



**ACONDICIONAMIENTO DE FIBRAS ESTABILIZADAS DE BAJO
COSTO Y FIBRAS DE *AGAVE TEQUILANA WEBER AZUL* PARA EL
DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

ING. JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JUAN CARLOS TAPIA PICAZO**

**AGUASCALIENTES, AGS., MÉXICO
FEBRERO DE 2026**



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 13/mayo/2026

Oficio No. DEPI 260/2026

Asunto: Autorización impresión tesis

C. JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR
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 fibras estabilizadas de bajo costo y fibras de agave tequilana weber azul para el desarrollo de materiales compuestos"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

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

PRESIDENTE

DR. JUAN CARLOS TAPIA PICAZO

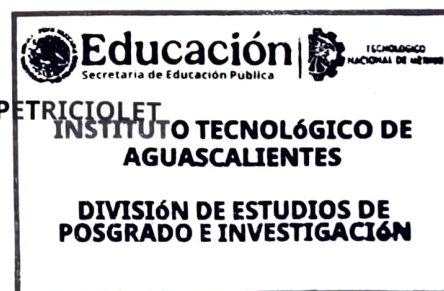
SECRETARIO

DRA. HILDA ELIZABETH REYNEL ÁVILA

VOCAL

DR. ADRIÁN BONILLA PETRICIOLET

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2026
año de
**Margarita
Maza**



Av. Adolfo López Mateos # 1801, Fracc. Bona Gens. C.P. 20256 Aguascalientes, Ags.

Tel. : 449 9105002 ext. 127 y 196

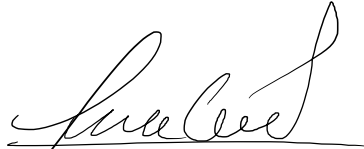
Email: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx

Página web: www.tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Aguascalientes, la que suscribe JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrita al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de JUAN CARLOS TAPIA PICAZO, y cede los derechos del trabajo ACONDICIONAMIENTO DE FIBRAS ESTABILIZADAS DE BAJO COSTO Y FIBRAS DE *AGAVE TEQUILANA WEBER AZUL* PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS, al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación.

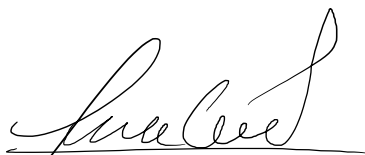
Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

En la Ciudad de Aguascalientes, la que suscribe JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrita al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que se responsabiliza de la autenticidad y originalidad del presente trabajo Análisis computacional del uso de profármacos en nanomateriales para la adsorción de glibenclamida y clorhidrato de metformina, el cual ha sido presentado para la obtención del grado correspondiente.



JUAN SEBASTIAN CHAVES SALAZAR

Agradecimientos

A mi familia, por ser el pilar fundamental a lo largo de toda mi formación académica y personal. Gracias por el apoyo incondicional, la paciencia, la confianza y los sacrificios realizados, incluso a la distancia, que hicieron posible la culminación de este trabajo.

A mi asesor de trabajo de grado, por su orientación, acompañamiento y disposición durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones y sugerencias fueron clave para el fortalecimiento del enfoque técnico y científico del presente estudio.

A mis compañeros de semestre, por el apoyo mutuo, el trabajo en equipo y las experiencias compartidas a lo largo de este proceso académico. Sin duda, el aprendizaje fue enriquecido gracias al intercambio de ideas y al compañerismo construido durante la maestría.

Un agradecimiento muy especial a Lizeth Jazmín Bastidas Solarte, por su acompañamiento constante a lo largo de toda mi carrera y durante mi estancia en México. Su apoyo, comprensión y motivación fueron fundamentales tanto en el ámbito académico como en el personal, y representaron un impulso invaluable para continuar y concluir este camino.

A la M. en C. Ana Iris Peña Maldonado, del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por su valiosa ayuda en la obtención de las imágenes de microscopía electrónica de barrido.

Finalmente, se agradece al personal del Laboratorio Nacional de Materiales Porosos (MatPore) por su apoyo en la obtención de los espectros de infrarrojo, los cuales permitieron un análisis más detallado y preciso de los materiales desarrollados en el presente trabajo.

Resumen

El propósito de este trabajo fue desarrollar materiales compuestos de bajo costo, utilizando como refuerzo microfibras de carbono recicladas, fibras estabilizadas a partir de residuos y fibras de bagazo de *agave tequilana weber azul* usando como matriz resina epóxica, el objetivo principal fue determinar la influencia de dichos materiales en las propiedades mecánicas, además de establecer una metodología para la incorporación y distribución de microfibras de carbono recicladas entre las fases. Se evaluó la eficiencia de los tratamientos aplicados a las fibras estabilizadas, ofreciendo una mejor resistencia al corte interfacial (IFSS) al tratamiento con ácido nítrico, por el contrario, el recubrimiento con sol-gel de SiO_2 disminuyó el IFSS hasta en un 65% para las fibras r-OPAN, las microfibras de carbono recicladas ofrecieron un incremento en la resistencia a la tracción con una incorporación hasta del 1% en peso de resina. Los tratamientos con HNO_3 y ácido nítrico fueron eficaces al momento de eliminar ceras y lignina superficial, sin embargo, la fibra de bagazo de agave cocida presentó mejores propiedades mecánicas lo cual se evidenció en los materiales compuestos fabricados en el diseño de experimentos. Los compuestos fabricados con matriz de resina epóxica en relación 1:1 con el endurecedor, indicaron pobres propiedades mecánicas sobre todo aquellos compuestos reforzados con fibras de agave, a pesar de que en las micrografías SEM se observó un buen anclaje con la matriz, la deficiencia en el entrecruzamiento causó un evidente deterioro de la resistencia a la tracción y a la deformación.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Justificación	4
Capítulo 2. Marco teórico	6
2.1 Precursores de fibra de carbono y procesos térmicos.....	6
2.1.1 Hilatura de poliacrilonitrilo	6
2.1.2 Estabilización térmica de fibras acrílicas	7
2.1.3 Carbonización de fibras estabilizadas	8
2.2 Materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas y fibras de carbono.	10
2.2.1 Matriz de resina epóxica.....	10
2.2.2 Compuestos con fibras de carbono y resina epóxica.....	11
2.2.3 Nanomateriales en compuestos poliméricos reforzados.....	13
2.3 Reciclado de materiales compuestos fibroreforzados	15
2.4 Tratamientos superficiales a fibras de carbono	16
2.4.1 Tratamiento superficial con ácidos fuertes	18
2.4.2 Tratamiento sol-gel de óxidos metálicos	19
2.5 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales	20
2.6 Tratamientos superficiales a fibras naturales.....	21
2.7 Resistencia al corte interfacial (IFSS)	22
Capítulo 3. Metodología.....	24
3.1 Preparación de fibras de refuerzo	24
3.1.1 Fibra precursora OPAN	24
3.1.2 Residuo textil acrílico r-OPAN	24
3.2 Tratamiento sol-gel de SiO ₂ a fibras de refuerzo	25

