto significa que, al elevar la temperatura, un material

termoplástico puede comportarse de manera similar a un líquido, ya que las fuerzas que mantienen sus moléculas juntas se vuelven más débiles (Gómez, 2008).

Los materiales compuestos evolucionaron en paralelo con el desarrollo de estas matrices, ya que las fibras ya eran conocidas y los procesos de preparación superficial de las fibras para garantizar una buena adherencia a las matrices no presentaron grandes dificultades. En consecuencia, los primeros materiales compuestos consistían en fibras de vidrio combinadas con matrices fenólicas y poliésteres, utilizados en aplicaciones como la eléctrica, embarcaciones y placas onduladas (Miravete, 2011).

En 1907, el químico belga Leo Baekeland logró un avance al crear la primera resina termoestable. Este logro implicó calentar y aplicar presión a una mezcla de fenol y formaldehído en un recipiente especial, dando como resultado una resina líquida que se polimerizó y adoptó la forma del recipiente. Baekeland la denominó "bakelita". A lo largo de las tres primeras décadas del siglo XX, se introdujeron gradualmente otras matrices termoestables, como las fenólicas, que fueron las primeras en ser utilizadas industrialmente en aplicaciones como el aislamiento, armamento y bisutería, así como las poliéster, vinil éster y epoxis (Miravete, 2011).

Para la década de 1930, se fabricaban mediante el método de "por contacto a mano" para aplicaciones en las que los requisitos mecánicos no eran elevados, aunque surgían problemas relacionados con la forma, el peso o el aislamiento eléctrico. Por lo tanto, estos materiales empezaron a ser considerados como una alternativa a los materiales tradicionales como el acero, el hormigón, el aluminio o la madera, por otro lado, en la década de 1940, surgió la inyección con matrices termoestables como una variante de la inyección de materiales termoplásticos (Miravete, 2011).

El panorama de los materiales compuestos ha experimentado una transformación significativa, con la aparición de nuevas tecnologías que han cerrado la brecha entre los campos de la aeronáutica y las aplicaciones de uso común, difuminando las diferencias que existían entre estas dos áreas (Miravete, 2011).

A finales de la década de 1950, se desarrolló la fibra de carbón de acrilonitrilo en el antiguo Instituto de Investigación Industrial del Gobierno Japonés en Osaka (GIRIO). En 1958, el Dr. Roger Bacon, científico de la UCC, descubrió "fibras de grafito" en filamentos de rayón que podrían convertirse en fibras de carbón, marcando el comienzo del proceso moderno de fabricación de fibra de carbón. Debido a que el poliacrilonitrilo era un polímero difícil de usar, los investigadores

estadounidenses lo abandonaron después de varios intentos fallidos de crear una fibra de alto módulo con el material (Bacon y Moses, 2003).

El polímero reforzado con fibra de carbón es un material compuesto que es una combinación de dos materiales, a saber, una fibra de carbón y una matriz que puede ser termoestable, termoplástica o elastómero (Bittmann, 2006). La razón de usar carbono como fibra es porque proporciona una relación muy buena con respecto a resistencia-peso (Lepretre y col, 2018).

Gracias a su baja densidad, peso ligero, mayor resistencia a la corrosión, mejor rigidez y mejor rendimiento ante la fatiga es que se utiliza el polímero reforzado con fibra de carbón (Visal y Deokar, 2016) (Firmo y col, 2012). La sobrecarga o el envejecimiento de las estructuras de acero pueden ocasionar daños, comprometiendo su integridad y generando riesgos para la seguridad (Wang y col, 2018) (Y. Chen y col, 2007). Sin embargo, la investigación sobre el rendimiento a largo plazo de los materiales compuestos de fibra de carbono reforzada empleados en el refuerzo de estructuras, ya sean de acero o de hormigón, ha sido limitada (Kabir y col, 2016). En algunos casos, la disminución de la vida útil de las estructuras puede atribuirse a la utilización de materiales de baja calidad y a restricciones temporales insuficientes para realizar detalles precisos (Chethan y col, 2018). Los métodos tradicionales, aparte de ser costosos, inducen la corrosión y, en determinadas circunstancias, implican el uso de equipos de elevación pesados, lo cual también conlleva considerables lapsos temporales. En consecuencia, se opta por el empleo de polímeros reforzados con fibra (FRP), dado que presentan características de ligereza, resistencia a la corrosión y una mejor capacidad de resistencia y rigidez como ya fue mencionado anteriormente (Wang y col, 2018).

La interacción entre los componentes de cualquier compuesto desempeña un papel crucial en facilitar la transferencia eficaz de tensiones desde el material de matriz, que tiende a ser relativamente más débil, hacia el material de refuerzo, que posee una mayor resistencia (Athulya Wickramasingha y col., 2022) (Hendlmeier y col., 2019) sin embargo, la interfaz entre fibra y resina ha sido reconocida durante mucho tiempo como un área de investigación de compuestos poco comprendida y difícil de diseñar (Jiao y col, 2019).

Investigaciones recientes han explorado la modificación superficial de fibras de carbono mediante la incorporación de nanoestructuras de ZnO a través de un proceso hidrotermal, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos híbridos de polímero reforzado con fibra de carbono. Observaron que un aumento en el tiempo de crecimiento y en los ciclos de siembra favorece la formación de ZnO, mientras que la concentración de la solución de crecimiento

influye mínimamente. Los compuestos resultantes mostraron mejoras notables en su módulo elástico, resistencia a la tracción y capacidad de absorción de impacto (Rai y Bajpai, 2024).

Chang Li y col. (2024) trabajaron en el desarrollo de materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales y electrónicas con la incorporación de estructuras de redes de carbono poroso funcionalizadas con polidopamina sobre fibras de carbono para mejorar simultáneamente la resistencia mecánica y la protección contra interferencias electromagnéticas. Se observó que esta modificación favorece la adhesión interfacial, aumentando la resistencia a la flexión y reduciendo el desgaste del material (C. Li y col., 2024)

Para mejorar la interacción entre el refuerzo y la matriz, Gogoi y col. (2024) implementaron una funcionalización superficial de fibras de carbono con grupos $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ y $-\text{NH}_2$, seguida de un recubrimiento con nanotubos de carbono mediante deposición electroforética asistida por ultrasonidos. Esta modificación incrementó significativamente la resistencia al corte interfacial, alcanzando 29 MPa, un aumento del 758% respecto a la fibra sin tratar y mejoró en un 13% su resistencia a la tracción.(Gogoi y col., 2024).

Por otro lado, Mehdipour y col. (2025) han explorado la mejora de la adhesión interfacial entre la fibra de carbono y la matriz epoxi mediante la incorporación de h-BN en una estructura multicapa. Encontraron que la combinación de h-BN tratado y sin tratar, aplicado mediante electropulverización y mezclado en la matriz, mejora significativamente la conductividad térmica fuera del plano y las propiedades mecánicas del material compuesto. En particular, el refuerzo con h-BN en la matriz epoxi incrementa el módulo elástico, el módulo de flexión y la resistencia al impacto, mientras que la modificación de la fibra de carbono favorece la conductividad térmica direccional sin comprometer la porosidad del material. (Mehdipour y col., 2025).

Debido al creciente enfoque en la sostenibilidad y la conciencia ambiental, los materiales compuestos de fibras naturales están ganando popularidad en diversas industrias. Estos materiales, que destacan por su bajo costo y baja densidad, ofrecen propiedades específicas aceptables, como la facilidad de separación, una mejor recuperación de energía, neutralidad de CO_2 , biodegradabilidad y reciclabilidad. Estos beneficios han aumentado el interés por las fibras naturales, especialmente en comparación con materiales tradicionales (Faruk y col., 2014).

En particular, los materiales compuestos de fibras naturales están impulsando una mayor demanda en sectores como la automotriz, la construcción y la edificación, gracias a sus características de durabilidad, fiabilidad, ligereza y excelentes propiedades mecánicas. Aunque no igualan a la fibra

de vidrio o fibra de carbono en términos de resistencia, sobresalen en la mayoría de los parámetros, lo que favorece su adopción en lugar de materiales sintéticos (Faruk y col., 2014).

En la industria automotriz, la producción de componentes con materiales compuestos de fibra natural se ha incrementado, especialmente en Europa y América del Norte, donde los vehículos comenzaron a incorporar termoplásticos reforzados con fibras naturales en piezas como paneles de puertas, bandejas de paquetes, respaldos de asientos y revestimientos de maleteros. Esto ha sido impulsado no solo por las ventajas técnicas, sino también por el precio competitivo, la reducción de peso, la facilidad de reciclaje y los incentivos de marketing (Khan y col., 2024)

Los principales factores que impulsan el uso de fibras naturales incluyen la fuente de materia prima renovable, las propiedades ambientales favorables, la volatilidad en los precios del petróleo y el apoyo gubernamental. Así, los compuestos de fibra natural continúan ganando terreno frente a alternativas sintéticas, consolidándose como una opción viable y beneficiosa en varias aplicaciones industriales (Faruk y col., 2014).

En la actualidad se han realizado diversos estudios para mejorar la interacción refuerzo-matriz de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales. Majhi y col. (2023) investigaron la modificación de la superficie de la fibra de Agave Lechuguilla (AL) con una solución de NaOH y su influencia en compuestos de epoxi. Se utilizaron fibras de AL tratadas y no tratadas en diferentes fracciones de peso (10 %, 20 %, 30 % y 40 %) como refuerzo para compuestos epoxi. Los resultados mostraron que el tratamiento con NaOH mejoró la resistencia al impacto del compuesto, siendo el mejor desempeño con un 30 % de fibra en peso (Majhi y col., 2023).

Por otra parte, Pokhriyal y col. (2024) extrajeron fibras de *Himalayacalamus falconeri* y evaluaron sus propiedades mediante análisis XRD, TGA, AFM y pruebas de tracción de fibra única. El tratamiento alcalino de las fibras incrementó un 6% el contenido de celulosa y un 4% la densidad, además de reducir el diámetro de las fibras. Este tratamiento también mejoró la cristalinidad, la resistencia a la tracción, la estabilidad térmica y la rugosidad superficial (Pokhriyal y col., 2024).

Gapsari y col. (2024) investigaron el tratamiento alcalino de la fibra de kapok combinado con un recubrimiento de aceite de soja epoxidado acrilado evaluando su efecto en los materiales compuestos de poliéster reforzados con fibra natural. Se demostró que el tratamiento mejoró significativamente las propiedades mecánicas de los compuestos, tal como la resistencia a la tracción y a la flexión, con un aumento del 31,97% en la resistencia a la tracción en comparación con las muestras sin tratar. Además, el tratamiento alcalino y el recubrimiento redujeron eficazmente la

degradación en condiciones de exposición a rayos UV e inmersión en agua, mejorando la durabilidad y longevidad de los compuestos (Gapsari y col., 2024).

Sánchez Morales y col. (2024) desarrollaron un material compuesto biobasado utilizando resina de *Elaegia pastoensis* (Mopa-Mopa) y fibras de raquis de plátano, con y sin tratamiento alcalino. La adición de ácido esteárico redujo la absorción de humedad y disminuyó ligeramente la resistencia mecánica. Las fibras tratadas alcalinamente mejoraron la adhesión a la matriz, incrementando la resistencia a la tracción. Sin embargo, la humedad relativa aumentó la absorción de agua y afectó negativamente las propiedades mecánicas, aunque el ácido esteárico mitigó parcialmente este efecto (Sánchez Morales y col., 2024).

En este trabajo se busca la funcionalización de fibras de carbón de bajo costo, ya que modificar su superficie es una técnica ampliamente utilizada para introducir grupos funcionales, lo que mejora significativamente la adhesión en la interfaz entre las fibras de carbón y la matriz polimérica (Pulidindi y Gedanken, 2023). De manera paralela, las fibras naturales obtenidas del bagazo de agave fueron tratadas con un proceso alcalino, lo que permite eliminar impurezas superficiales, mejorar su compatibilidad con la matriz polimérica y fortalecer su desempeño como material de refuerzo. Ambos sistemas de materiales compuestos presentan beneficios significativos en sus respectivos ámbitos. Los materiales compuestos con fibras de carbón funcionalizadas destacan por su alta resistencia mecánica, su estabilidad térmica y su capacidad para soportar aplicaciones que requieren un desempeño estructural de alto nivel, manteniendo costos reducidos gracias al uso de fibras de carbón de baja pureza. Por otro lado, los materiales compuestos con fibras naturales tratadas no solo ofrecen una solución sostenible y de bajo costo, sino que también presentan una excelente relación entre peso y resistencia, lo que los hace ideales para aplicaciones en las que se busca reducir el impacto ambiental, como en la industria automotriz, de empaques o de construcción. En conjunto, estos dos tipos de materiales permiten cubrir un amplio rango de necesidades, desde sistemas de alto desempeño basados en fibras de carbón funcionalizadas hasta alternativas sostenibles y accesibles con fibras naturales tratadas, posicionándose como opciones versátiles para diferentes sectores industriales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar materiales compuestos especiales usando microfibras de carbón de bajo costo funcionalizadas y fibras de bagazo de agave provenientes del proceso del tequila.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un método de funcionalización de fibras de carbón y fibras naturales para mejorar la interacción refuerzo-matriz en base a las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.
- Elaborar, caracterizar y analizar los materiales compuestos en términos de las interacciones interfaciales refuerzo-matriz para mejorar la resistencia a la tracción y elongación en base a los diferentes tratamientos aplicados a los refuerzos estructurales del material.
- Caracterizar fibras de carbón de bajo costo y fibras naturales para conocer y comparar sus propiedades mecánicas
- Comparar los resultados de los materiales compuestos elaborados con trabajos existentes en la literatura.

1.3. Justificación

Las fibras de carbón son materiales de ingeniería de gran importancia. La aeronáutica, aeroespacial, deportiva y de automoción son algunas de las industrias en las que prima el uso de fibras de carbón. La fabricación de fibras de carbón es un proceso intensivo que consume largos periodos de tiempo y un alto consumo energético. El refuerzo de materiales poliméricos y cerámicos es una de las principales aplicaciones de las fibras de carbón debido a sus excelentes propiedades mecánicas y bajo peso. La realización de este trabajo se presenta como un pilar fundamental en la investigación científica, ya que sus implicaciones abarcan desde la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos hasta la reducción de costos en su producción. Esto no solo contribuye a la competitividad industrial, sino que también tiene el potencial de promover la sostenibilidad al hacer un uso más eficiente de los recursos y alentar la adopción más amplia de materiales compuestos avanzados y alto rendimiento. Además, esta investigación propicia el desarrollo tecnológico que repercute en diversas industrias como lo son la aeronáutica, automovilística y a la medicina, lo que la convierte en un área de estudio de relevancia estratégica debido a que en la industria se utiliza fibra de carbón de elevado costo, esto debido a la energía utilizada en la producción de ésta, así como los precursores utilizados para desarrollar la fibra de carbón. En este contexto, la exploración y el uso de fibras de carbón de bajo costo se vuelve una vía prometedora para ampliar el uso de materiales compuestos de alto rendimiento en sectores que demandan soluciones eficientes, ligeras y funcionales con una mayor accesibilidad. El material compuesto a desarrollar es el resultado de la incorporación de fibra de carbón de bajo costo a una matriz polimérica para así adicionarle a esta las propiedades de alta resistencia a la tracción, rigidez y ligereza que caracterizan a la fibra de carbón, las cuales son superiores con respecto a otros materiales como lo es el acero, obteniendo así un material compuesto de alto rendimiento. Por otro lado, el análisis de fibras naturales, como las obtenidas del bagazo de

agave, es de gran relevancia debido a su disponibilidad, bajo costo y menor impacto ambiental en comparación con materiales sintéticos. Estas fibras, al ser tratadas con procesos para su modificación superficial, mejoran su compatibilidad con las matrices poliméricas, lo que las convierte en una alternativa viable y sostenible para aplicaciones en las que la reducción de costos y el menor impacto ambiental son factores clave. Este enfoque se basa en el aprovechamiento de fibras residuales, que de otro modo serían desechadas, para la fabricación de materiales compuestos sustentables, fomentando así la valorización de residuos. Esta investigación busca el desarrollo de nuevos materiales funcionales y de alto rendimiento, así como también el fomentar estrategias de sostenibilidad mediante el uso de fibras residuales y soluciones de bajo costo.

2. Marco teórico

En este apartado se definen y explican los conceptos clave que forman la base del estudio, y se presentan los enfoques teóricos. Permite comprender las relaciones entre las variables y los procesos involucrados, proporcionando una estructura conceptual que orienta el desarrollo de la metodología y el análisis de los resultados.

2.1. Materiales compuestos

Los materiales compuestos son estructuras macroscópicas conformadas por la unión de dos o más materiales diversos, sin que ocurran reacciones químicas entre ellos; las fases individuales retienen sus características distintivas, es decir, no se diluyen o mezclan por completo. Por lo general, es posible discernir físicamente las diferentes fases e identificar claramente la superficie que las separa. Como resultado, estos materiales son heterogéneos, lo que implica que sus propiedades no son uniformes en todo su volumen (Bayraktar, 2017).

Los materiales compuestos son una categoría relativamente moderna de materiales que se destacan por su menor peso y mayor resistencia en comparación con los materiales tradicionales. La investigación continua se centra en el desarrollo de técnicas de procesamiento de materiales compuestos para aplicarlos en sistemas de fabricación avanzada. En la actualidad, los enfoques de diseño en las tecnologías contemporáneas difieren significativamente de los métodos convencionales. Por ejemplo, en los diseños antiguos, se estima la vida útil de los materiales en torno a 10^6 ciclos, como se utiliza comúnmente en la ingeniería de fabricación estándar. Sin embargo, en las tecnologías modernas, la vida útil de los nuevos materiales compuestos, utilizados en aplicaciones como trenes de alta velocidad, diseños de aeronaves innovadores, aplicaciones aeroespaciales, turbinas de última generación, entre otros, se prevé que alcance cifras de 10^{10} a 10^{11} o incluso más (Bayraktar, 2017).

2.1.1. Clasificación

La variedad de materiales compuestos disponibles hace difícil categorizarlos en función de cómo mejoran sus propiedades mecánicas, como la resistencia, rigidez, tenacidad o su desempeño a altas temperaturas. Una forma razonable de clasificarlos es considerar el proceso que causa esta mejora, que depende en gran medida de la forma en que se incorpora un material de refuerzo en otro material principal llamado matriz (Carballo y col., 2002). Se puede apreciar una clasificación en la Figura 1:

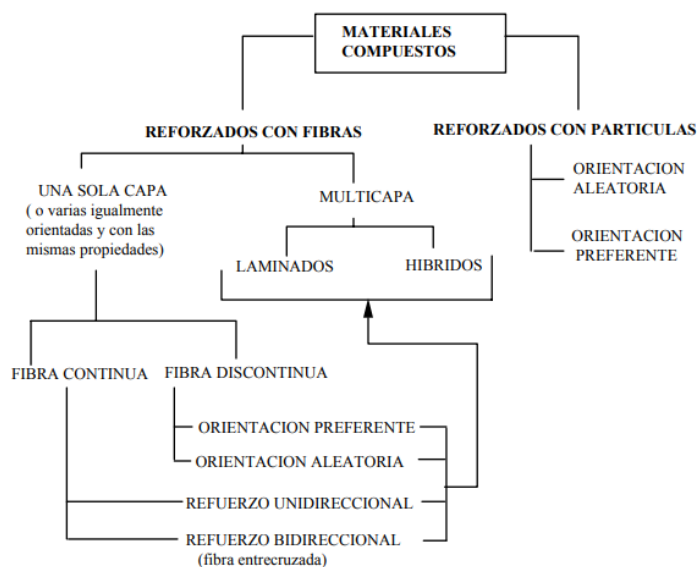


Figura 1. Clasificación de materiales compuestos (Carballo y col., 2002)

En términos tradicionales, los materiales compuestos que se emplean como elementos estructurales en aplicaciones de ingeniería abarcan categorías y se pueden clasificar como compuestos de matriz metálica (MMC), compuestos de matriz polimérica (PMC), compuestos de base cerámica (CMC) y también materiales compuestos diseñados para aplicaciones en la construcción. Muchos de estos compuestos que se utilizan en la actualidad ofrecen un rendimiento óptimo y costos adecuados para satisfacer las demandas extremadamente exigentes de aplicaciones de alta tecnología (Bayraktar, 2017).

2.1.2. Materiales compuestos reforzados con fibras de carbón

Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbón (CFRP) son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como la industria aeroespacial, naval, automotriz y civil, debido a sus notables ventajas en términos de relación entre rigidez y peso, así como relación entre resistencia y peso. Por ejemplo, sustituir metal por CFRP en automóviles puede reducir significativamente el peso en hasta un 15%, lo que tiene un impacto positivo en la eficiencia del combustible, la maniobrabilidad y la capacidad de carga de los vehículos (Kim, 1998). En comparación con los materiales convencionales, las fibras de carbón también destacan por su resistencia superior a la fatiga, su estabilidad a largo plazo, su menor expansión térmica y su excelente resistencia a la corrosión. Estas cualidades hacen que el CFRP sea una opción muy prometedora para una amplia variedad de aplicaciones, incluso en entornos ambientales extremos y diversos (Manalo y col., 2017).

En contraste con los problemas de degradación a largo plazo causados por factores como la radiación ultravioleta y la humedad, que pueden manejarse mediante capas de protección y control de vida útil, los cambios bruscos de temperatura pueden ser potencialmente catastróficos en un corto período de tiempo, especialmente en condiciones extremadamente frías. Del mismo modo, las propiedades mecánicas de la matriz polimérica están fuertemente influenciadas por la temperatura: a medida que esta aumenta, la matriz pasa de un estado duro a uno más blando y el módulo de elasticidad puede disminuir significativamente (Jia y col, 2018).

Cuando se fabrica un material compuesto que utiliza fibras de carbón como refuerzo, es necesario tener en cuenta diversos aspectos, como la longitud, el grosor, la dirección, la cantidad y la relación de las fibras; las características del material que las rodea (matriz); y la forma en que las fibras se unen a la matriz (interfase) (Stupenengo, 2011).

En la preparación de materiales compuestos se emplean diversos métodos convencionales, entre los cuales se encuentran la composición por fusión, el método de solución y las técnicas de fabricación aditiva. El método de composición por fusión, empleado para la creación y conformación de materiales poliméricos similares, como el moldeo por inyección, envasado al vacío, moldeo por compresión, laminado, moldeo rotacional, pultrusión y métodos de extrusión (Yao y col, 2018), implica dos etapas fundamentales. Inicialmente, se funde un polímero a una temperatura específica, dependiente de su tipo, al cual se le agrega posteriormente un refuerzo. En la segunda etapa, el compuesto fundido se moldea en un molde prediseñado, adquiriendo la forma deseada al enfriarse. Los refuerzos, como la fibra de carbón, pueden adoptar diversas formas, como estopas, cintas o laminados, o simplemente cortarse y añadirse en un peso determinado, afectando el grado de fusión y requiriendo consideraciones para evitar posibles defectos.

Los métodos tradicionales, aunque eficaces, presentan desafíos, ya que demandan moldes personalizados para cada forma, incrementando los costos y ralentizando el proceso de fabricación (Almushaikeh y col, 2023). Entre estos métodos, el moldeo por inyección destaca por su alta eficiencia y capacidad para fabricar piezas complejas, así como por la facilidad de mezclar diferentes tipos de polímeros durante la producción de un solo producto. En este proceso, los compuestos se funden y vierten en un molde para adquirir la forma deseada. La elección precisa del grado de fusión es crucial, ya que alteraciones pueden resultar en defectos finales como cavidades de aire, burbujas de aire y pérdida de energía (Xiaochun y col, 2018).

En la Tabla 1 se muestran diversas técnicas convencionales para la elaboración de materiales compuestos con sus respectivas ventajas y desventajas.

Tabla 1. Técnicas convencionales para elaboración de materiales compuestos (Almushaikeh y col, 2023)

Técnica	Ventajas	Desventajas
Extrusión	Se utiliza para mezclar el relleno y la matriz con calor y agitación mecánica.	Debe de existir un proceso consiguiente, como inyección o prensado en caliente.
En solución	Se utiliza para mezclar la carga y la matriz; sin embargo, en este método también se utilizan ácidos.	Por lo general, se necesitan otras técnicas después de este método para fabricar la forma del producto final, como el moldeo por compresión.
De colocación	Se apilan capas de hojas una encima de otra, capa por capa. Suele ir seguida de otra técnica para eliminar los huecos.	Lleva mucho tiempo cuando se hace manualmente.
Envasado al vacío	Se utiliza para eliminar el aire y los huecos de las capas colocadas. Fácil de realizar y requiere calor.	No se puede utilizar para fabricar una pieza sofisticada.
Moldeo por inyección	Produce piezas de alta calidad de todas las formas y tamaños con piezas más sofisticadas.	Generalmente se procede con una técnica de mezclado y requiere de un molde prediseñado para cada pieza con una forma específica lo que incrementa el costo.
Moldeo por compresión	Produce piezas complejas.	Requiere un molde prediseñado.

2.1.3. Materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Los materiales tradicionales, como el hormigón, el acero y la madera, han sido durante mucho tiempo los pilares fundamentales de la infraestructura física. Sin embargo, el aumento en los costos de construcción, en gran parte debido a estos materiales, ha superado significativamente la inflación en los últimos años (Cheng, 2012). Además, el acero y otras aleaciones presentan diversas limitaciones, como susceptibilidad a la corrosión, una baja relación resistencia-peso, un alto costo y menor resistencia en entornos hostiles (Naveen Kumar y col., 2023).

Ante estos desafíos, ha surgido un creciente interés en el desarrollo de materiales alternativos más eficientes y sostenibles. Entre ellos, los compuestos de polímero reforzado con fibra han demostrado ser una opción atractiva, especialmente aquellos basados en fibras naturales y biopolímeros (Dittenber y GangaRao, 2012). En comparación con los materiales de construcción convencionales, los materiales compuestos sintéticos derivados del petróleo ofrecen ventajas como mayor resistencia y rigidez en relación con su peso, mayor durabilidad, resistencia a la corrosión y a agentes agresivos como el fuego y los ácidos, además de una vida útil prolongada y menores costos de mantenimiento (Dittenber y GangaRao, 2012).

No obstante, la incorporación de fibras naturales en los compuestos poliméricos ha ganado relevancia debido a sus beneficios económicos y ambientales. Los materiales compuestos reforzados con fibra natural combinan la matriz polimérica con fibras vegetales, animales o minerales, proporcionando materiales más accesibles, livianos y biodegradables. A diferencia de los materiales compuestos sintéticos, los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son más fáciles de manejar, poseen buenas propiedades de aislamiento térmico y representan una opción viable para la fabricación de componentes estructurales sostenibles (Brouwer, 2000).

El interés en los materiales compuestos con fibra natural se debe a su capacidad para reducir el peso de los materiales sin comprometer su resistencia, lo que los hace ideales para aplicaciones en sectores como la industria automotriz, aeroespacial y la fabricación de equipos deportivos. Su menor peso también contribuye a mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de combustible y mejorar el rendimiento (Maiti y col., 2022).

Las fibras naturales han sido utilizadas por la humanidad durante milenios en diversas aplicaciones, desde textiles hasta construcción. Su impacto ambiental reducido en comparación con las fibras sintéticas ha impulsado su creciente adopción en múltiples industrias. Además, al ser

biodegradables, ayudan a reducir los desechos y la contaminación, al tiempo que promueven economías locales y preservan prácticas agrícolas tradicionales (Duc et al., 2014; Maiti et al., 2022).

Dentro de las fibras naturales más utilizadas en materiales compuestos, destacan aquellas de origen vegetal, como el agave sisalana, el lino, el bambú y el yute, debido a sus propiedades mecánicas favorables y su disponibilidad comercial (Nurazzi y col., 2021). La combinación de estas fibras con resinas poliméricas permite la obtención de materiales con características únicas, que incluyen alta resistencia mecánica, sostenibilidad ambiental y viabilidad para diversas aplicaciones en ingeniería (Seid y Adimass, 2024).

Uno de los aspectos más importantes en la evaluación de los materiales compuestos con fibra natural es su resistencia al impacto, ya que determina su capacidad para soportar cargas dinámicas o golpes sin fracturarse. Este parámetro es crucial en aplicaciones estructurales que requieren alta tenacidad, como la industria aeroespacial, los equipos de protección y los componentes automotrices (Yang y col., 2017).

Investigaciones recientes han puesto especial énfasis en los compuestos de fibra natural con matriz epoxi, destacando su facilidad de fabricación, eficiencia en el curado, alta resistencia al impacto y menor contracción durante el procesamiento. De igual manera, diversos estudios han demostrado que la incorporación de fibras naturales y otros aditivos en la matriz epoxi mejora considerablemente su resistencia mecánica y su comportamiento ante impactos (Reis y col., 2021).

El epoxi, como material de matriz, ofrece buenas propiedades de resistencia al impacto gracias a su estructura reticulada, además de presentar alta resistencia a la abrasión y buena estabilidad frente a la humedad (Abdellaoui y col., 2019). Factores como el contenido de fibra, su longitud, los tratamientos de superficie y la disposición en capas influyen significativamente en las propiedades finales del material compuesto. Por ello, el desarrollo de compuestos híbridos de epoxi con fibras naturales ha sido objeto de múltiples estudios comparativos para evaluar su desempeño y su viabilidad en distintas aplicaciones estructurales (Patel y col., 2023)

2.2. Fibra de carbón

El inicio oficial de la fabricación de fibras sintéticas de carbón se produjo en 1886 tras la fundación de la National Carbon Company, en Cleveland, Ohio. Tras el descubrimiento de la electricidad, fue necesario obtener una fibra capaz de actuar como conductora en la primera bombilla incandescente. Para producir estas fibras, Thomas Edison utilizó algodón y bambú, horneándolos a altas temperaturas hasta que se carbonizaron, obteniendo así las primeras fibras de carbón. Cuando

terminó la Segunda Guerra Mundial, Union Carbide buscaba reemplazar el alambre de tungsteno para los tubos de vacío mediante la carbonización de un famoso polímero utilizado en la ropa de época, el rayón. Fue en 1957 que Banebey-Cheney Company fabricó brevemente estopas y esteras de fibra de carbón de algodón y rayón que se utilizaron para aislamiento de alta temperatura. En 1958, Union Carbide presentó a la Fuerza Aérea de EE. UU. una tela de rayón carbonizado capaz de reemplazar la fibra de vidrio utilizada en los cohetes (Bacon y Moses, 2003).

La fibra de carbón se utiliza para la obtención de material compuesto por fibras de 50-10 micras de diámetro, compuestas principalmente por átomos de carbón. Los átomos de carbón están unidos en cristales que están alineados paralelos al eje longitudinal de la fibra (Vera, 2016). Miles de fibras de carbón se retuercen para formar un hilo que se puede usar solo o tejer en una tela como se puede apreciar en la Figura 2.

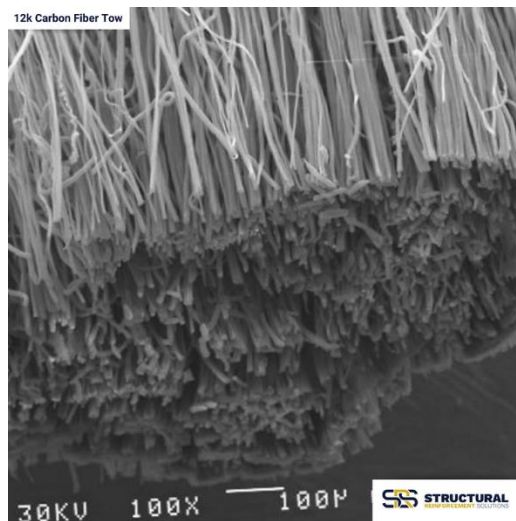


Figura 2. Fibra de carbón (Jones, 2021)

Las fibras de carbón se pueden definir como aquellas fibras que contienen al menos un 92% del peso total de carbono y que puede llegar hasta el 100%. Estos son policristalinos y generalmente tienen un orden bidimensional de átomos de carbono de largo alcance en redes hexagonales planas, pero sin llevar un orden cristalográfico medible en la tercera dirección. (Park, 2015)

2.2.1. Fibras de carbón a partir de Poliacrilonitrilo (PAN)

Las fibras de poliacrilonitrilo se emplean extensamente en la producción de fibras de carbono para aplicaciones industriales de gran envergadura. A pesar de la existencia de otros precursores como la brea y el rayón, las fibras de PAN han acaparado alrededor del 90% del mercado debido a su capacidad para generar fibras de carbono de alto rendimiento y eficacia (Khayyam y col, 2020), de

igual manera, contiene un 68% de carbono en su estructura. El PAN puede obtenerse a partir del acrilonitrilo (AN) utilizando iniciadores comunes, como peróxidos y compuestos azoicos, a través del proceso de polimerización por adición. Este proceso puede realizarse de dos maneras: polimerización en solución o polimerización en suspensión. Se prefiere la polimerización en solución, ya que se lleva a cabo en un disolvente de PAN, lo que permite utilizar la solución de PAN resultante directamente como un aditivo en la hilatura de fibras, una vez que se han eliminado los monómeros que no reaccionaron (Huang, 2009).

2.2.2. Proceso de fabricación y clasificación.

Rendimiento: Las fibras de carbón se pueden clasificar según sus propiedades y/o según las condiciones de procesamiento. En la Tabla 2 se muestra una clasificación de las fibras de carbón en función de la temperatura de tratamiento.

Precursor: Un precursor se obtiene realizando polimerizaciones para obtener consecuentemente un polímero, con el cual se realiza el proceso de hilatura, que da como resultado una fibra precursora.

Las fibras de carbón se fabrican a partir de fibras sintéticas (fibras precursoras) mediante tratamientos de calentamiento y estiramiento. El procesamiento de fibras de carbón de diferentes precursores requiere diferentes condiciones de operación como temperatura o tiempo de estabilización, por mencionar algunas, para obtener resultados según la calidad esperada.

Tabla 2. Clasificación de fibras de carbón (Frank y col, 2017)

Tipo de fibra de carbón basado en PAN	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad de la resistencia (GPa)
Módulo elástico bajo	>3500	<200
Módulo elástico estándar	>2500	200-280
Módulo elástico intermedio	>3500	280-350
Módulo elástico alto	>2500	350-600
Módulo elástico ultra alto	>2500	>600

Los materiales precursores de fibra de carbón son importantes porque la combinación de diversas propiedades y comportamientos (mecánicos, físicos y químicos) en las fibras de carbón dependen de la dureza de los materiales precursores de partida (Mirdehghan, 2021). Las fibras de carbón generalmente se sintetizan mediante pirólisis controlada de las fibras precursoras estabilizadas térmicamente. Para fabricar fibras de carbón, primero se obtiene una fibra precursora a partir de una solución o un polímero fundido. Luego, la fibra precursora se trata térmicamente para hacerla infusible. Finalmente, la fibra infusible se somete a altas temperaturas para convertirla en fibra de carbón.

El primer paso, el hilado, es el proceso de crear la fibra precursora. La fibra precursora puede estar hecha de diferentes materiales, como PAN, rayón o fibra de carbón regenerada. La fibra precursora puede ser de forma circular o hueca. El segundo paso, la estabilización, es el proceso de hacer que la fibra precursora sea infusible. Esto se hace calentando la fibra precursora a una temperatura de 200 a 300 °C. La estabilización ayuda a eliminar los grupos químicos que podrían causar que la fibra se queme. El tercer paso, la carbonización, es el proceso de convertir la fibra precursora en fibra de carbono. Esto se hace calentando la fibra precursora a una temperatura de 1000°C a 2000 °C. La carbonización ayuda a eliminar los átomos de hidrógeno y oxígeno de la fibra precursora, dejando solo carbono (Alcalá-Sánchez, 2016).

La facilidad de la estabilización depende de la estructura de la fibra precursora. Las fibras precursoras con una alta orientación molecular y una forma de sección transversal circular son más fáciles de estabilizar, porque la estructura afecta la distribución de los grupos químicos en la fibra. Las fibras precursoras con una alta orientación molecular tienen una mayor densidad de grupos químicos en la superficie de la fibra, lo cual hace que la eliminación de los grupos químicos sea más fácil y uniforme.

La composición de la solución polimérica y las condiciones de síntesis del polímero afectan las propiedades de la fibra precursora, esto debido a que de esta solución dependerán las propiedades posteriores de la fibra de carbón, como su peso molecular, densidad, por mencionar algunas (Frank y col., 2012).