3.3 Tratamiento con ácido nítrico a fibras de refuerzo	25
3.4 Preparación de aditivos.....	26
3.4.1 Aditivos de microfibras de carbono recicladas (PrP)	26
3.4.2 Aditivos de fibras de residuo acrílico estabilizadas r-PO	26
3.5 Preparación de resina epóxica.	27
3.6 Preparación fibras de agave tequilana Weber azul.....	27
3.6.1 Tratamiento alcalino con hidróxido de sodio	27
3.6.2 Tratamiento ácido con ácido acético.	27
3.7 Evaluación del contenido de fibra corta de agave tequilana weber azul en materiales compuestos	28
3.8 Fabricación de materiales compuestos híbridos reforzados con fibras estabilizadas acrílicas y aditivos de carbono.....	28
3.9 Diseño de experimentos Taguchi L8 para materiales compuestos híbridos.....	29
3.10 Caracterización mecánica de materiales compuestos.....	30
3.10.1 Ensayo de tracción.....	30
3.10.2 Caracterización fisicoquímica	32
3.11 Caracterización mecánica de fibras de refuerzo.	33
3.12 Evaluación de esfuerzo al corte interfacial para fibras estabilizadas	33
Capítulo 4. Resultados.....	35
4.1 Caracterización de las fibras estabilizadas térmicamente.....	35
4.1.1 Evaluación de propiedades mecánicas de monofilamento de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente con HNO ₃ y Sol-gel de SiO ₂	35
4.1.2 Microscopia de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente	36
4.1.3 FTIR de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN con tratamientos superficiales ..	39
4.2 Caracterización fibras agave tequilana weber azul.....	42

4.2.1 Evaluación de propiedades mecánicas de fibras cruda y cocida tratadas superficialmente con NaOH y ácido acético	42
4.1.2 Microscopia SEM a fibras crudas y cocidas tratadas superficialmente.....	43
4.1.3 FTIR de fibras cruda y cocida con tratamientos superficiales.....	46
4.3 Caracterización mecánica de resina epóxica bisfenol A	48
4.4 Caracterización de aditivos PrP y r-PO	50
4.4.1 FTIR de aditivos de microfibras PrP y r-PO	50
4.4.2 Evaluación de aditivos como material de refuerzo de resina epóxica	52
4.4.3 Evaluación de morfología y tamaño de aditivos.	53
4.5 Evaluación del contenido de fibra corta de agave tequilana weber azul	55
4.5 Resistencia al corte interfacial (IFSS) de las fibras OPAN y r-OPAN	57
4.6 Diseño de experimentos Taguchi L8 de fibras estabilizadas.....	60
4.7 Diseño de experimentos Taguchi L8 de fibras de agave tequilana weber azul.....	67
Capítulo 5. Conclusiones.....	74
Capítulo 6. Referencias.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mecanismo de reacción durante la estabilización de PAN copolímero	8
Figura 2.2 Mecanismo de reacción de carbonización de fibras estabilizadas	9
Figura 2.3. Mecanismo de reacción de resina epóxica con endurecedor tipo amina	11
Figura 2.4. Representación de materiales compuestos híbridos con CNTs	13
Figura 2.5. Técnicas de modificación superficial a fibras de carbono	17
Figura 2.6. Ensayos para calcular IFSS, a) Push out; b) Push in; c) Pull out; d) Microgota; e) fragmentación de fibra	23
Figura 3.1. Proceso de preparación de materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas.....	29
Figura 3.2 Esquema representativo de sujeción de probeta para ensayo de tracción	32
Figura 3.3 Marco para sujeción de fibra durante ensayo de tracción	33
Figura 3.4 Representación ensayo de fragmentación de monofilamento a fibras estabilizadas.....	34
Figura 4.1. Ensayo de tracción de monofilamento a fibras OPAN y r-OPAN con tratamientos superficiales	36
Figura 4.2. Micrografías de fibras tratadas superficialmente, a) r-OPAN sin tratamiento, b) r-OPAN con SiO ₂ , c) r-OPAN con HNO ₃ , d) OPAN sin tratamiento, e) OPAN con SiO ₂ , f) OPAN con HNO ₃	37
Figura 4.3. Microscopia SEM de fibras tratadas superficialmente, a) r-OPAN sin tratamiento, b) r-OPAN con SiO ₂ , c) r-OPAN con HNO ₃ , d) OPAN sin tratamiento, e) OPAN con SiO ₂ , f) OPAN con HNO ₃	38
Figura 4.4. FTIR de fibras OPAN con tratamiento superficial	39
Figura 4.5. FTIR de fibras r-OPAN con tratamiento superficial.....	40
Figura 4.6 Ensayo de tracción a fibras crudas y cocidas con tratamientos superficiales .	43
Figura 4.7. a) Fibra de bagazo de agave cruda, b) Fibra de bagazo de agave cocida.....	44
Figura 4.8. Microscopia SEM de fibras tratadas superficialmente, a) Cruda sin tratamiento, b) FCrNaOH, c) FCrAAc, d) Cocida sin tratamiento, e) FCoNaOH, f) FCoAAc.....	45
Figura 4.9. FTIR de fibras de agave cocidas con tratamiento superficial	46
Figura 4.10. FTIR de fibras de agave crudas con tratamiento superficial.....	47
Figura 4.11. Curva esfuerzo-deformación resina epóxica.....	49
Figura 4.12. Fractura de mezcla de resina/endurecedor 2:1 y 1:1	50

Figura 4.13. FTIR aditivos PrP y r-PO.....	51
Figura 4.14. Propiedades mecánicas de compuesto resina epóxica/aditivos PrP y r-PO .	52
Figura 4.15. SEM aditivos a) PrP, b) r-PO.....	53
Figura 4.16. Distribución de medida de diámetro y longitud de microfibras de los aditivos	54
Figura 4.17. Cortes transversales microfibras de aditivos a) r-PO b) PrP.....	55
Figura 4.18. Influencia del contenido de fibra corta de agave en las propiedades mecánicas del material compuesto	56
Figura 4.19. Curva esfuerzo vs deformación en función del contenido de fibra corta de agave.....	57
Figura 4.20. Fragmentación de monofilamento a) Durante la deformación. b) Mediciones de longitud después de la deformación elástica.....	58
Figura 4.21. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción del diseño de experimentos con fibras estabilizadas	64
Figura 4.22 Gráfica de efectos principales para resistencia a la deformación del diseño de experimentos con fibras estabilizadas	65
Figura 4.23. Micrografías SEM de la superficie de fracturas de materiales compuestos con fibras estabilizadas, a) Experimento 2 40X, b) Experimento 5 40X, c) Experimento 8 40X, d) Experimento 2 500X, e) Experimento 5 500X, f) Experimento 8 500X.....	67
Figura 4.24 Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción del diseño de experimentos con fibras de agave.....	71
Figura 4.25 Gráfica de efectos principales para resistencia a la deformación del diseño de experimentos con fibras de agave.....	72
Figura 4.26. Micrografías SEM de la superficie de fracturas de materiales compuestos con fibras de agave, a) Experimento 4 50X, b) Experimento 5 50X, c) Experimento 8 50X, d) Experimento 4 500X, e) Experimento 5 500X, f) Experimento 8 500X.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de compuestos reforzados con fibras estabilizadas y de carbono reportados en la literatura	12
Tabla 2.2 Tratamientos superficiales aplicados a fibras de carbono en materiales compuestos	18
Tabla 3.1 Diseño de experimentos utilizado para la preparación de materiales compuestos con fibras estabilizadas	29
Tabla 3.2. Diseño de experimentos utilizado para la preparación de materiales compuestos con fibras de agave	30
Tabla 4.1. Composición elemental por EDS de las fibras OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente.....	38
Tabla 4.2. Porcentaje de ciclización de las fibras estabilizadas	42
Tabla 4.3 Composición elemental por EDS de las fibras Crudas y Cocidas tratadas superficialmente.....	45
Tabla 4.4. Resistencia al corte interfacial IFSS de fibras estabilizadas con tratamiento superficial	59
Tabla 4.5 Valores de IFSS reportados en la literatura.....	59
Tabla 4.6 Diseño de experimentos para fibras estabilizadas	60
Tabla 4.7. Análisis de varianza ANOVA para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras estabilizadas.....	62
Tabla 4.8. Análisis de varianza ANOVA para la deformación del material compuesto con fibras estabilizadas.....	62
Tabla 4.9 Análisis de varianza ANOVA para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras de agave.....	68
Tabla 4.10. Análisis de varianza ANOVA para la deformación del material compuesto con fibras de agave	69
Tabla 4.11. Análisis de varianza ANOVA con pooling para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras de agave.....	69
Tabla 4.12. Diseño de experimentos para fibras de bagazo de agave	70

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

En la actualidad, existe una creciente necesidad de desarrollar y diseñar materiales novedosos que cumplan con propiedades específicas, particularmente para su aplicación en sectores estratégicos como la industria aeroespacial y del transporte (Ateeq, 2023). Entre los materiales ampliamente investigados se encuentran los materiales compuestos, destacando aquellos con matriz polimérica debido a su baja densidad y elevada relación resistencia-peso (Hsissou et al., 2021). Estas matrices suelen ser reforzadas con fibras sintéticas como carbono, vidrio, nylon, aramida, entre otros (Gogoi et al., 2022). Adicionalmente, diversos estudios han explorado el uso de fibras naturales como alternativas a las fibras sintéticas, debido a ventajas asociadas a su carácter renovable, alta disponibilidad y baja toxicidad (Moriyama et al., 2019); entre ellas se encuentran fibras provenientes de hoja de piña, coco, bambú, yute, lino, algodón y agave, entre otros (Mulenga et al., 2025).

Los materiales compuestos están constituidos principalmente por dos fases: una fase continua denominada matriz y una fase dispersa conocida como refuerzo (Bhong et al., 2023). Para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales, se ha investigado ampliamente el uso de diferentes tipos de agentes de refuerzo, tanto de origen sintético como natural (Selvaraj et al., 2025). Mientras que las fibras naturales se obtienen a partir de recursos renovables o residuos agroindustriales, las fibras sintéticas, como las de vidrio, poliéster y carbono, se producen a partir de precursores que, en su mayoría, no son biodegradables (Aravinth et al., 2023).

Los materiales de alto rendimiento como aleaciones de acero y de titanio han sido ampliamente utilizados por la industria automovilística, espacial, naval, civil, industrial militar, entre otras menos exigentes. Desde hace casi 50 años los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono han remplazado los materiales convencionales como metales, cerámicos y polímeros debido a su baja densidad y resistencia mecánica relativamente superior (F. Khan et al., 2024). Actualmente los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono se encuentran desarrollados para alcanzar los requisitos

mecánicos más exigentes en cuanto a resistencia, rigidez y tenacidad (Shama Rao et al., 2018).

Los materiales compuestos combinan propiedades físicas, químicas y mecánicas. Los compuestos de alto rendimiento, como aquellos con fibras de vidrio o de carbono, suelen tener una matriz polimérica de resina epóxica (Selvaraj et al., 2025), el cual es un polímero termoestable que proporciona una buena relación entre resistencia y peso. Sin embargo, para mejorar la resistencia mecánica, es necesario incluir materiales de refuerzo, lo que hace que estos compuestos sean ideales para aplicaciones en la industria automotriz (Cruz & Fangueiro, 2016; Seid & Adimass, 2024).

Existe una relación directa entre el grado de pureza de las fibras de carbono y el costo de las mismas, esto se debe principalmente a los procesos necesarios para alcanzar cierto nivel de pureza (H. Chen et al., 2025), el costo de las fibras dependen principalmente de factores como la materia prima como el poliacrilonitrilo PAN que es elegido como principal precursor debido a sus propiedades resultantes, otro factor determinante del costo son los tratamientos térmicos, ya que es necesario llevar a la fibra a temperaturas superiores a los 1000°C para obtener las características deseadas (Mahmud et al., 2026; S. M. Yang et al., 2025).