2.2.3. Propiedades de las fibras de carbón

Las fibras de carbón generalmente tienen buenas propiedades de tenacidad, bajas densidades y altas estabilidades térmicas y químicas considerando la falta de agentes oxidantes, de igual manera, propiedades térmicas, conductividades eléctricas y una excelente resistencia a la fluencia. A menudo

se utilizan ampliamente en compuestos en forma de textiles tejidos, pre-impregnados, fibras continuas y fibras cortadas. Las piezas compuestas se pueden producir mediante bobinado de filamentos, bobinado de cinta, moldeo por compresión, embolsado al vacío, moldeo líquido y moldeo por inyección (Park, 2015). Las fibras de carbón son importantes materiales de refuerzo para compuestos de alto rendimiento, ya que reducen el peso de los componentes estructurales y la huella de carbono.

2.2.4. Aplicaciones de fibras de carbón

La aplicación de las fibras de carbón se deriva principalmente de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas, y entre las más de 200 aplicaciones se muestran en la Tabla 3 algunas de las principales y su respectivo uso alrededor del mundo:

Tabla 3. Consumo mundial de fibra de carbón en toneladas (X. Huang, 2009)

	1999 (toneladas)	2004 (toneladas)	2006 (toneladas)	2008 (toneladas)	2010 (toneladas)
Aeroespacial	4,000	5,600	6,500	7,500	9,800
Industrial	8,100	11,400	12,800	15,600	17,500
Artículos deportivos	4,500	4,900	5,900	6,700	6,900
Total	16,600	21,900	25,200	29,800	34,200

2.2.5. Hilatura en húmedo

Como se mencionó anteriormente, un paso indispensable para la obtención de fibra precursora de fibra de carbón es el proceso de hilatura o extrusión, el cual es un proceso a partir de una solución polimérica. La solución polimérica se bombea a través de una boquilla sumergida en un baño líquido que contiene un coagulante, llamado baño de coagulación. El coagulante hace que la solución polimérica se solidifique, formando filamentos delgados. Los filamentos se extraen del baño y se someten a tratamientos de estiraje, lavado y secado (Alcalá-Sánchez, 2016).

El proceso de hilatura en húmedo se puede dividir en las siguientes etapas:

- Preparación de la solución polimérica: La solución polimérica se prepara disolviendo el polímero precursor en un solvente afín a este.

- **Bombeo de la solución polimérica:** La solución polimérica se bombea a través de una boquilla con ayuda de un compresor para controlar la presión y así dosificar la cantidad de solución polimérica que sale por los orificios de la boquilla.
- **Coagulación:** Se hace la coagulación del polímero en un baño donde se tiene disolvente a una concentración determinada.
- **Extracción de los filamentos:** Los filamentos se extraen del baño de coagulación.
- **Estiraje:** Durante todo el proceso de hilatura, se hace un estiraje de la fibra, la cual va desde que sale del baño de coagulación hasta el lavado o secado final, según sea el caso.
- **Lavado:** La fibra pasa a través de diferentes baños de lavado a una temperatura que este entre los 0°C hasta los 50°C, para así retirar el exceso de solvente que queda impregnado en la fibra, logrando así que la fibra final sea lo más libre de impurezas posibles.
- **Secado:** Una vez terminado el proceso de lavado y estiraje, se procede a secar la fibra en planchas a una temperatura menor a los 100°C para así evitar la degradación del polímero.

El baño de coagulación contiene un coagulante, que es una sustancia que hace que la solución polimérica se solidifique. El coagulante puede ser una mezcla de un solvente con un no-solvente. El solvente es el líquido en el que se disuelve el polímero. El no-solvente es un líquido que no disuelve el polímero

2.2.6. Modificación superficial de la fibra de carbón

La modificación superficial de la fibra de carbón busca mejorar su interacción con la matriz polimérica mediante tratamientos que aumentan su energía superficial. Estos procesos mejoran la adhesión, fortalecen la interfaz fibra-matriz y contribuyen al desempeño mecánico del material compuesto.

2.2.6.1. Métodos convencionales

Vedrtnam y Sharma (2019) propusieron una clasificación muy completa de los métodos de modificación superficial de fibras de carbono en 5 categorías principales:

1. Métodos húmedos:

- **Sizing:** aplicación de agentes de recubrimiento polimérico que protegen la superficie de la fibra.
- **Tratamiento electroquímico:** oxidación anódica mediante electrólisis en soluciones ácidas para introducir grupos oxigenados.

- Tratamiento con ácidos: oxidación en medio líquido con ácidos fuertes para crear grupos funcionales polares.

2. Métodos secos:

- Plasma: modificación mediante plasmas fríos a baja presión para limpiar/activar la superficie.
- Térmico: calentamiento a altas temperaturas en atmósferas controladas.
- Irradiación de alta energía: uso de haz de electrones o rayos gamma para inducir cambios químicos.

3. Uso de nanomateriales:

- Decoración de la superficie con CNTs, ZnO, TiO₂, SiO₂, SiC u óxido de grafeno para mejorar propiedades.

4. Métodos oxidativos:

- Oxidación con ácidos, gases o plasma para crear grupos funcionales polares.

5. Métodos no oxidativos:

- Deposición de carbono pirolítico para formar recubrimientos protectores.
- Polimerización por plasma para depositar películas poliméricas delgadas.
- Formación de whiskers de carbono para aumentar área superficial.

Otros métodos pueden ser, recubrimiento, oxidación, tratamiento con plasma e injerto. Este último es el método más destacado ya que permite unir especies poliméricas a la superficie de la fibra de carbono con precisión, mejorando así la rugosidad superficial y las propiedades mecánicas de la interfaz en los compuestos (Pulidindi y Gedanken, 2023)(Raphael y col., 2018)

Naito (2016) estudió el efecto de diversas modificaciones superficiales de fibras de carbono (injertos, recubrimientos poliméricos y otros métodos híbridos) sobre las propiedades de tracción. Encontró una relación lineal entre el módulo de Weibull y la resistencia promedio a la tracción para todas las fibras modificadas. Las modificaciones híbridas produjeron los mayores aumentos en estas propiedades.

2.2.6.2. Funcionalización

La funcionalización de materiales, un proceso fundamental en la ingeniería de materiales ha surgido como una estrategia altamente versátil para modificar y potenciar las propiedades de diversos sustratos. Este enfoque implica la introducción controlada de grupos químicos o enlaces en la superficie de los materiales, lo que posibilita la adaptación de sus características físicas y químicas para aplicaciones específicas.

Lo más importante de esta técnica radica en la alteración de nanoestructuras, donde la funcionalización se emplea con el propósito de ajustar propiedades tales como la reactividad química, la afinidad superficial, la conductividad eléctrica y la capacidad de interacción con otros materiales. La amplitud de las técnicas de funcionalización, que comprenden desde la química superficial hasta la deposición de capas y la modificación bioquímica, abre un abanico de posibilidades para realizar ajustes a medida.

El proceso para la funcionalización consiste en impregnar de un agente funcionalizante a la fibra, ya sea de forma directa o mediante una solución líquida que contenga el agente. La funcionalización se puede realizar en diferentes etapas del proceso.

Esta técnica es utilizada en diversos ámbitos donde se muestran resultados muy importante, por mencionar la nanomedicina, donde la funcionalización de nanopartículas ha facilitado la administración específica de fármacos y ha mejorado la biocompatibilidad (Chen y col, 2013). En el campo de la nanoelectrónica, la funcionalización de nanotubos de carbono se revela como un aspecto crucial para optimizar la conductividad y la interacción con sustratos (Bao y col, 2008). En la Figura 3 se puede apreciar la diferencia entre una fibra de carbón sin modificación superficial (a) y con modificación superficial por ácido nítrico (b).

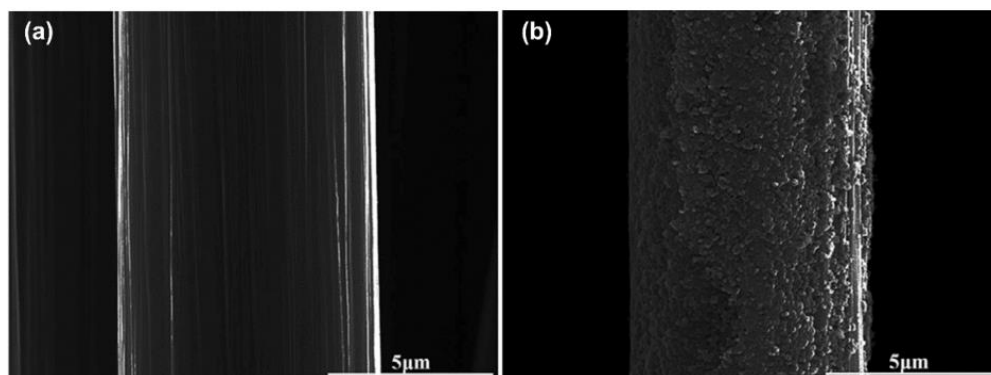


Figura 3. SEM de fibra de carbón (a) sin tratamiento (b) con tratamiento (Wu y col, 2017)

2.3. Fibras naturales

Las fibras naturales son materiales orgánicos derivados de fuentes biológicas, que se obtienen principalmente de plantas, animales y minerales que se caracterizan por ser renovables y biodegradables, lo que las convierte en una opción sostenible desde una perspectiva ecológica. Estas fibras se utilizan en una variedad de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como la resistencia, flexibilidad y bajo impacto ambiental.

Desde el punto de vista estructural, las fibras naturales están compuestas principalmente por compuestos orgánicos como la celulosa, hemicelulosa, lignina y proteínas, dependiendo de su origen. La composición y la estructura interna de las fibras naturales varían según la especie de la que provienen, lo que influye en sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas. Por mencionar algunas, las fibras vegetales tienen una mayor proporción de celulosa, lo que les otorga una mayor rigidez, mientras que las fibras de origen proteico pueden ser más flexibles y ligeras.

Las fibras naturales han sido utilizadas a lo largo de la historia en la fabricación de diversos productos, desde textiles hasta materiales de construcción y refuerzo. Con el aumento de la conciencia sobre la sostenibilidad y la necesidad de alternativas a los materiales sintéticos, el interés por las fibras naturales ha resurgido en los últimos años. Este resurgimiento se debe a sus ventajas, como la menor generación de residuos tóxicos y el consumo reducido de energía en su producción en comparación con las fibras sintéticas.

En la investigación y desarrollo de materiales compuestos, las fibras naturales han demostrado un gran potencial, especialmente por su bajo costo y su capacidad para ser tratadas y reforzadas para mejorar sus propiedades. En particular, las fibras naturales se están explorando para su uso en materiales compuestos de alto rendimiento, que podrían ofrecer soluciones sostenibles en áreas como la construcción, la automoción y la aeroespacial.

2.3.1. Clasificación de fibras naturales

Las fibras naturales son materiales derivados de fuentes vegetales, animales o minerales que, tras su procesamiento, pueden convertirse en hilos, cuerdas, o ser utilizadas en la fabricación de telas no tejidas. Además, pueden emplearse en la producción de papel y otros productos. Existen miles de tipos de fibras naturales disponibles en la naturaleza, y su potencial para ser incorporadas en compuestos ha captado la atención de numerosos investigadores, quienes se enfocan en desarrollar y mejorar sus propiedades. Las fibras naturales se pueden clasificar según su origen, y cada tipo ofrece propiedades únicas que se aprovechan en diversas aplicaciones industriales.

a) Fibras de origen vegetal: Estas fibras son predominantemente celulósicas y se extraen de distintas partes de las plantas, como semillas, hojas, tallos, frutas o la corteza que rodea el tallo de la planta. Las fibras vegetales se agrupan según su origen y uso:

Fibras de semilla: Se obtienen de las semillas o de las cáscaras que las rodean. Un ejemplo común es el algodón, que es ampliamente utilizado en la industria textil.

Fibras de hoja: Proviene de las hojas de las plantas, como el agave sisalana, el agave, el abacá, el henequén y la fibra de piña.

Fibras de piel o basto (liberiana): Se extraen de la corteza que rodea el tallo de la planta. Estas fibras tienen una alta resistencia a la tracción, lo que las hace ideales para aplicaciones como embalajes, telas, hilos duraderos y papel. Ejemplos incluyen el lino, el yute, el plátano, el cáñamo, el kenaf, el ramio, el ratán, las fibras de vid, la fibra de soja y las fibras de plátano.

Fibras de fruto: Proviene de los frutos de las plantas, siendo la fibra de coco un ejemplo destacado.

Fibras de tallo: Se encuentran en los tallos de plantas como la paja de trigo, arroz, cebada, maíz, centeno y avena.

Fibras de caña, pasto y junco: Se recogen de su fuente natural, como el bambú, el bagazo y el sabai.

b) Fibras de origen animal: Estas fibras son proteicas y se extraen de diversas especies animales. Algunas de las más conocidas incluyen la lana, la seda y el pelo de animales como el caballo, el camello o el alpaca.

c) Fibras de origen mineral: Se encuentran en la naturaleza y, en algunos casos, requieren una ligera modificación. Las fibras minerales incluyen el asbesto, las fibras cerámicas como las de vidrio y las fibras metálicas como las de aluminio.

2.3.2. Propiedades y aplicaciones de fibras naturales

El uso de fibras naturales en la fabricación de textiles es anterior a la escritura. Entre las primeras evidencias arqueológicas se encuentran prendas de lino y lana descubiertas en antiguos asentamientos lacustres suizos, que datan de los siglos VII y VI a. C. Desde tiempos prehistóricos, diversas fibras vegetales fueron empleadas con este propósito. Se considera que el cáñamo, una de

las primeras plantas cultivadas para obtener fibras, surgió en el sudeste asiático y más tarde se expandió a China, donde su cultivo ya estaba documentado en el 4500 a. C (Thapliyal y col., 2023)

En Egipto, el hilado y tejido del lino alcanzaron un alto grado de perfección alrededor del 3400 a. C., lo que indica que su cultivo comenzó mucho antes. Por su parte, la India cuenta con registros del hilado de algodón que se remontan al 3000 a. C. Mientras tanto, en China, una cultura altamente desarrollada dio origen a la producción de seda y al perfeccionamiento de la sericultura, la cría de gusanos de seda para la obtención de seda cruda, con evidencia de estas prácticas desde el 264 a. C. (Britannica, s.f.).

Las fibras naturales son uno de los materiales más inofensivos para el medio ambiente, superando a la fibra sintética en muchos aspectos (Sanjay y col., 2016). Las fibras naturales tienen un amplio rango de aplicaciones en diversas industrias debido a sus propiedades mecánicas y sostenibles. Se han utilizado en la fabricación de materiales estructurales y no estructurales, componentes automotrices, geotextiles, empaques biodegradables, productos moldeados, filtros y materiales absorbentes, además de combinarse con otros compuestos para mejorar sus características (Chandramohan y Bharanichandar, 2014).

Las fibras de algodón ofrecen mayor resistencia al impacto, pero menor rigidez y resistencia a la tracción, lo que las hace adecuadas para componentes expuestos a golpes, como piezas interiores de automóviles o cascos de seguridad. La combinación de fibras, como la estopa y el algodón, permite aprovechar las ventajas de ambas, logrando compuestos con buenas propiedades mecánicas tanto en tracción como en resistencia al impacto. Estos materiales se han incorporado con éxito en la industria automotriz, donde reemplazan paneles interiores y cojines de asientos que anteriormente eran fabricados con fibra de vidrio o espumas poliméricas (Sanjay y col., 2016).

Además de las fibras vegetales, las fibras de origen animal han surgido como una alternativa viable en la producción de materiales compuestos biodegradables con aplicaciones biomédicas y ortopédicas. Un ejemplo es la fibra de seda, ampliamente utilizada en suturas y otros dispositivos médicos debido a su biocompatibilidad y capacidad de reabsorción en el organismo (Sanjay y col., 2016).

En la industria textil, las fibras naturales como el algodón, el lino, la lana y el cáñamo se emplean en la confección de ropa, accesorios y productos para el hogar. En particular, el auge de la moda sostenible ha incentivado el desarrollo de prendas ecológicas que reducen la contaminación y promueven el comercio justo (Cheung y col., 2009).

En el sector automotriz, estas fibras se utilizan como refuerzos en biocompuestos para fabricar piezas más ligeras y resistentes, mejorando la eficiencia del combustible y reduciendo la huella de carbono de los vehículos. Fabricantes de automóviles han incorporado materiales como el lino, el kenaf y el coco en tableros, paneles de puertas y revestimientos internos (Chandramohan y Bharanichandar, 2014).

En el ámbito de la construcción, las fibras naturales se emplean en materiales aislantes térmicos y acústicos, proporcionando soluciones sostenibles para edificaciones ecológicas. Productos a base de fibras de celulosa, cáñamo o lana de oveja ofrecen un excelente rendimiento sin los impactos negativos de los aislantes sintéticos (Yousif y col., 2012).

Asimismo, en el sector del embalaje, las fibras naturales han cobrado relevancia como alternativa a los plásticos de un solo uso. Materiales como el papel reciclado, las fibras de bambú y el bagazo de caña de azúcar se utilizan para fabricar envases biodegradables y compostables, reduciendo la generación de residuos y la contaminación ambiental (Yousif y col., 2012).

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han cobrado gran relevancia como alternativa a los materiales tradicionales debido a su menor impacto ambiental y a la posibilidad de obtener estructuras ligeras con buenas propiedades mecánicas. Estos compuestos combinan fibras de origen vegetal con matrices poliméricas, permitiendo el desarrollo de materiales biodegradables y sostenibles con aplicaciones en infraestructura, construcción y elementos estructurales (Puglia y col., 2005).

El uso de fibras naturales en materiales compuestos ha demostrado ser una opción viable para la fabricación de vigas, paneles, techos y otros elementos portantes. La incorporación de fibras como lino, cáñamo, agave sisalana y yute en resinas derivadas de aceites vegetales ha permitido mejorar la resistencia a la tracción y la rigidez de los compuestos. Sin embargo, algunas fibras presentan menor resistencia al impacto, lo que restringe su aplicación a estructuras donde la exposición a esfuerzos dinámicos es limitada (Koronis y col., 2013).

La combinación de distintas fibras en un mismo material compuesto ha sido una estrategia clave para equilibrar sus propiedades mecánicas y ampliar su rango de aplicación. Por ejemplo, la mezcla de fibras rígidas como la estopa con fibras más flexibles como el algodón permite desarrollar compuestos con una mejor combinación de resistencia y absorción de impacto. Estos materiales pueden ser empleados en tableros estructurales, mobiliario y elementos de soporte en edificaciones y otras aplicaciones de infraestructura (Sanjay y col., 2015).

Además de su resistencia mecánica, los compuestos de fibras naturales ofrecen ventajas como su capacidad de aislamiento térmico y acústico, lo que los hace adecuados para su uso en paneles divisorios y sistemas constructivos sustentables. La implementación de estos materiales ha abierto nuevas oportunidades tanto en la investigación como en la industria, impulsando el desarrollo de biocompuestos con un buen desempeño y una menor huella ambiental (Thapliyal y col., 2023). En la Tabla 4 se pueden observar algunas fibras naturales con sus respectivas aplicaciones.

Tabla 4. Lista de fibras naturales y sus aplicaciones (Khan y col., 2024)

Fibra natural	Propiedades	Aplicaciones	Referencia
Algodón	Suave, absorbente.	Ropa, toallas, diversos textiles.	(Kozłowski y Mackiewicz-Talarczyk, 2020)
Lino	Resistente, duradero.	Ropa de alta calidad, manteles, ropa de verano.	(Daria y col., 2020)
Cáñamo	Resistente, duradero, resistente a los rayos UV.	Ropa casual, accesorios.	(Khan y col., 2018)
Yute	Áspero, resistente, biodegradable.	Sacos, bolsas, alfombras, geotextiles.	(Kicińska-Jakubowska y col., 2012)
Agave sisalana	Rígido, resistente, resistente a la abrasión.	Cuerdas, cordeles, alfombras, textiles agrícolas.	(Miller, 2018)

Ramio	Resistente, duradero, resistente al moho.	Ropa, redes de pesca.	(Mortazavi y Moghadam, 2009)
Fibra de coco	Ligera, resistente, resistencia a la humedad.	Geotextiles, control de erosión, colchones, tapetes.	(Azman y col., 2021)
Bambú	Suave, transpirable, antimicrobiano.	Ropa, toallas.	(Fuqua y col., 2012)
Fibra de piña	Fina, sedosa.	Ropa, accesorios.	(Todor y col., 2018)
Abacá	Resistente, flexible, resistente al agua salada.	Cuerdas, cordajes, textiles especializados.	(La Rosa y Grammatikos, 2019)

2.3.3. Modificación superficial de las fibras naturales

El tratamiento de las fibras naturales es un paso fundamental en la fabricación de materiales compuestos, ya que influye directamente en su compatibilidad con la matriz polimérica y en sus propiedades finales. La calidad de la fibra natural puede verse afectada por diversos procedimientos de extracción y tratamientos superficiales, los cuales buscan mejorar la adhesión fibra-matriz, reducir la absorción de humedad y optimizar el rendimiento mecánico del material compuesto (Jagadeesh y col., 2021). Dado que las fibras naturales poseen una alta cantidad de grupos hidroxilo en su estructura, presentan una afinidad intrínseca por la humedad, lo que puede afectar negativamente la estabilidad y la durabilidad del compuesto (Bledzki y col., 2010). Para contrarrestar este efecto, se emplean tratamientos físicos, químicos y enzimáticos, los cuales modifican la morfología y composición superficial de la fibra, promoviendo una mejor interacción con la matriz polimérica (Mohanty y col., 2005). La selección del tratamiento adecuado depende de diversos factores, como

la naturaleza de la fibra, el tipo de matriz y las condiciones de procesamiento, lo que permite mejorar el desempeño de los materiales compuestos en aplicaciones estructurales y funcionales. Algunos de los tratamientos más utilizados se mencionan a continuación.

a) Acetilación

El tratamiento de acetilación es una modificación química aplicada a fibras naturales con el objetivo de reducir su absorción de humedad, mejorar su estabilidad y mejorar su interacción con matrices poliméricas en materiales compuestos. Este proceso se basa en la reacción de los grupos hidroxilo de la celulosa con compuestos como el anhídrido acético o el acetato de vinilo, lo que da lugar a la incorporación de grupos acetilo en la estructura de la fibra (Rowell, 1983).

Este cambio químico disminuye la afinidad de la fibra por el agua, lo que ayuda a minimizar su hinchamiento y a prevenir la pérdida de propiedades mecánicas en ambientes húmedos. Además, la modificación superficial inducida por la acetilación favorece la adhesión con matrices poliméricas hidrofóbicas, como poliolefinas y resinas termoestables, lo que contribuye a una transferencia de carga más eficiente dentro del material compuesto (Hill y col., 1998).

Las fibras lignocelulósicas, como el lino, el cáñamo y el bagazo de caña, han mostrado mejoras significativas en su resistencia térmica y su durabilidad tras ser sometidas a este tratamiento. Por otra parte, el grado de acetilación debe controlarse cuidadosamente, ya que una modificación excesiva podría debilitar la fibra y afectar negativamente sus propiedades mecánicas (Faruk y col., 2014).

b) Benzoilación

La benzoilación es un tratamiento químico utilizado para mejorar la compatibilidad de las fibras naturales con matrices poliméricas, reduciendo su absorción de humedad y mejorando su estabilidad en materiales compuestos. Este proceso implica la reacción de los grupos hidroxilo de la celulosa con cloruro de benzoilo, lo que genera una superficie más hidrofóbica y facilita la adhesión con polímeros como las poliolefinas. Como resultado, el material compuesto presenta una mejor resistencia mecánica y una menor susceptibilidad a la degradación en ambientes húmedos (Paul y col., 2003)

El tratamiento de benzoilación ha demostrado ser particularmente efectivo en fibras lignocelulósicas como el lino, el yute y el bagazo de caña. Sin embargo, su aplicación requiere un control preciso, ya que el uso de cloruro de benzoilo puede generar subproductos ácidos que deben

ser eliminados para evitar efectos adversos en el compuesto final. Se suele sugerir la combinación de la benzoilación con un pretratamiento alcalino mejora aún más la adhesión interfacial y la dispersión de las fibras en la matriz, resultando en materiales compuestos con mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad (Sheeba y col., 2023).

c) Permanganato de potasio

El tratamiento con permanganato es una modificación química utilizada para mejorar la adhesión interfacial entre las fibras naturales y las matrices poliméricas en materiales compuestos. Este proceso implica la aplicación de una solución de permanganato de potasio en distintas concentraciones, generalmente después de un pretratamiento alcalino con hidróxido de sodio para facilitar la reacción (Sreekala y col., 2002)

Durante el tratamiento, el permanganato de potasio reacciona con la celulosa de la fibra, generando iones y radicales libres en la superficie. Estos radicales pueden inducir procesos de copolimerización por injerto, donde los altamente reactivos iones Mn^{3+} favorecen la formación de enlaces químicos con la matriz polimérica, mejorando la compatibilidad entre ambos componentes (Wallenberger y Weston, 2004). Además, este tratamiento modifica la energía superficial de la fibra, reduciendo su hidrofobicidad y aumentando su interacción con la resina, lo que da como resultado materiales compuestos con mejores propiedades mecánicas y estabilidad en condiciones ambientales adversas (Joseph y col., 1999).

d) Silanización

El tratamiento con silano actúa como agente de acoplamiento, estableciendo un enlace químico estable entre la fibra y la resina mediante la formación de un puente de siloxano (Kabir y col., 2012). Esta modificación superficial mejora la adhesión interfacial, lo que resulta en una mejor transferencia de esfuerzos y en una mayor resistencia mecánica del material final (Seisa y col., 2022).

El proceso de tratamiento ocurre en tres etapas principales: hidrólisis, condensación y formación de enlaces. Inicialmente, los grupos alcoxi del silano reaccionan con la humedad, generando silanoles. Posteriormente, estos compuestos se condensan con los grupos hidroxilo de la celulosa presentes en la fibra, estableciendo una unión química fuerte. Finalmente, el otro extremo del silano se enlaza con la matriz polimérica, formando una cadena de hidrocarburos que reduce la absorción de agua y previene el hinchamiento de la fibra (Khan y col., 2024).

e) Alcalinizado

El tratamiento alcalino, también conocido como mercerización, es uno de los métodos más utilizados para modificar fibras naturales con el fin de mejorar su compatibilidad con matrices poliméricas, tanto termoplásticas como termoestables. Este procedimiento implica la inmersión de las fibras en una solución de hidróxido de sodio durante un tiempo determinado, lo que genera cambios estructurales significativos. (Li y col., 2007). Entre los principales efectos de este tratamiento se encuentran la eliminación de lignina, ceras y aceites superficiales, así como la despolimerización parcial de la celulosa, lo que expone cristalitas más cortos y mejora la adhesión interfacial con la matriz (Magagula y col., 2022).

A nivel estructural, la alcalinización rompe los enlaces de hidrógeno en la red polimérica de la celulosa, lo que genera un aumento en la rugosidad superficial de la fibra y, en consecuencia, una mejor interacción mecánica con la resina (Martínez-Suárez y col., 2021). En conjunto, estos cambios mejoran las propiedades mecánicas del material compuesto, mejorando su resistencia a la tracción, su módulo elástico y su estabilidad en ambientes húmedos. Dependiendo de las condiciones del tratamiento, como la concentración de hidróxido y el tiempo de inmersión, la intensidad de estas modificaciones puede variar, permitiendo ajustar las propiedades finales del material según los requerimientos específicos de su aplicación (Khan y col., 2024).

2.4. Caracterización de la zona interfacial en material compuesto

La resistencia al corte interfacial es un parámetro clave en la caracterización de la interfaz fibra/matriz en materiales compuestos. Su importancia radica en que la unión interfacial influye directamente en la transferencia de carga entre la matriz y la fibra, determinando el desempeño mecánico del material compuesto (Gibson, 2016). Sin embargo, a pesar de su relevancia, no existe un consenso sobre cuál es la mejor técnica para su evaluación, y actualmente no hay un método estandarizado universalmente aceptado.

Las propiedades interfaciales pueden evaluarse mediante técnicas micromecánicas y macromecánicas. Ambas metodologías tienen ventajas y limitaciones, por lo que su selección depende de los objetivos específicos del estudio. Los ensayos micromecánicos miden directamente la resistencia de la interfaz fibra/matriz en microcompuestos formados por fibras individuales o muestras del material compuesto. Dentro de esta categoría, los métodos más utilizados incluyen el ensayo de fragmentación de un solo filamento, en el que se somete a una fibra embebida en la matriz a tracción hasta que se fragmenta en múltiples secciones, lo que permite estimar la resistencia a partir

de la longitud de fragmentación; el pull-out test, donde se extrae una fibra individual desde la matriz y se mide la fuerza necesaria para su extracción, proporcionando una estimación directa de la adhesión interfacial; y la técnica de microgota, que realiza un procedimiento utilizando microgotas de matriz adheridas a una fibra individual (Huang y col., 2021), entre otras.

Los ensayos macromecánicos evalúan la unión interfacial de manera indirecta en muestras representativas del material compuesto. Uno de los ensayos más utilizados en esta categoría es el ensayo de delaminación, en el cual se somete el material compuesto a cargas que inducen la separación de las capas, permitiendo estimar la tenacidad de la interfaz (Kim y Mai, 1998). Sin embargo, aunque los ensayos macromecánicos proporcionan información relevante sobre la resistencia global del material compuesto, su limitación se encuentra en que no permiten evaluar directamente la resistencia a la fractura de la interfaz a nivel microscópico, lo que puede ocultar efectos localizados que afectan la transferencia de carga entre la fibra y la matriz.

Otra técnica utilizada para evaluar la resistencia interfacial es el análisis de imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). A través de esta técnica, es posible medir la longitud de los huecos entre la fibra de refuerzo y la matriz después de realizar ensayos mecánicos. La presencia de huecos y su extensión pueden ser indicativos del nivel de adhesión interfacial, ya que una mayor separación sugiere una deficiente transferencia de carga (Huang y col., 2021). Este análisis visual complementa los ensayos mecánicos y proporciona información adicional sobre los mecanismos de falla en la interfaz.

La resistencia interfacial no depende únicamente de la naturaleza de la fibra y la matriz, sino también de otros factores clave como la compatibilidad química, donde la adhesión interfacial mejora cuando existen enlaces químicos fuertes entre la fibra y la matriz y modificaciones superficiales en la fibra, como tratamientos o recubrimientos, pueden mejorar esta interacción (Kim y Mai, 1998).

2.5. Caracterización de fibras naturales y de carbón

Para evaluar las propiedades de las fibras utilizadas en materiales compuestos, se emplean diversas técnicas de caracterización fisicoquímica y mecánica. Estas técnicas permiten conocer aspectos clave como la resistencia, la morfología y la composición química de las fibras, lo que resulta esencial para su aplicación en materiales de alto rendimiento.

2.5.1. Resistencia a la tracción

Esta propiedad permite evaluar la carga máxima que puede soportar la fibra antes de romperse. Se determina mediante pruebas donde un único filamento es sometido a un esfuerzo axial hasta su punto de fractura siguiendo la norma ASTM D3822 (American Society for Testing and Materials, 2025).

2.5.2. Elongación

A partir de las pruebas de resistencia a la tracción, se permite conocer el alargamiento máximo que puede experimentar una fibra antes de romperse. Se expresa como un porcentaje de la longitud original y es crucial para conocer la flexibilidad del material (American Society for Testing and Materials, 2025).

2.5.3. Módulo de Young

El módulo de Young se obtiene a partir de la pendiente de la región elástica de las gráficas de tensión-deformación. Es una medida de la rigidez de un material y se define como la razón entre el tensión y la deformación unitaria en la zona elástica de la curva tensión-deformación (Wong y col., 2024).

2.5.4. Análisis de gráfica tensión-deformación

Una gráfica de tensión-deformación para fibras refleja su comportamiento mecánico bajo esfuerzo de tracción, obtenida a partir de pruebas de resistencia y elongación. Muestra cómo la fibra responde a la carga, identificando etapas clave: una fase elástica donde recupera su forma al liberar la tensión, una fase plástica con deformaciones irreversibles tras superar el límite elástico y, finalmente, el punto de máxima resistencia seguido de la fractura. A partir de esta curva, se determinan propiedades como la tenacidad y el módulo de elasticidad. El análisis de estas gráficas es crucial para evaluar la calidad y el rendimiento de las fibras en materiales compuestos. (Clyne y Hull, 2019).

2.5.5. Microscopía óptica

La microscopía óptica es una técnica accesible y no destructiva para analizar las fibras naturales y sintéticas. Permite observar la morfología superficial, el diámetro y posibles defectos de las fibras, lo que ayuda a evaluar su calidad y distribución en materiales compuestos. De igual manera, facilita el estudio de los tratamientos superficiales aplicados a las fibras para mejorar su compatibilidad con la matriz.

2.5.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

SEM es una técnica utilizada para analizar la morfología superficial de las fibras con alta resolución y profundidad de campo. Permite observar características como la rugosidad, los defectos superficiales y la interacción fibra-matriz en materiales compuestos. Además, puede emplearse para evaluar el efecto de tratamientos químicos o físicos en las fibras (Huang y col., 2021).

2.5.7. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía FTIR es una técnica utilizada para identificar los grupos funcionales presentes en las fibras y detectar modificaciones químicas antes y después de los tratamientos. (Huang y col., 2021).

2.6. Caracterización de materiales compuestos

En la caracterización de materiales compuestos, diversas técnicas experimentales permiten evaluar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Estas técnicas son fundamentales para comprender el desempeño del material en distintas aplicaciones y optimizar su formulación. A continuación, se describen las principales técnicas empleadas en el estudio de materiales compuestos.

2.6.1. Pruebas de Humedad

Las pruebas de humedad en materiales compuestos son importantes porque la presencia de agua puede afectar significativamente sus propiedades mecánicas, térmicas y de durabilidad. La humedad puede debilitar/incrementar la adhesión entre las fibras y la resina, la resistencia del material y promover la formación de corrosión o degradación. Además, la absorción de agua puede cambiar las dimensiones del material, afectando su desempeño en condiciones de uso real (Sánchez Morales y col., 2024).

2.6.2. SEM

Permite analizar la microestructura de los materiales compuestos, proporcionando información detallada sobre la interacción entre el refuerzo y la matriz. Con esta técnica, es posible identificar defectos, evaluar la adhesión entre los componentes y caracterizar el modo de falla del material.

2.6.3. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es una de las propiedades mecánicas más importantes en materiales compuestos, ya que determina la capacidad del material para soportar cargas antes de su

fractura. Se mide mediante ensayos donde el material es sometido a un esfuerzo axial hasta alcanzar su punto de ruptura (Huang y col., 2021).

2.6.4. Elongación

La elongación mide la capacidad de un material compuesto para deformarse antes de romperse, expresándose como un porcentaje de su longitud original. Se expresa como un porcentaje de la longitud original y es crucial para conocer la flexibilidad del material y ductilidad del material.

2.6.5. Módulo de Young

El módulo de Young es un parámetro fundamental para evaluar la rigidez de un material compuesto donde a mayor valor, menor es la elasticidad del material y se obtiene a partir de la pendiente de la región elástica de la curva tensión-deformación.

2.6.6. Gráficas de tensión-deformación

La gráfica de tensión-deformación es una representación de la respuesta mecánica de un material sometido a esfuerzos de tracción, obtenida a partir de pruebas de resistencia y elongación. En ella se observa cómo el material reacciona ante la carga aplicada, identificando distintas etapas: primero, la región elástica, donde la deformación es reversible; luego, la fase plástica, donde ocurren deformaciones permanentes tras superar el límite elástico; y finalmente, el punto de máxima resistencia seguido de la fractura. Esta información es clave para evaluar propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima y la ductilidad del material. Reportar este tipo de gráfica es fundamental en el análisis de materiales compuestos, ya que permite comparar su desempeño mecánico y determinar su idoneidad para aplicaciones específicas.

2.6.7. Microscopía óptica

La microscopía óptica se emplea para analizar la estructura interna de los materiales compuestos mediante cortes transversales y longitudinales. Esta técnica permite evaluar la distribución del refuerzo dentro de la matriz, la uniformidad del material y la morfología de las fracturas tras pruebas mecánicas.

2.6.8. FTIR

Es una técnica analítica utilizada para caracterizar la composición química de los materiales compuestos y detectar posibles interacciones químicas entre sus componentes. Esta técnica es útil para evaluar cambios en los materiales debido a tratamientos químicos o envejecimiento.

2.7. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una metodología estadística utilizada para la planificación, ejecución, análisis e interpretación de experimentos con el objetivo de evaluar la influencia de diversas variables independientes o factores sobre una o más variables de respuesta. Su aplicación es fundamental en áreas como la ingeniería, la química, la biotecnología y las ciencias de los materiales, donde es necesario optimizar procesos, mejorar productos y comprender fenómenos complejos de manera sistemática y eficiente (Hisam y col., 2024).

Además, permite obtener la máxima cantidad de información con el menor número de ensayos posibles, reduciendo el consumo de recursos y tiempo experimental. A diferencia de los enfoques tradicionales, donde se varía un solo factor a la vez, el diseño de experimentos permite modificar múltiples factores simultáneamente, lo que facilita la identificación de interacciones entre variables y proporciona una visión más integral del sistema estudiado (Hernadewita y col., 2019).

Uno de los principios fundamentales del diseño de experimentos es la aleatorización, que consiste en asignar los tratamientos de manera aleatoria para minimizar el sesgo y reducir la influencia de factores externos no controlados. Además, se emplean repeticiones y bloques para mejorar la precisión de los resultados y disminuir la variabilidad experimental. Los bloques se utilizan cuando existen condiciones experimentales que podrían afectar la respuesta, agrupando las unidades experimentales de manera que la variabilidad interna se reduzca y se obtengan estimaciones más confiables (Hisam y col., 2024).

El análisis de los datos obtenidos en un experimento diseñado se realiza mediante técnicas estadísticas avanzadas, siendo el análisis de varianza (ANOVA) una de las herramientas más utilizadas. El ANOVA permite determinar la significancia estadística de los efectos de los factores y sus interacciones, ayudando a diferenciar si los cambios en la respuesta son consecuencia de la manipulación experimental o simplemente de la variabilidad inherente del sistema. También se pueden emplear modelos de regresión, pruebas de hipótesis y métodos de optimización según los objetivos del estudio (Hisam y col., 2024).

2.7.1. Tipos de diseños experimentales

El diseño de experimentos se puede clasificar en diferentes tipos según su estructura y propósito. Cada tipo de diseño tiene aplicaciones específicas y ventajas dependiendo del problema que se desea abordar.

a) Diseños factoriales

Los diseños factoriales son aquellos en los que se estudian dos o más factores simultáneamente, lo que permite analizar tanto los efectos principales de cada factor como sus posibles interacciones. Estos diseños son ampliamente utilizados en la industria y en la investigación científica, ya que proporcionan una visión más completa del sistema en estudio (Montgomery, 2017).

En un diseño factorial completo, se consideran todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Este tipo de diseño es útil cuando se necesita un análisis exhaustivo de la influencia de cada factor y sus interacciones, pero puede volverse costoso y poco práctico cuando el número de factores aumenta significativamente (Box y col., 2005).

Para reducir el número de ensayos sin perder demasiada información, se utilizan los diseños factoriales fraccionados. En estos, se selecciona solo un subconjunto de todas las combinaciones posibles, permitiendo disminuir los costos y la complejidad del experimento. Sin embargo, es importante considerar que este enfoque puede sacrificar la posibilidad de analizar interacciones de orden superior (Dean y col., 2017).

b) Diseños de bloques aleatorizados

Los diseños de bloques aleatorizados se utilizan cuando existen fuentes de variabilidad no controlables que podrían afectar la respuesta del experimento. En estos casos, los experimentos se agrupan en bloques homogéneos, lo que ayuda a reducir la variabilidad dentro de cada bloque y mejorar la precisión de las comparaciones entre tratamientos (Montgomery, 2017).

c) Diseños de superficie de respuesta

Los diseños de superficie de respuesta se utilizan cuando el objetivo del experimento es optimizar una respuesta y modelar su comportamiento dentro de un rango de valores de los factores. En estos casos, los modelos lineales tradicionales pueden ser insuficientes, y es necesario ajustar ecuaciones polinómicas de segundo orden para describir con mayor precisión la relación entre los factores y la respuesta (Dean y col., 2017).

Dentro de estos diseños, el diseño central compuesto es uno de los más utilizados. Consiste en una combinación de un diseño factorial para evaluar efectos principales e interacciones, puntos axiales para explorar regiones fuera del espacio factorial y repeticiones en el centro del diseño para estimar la variabilidad experimental (Myers y col., 2009).

Otra alternativa dentro de esta metodología es el diseño de Box-Behnken, que no incluye puntos axiales, lo que lo hace más eficiente en términos de experimentos requeridos. Es especialmente útil cuando se busca optimizar un sistema sin explorar valores extremos de los factores, reduciendo costos y minimizando la complejidad experimental (Box y Behnken, 1960).

d) Diseños de mezclas

Los diseños de mezclas se aplican cuando las variables de estudio representan proporciones de una mezcla, asegurando que la suma de los componentes sea constante. Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en formulaciones químicas, farmacéuticas, alimentarias y de materiales poliméricos. A diferencia de los diseños factoriales, en los diseños de mezclas la respuesta del sistema depende de las proporciones relativas de los componentes y no de sus cantidades absolutas. Por esta razón, se emplean modelos de regresión polinómicos específicos para capturar la relación entre los componentes y la respuesta del sistema en estudio (Cornell, 2011).

e) Diseños Taguchi

Los diseños de Taguchi, desarrollados por Gen'ichi Taguchi, están orientados a mejorar la robustez de los sistemas mediante la reducción de la variabilidad en presencia de factores incontrolables. Taguchi introdujo el concepto de arreglos ortogonales, los cuales permiten evaluar múltiples factores con un número reducido de ensayos, asegurando que la información obtenida sea lo más completa posible (Taguchi y col., 2005).

A diferencia de otros enfoques, los diseños de Taguchi se centran en minimizar la sensibilidad de un sistema a factores de ruido, lo que los hace especialmente útiles en procesos industriales donde la variabilidad puede afectar el rendimiento del producto final. Además, en lugar de enfocarse únicamente en la media de la respuesta, Taguchi introduce la razón señal-ruido como un criterio de optimización, maximizando la robustez del sistema en condiciones reales de operación.

3. Metodología

La presente metodología describe las herramientas técnico-científicas definidas para lograr los objetivos, entre las que se encuentran la modificación, caracterización y preparación de materiales compuestos basados en fibras naturales y estabilizadas. Estas etapas buscan evaluar las propiedades individuales de las fibras y su relación con las propiedades finales de los materiales compuestos obtenidos.

3.1. Modificación de la superficie de las fibras

La modificación de la superficie de las fibras es importante para mejorar la interacción entre las fibras y la matriz del material compuesto. Al alterar las propiedades superficiales de las fibras, se facilita una mejor adherencia, lo que contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas y la estabilidad del compuesto final (Majhi y col., 2023).

3.1.1. Funcionalización de fibras de carbón

Para mejorar la compatibilidad de las fibras estabilizadas con la matriz polimérica, se realizaron dos diferentes técnicas de funcionalización, la primera mediante un proceso de sol-gel y otra a través la silanización. Estas técnicas son empleadas ya que pueden favorecer la interacción entre el refuerzo y la matriz y mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto tales como resistencia a la tracción, elongación, módulo de Young, módulo elástico, etc. (Huang y col., 2021). En este trabajo se utilizaron siete fibras precursoras estabilizadas térmicamente para fibra de carbón. Estas fibras fueron desarrolladas en trabajos anteriores y son obtenidas a base de acrilonitrilo con comonomeros de acrilato de metilo y acetato de vinilo.

El método de sol-gel consistió en la formación de una capa delgada de sílice en la superficie de las fibras, aumentando su afinidad con la resina epoxi. Se prepararon dos soluciones-gel, de isopropóxido de titanio y óxido de silicio, añadiéndoles alcohol etílico como solvente y ácido nítrico como catalizador y ajustador de pH. Este tratamiento proporcionó una superficie funcionalizada con grupos silano (Brinker y Scherer, 1990; Verduzco y Medina, 2007). Este método ha sido elegido en este estudio debido a que puede mejorar la adhesión fibra-matriz, incrementando la resistencia mecánica del material compuesto sin comprometer su flexibilidad ni aumentar significativamente su densidad (Saravanan y Dubey, 2020).

Por otro lado, el método de silanización consiste en agregar el grupo funcional silanol (Si-O-H) en la superficie de la fibra a través de una reacción de hidrólisis en un medio acuoso de agentes

de acoplamiento de tipo silano, el cual es capaz de formar enlaces químicos en grupos reactivos de la matriz polimérica (Jiang y col., 2015; Tiscareño y Coronel, 2013). Este método permite incrementar la adhesión entre el refuerzo y la matriz aumentando la resistencia interfacial del material compuesto ya que aumenta la polaridad, humectabilidad y rugosidad de la fibra sin disminuir su resistencia a la tensión (Jiang et al., 2015).

3.1.2. Alcalinización de las fibras naturales

Las fibras naturales de bagazo de agave fueron sometidas a un proceso de modificación superficial para incrementar la rugosidad y así favorecer la interacción con matrices poliméricas.

El proceso consistió en sumergir las fibras en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) al 2% v/v durante 1 hora a temperatura ambiente. Durante este tiempo, la mezcla se mantuvo en constante agitación mediante un agitador magnético para garantizar una exposición uniforme. Posteriormente, las fibras fueron lavadas con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, las fibras se secaron en una estufa a 60 °C durante 24 horas. (Magagula y col., 2022; Martínez Suárez y col., 2021; Sánchez Morales y col., 2024). De acuerdo con la literatura, este método elimina lignina y hemicelulosa de la fibra, lo cual genera superficies con mayor porosidad beneficiando la unión mecánica entre el refuerzo y la matriz (Symington y col., 2009). Además, la eliminación de la hemicelulosa reduce la capacidad de las fibras para absorber humedad, que afecta negativamente a las propiedades mecánicas del material por la formación de enlaces de hidrógeno, donde los grupos hidroxilo abiertos interactúan con las moléculas de agua (Dittenber y GangaRao, 2012). Una de las técnicas utilizadas para la identificación de estos compuestos es mediante FTIR. En el espectro infrarrojo de la fibra, el cambio en la intensidad de absorción de las bandas asociadas a la hemicelulosa y lignina (en el rango de 1941-1315 cm^{-1}) indica la eliminación total o parcial de estos compuestos de la estructura superficial la fibra (Alsafran y col., 2024).

3.2. Caracterización de fibras de carbón y naturales

Se emplearon diferentes técnicas experimentales para caracterizar las fibras estabilizadas y las fibras naturales en relación con sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Entre estas técnicas se incluyen la resistencia a la tracción, que evalúa la capacidad de la fibra para soportar esfuerzos; la elongación, que da información sobre el alargamiento máximo de la fibra antes de su ruptura; la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido (SEM), que son herramientas clave para analizar la estructura y morfología superficial de las fibras, proporcionando una visión más profunda

sobre su calidad y posibles defectos; y FTIR, el cual se utiliza para estudiar los grupos funcionales presentes en las fibras y los cambios químicos derivados de los tratamientos.

3.2.1. Resistencia a la tracción

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de polímeros del Instituto Tecnológico de Aguascalientes como se muestra en la Figura 4. La fibra se coloca sobre una regla de medición para llevar el registro de la longitud que se estira la fibra y el peso adicionado en la parte inferior hasta lograr su ruptura. La resistencia a la tracción se determina con la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde σ es la tensión (resistencia a la tracción) en MPa, F es la fuerza aplicada en Newton y A es el área de la sección transversal en metros cuadrados.

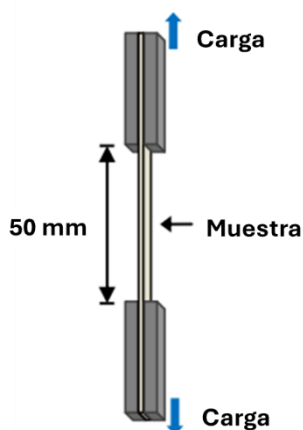


Figura 4. Dispositivo para realizar pruebas de resistencia a la tracción y elongación (Alcalá-Sánchez, 2021)

3.2.2. Elongación

Se expresa como un porcentaje de la longitud original y es crucial para conocer la flexibilidad del material. En la Figura 4 se muestra la prueba realizada. La fórmula para conocer la elongación es la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100$$

donde ε es el porcentaje de deformación, ΔL variación de la longitud en la fibra y L_0 la longitud inicial.

3.2.3. Gráficas de tensión-deformación

Se formularon las gráficas de tensión-deformación a raíz de las pruebas de elongación y resistencia a la tracción, en las cuales se muestra cómo se deforma la fibra conforme se le aplica una carga axial.

3.2.4. Microscopía óptica

Se realizaron cortes transversales y longitudinales de las fibras mediante microscopía óptica con aumentos de 20x a 1000x utilizando un Microscopio digital VXH 6000 del laboratorio de ingeniería mecánica del Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Los cortes transversales permitieron analizar el área transversal de la fibra y su forma, mientras que los cortes longitudinales mostraron la superficie de la fibra y su diámetro.

3.2.5. Módulo de Young

Matemáticamente, se expresa como:

$$E = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

donde E es el módulo de Young en MPa; X_1 , X_2 , Y_1 y Y_2 son los puntos dentro de la zona lineal de la curva.

3.2.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El equipo utilizado para obtener las imágenes fue el ESEM FEI-QUANTA 250 FEG. Esta prueba es importante ya que se puede apreciar si la superficie tendrá un buen anclaje mecánico dependiendo de su porosidad.

3.2.7. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de infrarrojo se obtuvieron a temperatura ambiente con un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet iS10 utilizando un detector DTGS KBr, en el rango de 4000 a 650 cm^{-1} utilizando el accesorio Smart iTRTM ATR y SeZn como elemento ATR con la ayuda del Laboratorio Nacional de Materiales Porosos MatPore Sede Aguascalientes. Esta técnica se utilizó para identificar los grupos funcionales presentes en las fibras y evaluar los cambios químicos tras la alcalinización.

3.3. Preparación de materiales compuestos.

La preparación de materiales compuestos es clave para obtener un material con las propiedades deseadas. En este proceso, se combinan cuidadosamente los refuerzos y la matriz, controlando factores como la proporción y distribución de las fibras. Además, el tratamiento de las fibras y las condiciones de curado son esenciales para garantizar una buena adhesión entre los componentes y mejorar las características mecánicas del material. El proceso de preparación de los materiales compuestos también permite adquirir un conocimiento profundo sobre el comportamiento de los materiales compuestos bajo diferentes condiciones de procesamiento. El análisis de cómo influyen variables como la temperatura, el tipo de refuerzo o el método de curado en el desempeño final del material, contribuye a la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que intervienen en la interacción entre la matriz y el refuerzo. Este conocimiento fortalece el entendimiento teórico de los mecanismos de refuerzo, así como también representa un aporte científico y tecnológico relevante para el diseño de nuevos materiales compuestos más eficientes y sostenibles. Esta sección describe los procedimientos utilizados para preparar los materiales compuestos.

Se prepararon materiales con fibras estabilizadas unidireccionales, fibras naturales cocidas y fibras naturales crudas mediante el método de laminado manual (Alcalá-Sánchez, 2021; Sánchez Morales y col., 2024). Este método de preparación se eligió debido a su bajo costo de fabricación y flexibilidad, ya que, a diferencia de los procesos automatizados, no requiere equipos especializados. Además, permite un control preciso sobre la cantidad de resina aplicada y la orientación de las fibras, lo que facilita la personalización de las propiedades del material final (Xiaochun y col., 2018). Los materiales compuestos se fabricaron bajo la norma ISO 037, utilizando moldes de dimensiones de 120 x 4.73 x 1.32 mm (Figura 5). Las fibras naturales de bagazo de agave, obtenidas de diferentes etapas del proceso de producción del tequila, y las fibras de carbón de composiciones químicas variadas se integraron a las resinas. Para asegurar una distribución uniforme, las fibras fueron colocadas individualmente en los moldes.



Figura 5. Molde para materiales compuestos

Se utilizaron dos sistemas de resinas epoxi. Para facilitar la identificación y diferenciación de los materiales empleados durante el desarrollo de este trabajo, se optó por asignar nombres prácticos a las dos resinas utilizadas: cristalina y opaca. Esta nomenclatura no responde a las características técnicas de las resinas, sino a una designación interna con fines prácticos dentro del proceso experimental.

Ambos tipos de resinas constan de dos componentes (resina y endurecedor) con una relación en peso de 2:1 (resina cristalina) y 1:1 (resina opaca), esto con la finalidad de comparar dos sistemas y conocer si existe una variabilidad significativa al utilizar los mismos refuerzos en sistemas diferentes. Se utilizaron tanto fibras estabilizadas obtenidas en trabajos previos como fibras naturales de bagazo de agave. Actualmente, las fibras de carbón son el principal refuerzo utilizado en materiales compuestos (Jiang y col., 2015), sin embargo, las fibras utilizadas en este trabajo, fibras estabilizadas, presentan un menor grado de pureza en la estructura. El objetivo de utilizar estas fibras es conocer las propiedades físico-mecánicas de un material compuesto elaborado con este refuerzo para determinar si este presenta propiedades altas de resistencia a la tracción y conocer su elongación. Por otro lado, el objetivo de utilizar fibras naturales es comparar las propiedades de los materiales compuestos con otros trabajos de la literatura donde también emplean fibras naturales como refuerzo y determinar si el tratamiento aplicado a estas fibras mejora las propiedades mecánicas del material. Particularmente, se propone el aprovechamiento de fibras residuales de bagazo de agave, un subproducto del proceso del tequila, abundante que usualmente se desecha, generando problemas ambientales. El uso de este residuo como refuerzo en materiales compuestos representa una estrategia sustentable que permite no solo valorizar un desecho, sino también explorar sus propiedades mecánicas con fines tecnológicos. Para este trabajo se utilizaron 7 tipos de fibras estabilizadas con diferente composición química y 2 tipos de fibras naturales de bagazo de agave, obtenidas de diferentes partes de un mismo proceso en la obtención del tequila.

3.4. Caracterización de materiales compuestos

La caracterización de materiales compuestos es esencial para evaluar sus propiedades y desempeño en diversas aplicaciones. Para ello, se utilizan varias técnicas que proporcionan información sobre diferentes aspectos del material. Entre ellas se encuentran la medición de la densidad, que permite conocer la relación entre masa y volumen del compuesto, influyendo en sus características mecánicas. La evaluación de materiales en presencia de humedad, las cuales son cruciales para evaluar el impacto de la absorción de agua en las propiedades del material. Además, la resistencia a la tracción y la elongación ofrecen datos sobre la capacidad del material para soportar

esfuerzos y deformarse sin romperse. La microscopía óptica y SEM permiten observar la microestructura y la interacción entre los componentes del material compuesto. Otras técnicas, como el FTIR, y el cálculo del módulo de Young a partir de las gráficas de tensión-deformación, complementan la caracterización al proporcionar información sobre la rigidez del material y los posibles cambios químicos en sus componentes.

3.4.1. Pruebas de humedad

Las pruebas se llevaron a cabo sumergiendo los materiales compuestos en agua durante 24 horas y determinando la diferencia de pesos mediante una balanza analítica. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_F - m_I}{m_I} * 100$$

donde m_I es la masa del material compuesto antes de la prueba de humedad; m_F es la masa del material compuesto después de la prueba de humedad.

3.4.2. SEM

Se tomaron fotografías SEM en la ruptura del material compuesto, esto con la finalidad de observar a detalle la interacción entre el refuerzo y la matriz del material compuesto, y de esta manera conocer si la falla se dio por falta de adhesión entre ambas partes, rompimiento del refuerzo, rompimiento de la matriz, o en su caso, de ambos. El equipo utilizado para obtener las imágenes fue el ESEM FEI-QUANTA 250 FEG.

3.4.3. Resistencia a la tracción

Se realizaron pruebas en el laboratorio de polímeros del Instituto Tecnológico de Aguascalientes siguiendo una adaptación de la norma ISO 37 (International Organization for Standardization, 2024) para conocer la resistencia a la tracción del material compuesto. El procedimiento que se lleva a cabo es el montar el material compuesto en el dispositivo de prueba, se aplica una fuerza axial colocando peso en la parte inferior del mismo, midiendo la longitud del material a cada adición de peso hasta que se llega a su ruptura, determinando la resistencia del material mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde σ es la tensión (resistencia a la tracción) en MPa, F es la fuerza aplicada en Newton y A es el área de la sección transversal en metros cuadrados.

3.4.4. Elongación

Con esta propiedad se permite conocer el alargamiento máximo que puede experimentar el material compuesto antes de romperse. Se expresa como un porcentaje de la longitud original y es crucial para conocer la flexibilidad del material. En la Figura 6 se muestra la prueba realizada. La expresión matemática para conocer el valor de esta variable es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100$$

donde ε es el porcentaje de deformación, ΔL variación de la longitud en la fibra y L_0 la longitud inicial.

3.4.5. Gráficas de tensión-deformación

La gráfica de tensión-deformación es una representación de la respuesta mecánica de un material sometido a esfuerzos de tracción, obtenida a partir de pruebas de resistencia y elongación. En ella se observa cómo el material reacciona ante la carga aplicada, identificando distintas etapas: primero, la región elástica, donde la deformación es reversible; luego, la fase plástica, donde ocurren deformaciones permanentes tras superar el límite elástico; y finalmente, el punto de máxima resistencia seguido de la fractura. Esta información es clave para evaluar propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima y la ductilidad del material. Reportar este tipo de gráfica es fundamental en el análisis de materiales compuestos, ya que permite comparar su desempeño mecánico y determinar su idoneidad para aplicaciones específicas.

3.4.6. Módulo de Young

El módulo de Young se obtiene a partir de la pendiente de la región elástica de las gráficas de tensión-deformación. Ayuda a conocer la rigidez del material. Matemáticamente, se expresa como:

$$E = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

donde E es el módulo de Young en MPa; X_1 , X_2 , Y_1 y Y_2 son los puntos dentro de la zona lineal de la curva. Esta técnica es fundamental ya que su aplicación está directamente relacionada con esta propiedad.

3.4.7. Microscopía óptica

Se realizaron cortes transversales y longitudinales de los materiales compuestos utilizando microscopía óptica en un Microscopio digital VXH 6000. Los cortes transversales permitieron analizar el área transversal de la ruptura del material, mientras que los cortes longitudinales mostraron la superficie del material y la distribución del refuerzo.

3.4.8. FTIR

Los espectros de infrarrojo se obtuvieron a temperatura ambiente con un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet iS10 utilizando un detector DTGS KBr, en el rango de 4000 a 650 cm^{-1} utilizando el accesorio Smart iTRTM ATR y SeZn como elemento ATR con la ayuda del Laboratorio Nacional de Materiales Porosos MatPore Sede Aguascalientes. Esta técnica es importante de aplicar en los materiales compuestos para obtener información sobre posibles cambios en los materiales individuales debido a su interacción.

3.4.9. Caracterización de la zona interfacial

Para caracterizar la adherencia se empleó el modelo matemático propuesto por Fantilli y Vallini (2007) el cual permite describir la relación esfuerzo de adherencia-deslizamiento considerando el ablandamiento post-pico y el efecto del tamaño del refuerzo sobre la resistencia de adherencia. Se obtiene un valor de adherencia entre el refuerzo y la matriz, siendo que, a un valor mayor, se tiene una mayor adherencia, mientras que valores menores, se trata de una adherencia menor. Estas ecuaciones pueden utilizarse para materiales compuestos con fibras de carbón y resina epoxi debido a que el mecanismo de adherencia entre las fibras y la matriz depende de factores como la resistencia de la matriz, el diámetro de la fibra y la interacción interfacial, aspectos que este modelo permite analizar. La ecuación para obtener la resistencia de adherencia es la siguiente:

$$\tau = \tau_{fin} + (\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{fin})e^{k(S_1 - S)}$$

donde τ es la resistencia de adherencia en MPa; τ_{fin} es el valor asintótico de la tensión de adherencia en MPa; $\tau_{m\acute{a}x}$ es la tensión máxima de adherencia en MPa; S_1 es el desplazamiento de la fibra en mm; S es el desplazamiento inicial de la fibra en la matriz en mm y k es el coeficiente de Rigidez de la base de la matriz en mm^{-1} .

Para obtener el valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ se sigue la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{1.572}{\sqrt{12.5 + \Phi}} \sqrt{f_c}$$

donde Φ es el diámetro de la fibra en mm y f_c es la resistencia de la matriz en MPa. De igual manera, para conocer el coeficiente de Rigidez de la base de la matriz se calcula con lo siguiente:

$$k = \frac{E_m}{2.651}$$

donde E_m es el valor del módulo de Young de la fibra en MPa.

El valor del desplazamiento de la fibra se obtuvo mediante las fotografías de SEM realizadas a los materiales compuestos, tomando como referencia la escala presente en las imágenes y midiendo la distancia presente por los huecos entre la fibra y la matriz.

3.5. Comparación entre materiales compuestos de fibra de bagazo de agave y materiales compuestos de fibra y resina biodegradable

Se realizó el comparativo de los materiales compuestos reforzados con fibra de bagazo de agave elaborados en este estudio con los resultados presentados en el artículo titulado *Using Plantain Rachis Fibers and Mopa-Mopa Resin to Develop a Fully Biobased Composite Material*, escrito por Valeria Sánchez Morales y colaboradores (Sánchez Morales y col., 2024). El propósito de esta comparación es examinar el desempeño mecánico de ambos materiales, poniendo énfasis en la resistencia a la tracción y la elongación, dos propiedades fundamentales para evaluar su comportamiento estructural y determinar sus posibles aplicaciones. Al contrastar los distintos tipos de fibras y matrices empleadas, se pretende identificar las fortalezas y limitaciones de cada sistema, así como comprender de qué manera estos componentes influyen en la funcionalidad de los compuestos en contextos industriales.

3.6. Diseño de experimentos Taguchi L12

Se utilizó un diseño de experimentos con el propósito de identificar las mejores condiciones para mejorar las variables de respuesta dentro del rango de operación definido. Para ello, se implementó un diseño Taguchi L12 analizado con Minitab 18, el cual permitió evaluar el efecto de 11 factores con 2 niveles cada uno mediante un conjunto reducido de ensayos, asegurando una distribución equilibrada de las combinaciones experimentales. La selección de este diseño se basó en su eficiencia para analizar múltiples variables con un número mínimo de corridas, lo que permitió reducir costos y tiempos experimentales sin comprometer la calidad del análisis. Además, la

estructura ortogonal del arreglo L12 facilitó la identificación de los factores más influyentes en la respuesta, minimizando la interferencia de interacciones de orden superior. Al emplear este enfoque, se logró un análisis sistemático de los efectos principales de cada factor, proporcionando información relevante sobre su contribución al comportamiento del sistema en estudio.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados en las pruebas preliminares, el diseño de experimentos con fibras naturales, el diseño de experimentos con fibras naturales evaluado en condiciones en presencia de alta humedad y materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas. Es importante mencionar que, en la preparación de los materiales compuestos, se desarrollaron seis especímenes por cada experimento, por lo tanto, los resultados de la evaluación mecánica corresponden al promedio de los seis especímenes.

4.1. Caracterización de fibras naturales

En la Figura 6 se observan los dos distintos tipos de fibras naturales utilizadas, notándose como principal diferencia el color, siendo la fibra cruda más oscura en comparación con la cocida. En la Figura 7 se muestra el espectro FTIR de la fibra de agave cruda sin tratar y fibra cocida sin tratar. Para este estudio, las señales de interés en los espectros FTIR correspondientes a los compuestos lignocelulósicos de las fibras naturales cruda y cocida son identificados como sigue: los grupos funcionales hidroxilos (OH) en la región entre $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$; los grupos metilo (CH) en los anillos de la glucosa se identifican en un rango de $893\text{--}895\text{ cm}^{-1}$; los grupos carbonilo (C=O) en un rango de $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ y a $1504\text{--}1506\text{ cm}^{-1}$ los grupos metilo (CH_3) en la lignina; finalmente, los enlaces glucosídicos (C-O-C) en el rango de $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ (Palacios Hinestroza y col., 2019; Rosa y col., 2010). En términos generales no se observan cambios significativos en los espectros FTIR de ambas fibras a pesar de que provienen de distintas etapas del proceso del tequila. Sin embargo, es posible apreciar una ligera disminución en la intensidad en la banda de absorción a $1504\text{--}1506\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al CH_3 de la lignina de la fibra cocida (Rosa y col., 2010), lo cual se atribuye al proceso de cocción de la fibra.



Figura 6. Fibras de agave (a) cruda y (b) cocida

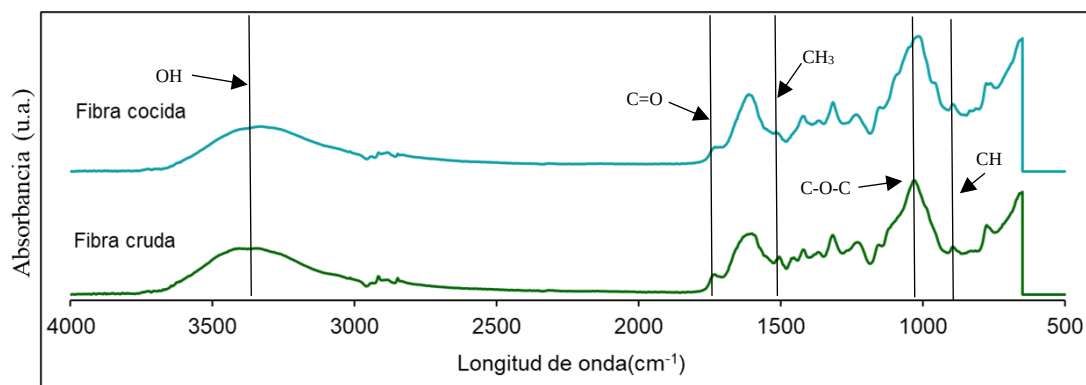


Figura 7. Espectros de FTIR de las fibras de agave cocida sin tratamiento y cruda sin tratamiento

Una herramienta útil para analizar de manera semicuantitativa los grupos funcionales presentes en un material es mediante la relación de absorbancias. Rosa y col. (2010) utilizaron una relación de absorbancia a 897 cm^{-1} (asignado a la glucosa) y 1510 cm^{-1} (asignado a la lignina) para conocer la eliminación de lignina de fibras de coco en un proceso de blanqueamiento ácido y corroboraron sus resultados mediante análisis de difracción de rayos X, DSC y TGA. En el presente estudio se utiliza la relación de absorbancias $A_{893-895}/A_{1504-1506}$, donde $A_{893-895}$ es la absorción del grupo CH en la celulosa y $A_{1504-1506}$ es la absorción de los grupos CH_3 en la lignina, para conocer si tanto en el proceso de cocción como en el proceso de tratamiento alcalino de las fibras de agave existe una reducción del contenido de lignina ya que esta se encuentra principalmente en la superficie de las fibras naturales (Muktham y col., 2016). Se encontró un valor de $A_{893-895}/A_{1504-1506}$ de 1.269 y de 1.767 para la fibra cruda y la fibra cocida, respectivamente. Esto demuestra que en la fibra cocida existe una menor cantidad de lignina presente en la fibra debido al proceso de cocción.

4.2. Caracterización de resinas epoxi

El análisis de las propiedades mecánicas de las resinas cristalina y opaca revela diferencias significativas en su comportamiento, lo que permite identificar sus posibles aplicaciones dependiendo de los requisitos mecánicos. Los resultados de la evaluación mecánica se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de resinas

Material	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %
Resina cristalina	11.40	19.33
Resina opaca	2.26	40

En términos de resistencia a la tracción, la resina cristalina presenta un promedio de 11.40 MPa, siendo considerablemente más resistente que la resina opaca, cuya resistencia es de 2.26 MPa. La resina cristalina posee una estructura interna más rígida o una composición que le confiere mayor

capacidad para soportar cargas antes de fracturarse. Por otro lado, la resina opaca, con su menor resistencia, está diseñada para aplicaciones menos exigentes en términos de carga. En cuanto a la elongación, la resina opaca demuestra una mayor capacidad de deformación antes de romperse, con un promedio de 40%, en comparación con el 19.33% de la resina cristalina. Este comportamiento más dúctil de la resina opaca indica que se adapta mejor a situaciones donde se requiera flexibilidad o absorción de deformaciones, mientras que la resina cristalina, aunque más rígida, es menos capaz de deformarse sin fracturarse.

Se obtuvieron las gráficas de tensión-deformación para las resinas, donde se puede observar el efecto del tratamiento de alcalinizado y cómo influye en las propiedades mecánicas del material (Figura 8).

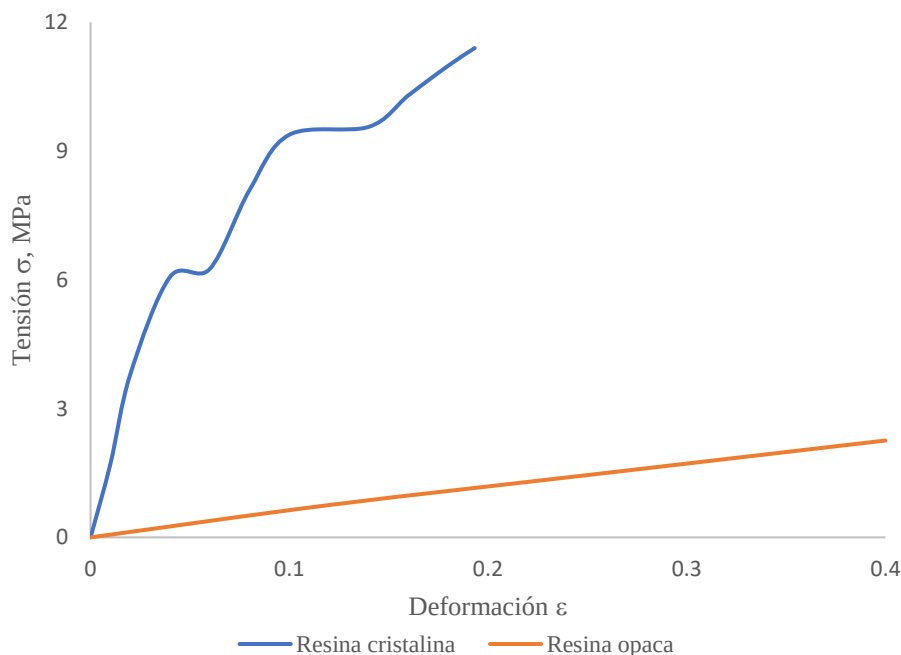


Figura 8. Gráfica de tensión-deformación de resinas

Las curvas de tensión-deformación obtenidas para las resinas cristalina y opaca revelan diferencias significativas en su comportamiento mecánico. En la resina cristalina, se observa una región inicial lineal hasta aproximadamente una deformación de 0.04, lo que indica un comportamiento elástico del material hasta este punto. En esta etapa, los enlaces atómicos se están estirando de tal manera que, si se retirase la carga, el material volvería a su estado inicial (Instron, 2025). De igual manera, es en esta región se cumple la Ley de Hook, la cual menciona que la fuerza de tracción es directamente proporcional a la deformación (Thompson, 1926). Posteriormente, la curva comienza a desviarse de la linealidad, señalando la entrada en una fase de deformación plástica,

específicamente en la zona de cedencia del material, que va de desde el 0.04 hasta el 0.06 de deformación. En esta zona, el material ya no regresa a su forma original, y este será el punto de retorno en caso de que se siga aplicando carga. Esta deformación se define como permanente, ya que los enlaces del material se han roto, modificando químicamente la estructura interna del mismo, por lo cual no puede volver a su forma original (Instron, 2025). Después, entre 0.06 y 0.16 se aprecia la zona de endurecimiento, donde el material presenta una deformación y endurecimiento al mismo tiempo. En este punto, el material aumenta su grado de dureza por el endurecimiento en su estructura, soportando el máximo de carga posible (Truong y Kim, 2021). El material alcanza su punto de último esfuerzo en una deformación de 0.1933 y una tensión máxima de 11.40 MPa, el cual es el momento donde el material no soporta más carga, y al seguir soportándola, éste opta por romperse. Por otro lado, la resina opaca presenta comportamiento elástico durante su caracterización, esto debido a su estructura interna. En esta resina, la máxima tensión se presenta en una deformación de 0.4 soportando una carga máxima de 2.26 MPa, con lo cual se evidencia su capacidad disminuida para soportar esfuerzos, pero tener una deformación mayor antes de su ruptura, caso contrario a la resina cristalina. Existen dos tipos de comportamientos de fractura en los materiales: dúctil y frágil. Ambos tipos de resinas presentan comportamiento dúctil, donde la deformación plástica permite liberación de energía de deformación mediante la cedencia (Wilkerson, 2018). Por otro lado, un comportamiento frágil se refiere a materiales donde la fractura se presenta antes o ligeramente después de la región de cedencia, es decir, sin tener comportamiento plástico (Soleiman Dehkordi y col., 2019), el cual no es observado en esta gráfica. Debido a la diferencia de sus propiedades, sus puntos de cedencia y sus regiones elásticas y plásticas, la resina cristalina es más adecuada para aplicaciones donde se requiere alta resistencia y rigidez, mientras que la resina opaca es útil en situaciones donde se priorice una mayor capacidad de deformación sin fractura inmediata.