El incremento de la demanda y la producción de fibra de carbono ha causado una disminución del valor comercial de materiales fibroreforzados, sin embargo, aún es considerada relativamente costosa, ya que factores como la pureza, proceso de producción e incremento del valor de las materias primas no contribuyen a la disminución rápida de su precio de venta (Arcos-Alomía et al., 2020). Por otra parte, las fibras naturales tienen un impacto comercial mayor, la abundancia de fibras y sus características hacen de estas un material que ha sido incorporado en nuevos materiales durante las últimas décadas. Disponer de fibras naturales que son consideradas residuo de procesos agroindustriales hacen de estos, materiales llamativos además de tener un costo bajo (Reddy et al., 2020). Las microfibras de carbono, al tener un costo menor en comparación con los nanotubos y nanofibras de carbono, se presentan como un material atractivo para su implementación en diferentes matrices poliméricas. No obstante, una de las limitaciones de estos materiales, al igual que algunas fibras naturales, es la poca interacción entre las fases de matriz (polímero) y refuerzo (fibra). Esta limitación se debe a una dificultad de anclaje y fijación, lo que conlleva concentraciones de esfuerzos de tensión internos que reducen las propiedades mecánicas del compuesto. La

resistencia interfacial es fundamental para la transferencia de cargas, al igual que la orientación de las fibras, para evitar la introducción de propiedades anisotrópicas. Mejorar la interacción entre la matriz y el refuerzo asegura una mejor distribución de las tensiones y optimiza el rendimiento mecánico del material compuesto (Brunner et al., 2020)

El rendimiento de los materiales compuestos van relacionados con la interfaz que se genera entre la matriz y la fibra, existe evidencia que la funcionalización de la fibra mejora esta interfaz ya que este tipo de fibras presentan una limitada adhesión interfacial (Verschatse et al., 2025), de lo contrario este material puede presentar fallas por deslizamiento entre fases y por lo tanto deficientes propiedades mecánicas. (Bourdeau et al., 2024; Zeng et al., 2021). Por otra parte, algunas fibras naturales como fibra de coco, yute, bagazo de caña, plátano, agave, entre otras presentan diferentes interacciones y propiedades de refuerzo con las matrices poliméricas. Sin embargo, para este tipo de fibras es necesario realizar modificaciones en la superficie, de esta forma es posible eliminar ceras y otras moléculas presentes en la fibra que aumentan la rugosidad y por lo tanto una mejor interacción con la matriz (Arunachalam et al., 2024). Las fibras de carbono también requieren tratamientos superficiales para mejorar las propiedades del compuesto (Huerta-Cardoso et al., 2020). Muchos de los procedimientos enfocados en el acondicionamiento de la superficie de las fibras demandan instrumentación especializada y costosa. Como alternativa, se están desarrollando métodos de modificación superficial mediante el uso de nanomateriales que se adhieren a la superficie de la fibra (Aravinth et al., 2022; Zeng et al., 2021).

Con el fin de mejorar la interacción de las fases se han realizado varios estudios en los que se propone incorporar grupos moleculares en la superficie de la fibra los cuales pueden mejorar la rugosidad de la fibra y aumentar el módulo local de la interfase (X. L. Wang et al., 2021). Otros autores proponen la incorporación de nanomateriales funcionalizados cuya función sea mejorar la interacción entre las láminas de la fibra y la matriz polimérica (Arcos-Alomía et al., 2024). Bajo esta perspectiva se pretende contribuir a mejorar la compatibilidad entre las fases evaluando una funcionalización adecuada.

Dentro de la ciencia y la ingeniería de materiales, los materiales compuestos se han consolidado como los materiales más usados por su rendimiento y versatilidad. No obstante, este avance tecnológico ha traído nuevos desafíos, como la creciente generación de desechos de este material y las limitaciones que se presentan para su reciclabilidad (Krauklis et al.,

2021). Actualmente se reúnen cerca de 60,000 toneladas cada año de residuos plásticos reforzados con fibra de carbono, por lo que recientemente se investiga distintas maneras de recuperar dicha fibra de carbono sin sacrificar sus propiedades en el proceso (W. Yang et al., 2026; Y. Zhang et al., 2023). En la presente investigación se realizó la funcionalización de fibras estabilizadas de bajo costo y fibras de agave, al mismo tiempo en el que se incorporó microfibras de carbono recicladas a diferentes materiales compuestos, evaluando la interacción entre las superficies y su impacto en las propiedades mecánicas del material.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar materiales compuestos, usando microfibras de carbono recicladas, fibras estabilizadas funcionalizadas, fibras de agave modificadas y una matriz de resina epóxica.

Objetivos específicos

1. Desarrollar y aplicar un tratamiento térmico oxidativo a fibras acrílicas precursoras y de grado textil
2. Evaluar y realizar un método de funcionalización aplicando técnicas de recubrimiento y el uso micromateriales a las fibras estabilizadas.
3. Modificar superficialmente las fibras de *Agave Tequilana* mediante un tratamiento químico.
4. Evaluar la interacción fibra-matriz de los materiales obtenidos.
5. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las fibras, así como las propiedades mecánicas del material compuesto resultante.

1.3 Justificación

La búsqueda de nuevos materiales es fundamental para el desarrollo tecnológico e industrial en los sectores productivos clave de cada país, y el incremento en la producción de materiales de refuerzo es esencial para alcanzar este objetivo. Para 2024, se proyecta un aumento del 10% en la producción de fibra de carbono en comparación con 2022 (Amin et al., 2024). En la industria aeroespacial, la fibra de carbono representa casi el 50% del volumen de los materiales utilizados, lo que convierte el desarrollo y la fabricación de

materiales reforzados con fibra de carbono en un campo de estudio amplio y de gran aplicabilidad industrial y productiva (Shehab et al., 2021).

Además de la fibra de carbono, las fibras naturales han sido utilizadas desde el siglo XVII para la fabricación de materiales más resistentes y con propiedades mejoradas. Actualmente, estas fibras están ganando terreno en nuevas aplicaciones, ya que sus propiedades pueden llegar a ser comparables a las de las fibras sintéticas (Elfaleh et al., 2023). Para alcanzar este potencial, es fundamental realizar estudios enfocados en la modificación de sus características morfológicas y su composición química, lo que permitiría optimizar su desempeño en materiales compuestos y ampliar su aplicabilidad industrial (F. Khan et al., 2024).

En México, cada año se producen cerca de 300,000 toneladas de fibras de agave como desecho de la producción de tequila, muchos de estos residuos no son aprovechados ya que el bagazo de agave no tiene un uso considerable para la industria agropecuaria (Rubio Rosas et al., 2025). Es por estos motivos que desarrollar materiales fibroreforzados y modificar las características de las fibras de agave se consideran como estudios importantes para el aprovechamiento de residuos y la formulación de nuevos materiales (Huerta-Cardoso et al., 2020)

Si bien es cierto que se han desarrollado estudios acerca de materiales compuestos usando fibras naturales, existe una gran necesidad en reducir el costo de estos, con el fin de así ser ampliamente usados comercialmente y aprovechar las excelentes propiedades que otorga este tipo de materiales. En otro punto de vista, mejorar ciertas características de las fibras de carbono y fibras de agave se convierte en uno de los mayores retos, ya que una excelente interfaz es crucial para lograr una máxima transferencia de carga y por lo tanto un rendimiento mecánico elevado frente a otros materiales comúnmente utilizados (Motta de Castro et al., 2024).

Por lo tanto, en este trabajo se realizó la evaluación de fibras estabilizadas y fibras naturales funcionalizadas con diferentes reactivos, obteniendo excelentes propiedades mecánicas y finalmente se caracterizó los materiales compuestos con el objetivo de analizar su factibilidad en cuanto al costo y comparar con otros materiales comerciales.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Precursores de fibra de carbono y procesos térmicos

La fibra de carbono es el material de mayor preferencia para estructuras con alto rendimiento y excelente relación entre la rigidez y el peso (Nguyen, Creighton, et al., 2024), algunos autores aseguran que la fibra de carbono ofrece diez veces más resistencia específica que el aluminio o el acero estructural, lo que hace que de este, el material más favorable para la industria aeroespacial, automovilística y deportiva (J. Zhang et al., 2023). Existen diferentes materiales precursores de fibra de carbono, entre los más comunes se encuentran celulosa sintética (rayón), brea de petróleo y el poliacrilonitrilo PAN, este último representa el 90% de la materia prima precursora de fibra de carbono, convirtiéndose en el material predilecto debido a sus propiedades superiores en comparación a las demás materias primas (Trogen et al., 2025). Sin embargo, el principal problema de esta materia prima es su costo, es por eso que desde hace una década (Frank et al., 2014) realizó un estudio acerca del coste y la justificación de producción de fibra de carbono basada en PAN. La industria textil produce fibras acrílicas las cuales contienen generalmente un máximo de 85% de acrilonitrilo y 15% de comonómeros, la fibra de grado precursor, contiene un mínimo 95% de acrilonitrilo y el restante 5% de otros monómeros (Choi et al., 2019).

El proceso productivo de la fibra de carbono usando como materia prima PAN, comienza con la hilatura, posterior estabilización, carbonización y finalmente la grafitización (Y. Wu et al., 2022).

2.1.1 Hilatura de poliacrilonitrilo

El proceso de hilatura del PAN puede llevarse a cabo mediante extrusión en húmedo, extrusión en seco y húmedo o electro hilado, dichas técnicas consisten en preparar una solución polimérica con una concentración establecida de PAN, dicha solución se hace pasar por una boquilla o esprea calibradas a un diámetro específico, mediante coagulación o corriente eléctrica (J. Chen et al., 2006; H.-S. Yang et al., 2020), el polímero toma forma a la salida de la esprea obteniendo hilos de manera continua, estas fibras son sometidas a lavados posteriores para el caso de la hilatura en húmedo con el fin de retirar el exceso de solvente (Y. M. Kim et al., 2025), posteriormente se secan y estiran hasta alcanzar diámetros

y propiedades específicas (Y. M. Kim et al., 2025). La incorporación de nanomateriales, partículas antibacteriales o elementos de refuerzo es una de las ventajas principales de este método, fabricando diferentes fibras para diferentes aplicaciones. (Jun Xu et al., 2021). Con el fin de mejorar su comportamiento mecánico, se han realizado investigaciones incorporando nanotubos de carbono, disueltos en la solución polimérica de PAN (H. Kim et al., 2021), además de esto incrementando la conductividad de las fibras haciendo de estas un posible medio capaz de medir diferentes sensores enfocados en el cuidado y la salud humana (Zhuang et al., 2025).

2.1.2 Estabilización térmica de fibras acrílicas

El proceso de estabilización térmica de fibras basadas en PAN, es uno de los procesos más importantes durante la fabricación de fibra de carbono, ya que de este depende la formación y el rendimiento de carbono presente en la fibra (Konstantopoulos et al., 2020). Este proceso se lleva a cabo calentando la fibra precursora en una atmósfera con oxígeno desde 180°C hasta 200-300 °C bajo tensión constante (Nguyen, Creighton, et al., 2024), este proceso térmico debe de realizarse a velocidades de calentamiento lentas para favorecer el cierre del anillo y la deshidrogenación (X. Jin et al., 2021). Luego de este tratamiento se obtiene una fibra oxidada o estabilizada, la cual puede calentarse a temperaturas superiores en atmósferas inertes. Varios estudios se han enfocado en el proceso de estabilización usando copolímeros que favorezcan esta conversión además de disminuir los tiempos lentos durante el proceso térmico (Moskowitz & Wiggins, 2016). La copolimerización del acrilonitrilo con monómeros como ácido itacónico, metil-metacrilato, vinil acetato y acrilato de metilo, son los más comúnmente usados, debido a que cambian el mecanismo de reacción, pasando de una ciclización de radicales libres a una ciclización aniónica. (Park et al., 2018), el mecanismo de reacción durante la estabilización en presencia de oxígeno se representa en la Figura 2.1, donde el calentamiento paulatino genera la deshidrogenación para el posterior cierre del anillo con grupos oxigenados enlazados en la mayoría de su estructura (Khayyam et al., 2020; T. Wang & Luo, 2018).