En la Figura 9 se muestran los espectros FTIR de las dos resinas epoxi utilizadas. La señal en la banda en 824 cm^{-1} pertenece a la vibración de estiramiento de los grupos carbonilo (C=O) de los oxiranos. A 1035 cm^{-1} se observa el pico de absorción de los grupos éter (C-O-O). En la banda a 1509 cm^{-1} se presenta la señal de los enlaces C=C y a 1603 cm^{-1} se observa el estiramiento del enlace C=C los cuales corresponden al anillo aromático. Se puede apreciar una señal en la resina opaca en la región de 1724 cm^{-1} lo cual está asociado al estiramiento por tensión del grupo carbonilo C=O, a lo que, según la literatura, se debe a un curado incompleto (Mansour y col., 2022). Asimismo, las bandas que se muestran en la región $2919\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ son asignadas al estiramiento de los grupos aromáticos y alifáticos CH. En la región de $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ se aprecia la banda asociada con los grupos hidroxilo (OH) (González y col., 2012).

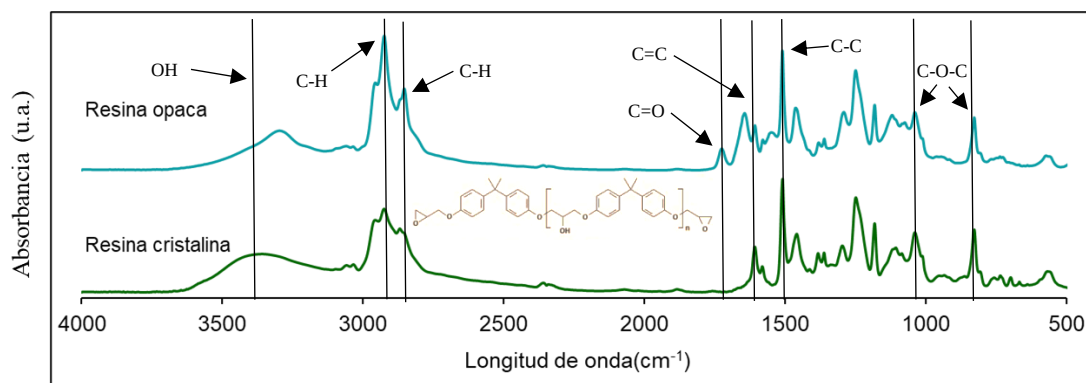


Figura 9. Espectros FTIR de las resinas epoxi

4.3. Pruebas preliminares de materiales compuestos

Se realizaron materiales compuestos utilizando la resina cristalina y reforzados con fibras naturales para determinar si el tratamiento aplicado mejoraba las propiedades mecánicas del material compuesto, mostrando los resultados de la caracterización en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de pruebas preliminares

Material	Tratamiento	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %
Fibra cruda	Sin tratamiento	6.50	7.50
Fibra cruda	Con tratamiento	10.89	3.50
Fibra cocida	Sin tratamiento	13.46	3.50
Fibra cocida	Con tratamiento	17.51	5.33

El análisis de los resultados demuestra que las propiedades mecánicas y físicas de los materiales compuestos varían significativamente dependiendo de los tratamientos aplicados a las fibras. En términos de resistencia a la tracción, los materiales compuestos reforzados con fibras cocidas mostraron un desempeño considerablemente superior en comparación con los materiales compuestos elaborados con las fibras crudas, tanto en condiciones sin tratamiento como con tratamiento. Esto indica que el proceso de cocción contribuye a la eliminación de componentes no estructurales, aumentando la rigidez y la capacidad de carga de las fibras. Además, el tratamiento incrementó la resistencia a la tracción de los materiales compuestos con ambos tipos de refuerzo, debido al incremento en la rugosidad en la superficie de las fibras (Symington y col., 2009). Por otro lado, la elongación mostró tendencias opuestas dependiendo del estado inicial de la fibra.

En los materiales elaborados con fibras crudas, el tratamiento químico redujo la elongación, lo que se atribuye a un incremento en la rigidez o una disminución de la elasticidad. En contraste, los materiales con fibras cocidas presentaron un aumento en su elongación tras el tratamiento químico,

lo que se debe a una redistribución interna de los compuestos estructurales, permitiendo un comportamiento más dúctil.

Como pruebas preliminares, se realizaron materiales compuestos tanto con fibra cruda y fibra cocida con y sin tratamiento utilizando la resina cristalina para determinar el tratamiento ayuda a mejorar la adhesión entre el refuerzo y la matriz. En la Figura 10 se muestra la gráfica de tensión-deformación para la fibra cruda.

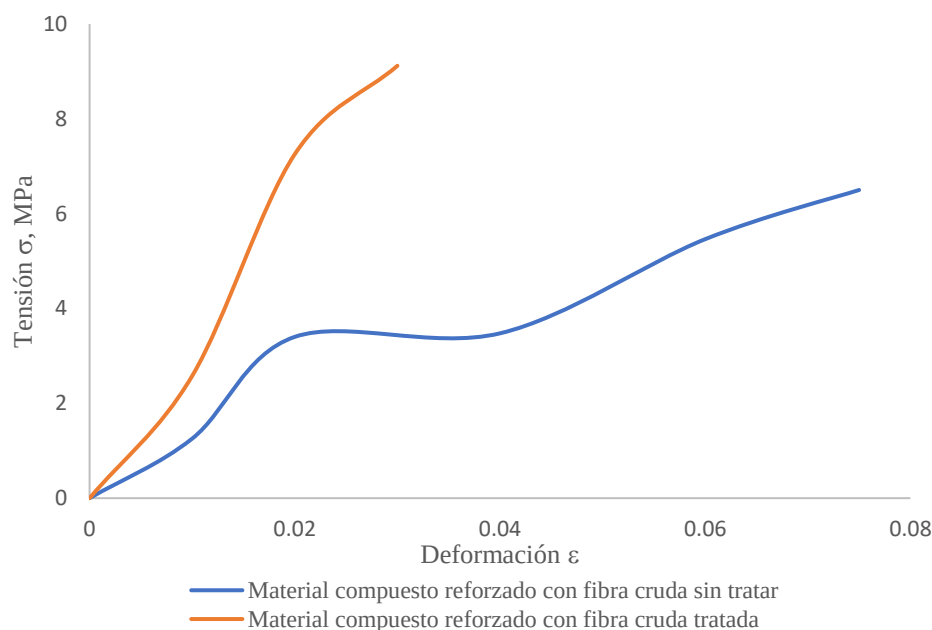


Figura 10. Gráfica de tensión-deformación de materiales compuestos con fibra cruda sin tratar y tratada

El análisis de las curvas para los materiales compuestos reforzados con fibra cruda tratada y sin tratar destaca los efectos significativos que tiene el tratamiento químico en sus propiedades mecánicas. Los materiales compuestos reforzados con la fibra sin tratar muestran un comportamiento dúctil, donde su región elástica abarca hasta una deformación de 0.02 a un esfuerzo de 3.40 MPa, y la región plástica de 0.021 hasta su punto de esfuerzo máximo en 0.075 soportando una carga de 6.50 MPa. Por otro lado, los materiales reforzados con la fibra cruda tratada presentan un comportamiento frágil debido a su reducida región plástica, la cual abarca únicamente desde una deformación de 0.02 y una carga de 7.25 MPa, hasta llegar al punto de esfuerzo máximo en una deformación de 0.035 y soportando 10.89 MPa.

La comparación entre ambas curvas demuestra que el tratamiento alcalino mejora la capacidad de carga debido a la eliminación parcial de lignina de la superficie, generando así sitios

activos donde la matriz puede anclarse con la celulosa de la fibra (Muktham y col., 2016). Sin embargo, este cambio implica una reducción la capacidad de deformación del material compuesto, ya que los datos muestran que comienza a desviarse del comportamiento lineal a menores niveles de deformación comparados con los materiales elaborados con la fibra sin tratar.

Se hizo el análisis de la gráfica de tensión-deformación para los materiales compuestos reforzados con fibra cocida sin y con tratamiento, mostrándose en la Figura 11.

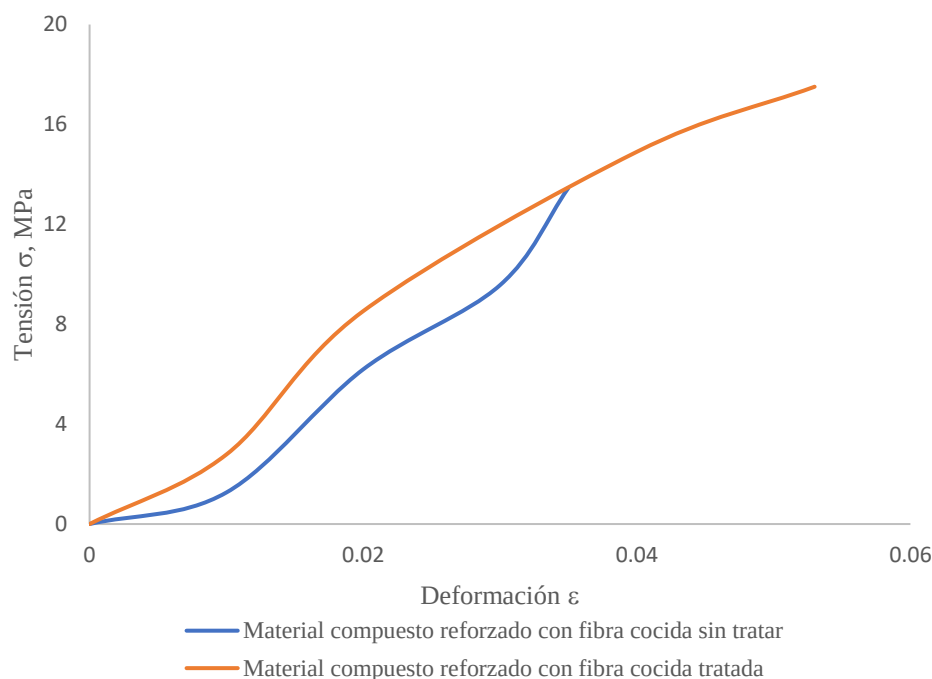


Figura 11. Gráfica de tensión-deformación de materiales compuestos con fibra cocida sin tratar y tratada

Las curvas de tensión-deformación para las fibras cocidas, tanto sin tratar como tratadas, muestran los efectos del tratamiento sobre las propiedades mecánicas del material. Ambas curvas presentan un comportamiento dúctil debido a la parte elástica que presentan. La región elástica de ambas curvas abarca hasta aproximadamente una deformación de 0.02, sin embargo, alcanzan este límite teniendo resistencias a la tracción diferentes (6.19 MPa en la fibra cocida sin tratar y 8.52 MPa en la fibra tratada), lo cual demuestra que el tratamiento alcalino ha mejorado la resistencia a la tracción del material con el tratamiento aplicado a la fibra. La región plástica de los materiales reforzados con la fibra sin tratar termina en el punto de máximo esfuerzo a una deformación de 0.035 y una resistencia máxima de 13.16 MPa, mientras que los materiales con la fibra tratada tienen una resistencia máxima de 17.51 MPa a una deformación de 0.053, aumentando así también la capacidad

de deformación del material, demostrando que el tratamiento alcalino ayuda a mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto debido a su mejor anclaje en la superficie de la fibra y la matriz (Sánchez Morales et al., 2024)

4.4. Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Se implementó un diseño de experimentos Taguchi L12 (Tabla 7) para, dentro del rango de operación, conocer las mejores condiciones con las cuales se pudieran obtener las mejores propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Se analizaron 11 variables a dos niveles en 12 experimentos. Se hicieron combinaciones de factores como el tipo de fibra (cocida o cruda), el tipo de hidróxido utilizado (sodio o potasio), la concentración de impregnado, la temperatura de impregnado, el tiempo de impregnado, la agitación durante el proceso, el tipo de resina, la relación fibra/matriz, la orientación de las fibras y el tiempo de curado.

Cada una de las 12 pruebas permite observar el comportamiento de los materiales compuestos bajo diferentes condiciones. En general, este diseño experimental busca identificar los factores y sus combinaciones que afectan las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con las fibras tratadas. Este enfoque es útil para realizar una evaluación sistemática de los diferentes parámetros, lo que permite establecer las mejores condiciones para el tratamiento de las fibras en aplicaciones específicas.

Tabla 7. Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Exp	TF	TH	CI, %	TEMI, °C	TI, horas	AI	LF, mm	TR	RFM, %	OF	TC, horas
1	Cocida	NaOH	2	25	1	No	5	Cristalina	10	Aleatoria	24
2	Cocida	NaOH	2	25	1	Si	70	Opaca	15	Ordenada	72
3	Cocida	NaOH	5	50	2	No	5	Cristalina	15	Ordenada	72
4	Cocida	KOH	2	50	2	No	70	Opaca	10	Aleatoria	72
5	Cocida	KOH	5	25	2	Si	5	Opaca	10	Ordenada	24
6	Cocida	KOH	5	50	1	Si	70	Cristalina	15	Aleatoria	24
7	Cruda	NaOH	5	50	1	No	70	Opaca	10	Ordenada	24
8	Cruda	NaOH	5	25	2	Si	70	Cristalina	10	Aleatoria	72
9	Cruda	NaOH	2	50	2	Si	5	Opaca	15	Aleatoria	24
10	Cruda	KOH	5	25	1	No	5	Opaca	15	Aleatoria	72
11	Cruda	KOH	2	50	1	Si	5	Cristalina	10	Ordenada	72
12	Cruda	KOH	2	25	2	No	70	Cristalina	15	Ordenada	24

Exp-Experimento; TF-Tipo de fibra; TH-Tipo de hidróxido; CI-Concentración de impregnado; TEMI-Temperatura de impregnado; TI-Tiempo de impregnado; AI-Agitación durante impregnado; LF-Longitud de las fibras; TR-Tipo de resina; RFM-Relación Fibra/Matriz; OF-Orientación de las fibras; TC-Tiempo de curado

Tras la elaboración de los materiales y su posterior caracterización, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 8 y Figura 12. El análisis de los resultados experimentales muestra una amplia variación en las propiedades mecánicas y físicas de los materiales estudiados, reflejando

la diversidad de combinaciones y tratamientos aplicados. En términos de resistencia a la tracción, los valores oscilaron entre 2.36 MPa (experimento 2) y 19.686 MPa (experimento 3), destacándose los experimentos 1 y 3 como los de mejor desempeño. Estos altos valores sugieren que las combinaciones específicas de fibra-resina y los tratamientos aplicados en estas condiciones mejoraron la rigidez y la capacidad estructural del material.

Tabla 8. Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos

Experimento	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %
1	17.25	4.5
2	2.36	8.5
3	19.68	9.3
4	4.60	13.0
5	2.74	7.0
6	5.66	12.0
7	3.29	15.3
8	12.64	7.3
9	3.77	7.0
10	2.72	6.0
11	7.76	9.5
12	7.04	7.3

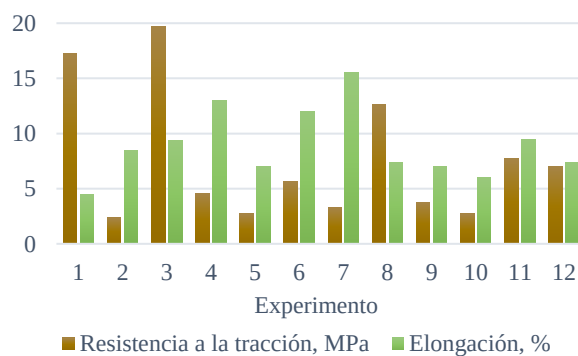


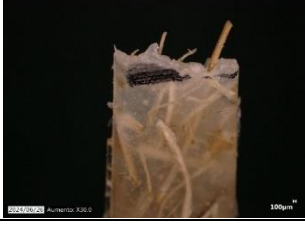
Figura 12. Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos

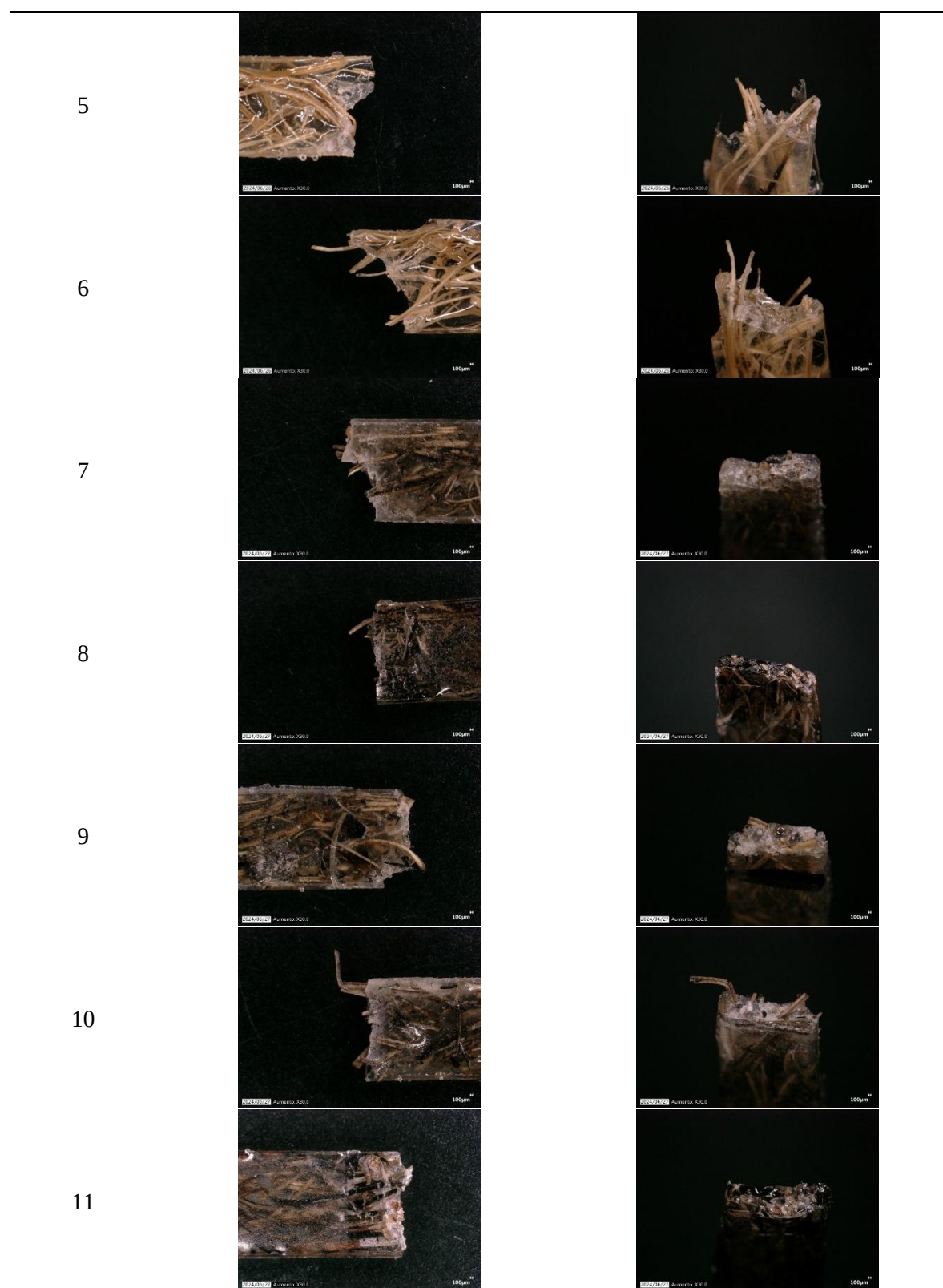
Por otro lado, la elongación varió entre 4.5% (experimento 1) y 15.5% (experimento 7). Los experimentos con mayor elongación indicaron un comportamiento más dúctil, característico de materiales diseñados para absorber deformaciones antes de fracturarse. En contraste, los valores bajos de elongación observados en los Experimentos 1 y 3 reforzaron la hipótesis de un compromiso entre rigidez y ductilidad, donde un aumento en resistencia a la tracción suele ir acompañado de una reducción en la capacidad de deformación.

Se destaca el experimento 3 por ser el que mejor resistencia a la tracción reporta, con un valor de 19.686 MPa, mientras que en el Experimento 2 se muestra la peor resistencia obtenida con 2.63 MPa. En el Experimento 7 se puede apreciar la mejor elongación obtenida en el diseño con 15.5%, mientras que la peor con un valor de 4.5% se obtuvo en el Experimento 1.

En la Tabla 9 se presentan las imágenes obtenidas por microscopía óptica de las fracturas de los materiales compuestos representativos de cada experimento. En particular, se destacan las observaciones del Experimento 3, donde se observa que la fibra se corta de manera adecuada y no se resbala de la resina, lo cual es uno de los objetivos del diseño, ya que indica una buena adherencia entre la fibra y la matriz.

Tabla 9. Microscopía óptica de materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos

Experimento	Corte longitudinal	Corte transversal
1		
2		
3		
4		





Por otro lado, en el experimento 2, se observa que la fibra se resbala de la resina, lo que resulta en el peor rendimiento del diseño, ya que sugiere una pobre interacción entre la fibra y la resina, lo que afecta negativamente las propiedades mecánicas del material. Además, se pueden observar diferencias en los cortes de las fibras entre las dos resinas utilizadas, lo que resalta cómo la elección de la resina influye en la adherencia y la transferencia de esfuerzos entre la fibra y la matriz, afectando las características de los materiales compuestos (Herman, 2013).

En la Figura 13 se muestra la gráfica tensión-deformación para el diseño de experimentos Taguchi L12.

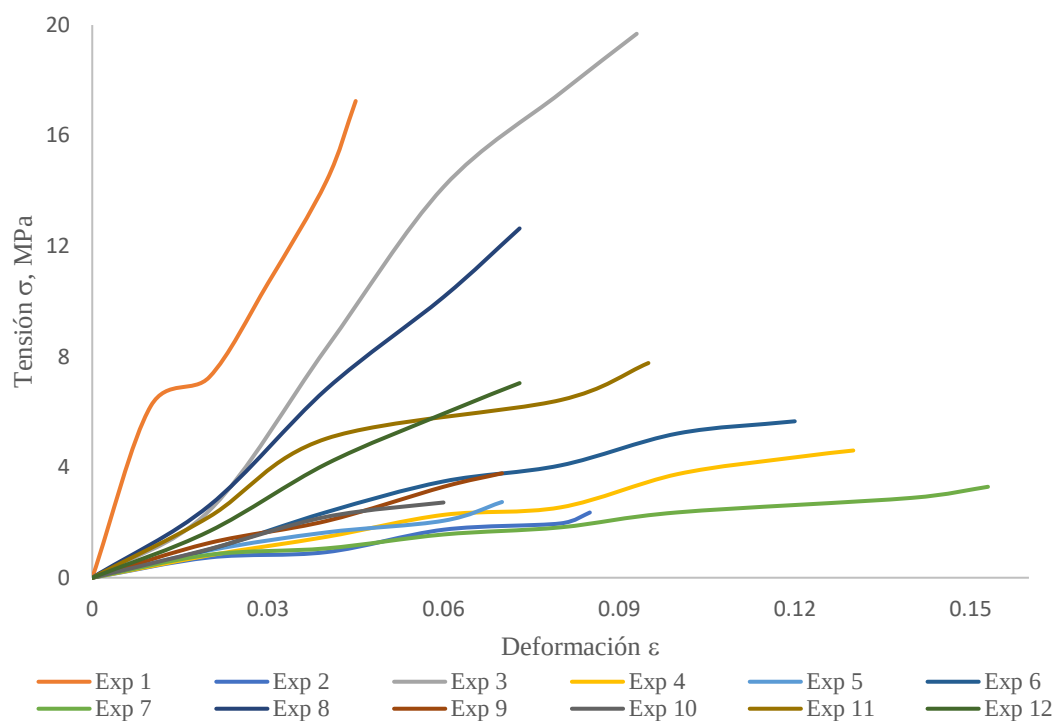


Figura 13. Gráfica de tensión-deformación para diseño de experimentos

Las curvas de tensión-deformación obtenidas en los diferentes experimentos revelan una amplia variabilidad en las propiedades mecánicas de los materiales estudiados, lo cual es reflejo de las distintas combinaciones de parámetros en el diseño experimental (tipo de fibra, tratamientos,

resinas, etc.). La mejor prueba del diseño de experimentos (Experimento 3) muestra un comportamiento frágil al no presentar una región plástica significativa más allá de la zona de cedencia la cual se encuentra en deformación 0.06 y una resistencia de 14.13 MPa, y se presenta su fractura en 0.093 de deformación a una resistencia de 19.68 MPa. Este material es útil para aplicaciones donde se requiera soportar mayor carga sin que se requiera su deformación de manera extendida antes de su ruptura. Se observa que los seis experimentos que presentan una pendiente mayor en su zona elástica son elaborados con la resina cristalina (Experimentos 1, 3, 6, 8, 11 y 12), lo cual nos habla de su comportamiento frágil, esto debido a que no presentan deformaciones plásticas muy prolongadas, lo cual comprueba el rol tan importante del tipo de resina en los materiales compuestos de este estudio. Por otro lado, los experimentos restantes fueron elaborados con la resina opaca, teniendo así un comportamiento dúctil donde se deforman de manera extenuante sin soportar una gran cantidad de carga. Por ejemplo, el Experimento 2 (peor rendimiento de resistencia a la tracción) presenta el inicio de su comportamiento plástico que se extiende desde 0.02 de deformación a una carga de 0.73 MPa hasta su punto de ruptura a una deformación de 0.085 y soportando una carga máxima de 2.36 MPa, mostrando una deformación considerable sin estar soportando una carga significativa comparando su resistencia con los materiales que utilizan resina cristalina.

El Experimento 7 (mejor prueba respecto a la elongación) presenta una pendiente inicial baja, lo que indica una rigidez reducida y una gran elasticidad del material, en mayor parte debido al tipo de resina, la cual presentó en las pruebas preliminares (Tabla 5) ser la resina con mayor deformación y comportamiento dúctil en comparación con la resina cristalina. Este material es útil en aplicaciones donde se requiere una extensa deformación antes de la ruptura, sin embargo, teniendo una resistencia muy reducida. En su contra parte, el material con el peor rendimiento respecto a la elongación es el Experimento 1, el cual también es el material que presenta el comportamiento más frágil del diseño de experimentos al tener la menor deformación de todas las pruebas. De igual manera, el comportamiento dúctil o frágil de los materiales compuestos se puede apreciar en las imágenes de microscopía óptica (Tabla 9), donde, un material dúctil presenta una fractura seccionada, es decir, con irregularidades en la superficie de fractura (fractura zigzag), mientras que un material frágil presenta una ruptura lineal (Soleiman Dehkordi y col., 2019).

En la Figura 14 se muestran los espectros del diseño de experimentos Taguchi L12 con los experimentos que presentaron el mejor (Experimento 3), medio (Experimento 11) y peor (Experimento 2) rendimiento respecto a la resistencia a la tracción. Los grupos funcionales de interés son: grupos hidroxilos (OH) en la región de $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$; grupos metilo (CH) en los anillos de la glucosa en un rango de $893\text{--}895\text{ cm}^{-1}$; grupos carbonilo (C=O) en $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ y a $1504\text{--}1506\text{ cm}^{-1}$.

¹ grupos metilo (CH_3); por último, enlaces glucosídicos (C-O-C) en $1000\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$. Se utilizó la relación de absorbancias $A_{893-895}/A_{1504-1506}$ para conocer la reducción de lignina de la fibra con el tratamiento alcalino (Muktham y col., 2016). Los valores de la relación $A_{893-895}/A_{1504-1506}$ fueron 1.479, 1.630 y 1.834 para las fibras del Experimento 3, Experimento 11 y Experimento 2, respectivamente. Se observa que la fibra del Experimento 3 presenta una menor relación de absorbancias, indicando que la cantidad de lignina que conserva en su estructura es mayor en comparación con el Experimento 2, ya que este presenta un mayor valor de relación de absorbancia. Un valor mayor en esta relación se refiere a más cantidad de celulosa expuesta debido a que el tratamiento aplicado ha sido más agresivo, lo cual se traduce en un debilitamiento en la estructura de la fibra volviéndola más frágil. En este contexto, el tratamiento alcalino busca la eliminación de lignina superficial de la fibra, pero sin llegar a debilitarla por la remoción excesiva de esta (Muktham y col., 2016). Sin embargo, debe notarse que el tratamiento de la fibra no es un factor determinante en las propiedades de los materiales compuestos, como se observó en las pruebas preliminares, el rol tan importante que tiene el tipo de resina.

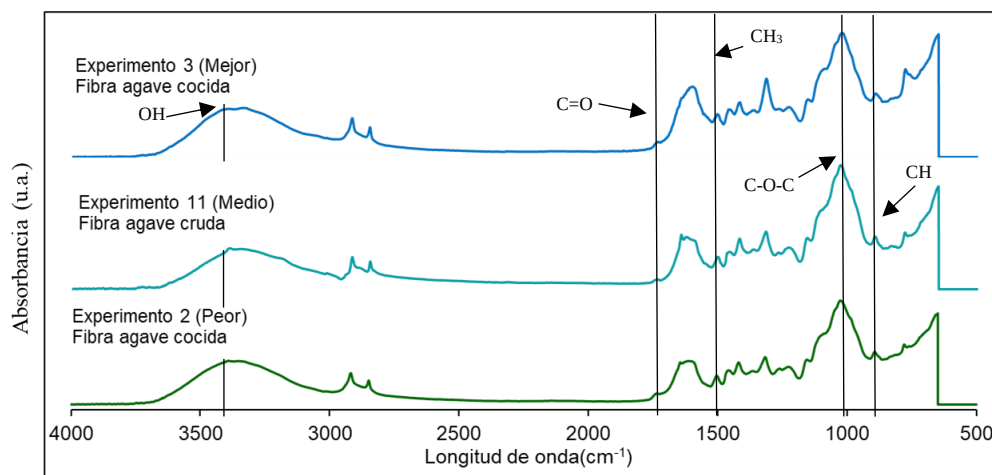


Figura 14. Espectros de FTIR de fibras de agave del diseño de experimentos L12 con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor

En la Figura 15 se observan los espectros de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos L12 con el mejor, medio y peor rendimiento con respecto a la resistencia a la tracción con la finalidad de observar si existen cambios en la estructura molecular entre el refuerzo y la matriz. La caracterización FTIR se realizó sobre la superficie del material compuesto y no en la interfaz entre la fibra y la resina. Las líneas punteadas corresponden al refuerzo, mientras que las líneas continuas se relacionan con los picos característicos la matriz. En términos generales, no se observan cambios en las señales que corresponden a la resina (Figura 9) o al refuerzo (Figura 14). Es importante resaltar que en el Experimento 2 se muestra el pico en 1724 cm^{-1}

correspondiente al C=O lo cual se traduce como un curado incompleto de la resina y que explica su bajo desempeño (Mansour y col., 2022). Para conocer si existe una interacción química entre el refuerzo y la matriz debería de realizarse la caracterización FTIR directamente en la interfaz de ambas partes.

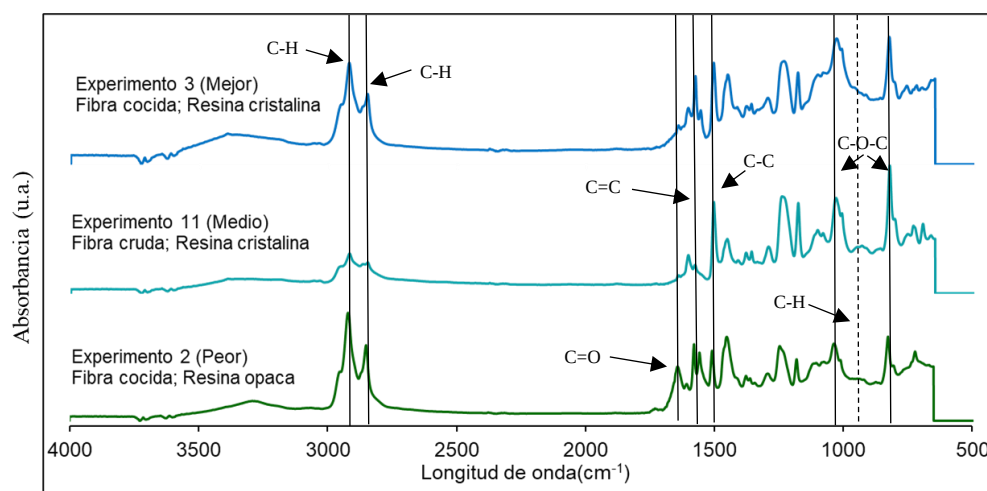


Figura 15. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos L12 con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor

Las imágenes SEM mostradas en la Figura 16 corresponden a la superficie de fractura transversal por tracción de los materiales compuestos del Experimento 2 del diseño de experimentos Taguchi L12, el cual fue el que obtuvo los peores resultados con respecto a la resistencia a la tracción.

En la Figura 16 a) se puede observar que este experimento presentó una adhesión deficiente (indicada con círculo rojo) debido a que existen cavidades notorias entre el refuerzo y la matriz. De igual manera, en la Figura 16 b) se pueden observar inconsistencias en la superficie de la matriz, condición que influye en la mala adhesión entre el refuerzo y la matriz debido a que la resina no cumple la función de brindar el soporte del material compuesto al no tener una mezcla homogénea entre la resina y su catalizador correspondiente.

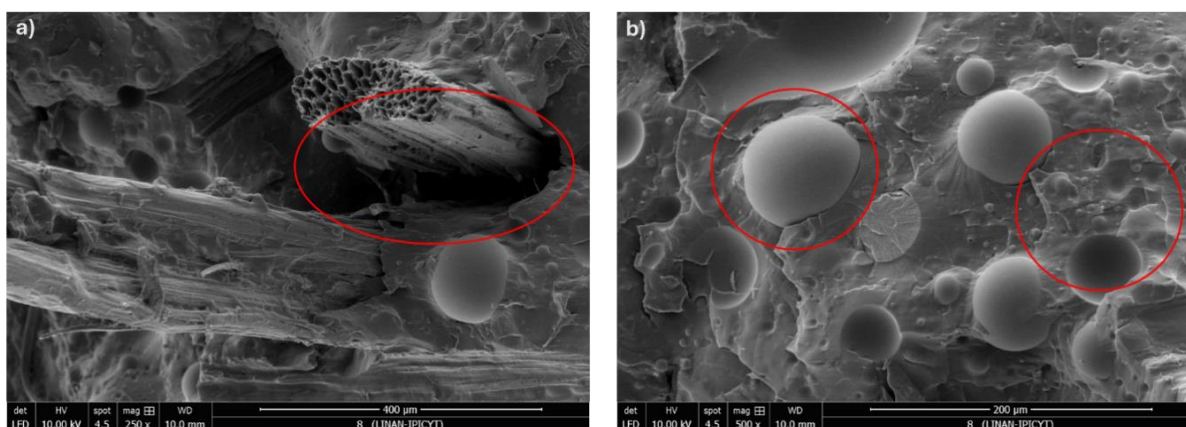


Figura 16. Imágenes SEM de Experimento 2 del diseño de experimentos en la superficie de fractura del material compuesto. a) zona de interfaz refuerzo-matriz y b) zona de matriz con curado incompleto

Asimismo, en la Figura 17 se observan las imágenes SEM del Experimento 3, el cual tuvo los mejores resultados con respecto a la resistencia a la tracción del diseño Taguchi L12. Al comparar estas micrografías con las correspondientes a las vistas en el Experimento 2, se observa como en la zona interfacial entre el refuerzo y la matriz (señalada en círculos verdes) no existen los huecos característicos de una mala adhesión, todo lo contrario, se puede ver una muy buena interacción entre el refuerzo y la matriz, mostrándose como existe un anclaje correcto, lo cual se traduce en una correcta ruptura del material gracias a que el refuerzo verdaderamente brindó el sustento necesario soportando la carga durante las pruebas de tenacidad.

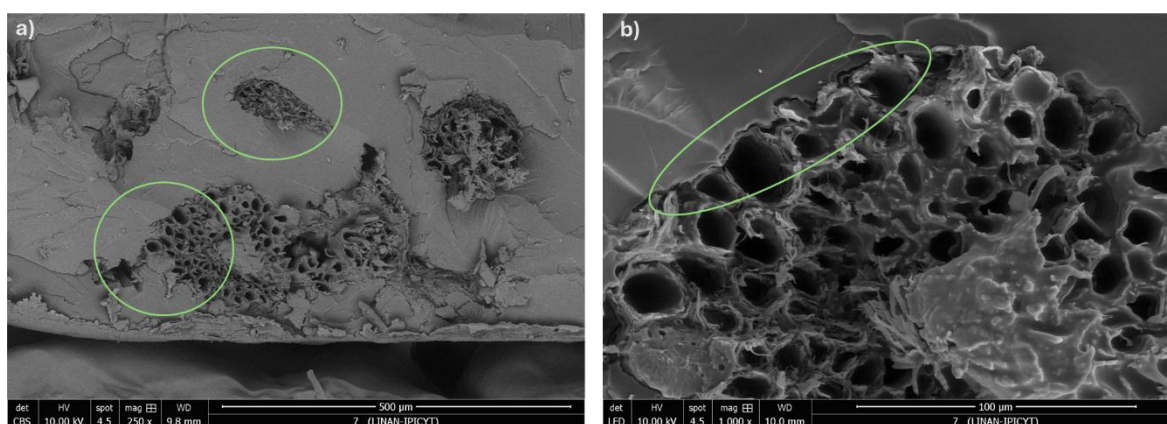


Figura 17. Imágenes SEM de Experimento 3 del diseño de experimentos en la superficie de fractura del material compuesto. a) zona de interfaz refuerzo-matriz y b) magnificación de zona de interfaz refuerzo-matriz

En la Figura 18 se observan los espectros FTIR del diseño de experimentos L12 con los experimentos que presentaron mejor (Experimento 7), medio (Experimento 2) y peor (Experimento

1) rendimiento respecto a la elongación. La identificación de los grupos funcionales de interés es como sigue: a $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ se encuentran los hidroxilos (OH); a 1730 cm^{-1} y 1505 cm^{-1} se observan los grupos carbonilo (C=O) y los grupos metilo (CH_3) respectivamente; los enlaces glucosídicos (C-O-C) en el rango de $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$; finalmente, los grupos metilo (CH) de los anillos de la glucosa se identifican a 895 cm^{-1} . Se determinaron las relaciones de absorbancias $A_{893-895}/A_{1504-1506}$ las cuales fueron 1.527, 1.834 y 1.811 para el Experimento 7, Experimento 2 y Experimento 1 respectivamente. El Experimento 7 tiene la fibra con menos lignina en comparación con el Experimento 1. Al igual que con la resistencia a la tracción, aquí se muestra que las fibras con menor presencia de lignina en su estructura son las que mejor desempeño mecánico han demostrado, esto debido al debilitamiento de la fibra por la pérdida excesiva de lignina y la exposición de celulosa (Muktham y col., 2016).

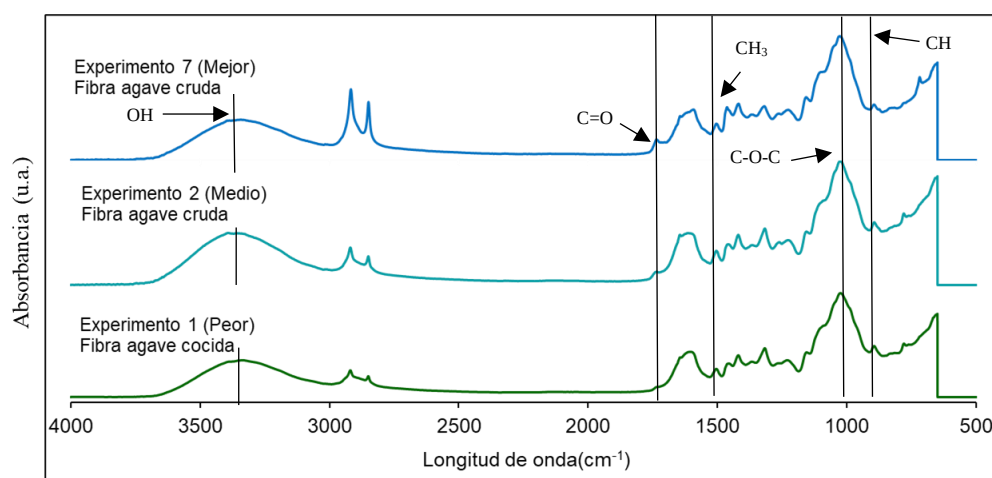


Figura 18. Espectros de FTIR de fibras de agave del diseño de experimentos L12 con respecto a elongación: mejor, medio y peor

En la Figura 19 se observan los espectros FTIR de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales del diseño de experimentos L12 con el mejor, medio y peor rendimiento con respecto a la elongación. Las líneas punteadas corresponden al refuerzo, mientras que las líneas continuas se relacionan con los picos característicos la matriz. Como era de esperarse en los FTIR que corresponden a los materiales compuestos, no se aprecian señales de absorbancia que indiquen interacciones químicas en la interfaz del material compuesto. Sin embargo, es notorio la intensidad en el pico correspondiente al grupo carbonilo C=O (1724 cm^{-1}) para los materiales compuestos del Experimento 7 y 2, los cuales están elaborados con la resina opaca, donde este pico se relaciona con una pobre curación de la matriz (Mansour y col., 2022).

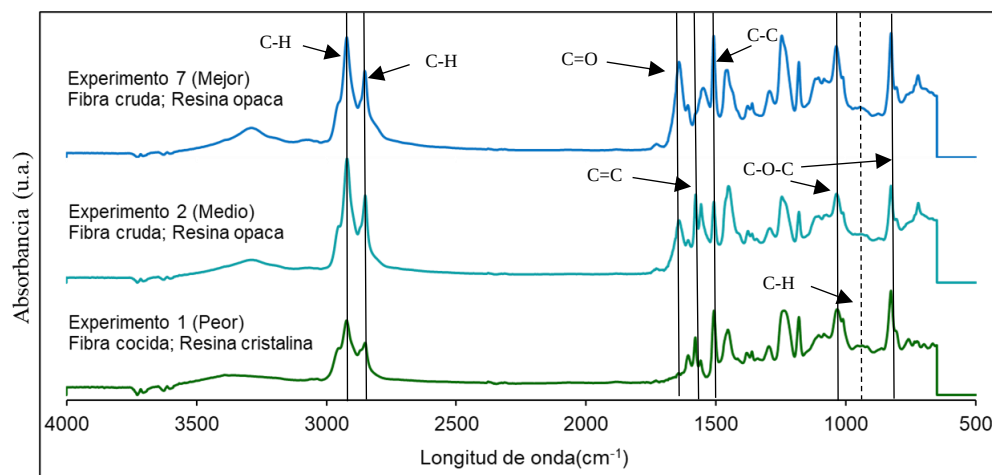


Figura 19. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos L12 con respecto a elongación: mejor, medio y peor

4.4.1. Análisis estadístico de diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales

A partir de los resultados obtenidos en el diseño experimental, se identificaron las combinaciones de factores más significativas para mejorar la resistencia a la tracción y la elongación de los materiales compuestos. Basados en el análisis estadístico y en los parámetros que demostraron mayor influencia, se realizaron nuevas pruebas utilizando materiales ajustados a estas condiciones favorables. En este estudio se consideró un nivel de significancia del 95% a través del análisis de varianza (ANOVA). Se empleó el valor F (F de Fisher) como parámetro de decisión, en donde un valor ≥ 2 indica que el factor tiene impacto sobre la variable de respuesta y entre mayor sea el valor es más significativo su impacto. De igual manera, se utilizó el valor P como parámetro de decisión, en donde un valor < 0.05 representa un factor de impacto en la variable de respuesta.

A través de un análisis de regresión se determinó la suma de cuadrados de cada variable del diseño de experimentos. Las variables con los dos valores más pequeños fueron discriminados y utilizados como datos de error con fines de obtener una identificación más precisa sobre los factores que afectan la resistencia a la tracción.

Como se muestra en la Tabla 10, la temperatura de impregnado y la orientación de las fibras demuestran tener los valores más bajos de suma de cuadrados, por lo tanto, han sido establecidas como variables error para el análisis de varianza, el cual es mostrado en la Tabla 11.

Tabla 10. Análisis de regresión de diseño de experimentos: Resistencia a la tracción (Minitab 18)

Variable	Suma de cuadrados
Tipo de fibra	18.873
Tipo de hidróxido	67.616
Concentración de impregnado	1.296
Temperatura de impregnado	0.000
Tiempo de impregnado	10.900
Agitación en impregnado	32.174
Longitud de las fibras	28.033
Tipo de resina	213.001
Relación fibra/matriz	4.155
Orientación de las fibras	1.186
Tiempo de curado	8.362

Tabla 11. Análisis de varianza diseño de experimentos Taguchi L12 teniendo la resistencia a la tracción como variable de respuesta

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	384.409	42.712	72.00	0.014
Tipo de fibra	1	18.873	18.873	31.82	0.030
Tipo de hidróxido	1	67.616	67.616	113.99	0.009
Concentración de impregnado	1	1.296	1.296	2.18	0.277
Tiempo de impregnado	1	10.900	10.900	18.38	0.050
Agitación en impregnado	1	32.174	32.174	54.24	0.018
Longitud de las fibras	1	28.033	28.033	47.26	0.021
Tipo de resina	1	213.001	213.001	359.08	0.003
Relación fibra/matriz	1	4.155	4.155	7.00	0.118
Tiempo de curado	1	8.362	8.362	14.10	0.064
Error	2	1.186	0.593		
Total	11	385.595			

El análisis de varianza muestra que el modelo general es significativo, con un valor p de 0.014, lo que confirma que los factores incluidos explican gran parte de la variabilidad en las propiedades del material compuesto. Entre los factores evaluados, el tipo de resina destaca como el más influyente, con un valor F de 359.08 y un valor p de 0.003, evidenciando su papel crítico en la rigidez y cohesión del material, ya que, en este estudio, el tipo de resina contribuye a una mejor transferencia de esfuerzos entre la fibra y la matriz (Aziz y col., 2024), mostrando que la resina cristalina es mejor para aplicaciones donde se requiera mayor esfuerzo que la resina opaca. El tipo de hidróxido afecta las propiedades mecánicas de los materiales compuestos debido a que los ataques químicos causados sobre la estructura de la fibra la favorecen o la debilitan. Por un lado, el tratamiento beneficia la interacción fibra-matriz por el aumento en la rugosidad de la superficie de la fibra. Por

otro lado, la agresividad del tratamiento puede debilitar la fibra, afectando la resistencia mecánica de los materiales compuestos (Ed-Dariye, 2020; Sánchez Morales y col., 2024). El impacto de la longitud de las fibras en la resistencia es explicado por la transferencia de carga. Con una mayor longitud de las fibras se observan discontinuidades en la transferencia de carga, lo cual provoca una falla prematura, siendo mejor para esta aplicación fibras de tamaño reducido (Keya y col., 2019). El tipo de fibra afecta debido al proceso de cocción, el cual contribuye a la eliminación de componentes no estructurales, aumentando la rigidez y la capacidad de carga de las fibras (Symington y col., 2009). La agitación y el tiempo del tratamiento afectan la resistencia de los materiales debido a que se promueven la interacción entre el hidróxido y las fibras (Anaya-Ramirez y col., 2023). Finalmente, el tiempo de curado, la concentración de impregnado y la relación fibra/matriz no resultaron significativos dentro del rango experimental estudiado.

Se desarrollaron nuevos materiales considerando los parámetros más significativos identificados en el análisis de varianza y ajustados al nivel que mejore la resistencia a la tracción. Estos factores son el tipo de fibra, el tipo de resina, el tipo de hidróxido, la longitud de las fibras y la agitación durante el tratamiento. Los resultados de las pruebas mecánicas de los materiales desarrollados son presentados la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación entre mejor experimento obtenido en el diseño de experimento contra mejores condiciones para resistencia a la tracción

Variable	Experimento 3	Mejores condiciones
Tipo de fibra	Cocida	Cocida
Tipo de hidróxido	NaOH	NaOH
Concentración de impregnado, %	5	5
Temperatura de impregnado, °C	50	25
Tiempo de impregnado, horas	2	2
Agitación en impregnado	No	No
Longitud de las fibras, mm	5	5
Tipo de resina	Cristalina	Cristalina
Relación fibra/matriz, %	15	10
Orientación de las fibras	Ordenada	Ordenada
Tiempo de curado, horas	72	72
Resistencia a la tracción, MPa	19.686	23.740
Elongación, %	9.3	4.0

Se aprecia que existe un incremento notorio en la resistencia a la tracción comparándolo con el mejor resultado del diseño de experimentos (experimento 3) de 19.686 MPa a 23.74 MPa, lo que representa una mejoría de 20.59%, lo cual es indicio de que el análisis estadístico identificó de manera correcta las variables que más afectan a la resistencia a tracción.

Por otro lado, se siguió el mismo procedimiento de análisis estadístico tomando como variables de respuesta la elongación. Los dos valores más pequeños de la suma de cuadrados fueron discriminados y se utilizaron como datos de error. Como se muestra en la Tabla 13, el tipo de fibra y el tiempo de curado demuestran tener los valores más bajos de suma de cuadrados. El análisis de varianza se muestra en la Tabla 14. Se muestra que el modelo en general es significativo, con un valor F de 101.85 y un valor p de 0.010, indicando que los factores estudiados explican una proporción sustancial de la variabilidad en las propiedades del material compuesto. La suma de cuadrados ajustada de 110.343 sobre un total de 110.583 refleja que la mayoría de la variación es atribuible a los factores evaluados, mientras que el error residual es mínimo.

Tabla 13. Análisis de regresión de diseño de experimentos: Elongación (Minitab 18)

Variable	Suma de cuadrados
Tipo de fibra	0.231
Tipo de hidróxido	0.593
Concentración de impregnado	4.481
Temperatura de impregnado	54.898
Tiempo de impregnado	2.083
Agitación en impregnado	1.565
Longitud de las fibras	34.454
Tipo de resina	4.083
Relación fibra/matriz	3.704
Orientación de las fibras	4.481
Tiempo de curado	0.009

Tabla 14. Análisis de varianza diseño de experimentos Taguchi L12 teniendo la elongación como variable de respuesta

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	110.343	12.2603	101.85	0.010
Tipo de hidróxido	1	0.593	0.5926	4.92	0.157
Concentración de impregnado	1	4.481	4.4815	37.23	0.026
Temperatura de impregnado	1	54.898	54.8981	456.08	0.002
Tiempo de impregnado	1	2.083	2.0833	17.31	0.053
Agitación en impregnado	1	1.565	1.5648	13.00	0.069
Longitud de las fibras	1	34.454	34.4537	286.23	0.003
Tipo de resina	1	4.083	4.0833	33.92	0.028
Relación F/M	1	3.704	3.7037	30.77	0.031
Orientación de las fibras	1	4.481	4.4815	37.23	0.026
Error	2	0.241	0.1204		
Total	11	110.583			

Entre los factores analizados, la temperatura de impregnado se identifica como el más influyente, ya que en este caso, la temperatura favorece la actividad del hidróxido llegando a debilitar la fibra, disminuyendo su calidad estructural y debilitándola provocando que no se adhiera de manera correcta a la matriz y ésta se deforme con mayor facilidad (Dittenber y GangaRao, 2012; Li y col., 2007). De igual manera, la longitud de las fibras tiene un alto impacto en la elongación debido a que, una fibra con mayor longitud puede presentar más discontinuidades e imperfecciones a lo largo del eje, lugares donde se puede provocar la ruptura prematura del material debido a la carga aplicada sobre esos puntos (Keya y col., 2019). El tipo de resina es un factor de impacto sobre la elongación debido a la composición y estructura molecular de la resina (Aziz y col., 2024). La relación fibra/matriz ha demostrado ser de suma importancia para la elongación de los materiales compuestos, ya que, como reportan Sánchez Morales y col., la resistencia a la tracción es función directa del contenido de fibra, mostrando que a mayor contenido de fibra se tiene mayor resistencia, por lo tanto, a mayor contenido de fibra, menor elongación (Sánchez Morales y col., 2024). La orientación de las fibras también resultó ser estadísticamente significativa para la elongación del material, esto debido a que los ángulos de contacto entre el refuerzo y la matriz cambian dependiendo el acomodo del refuerzo a lo largo de la resina, afectando las propiedades de los materiales compuestos (Biswas y col., 2011). Por último, el tiempo de impregnado, la agitación y el tipo de hidróxido no fueron significativos en los valores considerados en este estudio. Se desarrollaron nuevos materiales considerando los parámetros más significativos identificados en el análisis de varianza ajustados a sus correspondientes mejores niveles para obtener resultados que favorezcan a la elongación, resultados que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación entre mejor experimento obtenido en el diseño de experimento contra mejores condiciones para elongación

Variable	Experimento 7	Mejores condiciones
Tipo de fibra	Cruda	Cocida
Tipo de hidróxido	NaOH	KOH
Concentración de impregnado, %	5	5
Temperatura de impregnado, °C	50	50
Tiempo de impregnado, horas	1	1
Agitación en impregnado	No	No
Longitud de las fibras, mm	70	70
Tipo de resina	Opaca	Opaca
Relación fibra/matriz, %	10	10
Orientación de las fibras	Ordenada	Aleatoria
Tiempo de curado, horas	24	24
Resistencia a la tracción, MPa	3.296	3.29
Elongación, %	15.3	15.5

Aunque el aumento en la elongación no es particularmente significativo, se observa que las mejores condiciones para elongación alcanzan un valor promedio del 15.5%, lo que representa un comportamiento más dúctil en comparación con otras configuraciones experimentales. Este resultado resalta la capacidad del análisis estadístico para identificar las variables y parámetros que favorecen esta propiedad, aunque no necesariamente ayuden a la resistencia a la tracción. La mayor elongación sugiere que el material puede absorber más deformación antes de fracturarse, lo que podría ser útil en aplicaciones donde la flexibilidad y la capacidad de deformación sean prioritarias.

La gráfica de tensión-deformación de los materiales bajo las mejores condiciones para resistencia a la tracción y elongación (Figura 20) revela información detallada sobre el comportamiento mecánico del material compuesto, desde su respuesta inicial hasta su fallo.

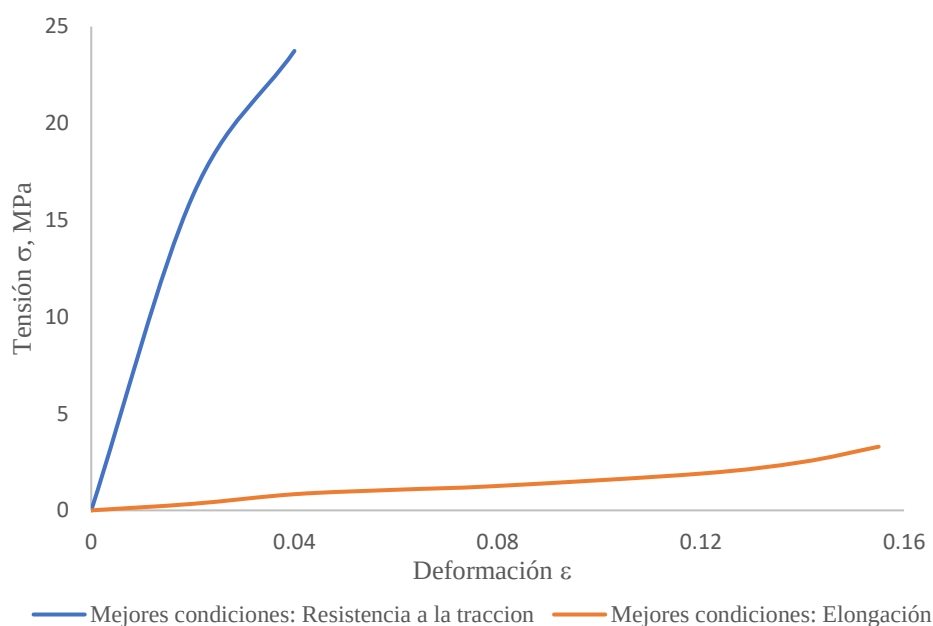


Figura 20. Gráfica de tensión-deformación de los materiales compuestos bajo las mejores condiciones del diseño de experimento para resistencia a la tracción y elongación

Es interesante observar cómo ambas curvas presentan comportamientos opuestos. La curva de las mejores condiciones de la resistencia a la tracción presenta un comportamiento frágil al no presentar una zona plástica significativa, con una deformación muy reducida de 0.04 pero soportando una gran carga de hasta 23.74 MPa. Este es un material con propiedades mecánicas que son aptas para aplicaciones donde no se requiera una deformación extenuante, sin embargo, si se necesite un material que pueda soportar mayores cargas a la tracción. Caso contrario, en la curva de mejores condiciones para la elongación se presenta un comportamiento dúctil debido a su extensa deformación

(0.155) antes de llegar a su ruptura con una resistencia a la tracción muy reducida (3.29 MPa). Este material es de utilidad en aplicaciones donde se requiera tener una deformación prolongada antes de llegar a punto máximo de tensión, sin embargo, se tiene un material que soporta bajas cantidades de carga.

4.5. Diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales en condiciones de humedad

Con el objetivo de comprender cómo las condiciones ambientales afectan las propiedades de los materiales compuestos, se desarrollaron nuevos materiales compuestos siguiendo las mismas condiciones de operación del diseño de experimentos descrito en la Tabla 7. Con fines comparativos entre los diseños de experimentos evaluados sin y con control de humedad se identifican como “diseño de experimentos seco” y “diseño de experimentos húmedo”, respectivamente.

Los materiales compuestos fueron expuestos a condiciones de 100% de humedad relativa antes de su evaluación mecánica (Randhawa y Patel, 2021).. En esta etapa, los materiales compuestos fueron sumergidos en agua para permitir la absorción de humedad, simulando condiciones de alta humedad relativa o exposición directa a ambientes húmedos. Este enfoque busca evaluar los cambios en las propiedades mecánicas, físicas y estructurales del material después de la exposición al agua, proporcionando información valiosa sobre su desempeño en aplicaciones donde la humedad es un factor crítico. Los resultados de la caracterización de los materiales compuestos expuestos a humedad con relación a resistencia a la tracción se muestran en la Figura 21.

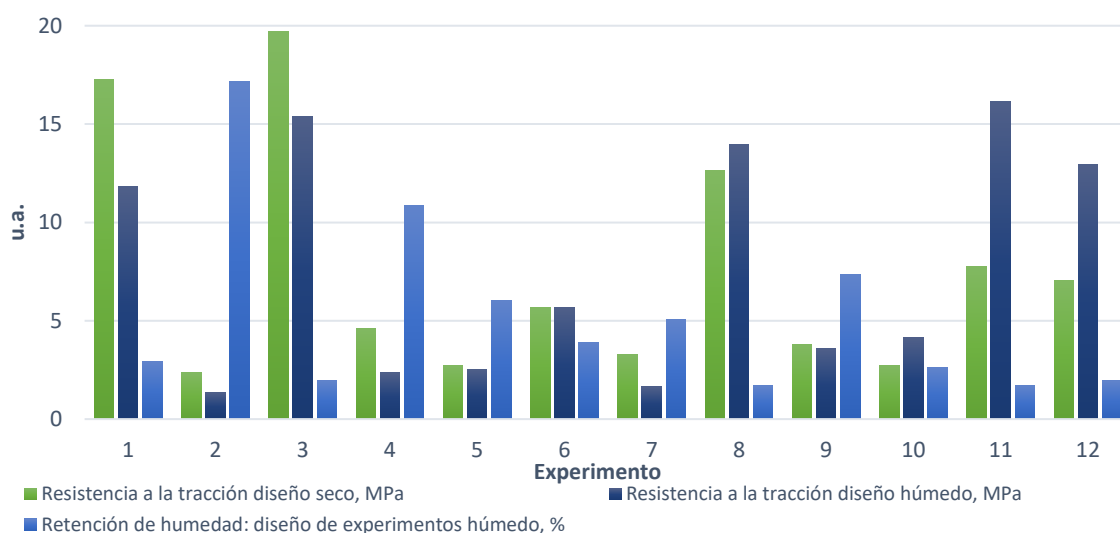


Figura 21. Comparativo entre materiales compuestos de diseños de experimentos seco y húmedo en términos de resistencia a la tracción

Se puede observar que en el diseño de experimentos seco se obtuvo un valor máximo de la resistencia a la tracción de 19.68 MPa mientras que para el diseño de experimentos húmedo fue de 16.15 MPa. De manera general, la humedad es un factor que influye en las propiedades mecánicas del material compuesto. En la Figura 21 se muestra que los experimentos 2, 4 y 7 son los materiales compuestos que mayor retención de humedad presentaron en el diseño de experimentos húmedo, y una disminución considerable en su resistencia a la tracción en comparación con los experimentos 2, 4 y 7 del diseño de experimento seco, además estos experimentos son realizados con resina opaca, la cual permite observar el rol de la elección de tipo de resina puesto que esta define la calidad del sellado en el material compuesto. Cuando la matriz logra sellar adecuadamente las fibras tratadas, la absorción de agua es limitada, y las propiedades mecánicas se conservan o incluso mejoran. En cambio, si la matriz presenta defectos o porosidad, el agua puede penetrar fácilmente, afectando negativamente la adhesión y, en consecuencia, la transferencia de cargas entre la fibra y la matriz (Dittenber y GangaRao, 2012; Thapliyal y col., 2023).

De manera sorpresiva, en los experimentos 11 y 12 se observa un aumento significativo en la resistencia a la tracción cuando los materiales son expuestos a alta humedad relativa, lo cual contradice lo reportado en la literatura (Sánchez Morales y col., 2024). Se aprecia también que estos experimentos son los que menor humedad absorbieron y que ambos están elaborados con la resina cristalina, reafirmando que el tipo de resina es crucial en el desempeño del material cuando se somete a distintas condiciones ambientales. Algunos estudios explican que este fenómeno se debe por el efecto de compactación de las fibras debido al hinchamiento controlado, un endurecimiento de la matriz inducido por la humedad o debido al fenómeno de plastificación por agua que experimenta el material (Khan y col., 2024). Además, el agua puede redistribuir tensiones dentro del material durante la prueba de tracción, mejorando la cohesión general (Mina Hernandez y col., 2020). Para poder comprobar el efecto que tiene la humedad en el sistema estudiado en este trabajo es necesario realizar estudios más profundos del comportamiento de los materiales expuestos a diferentes cantidades de humedad, lo cual abre un campo de investigación de interés.

La composición de las fibras naturales también son un factor clave para explicar las tendencias en estos resultados. Estas fibras, compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, son altamente sensibles a la humedad. El tratamiento alcalino elimina componentes como la hemicelulosa y parte de la lignina, dejando una estructura más cristalina que generalmente mejora la interacción con la matriz. Sin embargo, la exposición al agua puede causar hinchamiento, delaminación y debilitamiento de estas fibras debido a la naturaleza de estas, ya que la celulosa presente en las fibras naturales permite la absorción del agua, teniendo menos sitios activos donde la

resina pueda interactuar con el refuerzo. De igual manera, el agua interfiere en la interacción entre el refuerzo y la matriz, promoviendo la delaminación del material compuesto (Dittenber y GangaRao, 2012).

En la Figura 22 se muestran los espectros FTIR de los materiales compuestos del diseño de experimentos húmedo que presentaron el mejor (Experimento 11), el medio (Experimento 8) y el peor (Experimento 2) comportamiento en términos de resistencia a la tracción. En términos generales, no se observan cambios en las señales que corresponden a la resina (Figura 9) o al refuerzo (Figura 14). Sin embargo, se resalta que en el espectro del Experimento 2, la señal en la banda a $\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a los grupos hidroxilo (OH), es más intensa en comparación con los Experimentos 11 y 8, lo cual justifica el alto contenido de humedad y las bajas propiedades mecánicas del material.

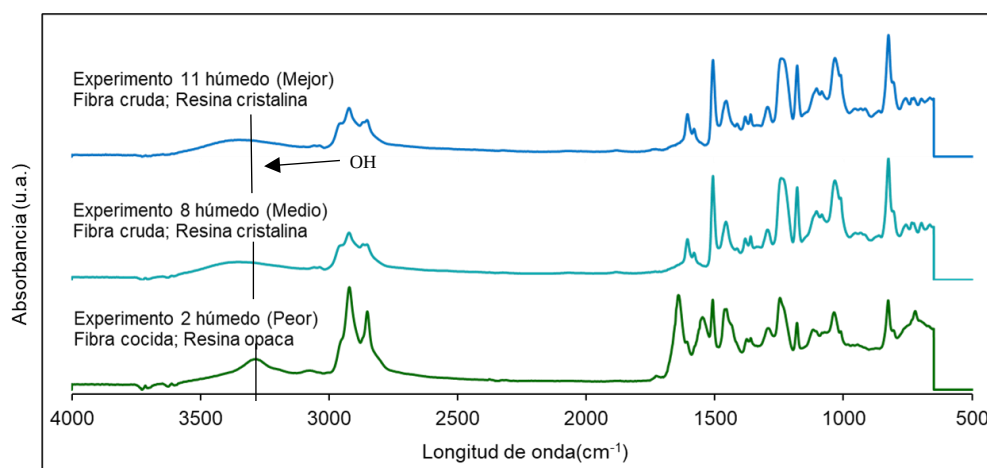


Figura 22. Espectros de FTIR de materiales compuestos de diseño de experimentos en condiciones de humedad con respecto a resistencia a la tracción: mejor, medio y peor

En la Figura 23 se observa el comparativo de la elongación de ambos diseños de experimentos y la retención de humedad del diseño de experimentos húmedo. Los Experimentos 2 y 4 fueron los experimentos que mayor retención de humedad presentaron en el diseño, teniendo como resultado las mayores disminuciones de la elongación en comparación con el diseño seco con el húmedo. Ambos experimentos están elaborados con la resina opaca, confirmando el rol tan importante que tiene el tipo de resina en la elaboración de los materiales compuestos en el presente estudio. Al exponer estos materiales a una humedad tan alta, acorde a lo reportado en la literatura, la matriz permite la absorción de agua por posibles defectos presentes en la estructura de la resina, lo cual reduce significativamente sus propiedades mecánicas (Dittenber y GangaRao, 2012; Thapliyal y col., 2023). Por otra parte, los Experimentos 1, 3, 8, 11 y 12 (elaborados con resina cristalina) aumentaron de manera significativa su elongación al ser expuestos a humedad, siendo también estas pruebas las que menor cantidad de

humedad absorbieron. Este comportamiento de aumento en la deformación se debe a que el agua interfiere en la interacción de la fibra y la resina, provocando mayor delaminación del material, o bien, a un fenómeno de plastificación que experimenta el material debido a la humedad, lo que mejora su comportamiento plástico aumentando su elongación (Dittenber y GangaRao, 2012; Khan y col., 2024).

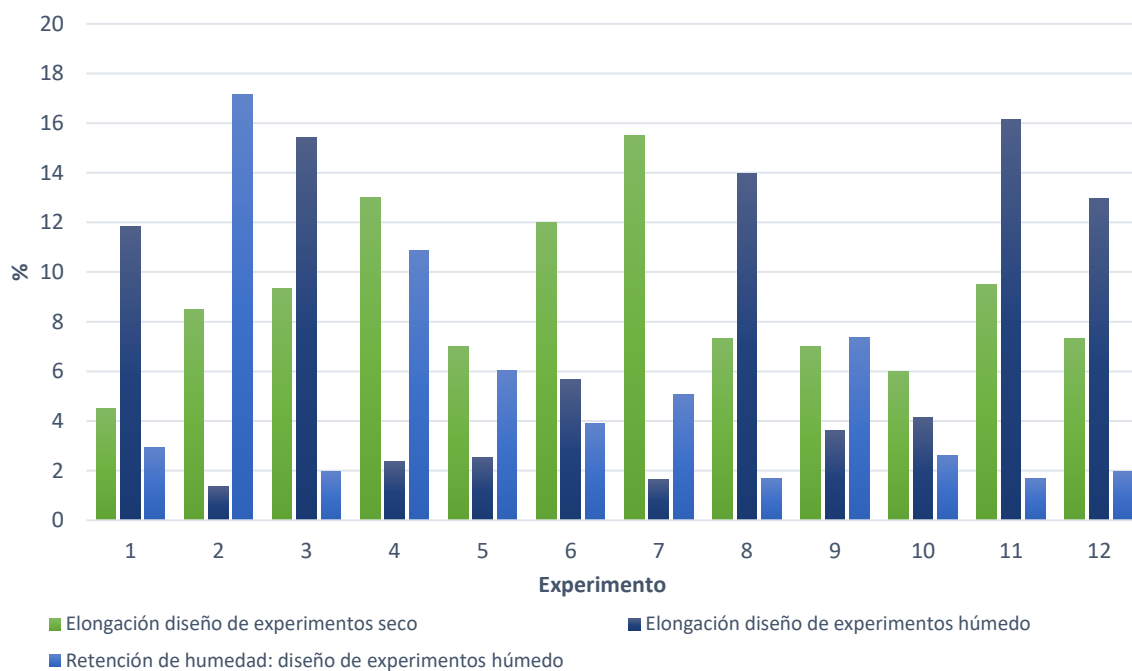


Figura 23. Comparativo entre materiales compuestos de diseños de experimentos seco y húmedo en términos de elongación

Para el análisis del diseño de experimentos húmedo se graficaron los datos obtenidos en las pruebas de tensión-deformación mostrándose en la Figura 24. Los Experimentos 11 y 12 presentan los comportamientos más frágiles del diseño de experimentos húmedo, esto debido a que no presentan una deformación muy pronunciada y en cambio tienen una resistencia a la tracción elevada. Por su parte, el Experimento 11 es el que presenta los mejores resultados mecánicos en lo que respecta a la resistencia a la tracción, teniendo su falla en una deformación de 0.06 y una resistencia máxima de 16.14 MPa, disminuyendo su deformación y aumentando su resistencia notablemente en comparación con los resultados obtenidos en el diseño de experimentos seco (véase Figura 13). Al igual que en el diseño de experimentos seco, los materiales compuestos elaborados con resina opaca presentaron un comportamiento dúctil, comprobando así la importancia del tipo de resina en la elaboración de materiales compuestos. Es interesante observar el comportamiento del Experimento 1, ya que en el diseño de experimentos seco mostró ser el material más frágil, sin embargo, se observa que al estar

en contacto con la humedad tiende a poder deformarse más antes de su ruptura, disminuyendo también su resistencia a la tracción en comparación con el diseño de experimentos seco (Figura 13). Se observa que el Experimento 5 es el que presenta la mayor deformación de todas las pruebas realizadas en el diseño de experimentos húmedo, superando al Experimento 7, el cual había sido el más sobresaliente respecto a la deformación en el diseño seco (Figura 13), lo cual muestra como la humedad mejoró su capacidad de poder deformarse de manera más extensa antes de su ruptura (aumentando su deformación de 0.07 hasta 0.14), sin embargo, reduciendo su resistencia a la tracción (reduciéndola de 2.74 MPa a 2.54 MPa).