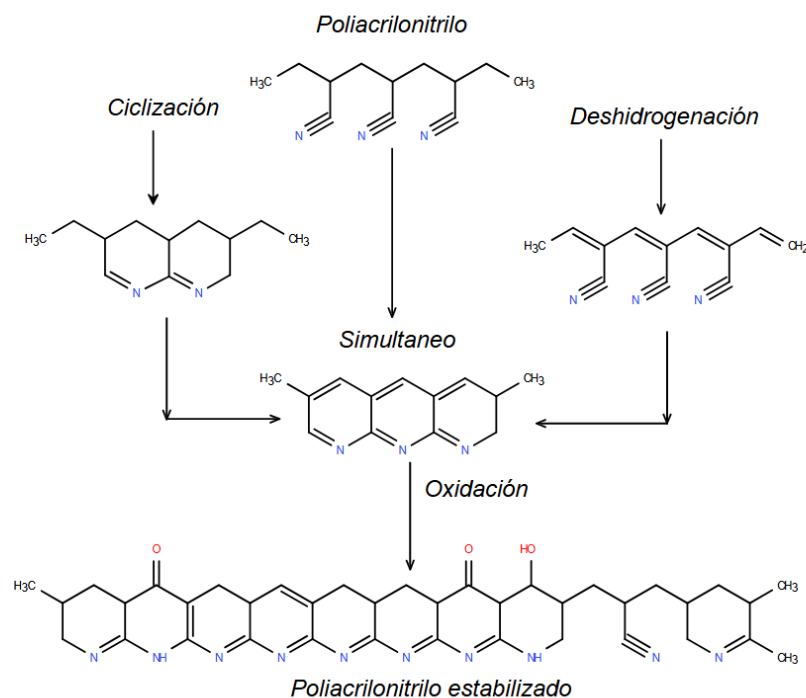


Figura 2.1 Mecanismo de reacción durante la estabilización de PAN copolímero

Otra característica que favorece la oxidación de las fibras precursoras es la presencia de carbono pirolítico en la estructura, lo cual hace referencia a carbono elemental con una estructura desordenada similar a la del grafito (Lamouroux et al., 1993). Se ha determinado que la tracción constante ejercida durante el tratamiento térmico y la duración de dicho tratamiento son variables que afectan las propiedades mecánicas resultantes de la fibra estabilizada y por lo tanto de la fibra de carbono (Nguyen, Maghe, et al., 2024), además de otras variables como la humedad y el flujo de oxígeno (Le Thao Nguyen et al., 2025).

Zoli et al (2023) realizó una investigación para mejorar la resistencia en tracción de las fibras estabilizadas controlando la tensión durante el tratamiento mediante rodillos mecánicos, en este se concluyó la importancia en la tensión ejercida y como esta influye en las propiedades mecánicas y en el cambio de densidad lineal (Zoli et al., 2023).

2.1.3 Carbonización de fibras estabilizadas

Esta etapa ocurre en atmósfera inerte para evitar que la fibra continúe oxidándose, es comúnmente llevada a temperaturas entre 1000 y 1500°C, a estas temperaturas se eliminan las moléculas no carbonosas restantes, ocurre un crecimiento de planos lo que conlleva a una

reorganización de láminas gráficas formando hexágonos que se empaquetan formando una red cristalina densa y resistente llamada grafeno, es por ello que las temperaturas alcanzadas definen dicha orientación y por lo tanto sus propiedades finales (Shi et al., 2018), para este punto el porcentaje de carbono elemental es entre 93 y 95% (Li et al., 2024), ver Figura 2.2 Recientes estudios se han enfocado en la fabricación de fibras de carbono a través de polímeros naturales como lignina o hemicelulosa debido a su alto contenido de carbono, valor comercial y abundancia en la naturaleza (Unterweger et al., 2024). Para obtener mas pureza en las fibras, es necesario realizar el tratamiento de grafitización, elevando la temperatura hasta 2000°C obteniendo un 99% de carbono, de esta forma se obtienen las fibras de carbono de alto modulo elástico entre 350 y 480 GPa (Peng et al., 2024).