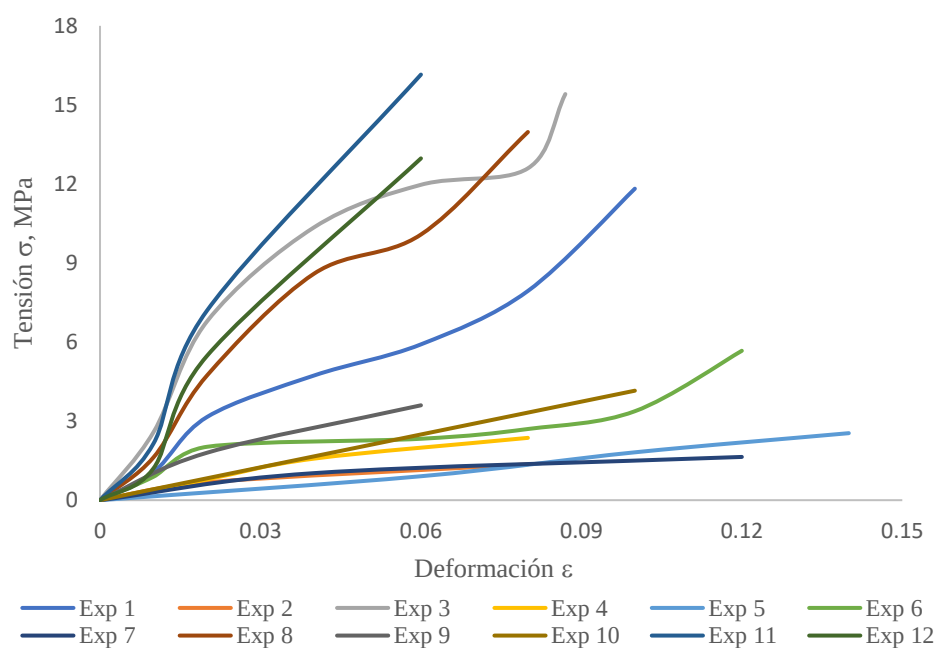


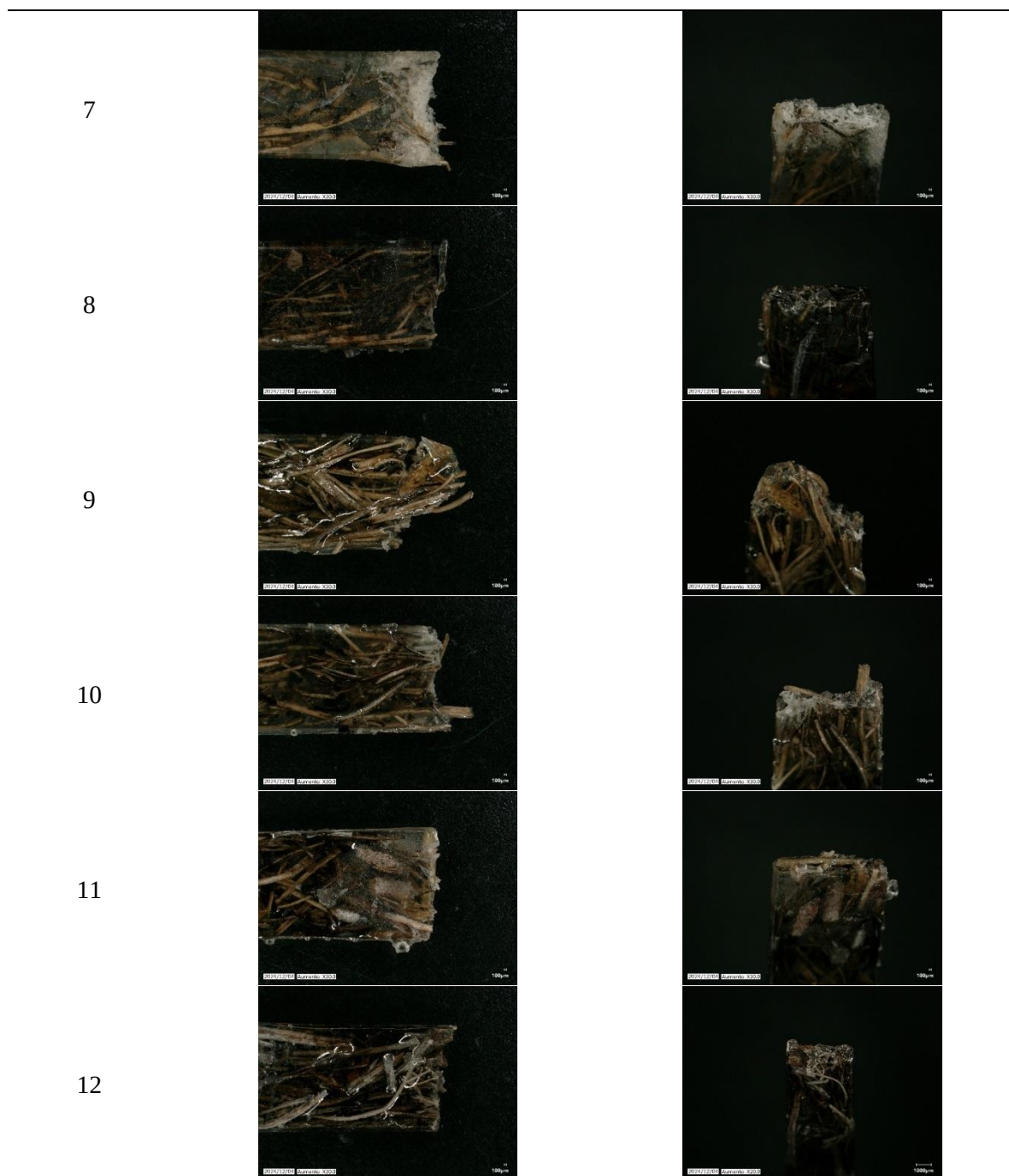
Figura 24. Gráfica de tensión-deformación para diseño de experimentos húmedo

En la Tabla 17 se muestran imágenes de microscopía óptica de la superficie de fractura de los materiales compuestos del diseño de experimentos húmedo. Es de interés observar el Experimento 11 y comparar este mismo experimento con el diseño seco (Tabla 9), donde se muestra el cambio en el tipo de fractura, siendo de un comportamiento dúctil (corte zigzag) en el experimento seco y de comportamiento frágil (corte lineal) en el húmedo, lo cual se ve reflejado en la resistencia a la tracción, esto debido a que, como explican algunos estudios, se debe a un efecto de compactación entre las fibras con la matriz por un hinchamiento, la resina siendo endurecida mejorando la resistencia a la tracción, o bien una plastificación de material compuesto (Khan y col., 2024). Por otro lado, el Experimento 3 muestra el comportamiento opuesto, cambiando de un tipo de fractura frágil en el diseño seco a una fractura dúctil en el diseño húmedo, lo que es consistente con su reducción en

la resistencia a la tracción, siendo un material menos resistente, pero con una mayor deformación (Soleiman Dehkordi y col., 2019). Finalmente, el Experimento 2 obtuvo los peores resultados de resistencia a la tracción en ambos diseños y no se aprecian cambios en su comportamiento dúctil (Herman, 2013).

Tabla 16. Fotografías con microscopía óptica tomadas a diseño de experimentos húmedo

Experimentos	Corte longitudinal	Corte transversal
1		
2		
3		
4		
5		
6		



4.5.1. Análisis estadístico de diseño de experimentos para materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Con los resultados de la caracterización de los materiales compuestos del diseño experimental húmedo se identificaron los factores que afectan la resistencia a la tracción y la elongación. Se siguió

la misma estrategia para el análisis estadístico utilizado en el diseño de experimentos seco, a través de la suma de cuadrados y el ANOVA.

En la Tabla 18 se muestra la suma de cuadrados del análisis de regresión. Cabe destacar que la temperatura de impregnado se mantuvo como variable de error como en el diseño de experimentos seco, sin embargo, en este diseño húmedo el tipo de hidróxido se presenta como variable error, mientras que en el diseño seco la variable de orientación de las fibras fue seleccionada como error por su valor bajo en la suma de cuadrados, lo que se atribuye al comportamiento de los materiales con la exposición de humedad, sin embargo, esto debe validarse estadísticamente. El análisis de varianza se muestra en la Tabla 19.

Tabla 17. Análisis de regresión de diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18)

Variable	Suma de cuadrados
Tipo de fibra	14.769
Tipo de hidróxido	1.299
Concentración de impregnado	1.980
Temperatura de impregnado	0.327
Tiempo de impregnado	8.428
Agitación en impregnado	2.141
Longitud de las fibras	20.553
Tipo de resina	303.368
Relación fibra/matriz	2.367
Orientación de las fibras	5.994
Tiempo de curado	19.139

Tabla 18. Análisis de varianza diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	378.738	42.082	51.77	0.019
Tipo de fibra	1	14.769	14.769	18.17	0.051
Concentración de impregnado	1	1.980	1.980	2.44	0.259
Tiempo de impregnado	1	8.428	8.428	10.37	0.084
Agitación en impregnado	1	2.141	2.141	2.63	0.246
Longitud de las fibras	1	20.553	20.553	25.28	0.037
Tipo de resina	1	303.368	303.368	373.20	0.003
Relación F/M	1	2.367	2.367	2.91	0.230
Orientación de las fibras	1	5.994	5.994	7.37	0.113
Tiempo de curado	1	19.139	19.139	23.54	0.040
Error	2	1.626	0.813		
Total	11	380.364			

Los factores que afectan la resistencia a la tracción en el diseño de experimentos húmedo son como sigue en orden de importancia: tipo de resina ($p = 0.003$), longitud de las fibras ($p = 0.037$) y tiempo de curado ($p = 0.040$). El tipo de resina y la longitud de las fibras afectan la resistencia a la tracción en el diseño seco y en el diseño húmedo. La elección del tipo de resina demuestra nuevamente su papel crítico en la elaboración de materiales compuestos, así como la longitud de las fibras para la transferencia de carga (Aziz y col., 2024; Keya y col., 2019).

Es interesante observar que el tiempo de curado, en el diseño de experimentos seco, no fue una variable significativa, pero en el diseño de experimentos húmedo está siendo determinante en el comportamiento mecánico, ya que como se menciona en la literatura, el agua actúa como acelerante en el proceso de curado y mejora las propiedades plásticas del material (Wu y col., 2004). Los factores restantes no tuvieron efecto significativo para la resistencia a la tracción.

Para la elongación se hizo la discriminación de las tres variables con los valores menores de suma de cuadrados (Tabla 20), obteniendo como variables error la agitación en impregnado, la longitud de las fibras y la orientación de las fibras, mostrando el análisis de varianza en la Tabla 21.

Tabla 19. Análisis de regresión de diseño de experimentos en condiciones de humedad: elongación (Minitab 18)

Variable	Suma de cuadrados
Tipo de fibra	13.3704
Tipo de hidróxido	0.9259
Concentración de impregnado	35.5926
Temperatura de impregnado	0.9259
Tiempo de impregnado	4.4815
Agitación en impregnado	0.0370
Longitud de las fibras	0.0370
Tipo de resina	4.4815
Relación fibra/matriz	4.4815
Orientación de las fibras	0.0370
Tiempo de curado	10.7037

Tabla 20. Análisis de varianza de diseño de experimentos en condiciones de humedad: resistencia a la tracción (Minitab 18)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	8	74.9630	9.3704	253.00	0.000
Tipo de fibra	1	13.3704	13.3704	361.00	0.000
Tipo de hidróxido	1	0.9259	0.9259	25.00	0.015
Concentración de impregnado	1	35.5926	35.5926	961.00	0.000
Temperatura de impregnado	1	0.9259	0.9259	25.00	0.015
Tiempo de impregnado	1	4.4815	4.4815	121.00	0.002
Tipo de resina	1	4.4815	4.4815	121.00	0.002
Relación F/M	1	4.4815	4.4815	121.00	0.002
Tiempo de curado	1	10.7037	10.7037	289.00	0.000
Error	3	0.1111	0.0370		
Total	11	75.0741			

Sorpresivamente, todas las variables restantes afectan significativamente el diseño de experimentos, sin embargo, los tres factores más determinantes según la suma de cuadrados son: concentración de impregnado (35.59), tipo de fibra (13.37) y tiempo de curado (10.70). Según se ha visto en estudios, si durante el tratamiento alcalino de la fibra se expone a una concentración elevada del agente alcalinizante, la fibra se ve afectada estructuralmente, volviéndose débil y eliminando de forma excesiva componentes necesarios para una correcta adhesión entre el refuerzo y la matriz (lignina y hemicelulosa) (Dittenber y GangaRao, 2012; Li y col., 2007), de igual manera, el tipo de fibra es importante ya que, en este estudio, la fibra cocida presenta en su estructura una presencia menor de lignina en su superficie, lo cual provoca que la celulosa quede expuesta y pueda absorber mayor cantidad de humedad, lo que provoca la delaminación prematura del material y su mayor deformación (Khan y col., 2024). Por último, un tiempo de curado reducido provoca afecta significativamente la elongación, esto debido a que cuando la resina no se cura completamente, la red polimérica formada es menos densa y presenta una estructura más flexible y menos resistente (Cruz-Cruz y col., 2022).

4.6. Comparación entre materiales compuestos de fibra de bagazo de agave y materiales compuestos de fibra y resina biodegradable

En esta sección, se hace una comparación detallada entre los materiales compuestos elaborados con fibra de bagazo de agave, desarrollados en el presente estudio, y aquellos materiales compuestos de fibra de raquis de plátano reforzados con resina Mopa-Mopa, tal como se describe en el artículo titulado *Using Plantain Rachis Fibers and Mopa-Mopa Resin to Develop a Fully Biobased Composite Material*, escrito por Valeria Sánchez Morales y colaboradores (Sánchez Morales y col.,

2024). El objetivo es evaluar y contrastar las propiedades mecánicas de los compuestos, enfocándose principalmente en la resistencia a la tracción y la elongación, dos parámetros clave para determinar el comportamiento y las aplicaciones potenciales de estos materiales. A través de esta comparación, se busca identificar las ventajas y limitaciones de cada tipo de material compuesto en función de su desempeño mecánico, considerando los diferentes tipos de fibra y matrices utilizadas, y cómo estos factores afectan la funcionalidad de los compuestos en aplicaciones industriales.

4.6.1. Sin considerar efectos de humedad

Al analizar los resultados obtenidos en el presente trabajo, han salido a relucir una considerable variabilidad en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos fabricados con fibra de bagazo de agave. En particular, la resistencia a la tracción muestra diferencias importantes entre los diferentes experimentos realizados, que varían entre 2.36 MPa en el Experimento 2 y 19.69 MPa en el Experimento 3. Este rango tan amplio refleja que las condiciones de fabricación, como el contenido de fibra y la interacción entre la fibra y la matriz, juegan un papel fundamental en la determinación de las propiedades del material. A pesar de esta variabilidad, los compuestos elaborados con fibra de agave, en general, muestran un rendimiento bastante competitivo en comparación con las fibras de raquis de plátano, tanto nativas como alcalinizadas, descritas en el artículo que me has proporcionado. Al comparar los resultados del presente trabajo con los obtenidos en el artículo para las fibras de raquis de plátano (Tabla 22), se puede observar que las fibras nativas, cuando tienen un contenido de 5% de fibra (NF/5), alcanzan una resistencia de 16.8 MPa, mientras que con un contenido de fibra del 15% (NF/15), la resistencia cae a 6.0 MPa. Este comportamiento refleja una tendencia en la que la resistencia de las fibras nativas disminuye conforme aumenta el contenido de fibra, lo que puede estar relacionado con la forma en que las fibras interaccionan con la matriz. En mi caso, algunas de mis muestras, como la del Experimento 3 (19.69 MPa), alcanzan una resistencia superior a la de las fibras de raquis de plátano alcalinizadas, que llegan hasta 18.2 MPa con un 15% de fibra (AF/15). Este resultado sugiere que, bajo ciertas condiciones, los compuestos de fibra de agave tienen el potencial de superar en términos de resistencia a la tracción incluso a las fibras alcalinizadas de plátano, lo cual es un hallazgo bastante positivo. Sin embargo, también se observa que en algunos experimentos, como el número 2, la resistencia es significativamente menor (2.36 MPa), lo que indica que hay factores adicionales que afectan la calidad del compuesto, como la distribución de las fibras, la cantidad de resina, o la calidad de la adherencia entre la fibra y la matriz. Este comportamiento podría ser una oportunidad para mejorar las condiciones de fabricación y la consistencia en los resultados.

Tabla 21. Valores máximos de resistencia y deformación a la rotura para las formulaciones de compuestos de base biológica estudiadas (Sánchez Morales y col., 2024)

Bloque	Nivel	Prueba	Contenido de aditivo	Tipo de fibra	Contenido de fibra (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)
1	1	NF/A/5	Con aditivo	Nativa	5	15.9	7
		NF/A/10			10	8.9	7.3
		NF/A/15			15	6	7.6
	2	NF/5	Sin aditivo	Nativa	5	16.8	5.1
		NF/10			10	11.1	5.9
		NF/15			15	10.7	6.7
2	1	AF/A/5	Con aditivo	Alcalinizada	5	14.1	8.7
		AF/A/10			10	16.2	8
		AF/A/15			15	18.2	6.7
	2	AF/5	Sin aditivo	Alcalinizada	5	4.3	7.5
		AF/10			10	8.6	5.9
		AF/15			15	14.8	5.3

Por otro lado, al analizar la elongación, los compuestos de fibra de bagazo de agave presentan una tendencia a mostrar una mayor capacidad de deformación antes de la fractura en comparación con las fibras de raquis de plátano. En estos experimentos, la elongación varió entre 4.5% (en el experimento 1) y 15.5% (en el experimento 7), con los valores más altos observados en las muestras con mayor contenido de fibra. Esta alta elongación indica que los compuestos son más flexibles y pueden absorber mayor deformación antes de alcanzar la rotura, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones donde se requiere un material flexible y resistente. En comparación, las fibras de raquis de plátano muestran una elongación mucho más baja, con valores que oscilan entre 5.1% (para un 5% de fibra) y 7.6% (para un 15% de fibra) en las muestras nativas, y entre 5.3% (para un 15% de fibra) y 8.7% (para un 5% de fibra) en las muestras alcalinizadas. Este comportamiento indica que las fibras de raquis de plátano son menos flexibles que las de agave. La mayor flexibilidad de los compuestos con fibra de agave podría ser vista como una ventaja en términos de rendimiento, ya que en ciertos contextos se prefieren materiales con mayor capacidad de deformación, lo que podría mejorar la durabilidad bajo cargas cíclicas o dinámicas. Sin embargo, este aumento en la elongación podría ser un desafío si se requiere un material con alta rigidez y poca deformación, ya que podría afectar la capacidad del material para resistir cargas sin deformarse excesivamente. Al comparar los resultados, también es relevante señalar que en el artículo se observó que el tratamiento alcalino de las fibras de raquis de plátano tiene un impacto positivo en la resistencia a la tracción, mejorando la adherencia entre la fibra y la matriz, lo que resulta en un material más resistente. Sin embargo, en el presente trabajo, aunque se utilizó un tratamiento alcalino para las fibras de agave, no se incorporaron aditivos adicionales como el ácido esteárico, el cual en las fibras de plátano tiene un efecto plastificante que mejora la resistencia y reduce la absorción de humedad. El hecho de no haber utilizado este aditivo podría ser una de las razones por las que algunos de los compuestos en el presente trabajo, a pesar de mostrar un buen rendimiento, presentan una mayor variabilidad en términos de resistencia y

elongación. El ácido esteárico podría haber ayudado a mejorar la estabilidad de las propiedades mecánicas, reduciendo la sensibilidad del material a la humedad, un factor crítico en aplicaciones al aire libre o en ambientes de alta humedad.

4.6.2. Considerando efectos de humedad

El análisis de los efectos de la humedad en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, tanto los fabricados con fibra de bagazo de agave en este estudio como los descritos en el artículo, demuestra una tendencia consistente en que el aumento de la humedad relativa deteriora significativamente las propiedades mecánicas de estos materiales. Este comportamiento se observa tanto en la resistencia a la tracción como en la elongación, dos de las propiedades clave utilizadas para caracterizar el desempeño mecánico de los materiales compuestos. La influencia de la humedad en estas propiedades refleja la vulnerabilidad inherente de los materiales biodegradables a las condiciones ambientales, particularmente a la humedad, lo que es crucial para su viabilidad en aplicaciones prácticas. En el caso de los compuestos de fibra de bagazo de agave, se observa que, a medida que aumenta la humedad, la resistencia a la tracción disminuye notablemente.

En los experimentos realizados en el presente trabajo, el contenido de humedad varió entre 1.7% y 17.15%, y la resistencia a la tracción mostró una respuesta dependiente de la humedad. Por ejemplo, en el experimento 1, donde la humedad es baja (2.92%), la resistencia a la tracción fue relativamente alta, alcanzando 11.82 MPa, lo que sugiere que el material tiene una buena estabilidad estructural en condiciones secas o con baja humedad. Sin embargo, en el experimento 2, donde la humedad alcanza el 17.15%, la resistencia a la tracción cae drásticamente a 1.36 MPa, lo que indica que la humedad ha comprometido significativamente la integridad estructural del compuesto. Este comportamiento es coherente con los resultados reportados en el artículo, donde los compuestos con fibra de raquis de plátano, especialmente aquellos sin aditivos, muestran una pérdida sustancial en la resistencia a la tracción con el aumento de la humedad.

En este artículo, se reporta que a una humedad relativa del 97%, los compuestos sin aditivos experimentan una caída de 16.8 MPa a 3.2 MPa, lo que subraya que la humedad afecta gravemente la resistencia estructural del material, especialmente en materiales compuestos biodegradables sin tratamiento adecuado (Tabla 23).

Tabla 22. Valores máximos de resistencia y deformación para las muestras del material compuesto sin aditivo y las muestras del material compuesto con aditivo de las mezclas de mejor rendimiento (Sánchez Morales y col., 2024)

Muestra	Contenido de aditivo	Tiempo (D)	Humedad relativa (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)
Mopa-Mopa	Con aditivo	0	-	11.8	7.1
		30	47	8.9	31.4
			77	8.1	79.9
			97	4.5	80.9
	Sin aditivo	0	-	20.9	9
		30	47	18.1	13
			77	12.1	25.8
			97	6.3	26.1
NF / A / 5	Con aditivo	0	-	15.9	7
		30	47	5.2	9.2
			77	2.7	16.2
			97	2.6	28.3
NF / 5	Sin aditivo	0	-	16.8	5.1
		30	47	6.5	3.8
			77	3.8	7.3
			97	3.2	42.4
AF / A / 15	Con aditivo	0	-	18.2	6.7
		30	47	9.7	9.4
			77	5.2	11.1
			97	3.9	18.7
AF / 15	Sin aditivo	0	-	14.8	5.3
		30	47	9	6.1
			77	6.2	7.8
			97	5.3	24.9

Esta caída en la resistencia a la tracción con el aumento de la humedad puede explicarse por varios mecanismos. Uno de los más relevantes es la absorción de agua por las fibras naturales, que tienden a hincharse al absorber humedad, lo que puede alterar la matriz del material compuesto y debilitar la adhesión entre la fibra y la resina. Este fenómeno puede generar fisuras en la interfaz de la fibra-matriz, lo que reduce la capacidad del material para resistir esfuerzos mecánicos. Además, el agua puede actuar como un plastificante, disminuyendo la rigidez del material y, por ende, su capacidad para soportar cargas sin deformarse permanentemente. Este tipo de comportamiento es característico en materiales compuestos biodegradables, que, a pesar de sus beneficios medioambientales, presentan limitaciones en cuanto a la estabilidad ante la humedad. En cuanto a la elongación, los compuestos de fibra de bagazo de agave también muestran una disminución a medida que aumenta la humedad. La elongación es una propiedad crucial para determinar la capacidad de un material para deformarse antes de fracturarse, lo que es relevante para aplicaciones que implican esfuerzos dinámicos o impactos. En el experimento 5, donde la humedad es del 6.04%, la elongación

alcanza el 14%, lo que indica una buena capacidad de deformación. Sin embargo, en el experimento 9, con una humedad de 7.37%, la elongación se reduce a 6%, lo que sugiere que el aumento de la humedad limita la capacidad del material para deformarse sin fallar. Este comportamiento es consistente con los resultados del artículo, donde los compuestos de fibra de raquis de plátano muestran una disminución significativa en la elongación con el aumento de la humedad. Por ejemplo, en las muestras sin aditivos a 97% de humedad relativa, la elongación cae del 16.2% a 3.2%. Este patrón refleja cómo la humedad no solo afecta la resistencia del material, sino también su capacidad para deformarse bajo carga. El comportamiento observado en los compuestos de fibra de agave y en los compuestos de fibra de raquis de plátano muestra la importancia de la humedad en el desempeño de los materiales compuestos biodegradables. La absorción de agua por las fibras naturales parece ser un factor determinante en la degradación de las propiedades mecánicas. Este fenómeno se debe principalmente a la naturaleza de las fibras vegetales, que tienden a absorber agua y a modificar su estructura interna, lo que resulta en una disminución de la rigidez y la resistencia. En materiales compuestos sin tratamiento adecuado o sin aditivos que protejan las fibras, este efecto es más pronunciado. A pesar de las desventajas que la humedad representa para la resistencia a la tracción y la elongación de estos compuestos, es importante destacar que los aditivos o tratamientos superficiales pueden ofrecer soluciones para mitigar estos efectos. Por ejemplo, en el artículo se menciona que la adición de ácido esteárico ayuda a reducir la absorción de agua en los compuestos de fibra de raquis de plátano, lo que a su vez mejora su rendimiento en condiciones de alta humedad. La incorporación de aditivos, o la mejora en el tratamiento superficial de las fibras, podría ser una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad de los compuestos biodegradables y hacerlos más adecuados para aplicaciones en entornos con alta humedad.

4.7. Fibras de carbón

Las siete fibras estabilizadas térmicamente se identifican como sigue: AM 11 (base Acrilonitrilo-Acrilato de Metilo), 1.282, CPM, L15 paso 2, L15 paso 3, L15 final (base Acrilonitrilo-Acetato de Vinilo) y L15 silanizada (Base Acrilonitrilo-Acetato de Vinilo con tratamiento superficial de silanizado). La selección de estas fibras se fundamenta en su evaluación como refuerzo en materiales compuestos y analizar como el cambio en la composición química, la temperatura del tratamiento térmico en el proceso de estabilización y la funcionalización mediante silanización afectan su interacción fibra-matriz en términos de resistencia, elongación y adherencia en materiales compuestos.

Se obtuvieron los espectros FTIR de las siete fibras estabilizadas (Figura 25). Los grupos funcionales de interés en este estudio se pueden identificar en el rango de $1580\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$ y $2240\text{--}2243\text{ cm}^{-1}$ que corresponden a los grupos C=O , C=N y C=C , y a los grupos nitrilo $\text{C}\equiv\text{N}$, respectivamente. Además, los grupos O-H y N-H son identificados en la región de $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, los cuales están asociados al proceso de estabilización (Fu y col., 2014). La señal a 1730 cm^{-1} está asociada a los grupos carbonilo (C=O) de las fibras estabilizadas. Estos grupos funcionales son comunes para evaluar la transformación estructural de fibras precursoras en el proceso de estabilización y carbonización (Alcalá-Sánchez, 2021).

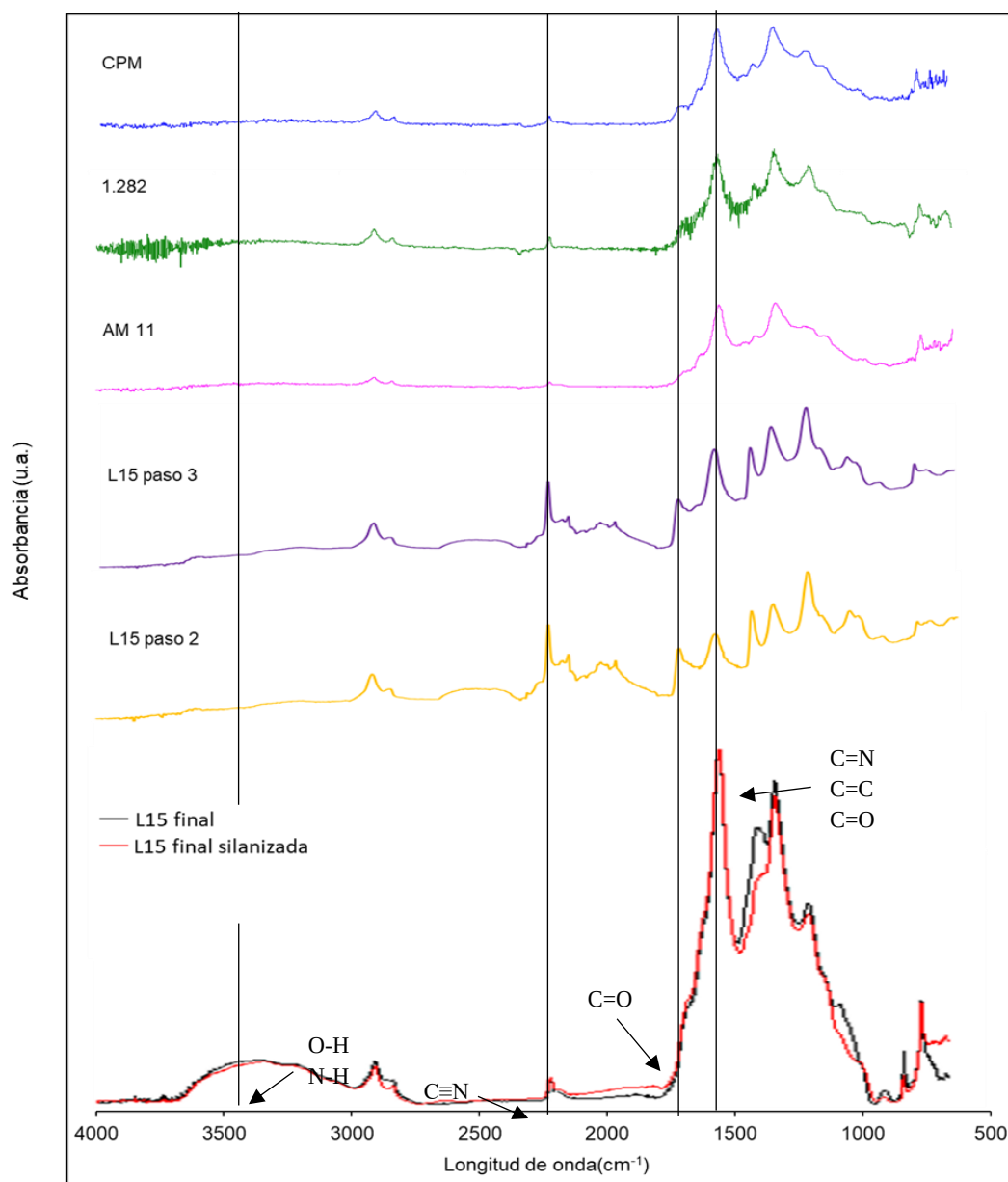


Figura 25. Espectros FTIR de fibras estabilizadas

Con los espectros FTIR se determinó el índice de estabilización de acuerdo con la ley de Lambert-Beer y a partir de la relación de absorbancias $A_{1580-1660}/A_{2240-2243}$, donde $A_{1580-1660}$ es la intensidad de absorción de la combinación de los grupos C=O, C=N y C=C en el rango 1580-1660 cm^{-1} y $A_{2240-2243}$ es la intensidad de absorción de los grupos nitrilo $\text{C}\equiv\text{N}$ en rango de 2240-2243 cm^{-1} (Alcalá-Sánchez, 2021). La caracterización y descripción general de las fibras estabilizadas se muestra en la Tabla 24.

Tabla 23. Caracterización y descripción de fibras estabilizadas

Nombre de la fibra	Descripción	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %	Módulo de Young, MPa	Índice de estabilización
1.282	Temperatura de estabilización: 240°C	175.42	22.5	654.72	3.61
AM 11	Temperatura de estabilización: 240°C	143.30	8.67	392.25	8.5
CPM	Temperatura de estabilización: 240°C	193.87	20	556.90	7.5
L15 paso 2	Temperatura de estabilización: 200°C	271.54	16.34	1036.18	0.93
L15 paso 3	Temperatura de estabilización: 220°C	291.63	6.24	891.18	1.26
L15 final	Temperatura de estabilización: 240°C	175.08	6.27	806.92	13.61
L15 silanizada	Temperatura de estabilización: 240°C-silanización (Tiscareño y Coronel, 2013)	96.82	2.46	547.35	13.61

Es de esperarse que en las propiedades mecánicas de las fibras en términos de resistencia a la tracción, elongación, módulo de Young e índice de estabilización se muestren diferencias, las cuales están relacionadas con la estructura interna, el tratamiento térmico y el tratamiento superficial (Sieira y col., 2024). Es importante señalar que el índice de estabilización está relacionado con la temperatura de estabilización y las reacciones químicas que ocurren durante este proceso conocidas como reacciones de estabilización (deshidrogenación, oxidación y ciclización) (Fu y col., 2017). Este parámetro es clave en la comprensión del comportamiento de la fibra como refuerzo en materiales poliméricos. Además, es bien sabido que las propiedades de los materiales compuestos dependen de la interacción entre el refuerzo y la matriz, y no solamente de las propiedades individuales de sus

componentes, por lo tanto, la diferencia entre las propiedades de las fibras bajo estudio permitirá evaluar su desempeño como refuerzo de una resina epoxi.

Se presentan los resultados para los materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas en la Tabla 25. Estos materiales fueron elaborados con la resina cristalina, esto debido a que se buscan analizar los resultados de las pruebas mecánicas de los distintos tipos de fibras, priorizando la resistencia a la tracción. Este análisis permite establecer las características distintivas de estos materiales resaltando su potencial para aplicaciones de alto rendimiento. Es importante mencionar que la preparación de estos materiales se llevó a cabo con una concentración del 4-5% p/p de refuerzo con respecto a la resina.

Tabla 24. Resultados de pruebas mecánicas en materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas

Fibra utilizada como refuerzo	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %
1.282	23.24	7.33
AM II	16.29	5.33
CPM	19.85	4.00
L15 paso 2	26.65	3.33
L15 paso 3	26.26	4.00
L15 final	23.14	3.33
L15 silanizada	27.16	5.33

En el análisis de las fibras utilizadas en los materiales compuestos, se pueden observar diferencias notables entre las propiedades mecánicas de las fibras en función de los tratamientos aplicados. Los materiales compuestos reforzados con las fibras L15 paso 2 y L15 paso 3 presentan valores de resistencia a la tracción muy similares, tanto en la fibra individual como en el material compuesto. Para estos dos materiales compuestos la interacción entre la fibra y la matriz está influenciada por el índice de estabilización de las fibras y por la presencia de grupos funcionales carbonilo (C=O) que corresponden al precursor y su comonomero, detectados en el análisis FTIR en la banda de 1730 cm^{-1} .

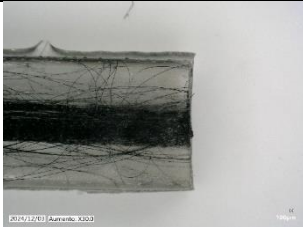
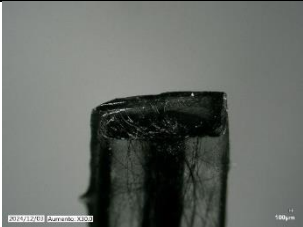
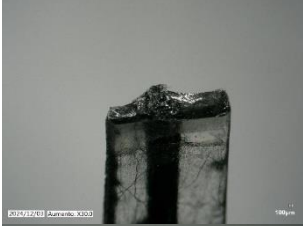
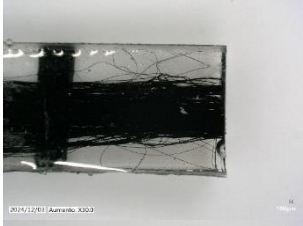
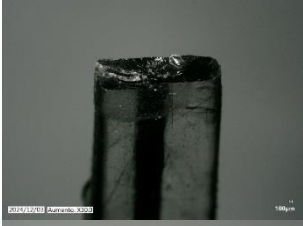
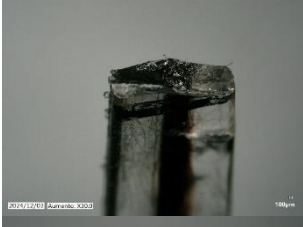
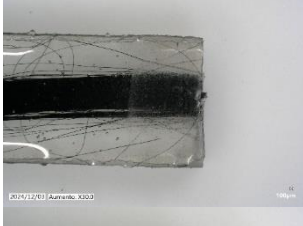
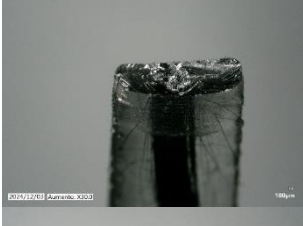
Por otro lado, la fibra L15 final, a pesar de presentar un mayor índice de estabilización, se observa que las propiedades mecánicas disminuyeron, no solo en la fibra sino también en el material compuesto. Esta disminución se asocia a una estructura molecular mayormente oxidada de la fibra en el proceso de estabilización, la cual se puede evidenciar por la aparición de la señal en la banda a $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ en el espectro FTIR, correspondiente a grupos O-H y N-H (Fu y col., 2014). Un comportamiento parecido se observa en el comparativo entre los materiales compuestos reforzados

con las fibras 1.282 y CPM, las cuales se compararon debido a que tienen la misma base química a fin de observar el efecto de los índices de estabilización de las fibras.

Respecto a los materiales compuestos con la fibra AM II, se observaron los resultados con las propiedades mecánicas más bajas de los materiales compuestos elaborados con las fibras estabilizadas pese a tener un índice de estabilización relativamente alto de 8.5. Este comportamiento indica que la base química de la fibra influye directamente en la evolución de su estructura durante el proceso de estabilización. En este caso, el tratamiento térmico evidencia una estructural débil de la fibra por el rompimiento de enlaces dentro de su estructura molecular (Hao y col., 2018). Finalmente, el material compuesto con la fibra L15 silanizada muestra un comportamiento sorprendente, ya que la caracterización individual de la fibra muestra que tiene la peor resistencia a la tracción de todas las fibras, sin embargo, el material compuesto elaborado con este refuerzo es el que presenta la mayor resistencia a la tracción de todas las pruebas realizadas, lo cual se justifica con su tratamiento superficial, que aunque individualmente la fibra no tiene una buena resistencia a la tracción en comparación con las demás fibras estabilizadas de este estudio, al momento de interactuar con la matriz, la fibra tiene mayor afinidad con la resina y el material obtiene una resistencia superior que todos los demás experimentos, lo que comprueba que el tratamiento superficial por silanizado mejora la adhesión en la interfaz entre el refuerzo y la matriz del material compuesto (Jiang y col., 2015).