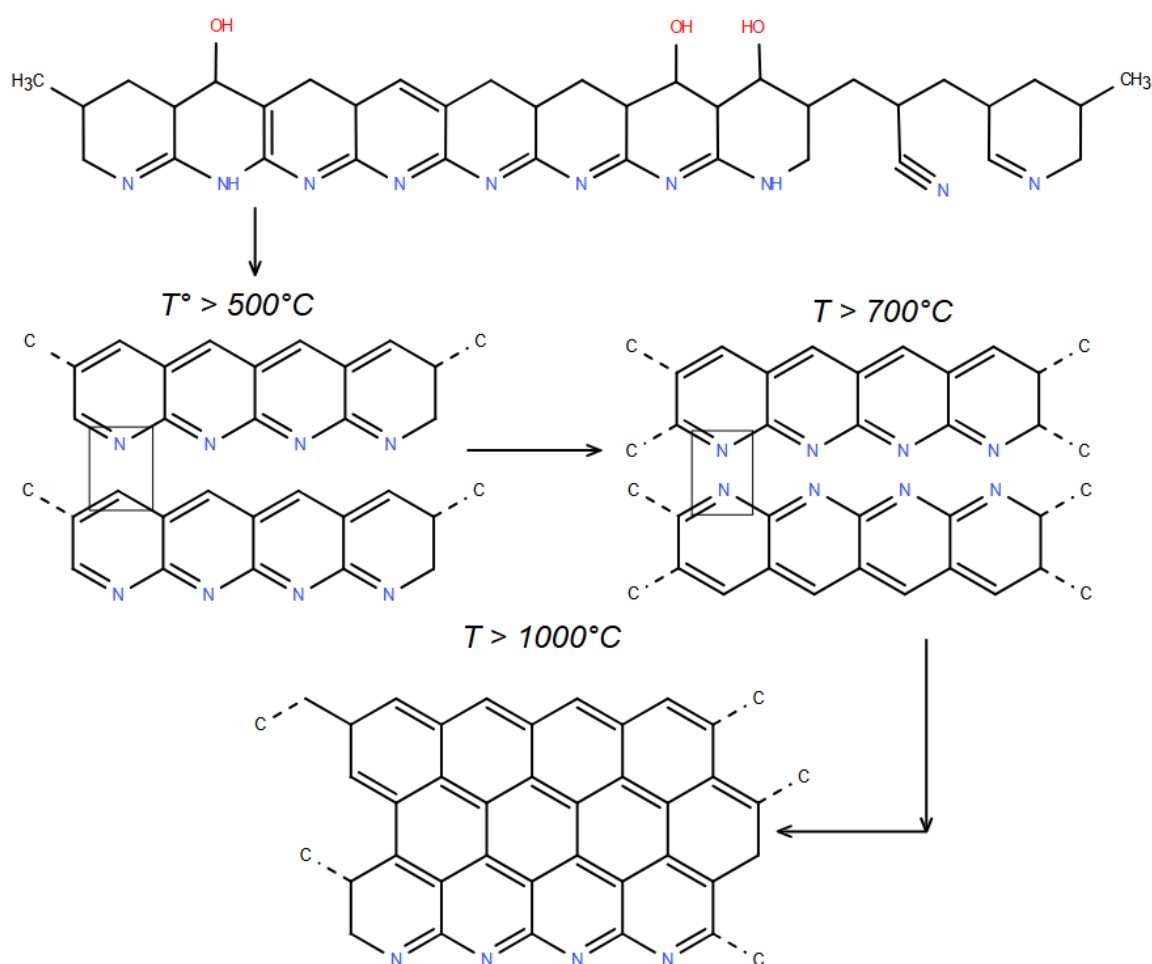


Figura 2.2 Mecanismo de reacción de carbonización de fibras estabilizadas

2.2 Materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas y fibras de carbono.

2.2.1 Matriz de resina epóxica

Los polímeros termoestables de tipo epoxi han sido ampliamente utilizados en la conformación de piezas reforzadas con fibras naturales y sintéticas, reconocida por su buena resistencia térmica, a la corrosión, resistencia específica y facilidad para moldeo, ha sido utilizada en materiales compuestos, recubrimientos, acabados y estructuras en el sector industrial (Hao et al., 2025). La resina epóxica comúnmente utilizada es la de tipo bisfenol A debido a su buen comportamiento mecánico y resistencia en ambientes ácidos, Gu et al. (2026) estudió como agente entrecruzamiento, endurecedor o catalizador, los compuestos 4,4'-diaminodifenilsulfona (DDS), 4,4'-diaminodifenilmetano (DDM) y m-fenilendiamina (MPD), otorgando una mayor estabilidad térmica en la resina epóxica aromática con respecto a la alifática (Gu et al., 2026). El rendimiento de la resina epóxica depende principalmente del peso molecular (la unidad repetitiva n) y el entrecruzamiento entre las cadenas poliméricas, es por ello que se han realizado estudios moleculares del mecanismo de entrecruzamiento usando agentes de curado amínicas (X. Liu et al., 2024).

El mecanismo de entrecruzamiento de la resina epóxica tipo bisfenol A y el endurecedor con grupos funcionales amina se presenta en la Figura 2.3, los electrones del átomo de nitrógeno, se combinan con el átomo de carbono del grupo epoxi, de esta forma se conecta las aminas primarias con el enlace, formando una reacción nucleofílica por adición, posteriormente el enlace C-O del grupo epoxi se rompe por la influencia de los enlaces C-N y finalmente se rompe el enlace N-H presente en la amina primaria y este se une al átomo de oxígeno para formar el grupo hidroxilo, posteriormente la amina secundaria residual continua reaccionando de manera similar (He et al., 2022; X. Liu et al., 2025).

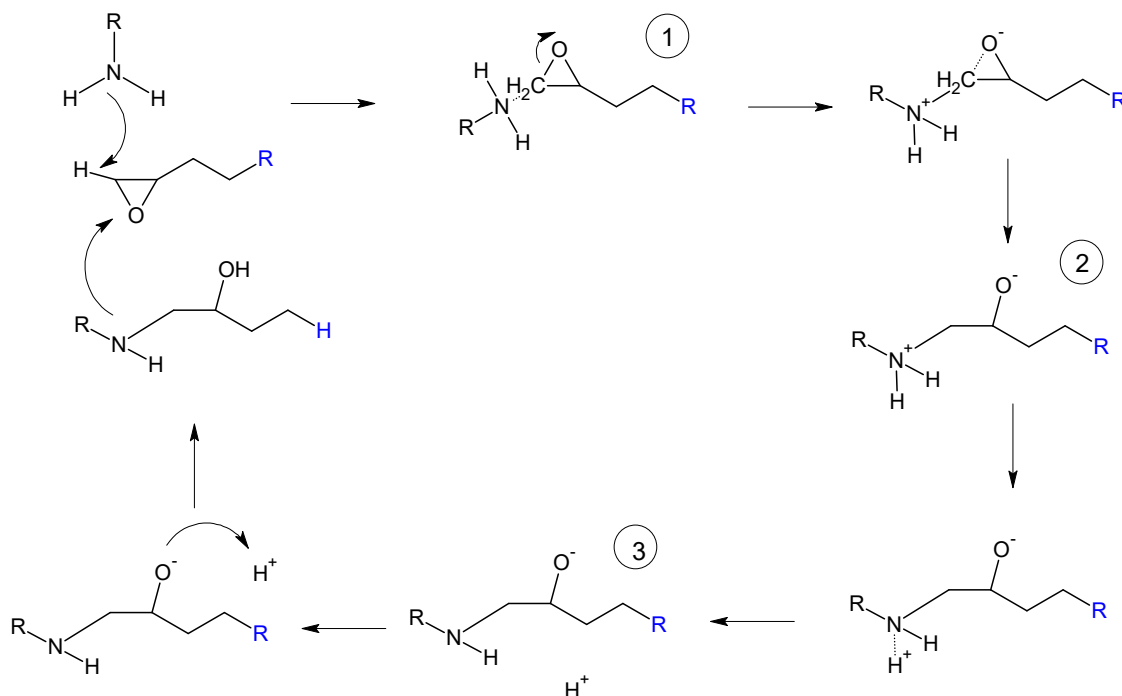


Figura 2.3. Mecanismo de reacción de resina epóxica con endurecedor tipo amina

2.2.2 Compuestos con fibras de carbono y resina epóxica

Los compuestos poliméricos reforzados CFRP (por sus siglas en inglés) muestran excelentes comportamientos mecánicos, entre estos destaca aquellos reforzados con fibra de carbono, debido a su resistencia y altos módulos elásticos, Gogoi et al. (2022) realizó investigaciones de materiales compuestos reforzados con matrices de poliolefinas termoplásticas, preparando los compuestos mediante un extrusor de doble tornillo (Savas et al., 2016), se usaron fibras de carbono grado comercial cortadas a 5 mm de longitud, evaluando el comportamiento mecánico, térmico y tribológico de los materiales resultantes, obteniendo como resultados propiedades variables que varían principalmente de la matriz usada, en algunas ocasiones el porcentaje de fibra añadido provocó una pérdida de resistencia lo que asegura la importancia de mantener una interfaz adecuada (Gogoi et al., 2022).

Dentro de los procesos de preparación de estos materiales comúnmente usados son, el moldeo por transferencia, en el que la fibra seca se posiciona en un molde y la resina se inyecta a presión llenando el molde correspondiente (Sato et al., 2025); Moldeo de preimpregnadas, se prepara con láminas de fibra de carbono impregnadas con resina sin curar, se otorga la forma con un molde y mediante compresión y curado simultaneo se obtiene

la pieza (Yin et al., 2021); el moldeo por vaciado, se vierte resina sin curar a un molde con fibras de carbono previamente agregadas; enrollado de filamento, fibras continuas previamente impregnadas se enrollan en un mandril giratorio con una adecuada tensión (Fitzka et al., 2026) .

La Tabla 2.1, indica algunos estudios en los que han evaluado la resistencia a la tracción y flexión de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono o fibras estabilizadas por distintos métodos de moldeo, existe una estrecha relación entre la resistencia del material, el porcentaje de refuerzo y el tipo de refuerzo que se incorpora en este tipo de materiales.