El análisis de microscopía óptica de las fibras utilizadas en los diferentes materiales compuestos obtenidos, se muestran en la Tabla 26, se observa una diferencia significativa en el comportamiento de las fibras estabilizadas en comparación con las fibras naturales. Las imágenes revelan que, a diferencia de las fibras naturales, todas las fibras estabilizadas muestran un rompimiento correcto del refuerzo en lugar de un despliegue de la fibra de la matriz. Este comportamiento es importante, ya que indica una interacción más eficiente entre las fibras y la matriz, lo que contribuye a una transferencia de carga más efectiva y mejora la integridad estructural del material compuesto. El hecho de que las fibras tratadas no presenten despliegue al momento de la ruptura significa que la fibra permanece unida a la matriz de manera adecuada durante el proceso de carga, lo que permite una distribución uniforme de los esfuerzos a través del material compuesto (Huang y col., 2021). Este tipo de comportamiento es altamente deseable en materiales de refuerzo, ya que garantiza que las fibras actúan como refuerzos efectivos dentro de la matriz, mejorando la resistencia global del material sin que se presenten fallas prematuras por despegue o separación de la fibra (Huang y col., 2021).

Tabla 25. Fotografías con microscopía óptica tomadas a materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas

Fibra	Corte longitudinal	Corte transversal
1.282		
AM II		
CPM		
L15 paso 2		
L15 paso 3		
L15 final		
L15 silanizada		

El observar estos comportamientos en las imágenes de microscopía óptica subraya la importancia de los tratamientos en las fibras para mejorar la adherencia con la matriz. Las fibras estabilizadas, especialmente aquellas sometidas a procesos como el de silanización, evidencian una estructura más robusta y una mejor integración con la matriz, lo que se traduce en un material compuesto con un rendimiento superior en términos de resistencia a la tracción y durabilidad.

En la Figura 26 se muestran las curvas de tensión-deformación para los materiales compuestos elaborados con fibras estabilizadas.

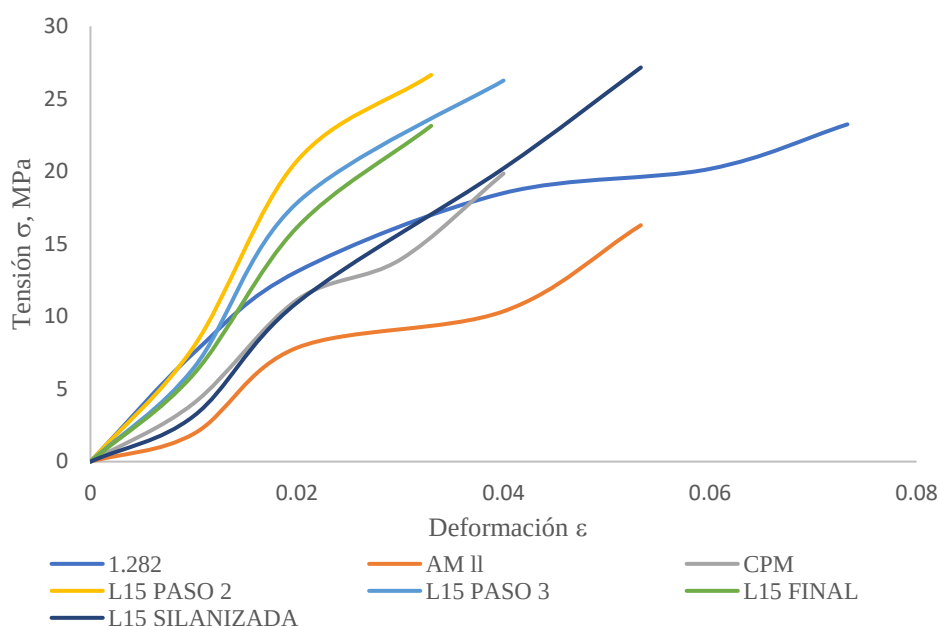


Figura 26. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos elaborados con fibras estabilizadas

El material compuesto elaborado con la fibra 1.282 es la que presenta el comportamiento más dúctil de todas las pruebas experimentales debido a su mayor deformación. Esto concuerda con los resultados de la caracterización de la fibra de manera individual (Tabla 24) donde la fibra 1.282 presentó la mayor elongación de las fibras estabilizadas, lo cual demuestra la intimidad entre el refuerzo y la matriz al combinar sus propiedades en el material compuesto. De igual manera, el material con la fibra AM II presenta un comportamiento dúctil al mostrar de manera pronunciada su región plástica en comparación con los demás materiales, siendo este compuesto el que tiene la menor resistencia a la tracción. A pesar de que la fibra L15 silanizada mostró la menor resistencia a la tracción de manera individual, el material compuesto elaborado con ella alcanzó la mayor resistencia entre todas las pruebas. Este resultado se atribuye al tratamiento superficial por silanizado, que mejora

la compatibilidad entre la fibra y la matriz. Así, se demuestra que una mejor adhesión en la interfaz puede compensar una baja resistencia de la fibra (Jiang y col., 2015).

Se obtuvieron las imágenes SEM de los materiales compuestos de fibras estabilizadas, mostrando las pruebas que presentaron peores propiedades mecánicas en la Figura 27 (fibra AM II) y las que presentaron mejores propiedades en la Figura 28 (fibra L15 silanizada).

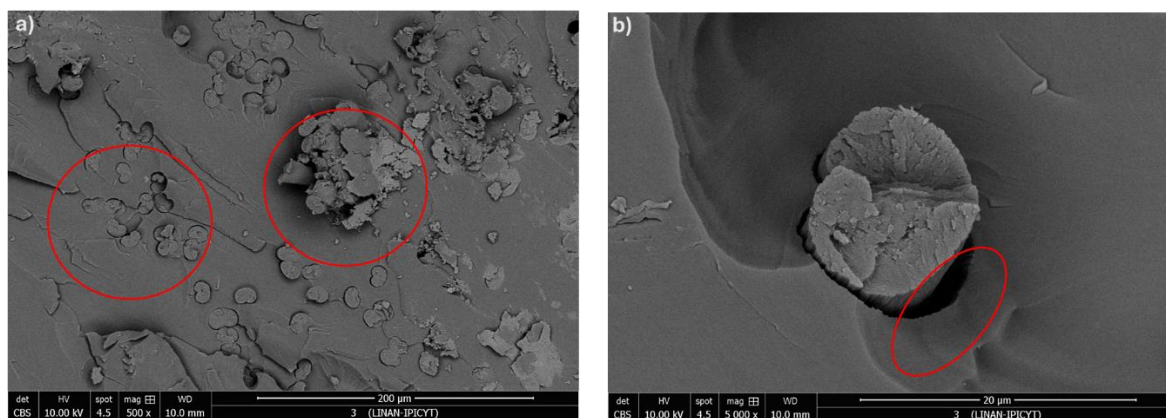


Figura 27. Imágenes SEM de material compuesto con fibra estabilizada “AM II”

En la Figura 27 a) se observa que este experimento presentó una adhesión deficiente (indicada con círculo rojo) comparándola con la que obtuvo mejor rendimiento (fibra L15 silanizada). Se puede apreciar que existe un aglomerado de fibras (indicado por círculo rojo) lo que contribuyó a la prematura ruptura del material, ya que, al no estar en contacto directo la resina con cada filamento de la fibra, ésta no recibe el soporte estructural necesario para soportar la carga aplicada, afectando la integridad del material (Wang y col., 2024). De igual manera, en la Figura 27 b) se observan huecos entre el refuerzo y la matriz, mostrando así la mala adhesión entre ambas partes.

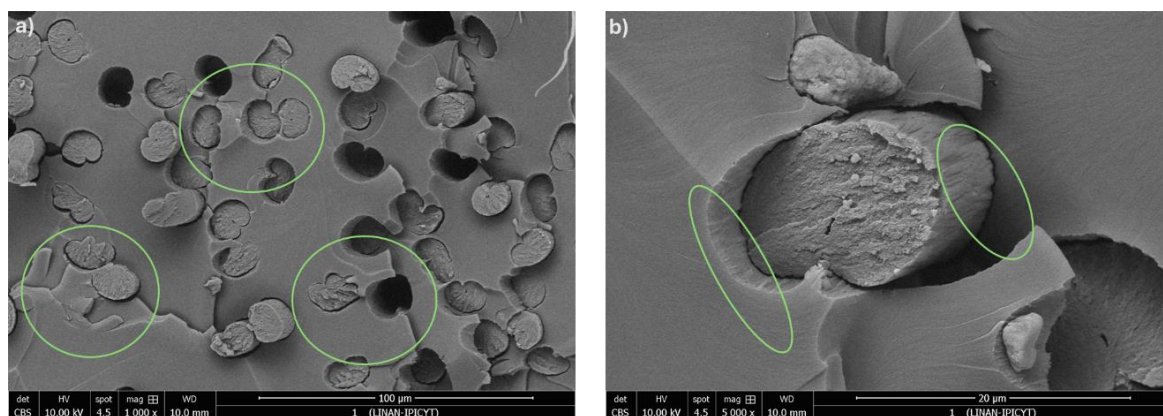


Figura 28. Imágenes SEM de material compuesto con fibra estabilizada “L15 silanizada”

En la Figura 28 a) se observa una adhesión muy buena entre el refuerzo y la matriz. Las fibras se cortaron a la par de la matriz, lo cual indica el buen soporte estructural que brindó el refuerzo al material compuesto (Soleiman Dehkordi y col., 2019). Inclusive, en algunos huecos que pareciera no haber fibra, ésta se cortó y se puede apreciar en la Figura 28 a). No se presentan huecos pronunciados entre el refuerzo y la matriz, lo cual significa un excelente anclaje entre ambas partes.

En la Figura 28 b) se observa como la si la matriz “abrazara” a la fibra, y como la resina adquiere la rugosidad del refuerzo (véase los círculos verdes), lo cual vuelve a comprobar la buena adhesión y el contacto íntimo entre ambas partes, resultando en un material de alta resistencia a la tracción donde matriz y refuerzo se compenetran de manera correcta.

A partir de las ecuaciones y las imágenes de SEM, se calculó la resistencia de adherencia en los materiales compuestos con fibras estabilizadas, esto con la finalidad de comparar los valores experimentales con los modelos teóricos y corroborar que los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la tracción son congruentes con la teoría.

Se calculó la resistencia de adherencia para los materiales compuestos elaborados con fibras estabilizadas, concretamente en aquellos que obtuvieron el mejor, medio y peor resultado con respecto a la resistencia a la tracción. Los resultados de los cálculos se observan en la Tabla 27.

Tabla 26. Resultados de resistencia de adherencia de materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas: mejor, medio y peor.

Refuerzo	Valor de $T_{máx}$ (MPa)	Valor de T_{fin} (MPa)	Valor de f_c (MPa)	Valor de Φ (mm)	Valor de k (mm ⁻¹)	Valor de S_1 (mm)	Valor de S (mm)	Resistencia adherencia (MPa)
L15 silanizada (Mejor)	1.192365	0.0001	7.2	0.0146	206.4693	0	0.000213	1.14107
1.282 (Medio)	1.192277	0.0001	7.2	0.0165	248.5099	0	0.001230	0.87830
AM II (Peor)	1.192406	0.0001	7.2	0.0138	148.0573	0	0.002824	0.78498

La fibra silanizada L15 presenta el mayor desempeño en términos de resistencia de adherencia, lo cual es congruente ya que este es el material que mejores resultados mostró en las pruebas de resistencia a la tracción. Su diámetro es de 0.0146 mm, un valor intermedio en comparación con los otros refuerzos, lo que sugiere que su buen desempeño no se debe únicamente a su tamaño, sino a su tratamiento superficial. El coeficiente k es de 206.4693 mm⁻¹, el cual está relacionado directamente con el módulo de Young de la fibra. El desplazamiento final de la fibra (S) es de apenas 0.000213 mm, el menor de los tres casos, lo que implica que la fibra experimenta un

desplazamiento mínimo dentro de la matriz, favoreciendo una transferencia de carga más efectiva y una mejor adhesión. Esto se debe gracias a la buena interacción tanto mecánica como química presente en la interfaz, ya que se está generando un contacto íntimo y de alta calidad entre el refuerzo y la matriz, siendo casi despreciable el desplazamiento de la fibra, lo cual concuerda con los resultados obtenidos durante las pruebas de resistencia a la tracción, donde, efectivamente, este refuerzo fue el que presentó mejores propiedades mecánicas en relación con los demás.

El refuerzo 1.282 presenta un desempeño intermedio con una resistencia de adherencia de 0.87830 MPa. Su diámetro es el mayor de los tres refuerzos analizados, con un valor de 0.0165 mm, lo que podría estar contribuyendo a su desempeño al modificar la relación entre superficie de contacto y volumen de fibra dentro de la matriz. El desplazamiento final de la fibra es de 0.001230 mm, significativamente mayor que en la fibra silanizada, lo que indica que la fibra experimenta un mayor desplazamiento dentro de la matriz antes de perder completamente la adherencia. Este aumento en el desplazamiento de la fibra dentro de la matriz puede deber, principalmente, a la mediana interacción mecánica que existe entre el refuerzo y la matriz, de igual manera, a la nula presencia de agentes funcionalizantes en la superficie de la fibra.

Por último, la fibra AM II presenta el peor desempeño, con una resistencia de adherencia de 0.78498 MPa, la menor de los tres refuerzos evaluados. Su diámetro es el menor de los tres refuerzos (0.0138 mm), lo que sugiere que una menor superficie de contacto puede estar contribuyendo a su bajo desempeño debido a que la zona de contacto puede no ser suficiente para obtener un anclaje mecánico que permita la correcta transferencia de carga entre el refuerzo y la matriz. El coeficiente k es el más bajo de los tres refuerzos, lo que implica que la degradación post-pico es menos pronunciado, pero también que la fibra presenta una menor resistencia a la tracción antes de que la adherencia comience a disminuir. Finalmente, su desplazamiento es de 0.002824 mm, el mayor de los tres casos, lo que indica que la fibra experimenta un desplazamiento considerable dentro de la matriz antes de perder completamente la adherencia. Al tener un área superficial menor en comparación con los otros dos refuerzos, hace sentido que se tenga una adhesión menos eficiente al existir menos lugares donde el refuerzo se pueda anclar tanto de manera mecánica como química a la matriz.

4.8. Fibras estabilizadas con tratamientos Sol-Gel

Las fibras AM II y L15 final fueron acondicionadas con dos diferentes tipos de sol-gel, cuyos precursores fueron Isopropóxido de Titanio ($C_{12}H_{28}O_4Ti$) y Tetraetil Ortosilicato (TEOS, $SiC_8H_{20}O_4$) buscando mejorar la interacción fibra-matriz y aumentar la resistencia a la tracción de los materiales

compuestos. Para términos prácticos de análisis en este estudio, se denominaron “Sol-Gel Ti” y “Sol-Gel Si” a los tratamientos con Isopropóxido de Titanio y Tetraetil Ortosilicato, respectivamente. Se desarrollaron materiales compuestos, mostrando los resultados de la caracterización en la Tabla 28. En la Figura 29 se muestra la gráfica tensión-deformación de los materiales reforzados con la fibra AM II con los dos distintos tratamientos de Sol-Gel aplicados, así como el material compuesto reforzado con la fibra sin tratamiento.

Tabla 27. Resultados de pruebas mecánicas en materiales compuestos con fibras estabilizadas con tratamientos Sol-Gel

Fibra	Tratamiento	Resistencia a la tracción, MPa	Elongación, %
AM II	Sin tratar	16.29	5.3
AM II	Sol-gel Si	13.78	6.0
AM II	Sol-gel Ti	13.89	3.9
L15 final	Sin tratar	23.14	3.3
L15 final	Sol-gel Si	20.90	4.0
L15 final	Sol-gel Ti	19.41	8.0

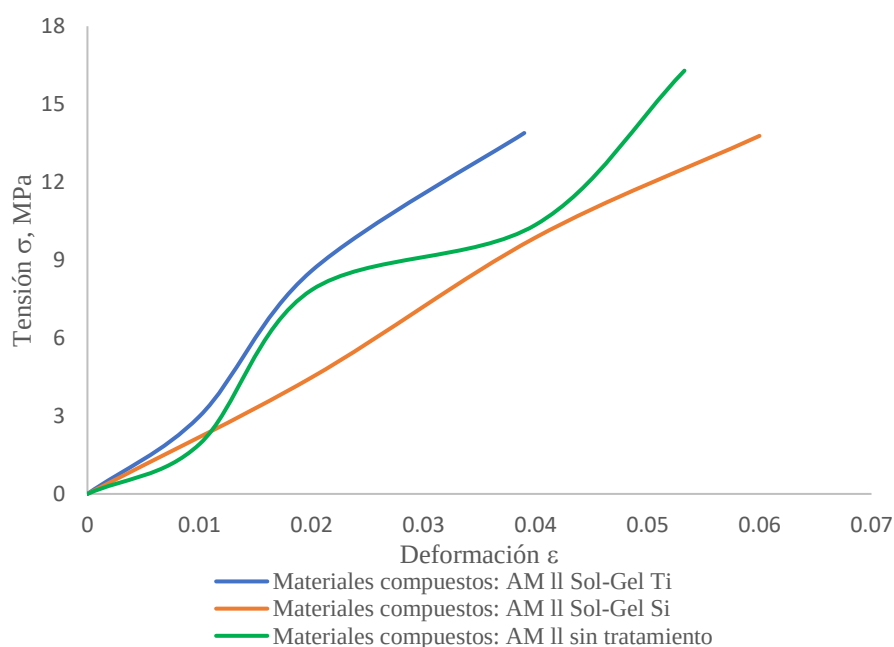


Figura 29. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos reforzado con fibra AM II sin y con tratamientos Sol-Gel

En ambos materiales reforzados con fibras con tratamiento se muestra la reducción en la tensión soportada, lo cual da como resultado que ninguno de los dos tratamientos funcionó para aumentar la resistencia a la tracción, caso contrario, afectó su rendimiento. Por otro lado, se pueden apreciar dos comportamientos diferentes con los tratamientos. El primero, el Sol-Gel Si aumentó la

deformación máxima que puede alcanzar el material (de 0.0533 aumentó a 0.06), y el segundo, el Sol-Gel Ti disminuyó el valor de deformación del material (de 0.0533 disminuyó a 0.039), lo cual es muy interesante, ya que si se necesita un material que tenga una mayor deformación antes de su ruptura, se debe de optar por acondicionar el refuerzo con Sol-Gel Si; ahora bien, si se necesita un material que se deforme en menor magnitud, el tratamiento con Sol-Gel Ti es el indicado. El material con el tratamiento Sol-Gel Ti es el que presenta el comportamiento más frágil de las tres pruebas, mostrando que el tratamiento aplicado reduce su zona plástica, de igual manera, este tiene una pendiente mayor en su zona elástica. El material compuesto realizado con el refuerzo sin tratamiento resulta ser el que mejor resultados presentó respecto a mayor resistencia a la tracción se refiere.

En la Figura 30 se observa la gráfica tensión-deformación de los materiales reforzados con la fibra L15 final, mostrando los dos distintos tratamientos de Sol-Gel aplicados y el material compuesto reforzado con la fibra sin tratamiento.

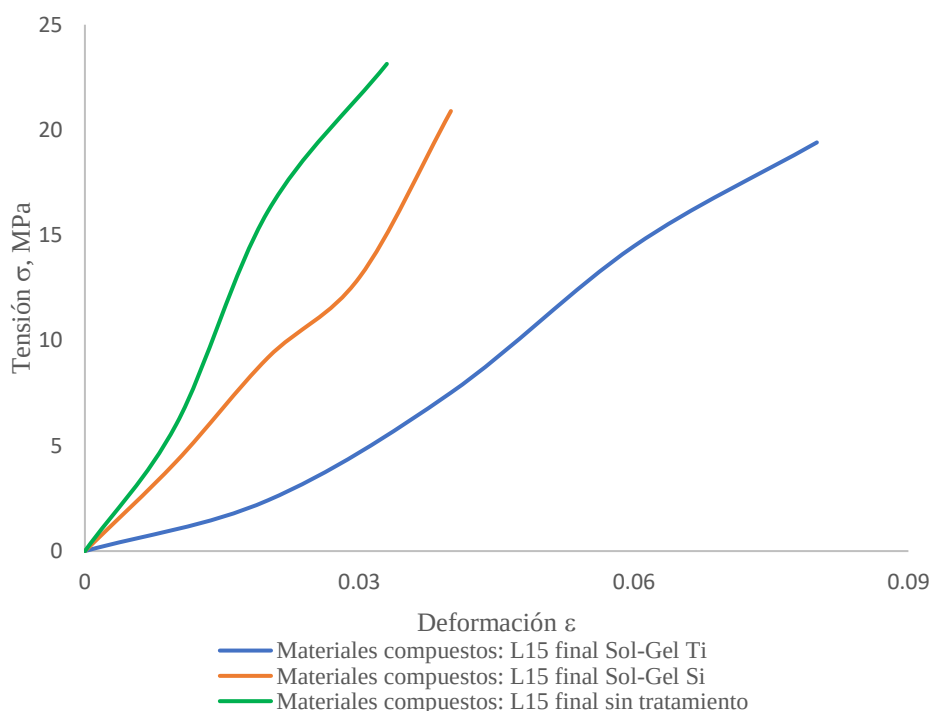


Figura 30. Gráfica de tensión-deformación materiales compuestos reforzados con fibra L15 sin y con tratamientos Sol-Gel

Los tres tipos de materiales muestran comportamiento frágil debido a que su zona plástica no es muy extensa, destacando el material compuesto sin tratamiento como el más frágil mostrando la mayor resistencia a la tracción de las tres pruebas. Ambos tratamientos aplicados aumentaron la deformación del material con respecto al elaborado con la fibra sin tratamiento, sin embargo, el

tratamiento con Sol-Gel Si no mostró un aumento significativo. El rendimiento del material compuesto respecto a la resistencia a la tracción se redujo al aplicarle tanto el tratamiento Sol-Gel Si como con el Sol-Gel Ti, lo cual demuestra que este tratamiento no mejoró la interfaz entre el refuerzo y la matriz, en caso contrario, redujo su capacidad para soportar la carga.

En la Figura 31 se muestran los espectros correspondientes a la fibra L15 final con los tratamientos superficiales a los que fue sometida. Las señales de absorción que corresponden a la fibra son las que siguen: en el rango de $1580\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$ y $2240\text{--}2243\text{ cm}^{-1}$ que corresponden a los grupos C=O , C=N y C=C , y a los grupos nitrilo $\text{C}\equiv\text{N}$, respectivamente. Por otra parte, los grupos que corresponden a los tratamientos aplicados son: en el rango de $800\text{--}770\text{ cm}^{-1}$ y $1180\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ son asociados con los grupos siloxanos (O-Si-CH_3) del Sol-Gel Si y los grupos metoximetano ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) del Sol-Gel Ti, respectivamente (Kim y col., 2013; Paryab y col., 2021). Debido a que en el tratamiento superficial no se realizó un proceso térmico para la formación de óxidos de titanio y de silicio, las bandas de vibración de estos enlaces no en los espectros FTIR (TiO_2 a 1400 cm^{-1} y SiO_2 a 1250 cm^{-1}). Este espectro evidencia el recubrimiento superficial de las fibras con los diferentes precursores de titanio y silicio.

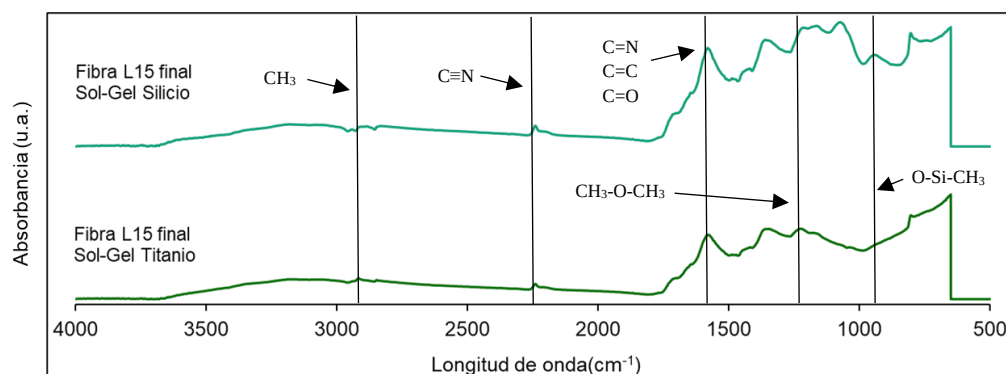


Figura 31. Espectros de FTIR de fibra L15 final con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti

En la Figura 32 se aprecian los espectros de los materiales compuestos reforzados con la fibra L15 final con los dos tipos de tratamientos. La línea punteada corresponde al refuerzo, mientras que las líneas continuas se relacionan con los picos característicos la matriz. El espectro de los materiales compuestos no presenta cambios significativos que demuestren que existe una interacción química entre el refuerzo y la matriz como fue observado en las secciones anteriores. Sin embargo, se observan picos característicos de la fibra (en el rango de $1580\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a los grupos C=O , C=N y C=C) y de la matriz (a 824 cm^{-1} los grupos carbonilo (C-O-C); a 1509 cm^{-1} se presenta la señal de enlaces C-C ; en la región de $2919\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ se asignada al estiramiento de los grupos aromáticos y alifáticos CH_2) (González y col., 2012). Por otro lado, no es posible identificar un

aumento en la intensidad de absorción en las bandas asociadas con el tratamiento, esto debido a que la cantidad de recubrimiento es solapada por la señal de la resina que se atribuye a la zona del material compuesto analizada.

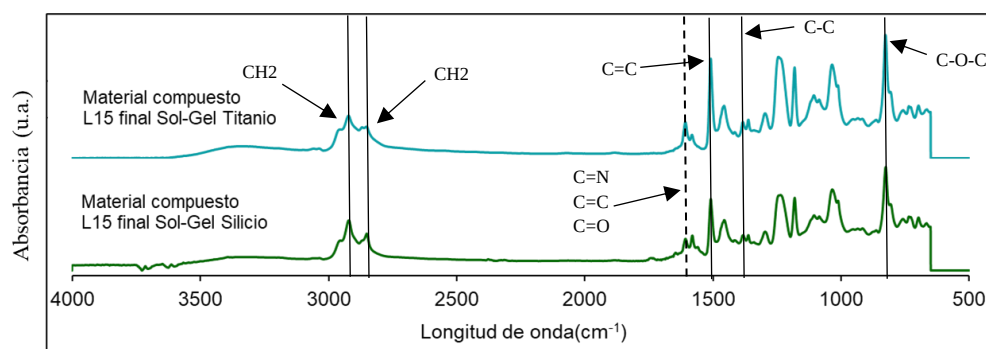


Figura 32. Espectros de FTIR de materiales compuestos con fibra L15 final con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti

En la Figura 33 se presentan los espectros FTIR correspondientes a la fibra AM II con los dos tratamientos superficiales. Las señales de absorción de la fibra se observan en el rango de 1580–1660 cm^{-1} y 2240–2243 cm^{-1} , correspondientes a los grupos C=O, C=N y C=C, y al grupo C≡N, respectivamente. Los tratamientos superficiales muestran las señales de absorción en el rango de 770–800 cm^{-1} de los grupos siloxano y a 1180–1200 cm^{-1} de los grupos metoximetano.

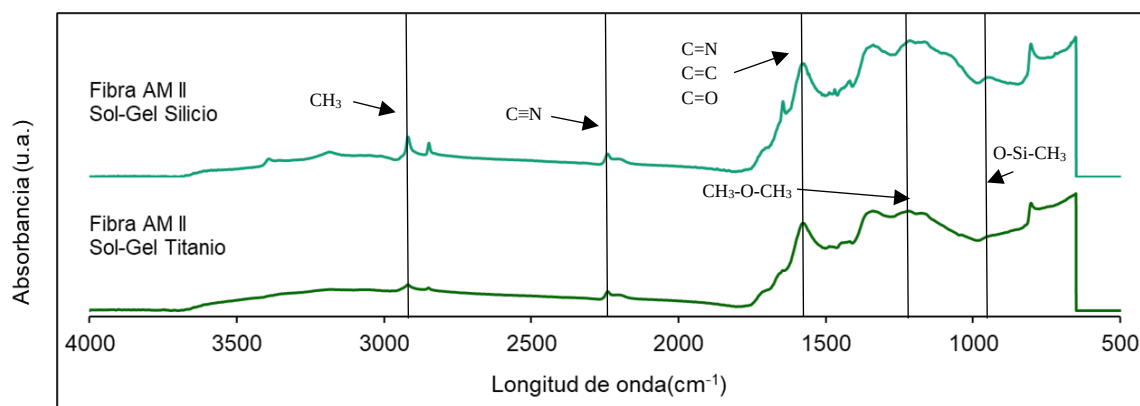


Figura 33. Espectros de FTIR de fibra AM II con tratamiento de Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti

Por otro lado, en la Figura 34 se muestran los FTIR de los materiales compuestos reforzados con la fibra AM II con los tratamientos superficiales. Con fines ilustrativos, el espectro FTIR es presentado para demostrar que no existen bandas de absorción que relacionen interacciones químicas entre el refuerzo y la matriz, pero es posible identificar las señales de la matriz (líneas continuas) y del refuerzo (línea punteada).

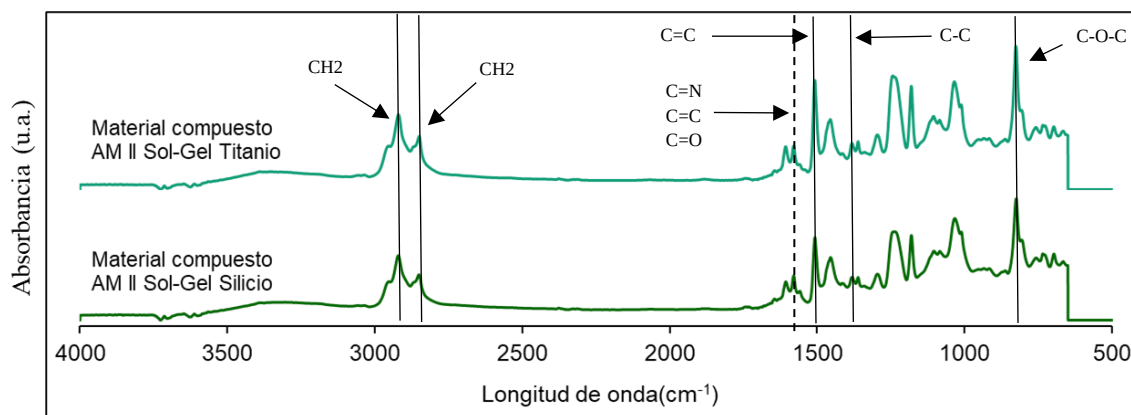


Figura 34. Espectros de FTIR de materiales compuestos con fibra AM II con tratamiento Sol-Gel Si y Sol-Gel Ti

En la Figura 35 se muestran imágenes obtenidas de microscopía electrónica de barrido (SEM) correspondientes a las fibras estabilizadas L15 y AM II acondicionadas con los dos distintos Sol-Gel. En las imágenes correspondientes a la fibra L15 acondicionada con Sol-Gel Si (Figura 35 A, B, C), se observa una adherencia parcial del recubrimiento en la superficie de la fibra. El método por inmersión por el cual se trataron las fibras mostró ser no efectivo para mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto debido a la reducción en la resistencia a la tracción. Se aprecian zonas donde existen aglomeraciones de recubrimiento, mientras que en otras se muestran regiones de la fibra donde el tratamiento no se adhirió de forma satisfactoria. El proceso de acondicionamiento no generó una interacción efectiva entre ambas partes, limitando la transferencia de esfuerzos en el material compuesto. En la interacción entre el refuerzo y la matriz se generan discontinuidades de carga al mostrarse regiones irregulares en la fibra debido a que no existe una superficie homogénea y algunas zonas del refuerzo reciben más estrés que otras, lo cual se corrobora con la pérdida en la resistencia a la tracción del material compuesto. La mala adhesión entre el recubrimiento y el refuerzo se asocia al proceso de impregnación de la fibra, lo cual generó una interacción física limitada en la superficie del refuerzo, sin obtener una interacción química significativa y afectando las propiedades mecánicas del material.

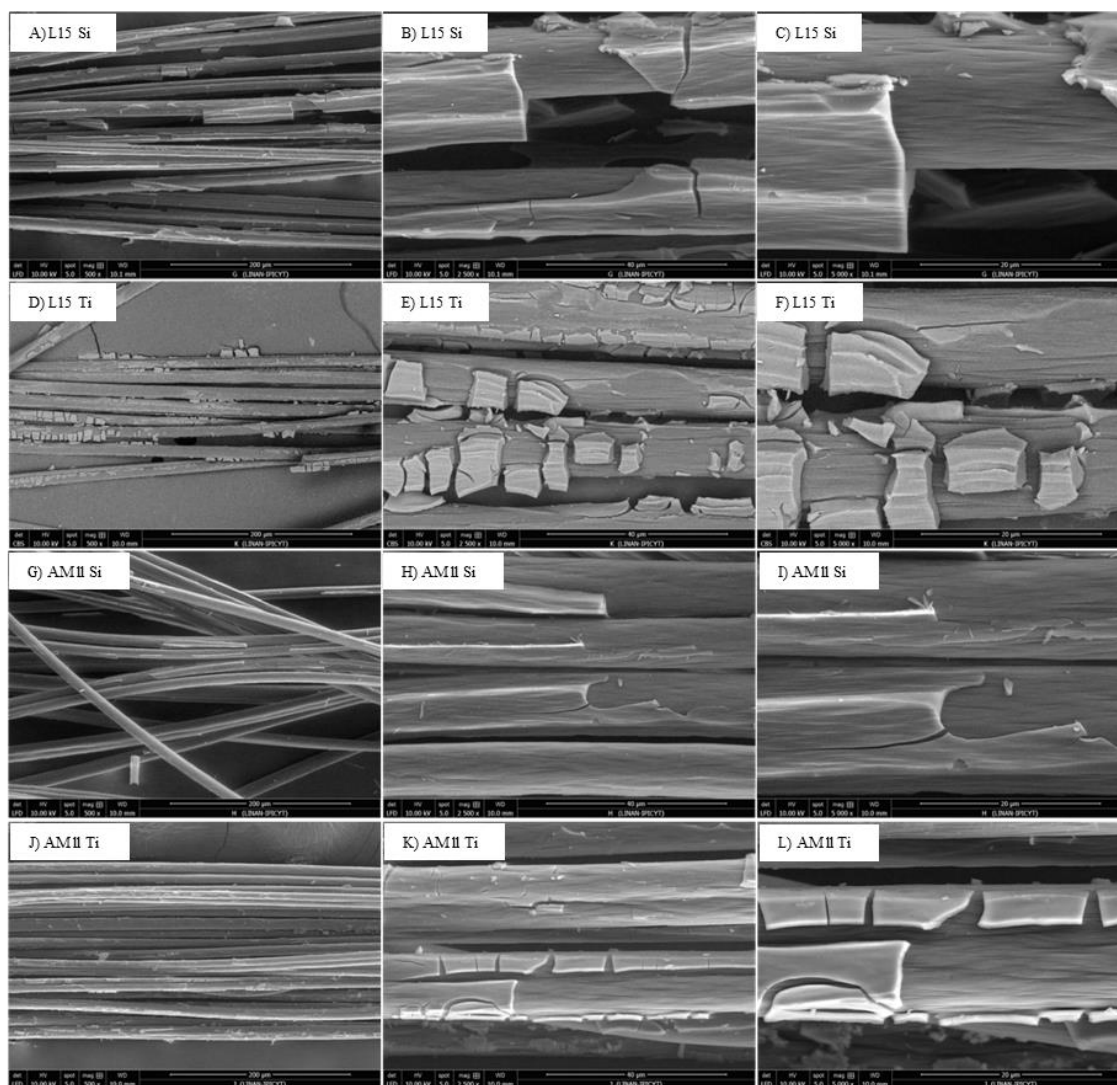


Figura 35. Imágenes SEM de fibras estabilizadas con tratamiento: L15 Sol-gel Silicio (A, B, C); L15 Sol-gel Titanio (D, E, F); AM II Sol-gel Silicio (G, H, I); AM II Sol-gel Titanio (J, K, L)

Tanto en las fibras L15 impregnadas con el Sol-Gel Ti, (Figura 34 D, E, F), fibra AM II con Sol-Gel Si (Figura 34 G, H, I) y fibra AM II con Sol-Gel Ti (Figura 34 J, K, L) se observa el mismo comportamiento mostrado en la fibra L15 con Sol-Gel Si (Figura 34 A, B, C) donde el recubrimiento de la fibra contribuyó al mal desempeño mecánico de los materiales compuestos. En la literatura se realiza un tratamiento térmico en la fase final de la impregnación de las fibras con el Sol-Gel, lo que contribuye a que el recubrimiento se active en la superficie de la fibra, favorece el anclaje químico entre el refuerzo y la matriz (Jiang y col., 2015).

En este estudio se realizaron materiales compuestos elaborados con diferentes refuerzos, tanto naturales como sintéticos, demostrando que los materiales reforzados con las fibras estabilizadas presentan mejores resultados mecánicos en comparación con los elaborados con fibras naturales, sin embargo, estos últimos presentan una gran capacidad de competir con materiales reforzados con materiales más costosos siendo una alternativa amigable con el ambiente y teniendo una reducción de costos al trabajar con fibras residuales, teniendo aplicaciones por sus propiedades en la industria aeroespacial, marina, construcción, automotriz, deportes, transporte y medicina (Ma y col., 2020; Pickering y col., 2016).

5. Conclusiones y recomendaciones

Las fibras de bagazo de agave demostraron ser una alternativa sostenible y efectiva como refuerzo en materiales compuestos. A lo largo de este estudio, se evidenció que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos fabricados con estas fibras son competitivas, especialmente considerando su bajo costo y disponibilidad. Los tratamientos de alcalinizado realizados sobre las fibras permitieron mejorar la adherencia con la matriz, lo que impactó positivamente en la resistencia general del material compuesto. Sin embargo, también se identificaron limitaciones, como la variabilidad en las propiedades de las fibras naturales. Se recomienda explorar otros tratamientos superficiales que mejoren la compatibilidad entre la fibra y la matriz, así como investigar la aplicación de fibras de otros orígenes para ampliar el alcance de este enfoque.

El diseño experimental empleado permitió identificar las variables y sus respectivos niveles más favorables dentro del rango operativo para obtener las mejores propiedades posibles en el material compuesto, tanto a nivel de las fibras como de la matriz utilizada. Como recomendación, se sugiere realizar estudios adicionales que permitan explorar interacciones entre variables que no se estudiaron en este trabajo.

Las pruebas realizadas bajo condiciones de humedad mostraron un impacto significativo en las propiedades mecánicas del material compuesto. La absorción de humedad afectó negativamente algunos experimentos respecto a la resistencia y la rigidez del material, mientras que en algunas otras mejoró estas propiedades, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias para mitigar o promover este efecto según sea el caso. Como recomendación, se propone ampliar los experimentos a un rango mayor de condiciones ambientales y evaluar la durabilidad del material en ciclos de humedad y sequedad, lo que permitirá un análisis más completo de su comportamiento en aplicaciones reales.

En cuanto a la comparación realizada con el artículo de las fibras naturales, los resultados obtenidos en este estudio demostraron que las fibras de bagazo de agave poseen un desempeño competitivo frente a otras fibras naturales reportadas en la literatura. Aunque las metodologías experimentales y los tratamientos de las fibras variaron entre ambos estudios, se identificó que el material compuesto desarrollado en esta investigación presenta propiedades mecánicas y de adherencia fibra-matriz que destacan dentro de su rango de aplicación. Esta comparación subraya la relevancia de continuar explorando las fibras de bagazo como una alternativa sustentable, además de implementar métodos más estandarizados para facilitar futuras evaluaciones comparativas. Se recomienda realizar pruebas

con el ácido esteárico para ver como ayuda a mitigar el efecto de la humedad en las fibras de agave, mismo procedimiento que utilizaron en el artículo.

Los espectros FTIR permitieron observar los grupos funcionales presentes en los distintos tipos de fibras y así realizar relaciones de absorbancias para determinar la cantidad de lignina presente en las fibras naturales y conocer el índice de estabilización de las fibras estabilizadas, parámetros muy importantes para comprender el comportamiento y propiedades de las fibras utilizándolas como refuerzos en materiales compuestos. Se recomienda utilizar otro tipo de técnicas analíticas para analizar si existen interacciones químicas entre el refuerzo y la matriz en los materiales compuestos.

El análisis de las gráficas de tensión-deformación permitió identificar comportamientos específicos en las zonas elásticas, plásticas y en los puntos de fractura de los materiales compuestos. Las curvas mostraron diferencias notables entre los materiales reforzados con fibras naturales y aquellos con fibras sintéticas, destacándose la capacidad de las fibras de bagazo para soportar esfuerzos significativos antes de la fractura. Esto evidencia su potencial como refuerzo en aplicaciones de bajo y mediano impacto mecánico. Se recomienda complementar este tipo de análisis con pruebas dinámicas o térmicas que permitan correlacionar los datos de deformación con la estructura interna del material.

Las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) mostraron detalles clave sobre la adherencia fibra-matriz, la presencia de defectos y la distribución del refuerzo dentro del material compuesto. Se observó que los tratamientos superficiales aplicados a las fibras naturales mejoraron significativamente la interacción entre las fibras y la matriz, contribuyendo a una mejor transferencia de esfuerzos. Asimismo, las imágenes revelaron áreas de debilidad que podrían ser mejoradas en futuros estudios. Como recomendación, se sugiere realizar un análisis cualitativo de estas imágenes para correlacionarlas con las propiedades mecánicas y explorar otros tratamientos superficiales que reduzcan defectos negativos a los materiales compuestos.

La microscopía óptica permitió identificar aspectos fundamentales de la textura, la distribución de las fibras y la presencia de defectos iniciales en los materiales compuestos. Este análisis complementó los resultados obtenidos mediante SEM y FTIR, proporcionando una visión general del estado final del material tras someterlo a ensayos de tensión. Se recomienda utilizar esta técnica en etapas tempranas del proceso de producción para detectar irregularidades y realizar ajustes preventivos.

Con respecto a la correlación con el modelo matemático, y al comparar los tres refuerzos de fibras estabilizadas, se observa que la diferencia principal entre ellos radica en la interacción entre la fibra y la matriz. La fibra silanizada L15 muestra la menor pérdida de adherencia post-pico y el menor desplazamiento de la fibra al final, lo que indica una mejor transferencia de carga y una mayor estabilidad en la interfaz. La fibra AM II, con el menor coeficiente k y el menor diámetro, presenta el peor desempeño, sugiriendo que una menor superficie de contacto y una interacción menos efectiva con la matriz contribuyen a su baja resistencia de adherencia.

Por último, el tratamiento Sol-Gel aplicado a las fibras estabilizadas mostró tener un impacto negativo en el rendimiento mecánico de los materiales compuestos, disminuyendo sus propiedades mecánicas y alterando su comportamiento de ruptura. Se recomienda realizar un tratamiento térmico controlado a las fibras después de su tratamiento, evitando su degradación para así conseguir un recubrimiento homogéneo en la superficie de la fibra y se consiga un anclaje químico que mejore las propiedades mecánicas del material compuesto.

6. Referencias bibliográficas

- Abdellaoui, H., Raji, M., Bouhfid, R., & Qaiss, A. E. K. (2019). Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. 29-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>
- Alcalá Sánchez, D. (2016). Análisis de sistemas de copolimerización acrilonitrilo-acetato de vinilo para la obtención de fibras de carbón de baja pureza. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
- Alcalá-Sánchez, D. (2021). *Conditioning low-purity carbon microfiber for use as reinforcing materials*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
- Almushaikeh, A. M., Alaswad, S. O., Alsuhybani, M. S., AlOtaibi, B. M., Alarifi, I. M., Alqahtani, N. B., Aldosari, S. M., Alsaleh, S. S., Haidyrah, A. S., Alolyan, A. A., & Alshammari, B. A. (2023). Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review. *Polymer Testing*, 122, 108029. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108029>
- Alsafran, M., Sadasivuni, K. K., Haneesh, J. M., & Kasote, D. M. (2024). Extraction and characterization of natural fibers from *Pulicaria gnaphalodes* plant and effect of alkali treatment on their physicochemical and antioxidant properties. *Frontiers in Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1437277>
- American Society for Testing and Materials. (2025). *Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers* (Patent ASTM D3822/D3822M-14(2020)). https://www.astm.org/d3822_d3822m-14r20.html
- Anaya-Ramirez, R. C., Rios-Soberanis, C. R., & Herrera-Franco, P. J. (2023). Identification of micro-failure processes of HDPE-henequen fiber composite material by using acoustic emission monitoring: Effect of fiber surface modification. *Polymer Composites*, 44(5), 2697-2709. <https://doi.org/10.1002/pc.27271>

- Athulya Wickramasingha, Y., Dharmasiri, B., Randall, J. D., Yin, Y., Andersson, G. G., Nepal, D., Newman, B., Stojcevski, F., Eyckens, D. J., & Henderson, L. C. (2022). Surface modification of carbon fiber as a protective strategy against thermal degradation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 153, 106740. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106740>
- Aziz, T., Haq, F., Farid, A., Cheng, L., Chuah, L. F., Bokhari, A., Mubashir, M., Tang, D. Y. Y., & Show, P. L. (2024). The epoxy resin system: Function and role of curing agents. *Carbon Letters*, 34(1), 477-494. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00547-7>
- Azman, M. A., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Petru, M., Ruzaidi, C. M., Sapuan, S. M., Wan Nik, W. B., Ishak, M. R., Ilyas, R. A., & Suriani, M. J. (2021). Natural Fiber Reinforced Composite Material for Product Design: A Short Review. *Polymers*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym13121917>
- Bacon, R., & Moses, C. T. (2003). The full history of carbon fibers has yet to be written: The industry is barely out of its infancy.
- Bao, X.-Y., Soci, C., Susac, D., Bratvold, J., Aplin, D. P. R., Wei, W., Chen, C.-Y., Dayeh, S. A., Kavanagh, K. L., & Wang, D. (2008). Heteroepitaxial Growth of Vertical GaAs Nanowires on Si (111) Substrates by Metal–Organic Chemical Vapor Deposition. *Nano Letters*, 8(11), 3755-3760. <https://doi.org/10.1021/nl802062y>
- Bayraktar, E. (2017). Composite Materials and Technologies. En Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (p. B9780128035818041084). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04108-4>
- Betelie, A. A., Sinclair, A. N., Kortschot, M., Li, Y., Redda, D. T., Betelie, A. A., Sinclair, A. N., Kortschot, M., Li, Y., & Redda, D. T. (2019). Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio. *AIMS Materials Science*, 6(6), Article matersci-06-06-985. <https://doi.org/10.3934/matetsci.2019.6.985>

- Biswas, S., Deo, B., Patnaik, A., & Satapathy, A. (2011). Effect of fiber loading and orientation on mechanical and erosion wear behaviors of glass–epoxy composites. *Polymer Composites*, 32(4), 665-674. <https://doi.org/10.1002/pc.21082>
- Bittmann, E. (2006). The black gold of lightweight building. 96, 76-82.
- Bledzki, A. K., Mamun, A. A., & Volk, J. (2010). Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4), 480.
- Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2(4), 455-475. <https://doi.org/10.1080/00401706.1960.10489912>
- Box, G., Hunter, S., & Hunter, W. (2005). *Statistics for experimenters. Design, innovation, and discovery. 2nd ed* (Vol. 2).
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Gulf Professional Publishing.
- Brouwer, W. D. (2000). Natural fibre composites: Where can flax compete with glass? *Sampe Journal*, 36, 18-23.
- Carballo, F. P., Delgado, J. C., & Vallejo, J. C. M. (2002). Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- Chandramohan, D., & Bharanichandar, J. (2014). Natural Fiber Reinforced Polymer Composites for Automobile Accessories. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(6), 494-504. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2013.494.504>
- Chen, M.-C., Mi, F.-L., Liao, Z.-X., Hsiao, C.-W., Sonaje, K., Chung, M.-F., Hsu, L.-W., & Sung, H.-W. (2013). Recent advances in chitosan-based nanoparticles for oral delivery of macromolecules. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(6), 865-879. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.10.010>

- Chen, Y., Davalos, J. F., Ray, I., & Kim, H.-Y. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*, 78(1), 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.08.015>
- Cheng, L. (2012). Steel-Free Bridge Decks Reinforced with FRP Composites. En *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications* (pp. 143-162). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3_8
- Chethan, K. N., Keni, L. G., Padmaraj, N. H., Dias, A., & Jain, R. (2018). Fabrication and Mechanical characterization of aluminium [6061] with conventionally prepared bamboocharcoal. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 3465-3475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.593>
- Chethan, K. N., Pai, A., Padmaraj, N. H., Singhal, A., & Sinha, S. (2018). Effect of bamboo char and boron carbide particles on mechanical characteristics of Aluminum 6061 hybrid composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012038>
- Cheung, H., Ho, M., Lau, K., Cardona, F., & Hui, D. (2009). Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 655-663. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.014>
- Chikkol Venkateshappa, S. (2014). Abaca Fiber Reinforced Epoxy Composites: Evaluation of Impact Strength. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 18, 305-317.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- Cornell, J. A. (2011). *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*. John Wiley & Sons.
- Cruz-Cruz, I., Ramírez-Herrera, C. A., Martínez-Romero, O., Castillo-Márquez, S. A., Jiménez-Cedeño, I. H., Olvera-Trejo, D., & Elías-Zúñiga, A. (2022). Influence of Epoxy Resin

- Curing Kinetics on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites. *Polymers*, 14(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/polym14061100>
- Daria, M., Krzysztof, L., & Jakub, M. (2020). Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129>
- Dean, A., Voss, D., & Draguljić, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>
- Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419-1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- Duc, F., Bourban, P. E., Plummer, C. J. G., & Månson, J.-A. E. (2014). Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.016>
- Ed-Dariye, Y. (2020). *Experimental Investigation of the Effects of Naoh and KOH Solution on the Behavior of Concrete Square Columns Reinforced By JFRP Composites*. https://www.academia.edu/96510693/Experimental_Investigation_of_the_Effects_of_Naoh_and_KOH_Solution_on_the_Behavior_of_Concrete_Square_Columns_Reinforced_By_JFRP_Composites
- Fantilli, A. P., & Vallini, P. (2007). A Cohesive Interface Model for the Pullout of Inclined Steel Fibers in Cementitious Matrixes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(2), 247-258. <https://doi.org/10.3151/jact.5.247>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2014). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26. <https://doi.org/10.1002/mame.201300008>
- Firmo, J. P., Correia, J. R., & França, P. (2012). Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage

- zones. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1545-1556.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.09.002>
- Frank, E., Hermanutz, F., & Buchmeiser, M. R. (2012). Carbon Fibers: Precursors, Manufacturing, and Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297(6), 493-501.
<https://doi.org/10.1002/mame.201100406>
- Frank, E., Ingildeev, D., & Buchmeiser, M. R. (2017). High-performance PAN-based carbon fibers and their performance requirements. En G. Bhat (Ed.), *Structure and Properties of High-Performance Fibers* (pp. 7-30). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100550-7.00002-4>
- Fu, Z., Gui, Y., Cao, C., Liu, B., Zhou, C., & Zhang, H. (2014). Structure evolution and mechanism of polyacrylonitrile and related copolymers during the stabilization. *Journal of Materials Science*, 49(7), 2864-2874. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7992-3>
- Fu, Z., Liu, B., Sun, L., & Zhang, H. (2017). Study on the thermal oxidative stabilization reactions and the formed structures in polyacrylonitrile during thermal treatment. *Polymer Degradation and Stability*, 140, 104-113.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.04.018>
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural Fiber Reinforced Composites. *Polymer Reviews*, 52(3), 259-320. <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>
- Gapsari, F., Wijatmiko, I., Andoko, A., Diharjo, K., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2024). Modification on Fiber from Alkali Treatment and AESO Coating to Enhance UV-Light and Water Absorption Resistance in Kapok Fiber Reinforced Polyester Composites. *Journal of Natural Fibers*, 21(1), 2383970.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2383970>
- Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics* (4.^a ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b19626>

- Gogoi, R., Shankar, U., Rawat, S., Manik, G., & Bandyopadhyay, A. (2024). Interfacial shear strength of surface functionalized and functionalized CNT coated carbon fiber: A single fiber fragmentation study. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(3), 1242-1267. <https://doi.org/10.1177/08927057231187520>
- Gómez, S. (2008). Materiales compuestos con propiedades a la carta. Diseño de interfases. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
- González, M. G., Cabanelas, J. C., Baselga, J., González, M. G., Cabanelas, J. C., & Baselga, J. (2012). Applications of FTIR on Epoxy Resins—Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. En *Infrared Spectroscopy—Materials Science, Engineering and Technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/36323>
- Gupta, G., Kumar, A., Tyagi, R., & Kumar, S. (2016). Application and Future of Composite Materials: A Review. 5(5).
- Hao, J., Liu, Y., & Lu, C. (2018). Effect of acrylonitrile sequence distribution on the thermal stabilization reactions and carbon yields of poly(acrylonitrile-co-methyl acrylate). *Polymer Degradation and Stability*, 147, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.010>
- Hegde, S., Satish Shenoy, B., & Chethan, K. N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658-662. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.749>
- Hendlmeier, A., Marinovic, L. I., Al-Assafi, S., Stojcevski, F., & Henderson, L. C. (2019). Sizing effects on the interfacial shear strength of a carbon fibre reinforced two-component thermoplastic polymer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 127, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105622>
- Herman, H. (2013). *Treatise on Materials Science and Technology: Materials Science Series, Vol. 1*. Elsevier.

- Hernadewita, Rochmad, I., Hendra, Hermiyetti, & Yuliani, E. N. S. (2019). An analysis of implementation of Taguchi method to improve production of pulp on hydropulper milling. *International Journal of Production Management and Engineering*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2019.10163>
- Hill, C. A. S., Khalil, H. P. S. A., & Hale, M. D. (1998). A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products*, 8(1), 53-63. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)10012-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)10012-7)
- Hisam, M. W., Dar, A. A., Elrasheed, M. O., Khan, M. S., Gera, R., & Azad, I. (2024). The Versatility of the Taguchi Method: Optimizing Experiments Across Diverse Disciplines. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 23(4), 365-389. <https://doi.org/10.1007/s44199-024-00093-9>
- Huang, S., Fu, Q., Yan, L., & Kasal, B. (2021). Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1441-1484. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>
- Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*, 2(4), 2369-2403. <https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- International Organization for Standardization. (2024). *Rubber, vulcanized or thermoplastic—Determination of tensile stress-strain properties* (Patent ISO 37). <https://www.iso.org/standard/86892.html>
- Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2021). A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications. *Polymer Composites*, 42(12), 6239-6264. <https://doi.org/10.1002/pc.26312>
- Jia, Z., Li, T., Chiang, F., & Wang, L. (2018). An experimental investigation of the temperature effect on the mechanics of carbon fiber reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 154, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.11.015>

- Jiang, S., Li, Q., Zhao, Y., Wang, J., & Kang, M. (2015). Effect of surface silanization of carbon fiber on mechanical properties of carbon fiber reinforced polyurethane composites. *Composites Science and Technology*, 110, 87-94.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.01.022>
- Jiao, W., Zheng, T., Liu, W., Jiao, W., & Wang, R. (2019). Molecular dynamics simulations of the effect of sizing agent on the interface property in carbon fiber reinforced vinyl ester resin composite. *Applied Surface Science*, 479. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.157>
- Jones, J. (2021). 12k Carbon Fiber tow under a microscope. Structural Reinforcement Solutions. <https://www.structuralrs.com/post/12k-carbon-fiber-tow-under-a-microscope>
- Joseph, K., Tolêdo Filho, R. D., James, B., Thomas, S., & Carvalho, L. H. de. (1999). A review on sisal fiber reinforced polymer composites. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3, 367-379. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p367-379>
- Kabir, M. I., Shrestha, R., & Samali, B. (2016). Effects of applied environmental conditions on the pull-out strengths of CFRP-concrete bond. *Construction and Building Materials*, 114, 817-830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.195>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883-2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Keya, K. N., Kona, N. A., Koly, F. A., Maraz, K. M., Islam, Md. N., & Khan, R. A. (2019). Natural fiber reinforced polymer composites: History, types, advantages, and applications. *Materials Engineering Research*, 1(2), 69-87. <https://doi.org/10.25082/MER.2019.02.006>
- Khan, F., Hossain, N., Hasan, F., Rahman, S. M. M., Khan, S., Saifullah, A. Z. A., & Chowdhury, M. A. (2024). Advances of natural fiber composites in diverse engineering applications—A review. *Applications in Engineering Science*, 18, 100184.
<https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100184>

- Khan, T., Hameed Sultan, M. T. B., & Ariffin, A. H. (2018). The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(11), 770-779.
<https://doi.org/10.1177/0731684418756762>
- Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S., & Naebe, M. (2020). PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling. *Progress in Materials Science*, 107, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- Kicińska-Jakubowska, A., Bogacz, E., & Zimniewska, M. (2012). Review of Natural Fibers. Part I—Vegetable Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 9(3), 150-167.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2012.703370>
- Kim, D. J., Hwang, H. Y., & Nam, S. Y. (2013). Characterization of sulfonated poly(arylene ether sulfone) (SPAES)/silica-phosphate sol-gel composite membrane: Effects of the sol-gel composition. *Macromolecular Research*, 21(11), 1194-1200.
<https://doi.org/10.1007/s13233-013-1162-y>
- Kim, J.-K., & Mai, Y.-W. (1998). *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*.
<https://shop.elsevier.com/books/engineered-interfaces-in-fiber-reinforced-composites/kim/978-0-08-042695-2>
- Koronis, G., Silva, A., & Fontul, M. (2013). Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 120-127.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>
- Kozłowski, R. M., & Mackiewicz-Talarczyk, M. (2020). 1A - Introduction to natural textile fibres. En R. M. Kozłowski & M. Mackiewicz-Talarczyk (Eds.), *Handbook of Natural Fibres (Second Edition)* (pp. 1-13). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818398-4.00001-3>

- La Rosa, A. D., & Grammatikos, S. A. (2019). Comparative Life Cycle Assessment of Cotton and Other Natural Fibers for Textile Applications. *Fibers*, 7(12), Article 12.
<https://doi.org/10.3390/fib7120101>
- Lepretre, E., Chataigner, S., Dieng, L., & Gaillet, L. (2018). Fatigue strengthening of cracked steel plates with CFRP laminates in the case of old steel material. *Construction and Building Materials*, 174, 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.063>
- Li, C., Qi, L., Fei, J., Yan, J., Wu, Z., Zhang, T., & Li, H. (2024). Construction of polydopamine functionalized porous carbon network structure in polymer composites for excellent mechanical and electromagnetic interference shielding properties. *Carbon*, 217, 118620.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118620>
- Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25-33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Li, Z., & Meng, Z. (2016). A Review of the Radio Frequency Non-destructive Testing for Carbon-fibre Composites. *Measurement Science Review*, 16(2), 68-76. <https://doi.org/10.1515/msr-2016-0010>
- Ma, C., Sánchez-Rodríguez, D., & Kamo, T. (2020). Influence of thermal treatment on the properties of carbon fiber reinforced plastics under various conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 178, 109199.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109199>
- Magagula, S. I., Sefadi, J. S., Mochane, M. J., Mokhothu, T. H., Mokhena, T. C., & Lenetha, G. G. (2022). 2—The effect of alkaline treatment on natural fibers/biopolymer composites. En A. Shahzad, F. Tanasa, & C.-A. Teaca (Eds.), *Surface Treatment Methods of Natural Fibres and their Effects on Biocomposites* (pp. 19-45). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821863-1.00002-8>

- Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., & Karim, N. (2022). Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Advanced Sustainable Systems*, 6(11), 2200258. <https://doi.org/10.1002/adsu.202200258>
- Majhi, S., Pradhan, S., Prakash, V., & Kumar Acharya, S. (2023). Influence of fiber surface modification on impact strength behaviour of Agave Lechuguilla fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.416>
- Manalo, A., Aravinthan, T., Fam, A., & Benmokrane, B. (2017). State-of-the-Art Review on FRP Sandwich Systems for Lightweight Civil Infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 04016068. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000729](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000729)
- Mansour, H., Soliman, E. A., El-Bab, A. M. F., & Abdel-Mawgood, A. L. (2022). Development of epoxy resin-based microfluidic devices using CO2 laser ablation for DNA amplification point-of-care (POC) applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7), 4355-4372. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08992-w>
- Martínez Suárez, C., Rojas Montejó, P., & Gutiérrez Junco, O. (2021). Effects of alkaline treatments on natural fibers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012056>
- Masilamani, R., Dhandapani, N. V., Kumar, K. V., & Mani, K. T. (2017). A Review on Usage of Carbon Fiber Reinforced Plastics in Automobiles.
- Mehdipour, M., Doğan, S., Al-Nadhari, A., Sorayani Bafqi, M. S., Beylergil, B., Yildiz, M., & Saner Okan, B. (2025). Influence of functionalized h-BN particle interphase and interface regulation with structural design on the directional thermal conductivity and mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 190, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108708>
- Miller, S. A. (2018). Natural fiber textile reinforced bio-based composites: Mechanical properties, creep, and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 198, 612-623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.038>

- Mina Hernandez, J. H., Toro Perea, E. F., Caicedo Mejía, K., & Meneses Jacobo, C. A. (2020). Effect of Fique Fibers in the Behavior of a New Biobased Composite from Renewable Mopa-Mopa Resin. *Polymers*, 12(7), 1573. <https://doi.org/10.3390/polym12071573>
- Miravete, A. (2011). *Materiales compuestos: Vol. I*. Reverté.
- Mirdehghan, S. A. (2021). 1—Fibrous polymeric composites. En M. Latifi (Ed.), *Engineered Polymeric Fibrous Materials* (pp. 1-58). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824381-7.00012-3>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (Eds.). (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203508206>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- Mortazavi, S. M., & Moghadam, M. K. (2009). Introduction of a new vegetable fiber for textile application. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(5), 3307-3312. <https://doi.org/10.1002/app.30301>
- Muhammad, Y., Ahmad, S., Bakar, M., Al-Mamun, Dr. A., & Heim, H.-P. (2015). Mechanical properties of hybrid glass/kenaf fibre-reinforced epoxy composite with matrix modification using liquid epoxidised natural rubber. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34. <https://doi.org/10.1177/0731684415584431>
- Muktham, R., Bhargava, S. K., Bankupalli, S., & Ball, A. S. (2016). A Review on 1st and 2nd Generation Bioethanol Production-Recent Progress. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 6(3), Article 3. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2016.63008>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2009). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons.
- Naito, K. (2016). Effect of Hybrid Surface Modifications on Tensile Properties of Polyacrylonitrile- and Pitch-Based Carbon Fibers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(5), 2074-2083. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2028-1>

- Naveen Kumar, G., Rajesh, K., Rama Durga Rao, M., Sai Bharath, K. P., & Eswara Manikanta, J. (2023). A review on mechanical properties of hybrid polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.059>
- Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Fatimah Athiyah, S., Shazleen, S. S., Rafiqah, S. A., Harussani, M. M., Kamarudin, S. H., Razman, M. R., Rahmah, M., Zainudin, E. S., Ilyas, R. A., Aisyah, H. A., Norrrahim, M. N. F., Abdullah, N., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). A Review on Mechanical Performance of Hybrid Natural Fiber Polymer Composites for Structural Applications. *Polymers*, 13(13), 2170. <https://doi.org/10.3390/polym13132170>
- Palacios Hinestroza, H., Hernández Diaz, J. A., Esquivel Alfaro, M., Toriz, G., Rojas, O. J., & Sulbarán-Rangel, B. C. (2019). Isolation and Characterization of Nanofibrillar Cellulose from Agave tequilana Weber Bagasse. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2019/1342547>
- Parbin, S., Waghmare, N., Singh, S., & Khan, S. (2019). Mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composites: A review. *Procedia Computer Science*, 152, 375-379. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.003>
- Park, S.-J. (2015). *Carbon Fibers* (Vol. 210). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9478-7>
- Paryab, A., Godary, T., Abdollahi, S., Anousheh, M., & Malek Khachatourian, A. (2021). Manufacturing and Structural Evaluation of Polymer Derived SiOC/TiC and SiOC/TiC/mullite Nanocomposites. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 18(3), 1-8. <https://doi.org/10.22068/ijmse.2093>
- Patel, R. V., Yadav, A., & Winczek, J. (2023). Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Composites for Construction and Automotive Applications. *Applied Sciences*, 13(8), 5126. <https://doi.org/10.3390/app13085126>

- Paul, S., Nanda, P., & Gupta, R. (2003). PhCOCl-Py/Basic Alumina as a Versatile Reagent for Benzoylation in Solvent-Free Conditions. *Molecules*, 8(4), Article 4.
<https://doi.org/10.3390/80400374>
- Pickering, S., Liu, Z., Turner, T., & Wong, K. (2016). Applications for carbon fibre recovered from composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 139(1), 012005.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/139/1/012005>
- Pokhriyal, M., Rakesh, P. K., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Effect of alkali treatment on novel natural fiber extracted from Himalayacalamus falconeri culms for polymer composite applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(16), 18481-18497.
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-03843-4>
- Puglia, D., Biagiotti, J., & Kenny, J. M. (2005). A Review on Natural Fibre-Based Composites—Part II. *Journal of Natural Fibers*, 1(3), 23-65. https://doi.org/10.1300/J395v01n03_03
- Pulidindi, I. N., & Gedanken, A. (2023). Surface Modification of Carbon Fibers (2023082053). Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.2053.v1>
- Rai, R. S., & Bajpai, V. (2024). Surface functionalization of carbon fiber by hydrothermally synthesized ZnO nanostructures for mechanical strengthening of polymer composites. *Polymer Composites*, 45(3), 2012-2031. <https://doi.org/10.1002/pc.27901>
- Randhawa, K. S., & Patel, A. (2021). The effect of environmental humidity/water absorption on tribo-mechanical performance of polymers and polymer composites – a review. *Industrial Lubrication and Tribology*, 73(9), 1146-1158. <https://doi.org/10.1108/ILT-02-2021-0045>
- Raphael, N., Namratha, K., Chandrashekar, B. N., Sadasivuni, K. K., Ponnammma, D., Smitha, A. S., Krishnaveni, S., Cheng, C., & Byrappa, K. (2018). Surface modification and grafting of carbon fibers: A route to better interface. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 64(3), 75-101. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2018.07.001>

- Reis, R., Garcia Filho, F., Nunes, L., Candido, V., Silva, A., & Monteiro, S. (2021). Impact Resistance of Epoxy Composites Reinforced with Amazon Guaruman Fiber: A Brief Report. *Polymers*, 13(14), 2264. <https://doi.org/10.3390/polym13142264>
- Rosa, M. F., Medeiros, E. S., Malmonge, J. A., Gregorski, K. S., Wood, D. F., Mattoso, L. H. C., Glenn, G., Orts, W. J., & Imam, S. H. (2010). Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. *Carbohydrate Polymers*, 81(1), 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.059>
- Rowell, R. (1983). Chemical Modification of Wood. *For. Prod. Abstr.*, 6. <https://doi.org/10.3139/9783446442504.022>
- S. Saravanan, & Dubey, R. S. D. O. R. S. (2020). Synthesis of SiO₂ Nanoparticles by Sol-Gel Method and Their Optical and Structural Properties. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 23, 105-112.
- Sánchez Morales, V., Martínez Salinas, B. A., Mina Hernandez, J. H., Córdoba Urrutia, E., Fajardo Cabrera De Lima, L. D. P., Maturana Peña, H., Valadez González, A., Ríos-Soberanis, C. R., & Pérez-Pacheco, E. (2024). Using Plantain Rachis Fibers and Mopa-Mopa Resin to Develop a Fully Biobased Composite Material. *Polymers*, 16(3), 329. <https://doi.org/10.3390/polym16030329>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.4236/nr.2016.73011>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., & Yogesha, B. (2015). Study on Mechanical Properties of Natural - Glass Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 2959-2967. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.264>
- Seid, A. M., & Adimass, S. A. (2024). Review on the impact behavior of natural fiber epoxy based composites. *Heliyon*, 10(20), e39116. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39116>

- Seisa, K., Chinnasamy, V., & Ude, A. U. (2022). Surface Treatments of Natural Fibres in Fibre Reinforced Composites: A Review. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 30(2), 82-89. <https://doi.org/10.2478/ftce-2022-0011>
- Sheeba, K. R. J., Priya, R. K., Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Flores, E. S., & Kozlov, P. (2023). Enhancing structural, thermal, and mechanical properties of Acacia pennata natural fibers through benzoyl chloride treatment for construction applications. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02443. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02443>
- Sieira, P., Guimarães, C., Braga, A., L. dos Santos, C. E., Pereira, M. H., & Borges, L. E. P. (2024). Stabilization time and temperature influence on the evolution of the properties of mesophase pitch stabilized fibers and carbon fibers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 136, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.02.035>
- Soleiman Dehkordi, M., Lazemi, H. A., & SaeedModaghegh, H. R. (2019). Estimation of the drop modulus using the brittleness index of intact rock and geological strength index of rock mass, case studies: Nosoud and Zagros tunnels in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(2), 479-492. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00577-z>
- Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., & Thomas, S. (2002). Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(6), 763-777. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00032-5)
- Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas: Materiales compuestos. 10.
- Symington, M. C., Banks, W. M., West, O. D., & Pethrick, R. A. (2009). Tensile Testing of Cellulose Based Natural Fibers for Structural Composite Applications. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1083-1108. <https://doi.org/10.1177/0021998308097740>
- Taguchi, G., Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Wiley.
- Tensile Strength | Instron. (2025, enero 20). <https://www.instron.com/en/resources/glossary/tensile-strength/>

Textile—Clothing, Upholstery, Industrial | Britannica. (s. f.). Recuperado 30 de enero de 2025, de

<https://www.britannica.com/topic/natural-fiber>

Thapliyal, D., Verma, S., Sen, P., Kumar, R., Thakur, A., Tiwari, A. K., Singh, D., Verros, G. D., &

Arya, R. K. (2023). Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges. *Journal of Composites Science*, 7(12), 506.

<https://doi.org/10.3390/jcs7120506>

Thompson, J. O. (1926). Hooke's Law. *Science*, 64(1656), 298-299.

<https://doi.org/10.1126/science.64.1656.298>

Tiscareño, A., & Coronel, E. (2013). *Caracterización de interacciones micro-mecánicas y su efecto*

en las propiedades efectivas de un material compuesto a base de fibras de carbón y una resina epóxica. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

Todor, M. P., Bulei, C., Heput, T., & Kiss, I. (2018). Researches on the development of new

composite materials complete / partially biodegradable using natural textile fibers of new vegetable origin and those recovered from textile waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294(1), 012021. [https://doi.org/10.1088/1757-](https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012021)

[899X/294/1/012021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012021)

Truong, V. D., & Kim, D. J. (2021). A review paper on direct tensile behavior and test methods of textile reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 263, 113661.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113661>

Vedrtnam, A., & Sharma, S. P. (2019). Study on the performance of different nano-species used for surface modification of carbon fiber for interface strengthening. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105509>

Vera, P. A. S. (2016). Refuerzo estructural con fibra de carbono. Universidad San Francisco de Quito.

Verduzco, L., & Medina, J. (2007). *Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

- Visal, S., & Deokar, S. U. (2016). A Review Paper on Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymers. 2(12).
- Wallenberger, F. T., & Weston, N. E. (Eds.). (2004). Natural Fibers, Plastics and Composites. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9050-1>
- Wang, X., Jin, Y., Ma, Q., & Li, X. (2024). Performance and mechanism analysis of natural fiber-reinforced foamed concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03476. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03476>
- Wang, Y., Zheng, Y., Li, J., Zhang, L., & Deng, J. (2018). Experimental study on tensile behaviour of steel plates with centre hole strengthened by CFRP plates under marine environment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.01.017>
- Wilkerson, R. (2018). *Biomimetic «Nacre-Like», Metal-Compliant-Phase Ceramics Produced via Coextrusion*.
- Wong, D., Fabito, G., Debnath, S., Anwar, M., & Davies, I. J. (2024). A critical review: Recent developments of natural fiber/rubber reinforced polymer composites. *Cleaner Materials*, 13, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100261>
- Wu, G., Chen, L., & Liu, L. (2017). Effects of silanization and silica enrichment of carbon fibers on interfacial properties of methylphenylsilicone resin composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.024>
- Wu, L., Hoa, S. V., & Ton-That, M.-T. (2004). Effects of water on the curing and properties of epoxy adhesive used for bonding FRP composite sheet to concrete. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(4), 2261-2268. <https://doi.org/10.1002/app.20195>
- Xiaochun, Y., Youhua, Y., Yanhong, F., Guizhen, Z., & Jinsong, W. (2018). Preparation and characterization of carbon fiber/polypropylene composites via a tri-screw in-line

compounding and injection molding. *Advances in Polymer Technology*, 37, 3861-3872.

<https://doi.org/10.1002/adv.22169>

Yanagimoto, J., & Ikeuchi, K. (2012). Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts. *CIRP Annals*, 61(1), 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.129>

Yang, K., Wu, S., Guan, J., Shao, Z., & Ritchie, R. O. (2017). Enhancing the Mechanical Toughness of Epoxy-Resin Composites Using Natural Silk Reinforcements. *Scientific Reports*, 7(1), 11939. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11919-1>

Yao, S.-S., Jin, F.-L., Rhee, K. Y., Hui, D., & Park, S.-J. (2018). Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 142, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.007>

Yousif, B. F., Shalwan, A., Chin, C. W., & Ming, K. C. (2012). Flexural properties of treated and untreated kenaf/epoxy composites. *Materials & Design*, 40, 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.017>