Tabla 2.1. *Propiedades mecánicas de compuestos reforzados con fibras estabilizadas y de carbono reportados en la literatura*

<i>Matriz</i>	<i>Refuerzo</i>	<i>Método</i>	<i>% refuerzo</i>	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>Referencia</i>
Resina epóxica Bisfenol F	Fibra estabilizada	Moldeo por transferencia	48	61,01	(Ebrahimnezhad-Khaljiri & Eslami-Farsani, 2017)
Resina Fenólica	Fibra estabilizada	Moldeo por vaciado	40	52,05	(Patel & Manocha, 2013)
Resina Epóxica	Fibra de carbono T300/3K	Moldeo de capas en vacío	50	640,30	(S. Zhang et al., 2026)
Resina epóxica YD114	Fibra de carbono T700	Moldeo de remolque (cable)	75	2900	(Lim et al., 2024)
Resina epóxica H1655	Fibra de carbono T700/12K	Moldeo de preimpregnadas	61	968	(C. Ma et al., 2025)
Resina epóxica YB01	Fibra de carbono T300/12K	Moldeo de capas en vacío	61	973	(Li et al., 2025)
Nylon	Fibra de carbono corta	Impresión 3D	-	216	(Dickson et al., 2017)

Nylon	Fibra de carbono	Impresión 3D	-	270	(T. Yu et al., 2019)
Resina epóxica	Fibra de carbono	Moldeo de capas en vacío	45	370	(Ramana & Ramprasad, 2017)
Resina epóxica	Fibra de carbono T300/3K	Molde de capas en vacío	45	420	(J. Zhang et al., 2012)

2.2.3 Nanomateriales en compuestos poliméricos reforzados

El uso de nanomateriales como nanoplaquetas de grafeno, nanotubos de carbono o nanopartículas de grafeno han sido estudiados en la incorporación de materiales compuestos desde su descubrimiento, se ha encontrado que estos materiales son capaces de conferir mayor resistencia y adherencia entre las fases, los nanomateriales dispersos en la matriz controlan el crecimiento de las grietas ya que actúan como elementos disipadores de energía (Yim et al., 2025). La Figura 2.4 muestra cómo se encuentran dispersos los nanotubos de carbono (CNTs) en una matriz polimérica, además de como interactúa con diferentes rellenos y con fibras de carbono continuas (Ramachandrarao et al., 2025).

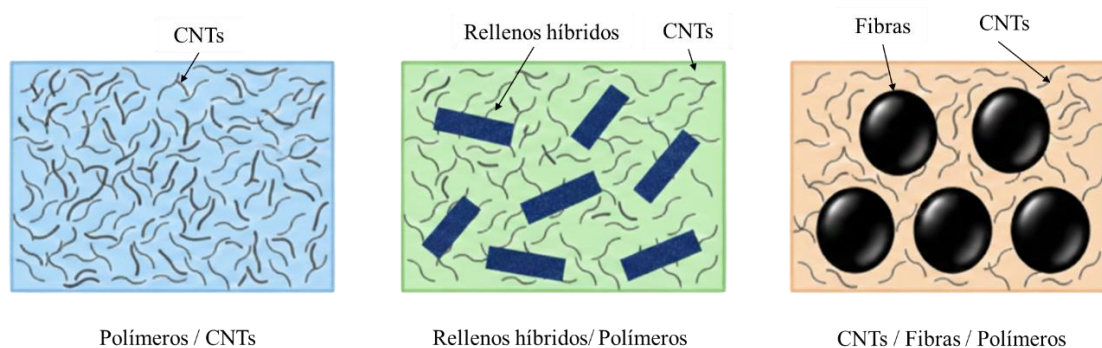


Figura 2.4. Representación de materiales compuestos híbridos con CNTs

Srivastava et al. (2019) valoraron la aplicación de recubrimientos de nanoplaquetas de grafeno en fibras de carbono utilizadas como refuerzo en una matriz de resina epóxica. Las nanoplaquetas de grafeno, con una pureza del 99%, se emplearon como agentes funcionales para las propiedades interfaciales del compuesto. Las fibras de carbono, obtenidas a partir de filamentos de poliacrilonitrilo, fueron recubiertas con las nanoplaquetas a fin de mejorar su

compatibilidad y adhesión con la matriz polimérica. Buscando así, mejorar las propiedades mecánicas y estructurales del material compuesto. En este sentido, llevaron a cabo un pretratamiento de las fibras de carbono mediante ultrasonido, seguido de un lavado con ácido nítrico y ácido sulfúrico. Para el recubrimiento de las fibras, emplearon un aerógrafo con el cual se aplicaron las nanoplaquetas de grafeno en distintas concentraciones en peso ente 0.2% y 0.4%. Los laminados compuestos se fabricaron utilizando la técnica de moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (Srivastava et al., 2019).

Las propiedades de flexión de los laminados fueron evaluadas, con microscopía electrónica de barrido y análisis elemental para caracterizar la distribución de las nanoplaquetas en la matriz. Los resultados indicaron que el recubrimiento con nanoplaquetas de grafeno incrementó significativamente la rigidez de los compuestos. Este efecto fue atribuido a una mejora en la interfase entre la matriz y las fibras, resultado del aumento en la superficie de contacto del compuesto (Karger-Kocsis et al., 2015; Srivastava et al., 2019)

Hiremath et al. (2020), realizaron un estudio de compuestos de resina epóxica reforzados con fibras de carbono de grado textil y grado comercial para aplicaciones automovilísticas y de energía, ambas de uso no aeroespacial, se fabricaron compuestos con resina epóxica mediante infusión al vacío. Los resultados del estudio indican que las fibras grado textil son una opción viable para aplicaciones automotrices, según los análisis de rayos X, estos indican propiedades mecánicas similares en comparación de las fibras comerciales, los resultados mecánicos indicaron propiedades inferiores a la fibra comercial, y esto se debe a la resistencia de la fibra como tal. Y en cuanto la resistencia al cizallamiento estos compuestos presentan propiedades similares. (Hiremath et al., 2020).

En 2024, se han propuesto diversos materiales adicionales para mejorar las interfaces entre la fibra y la matriz en compuestos avanzados. Koutroumanis et al. (2024) investigaron las propiedades interfaciales y el rendimiento mecánico de compuestos híbridos formados por fibra de carbono y polvo de grafeno, estas fibras fueron sintetizadas de poliacrilonitrilo y polvo de grafeno con un espesor de partícula entre 5 y 7 capas con un tamaño promedio de 5 μm ; las muestras se prepararon adicionando el polvo de grafeno a la resina epóxica, seguido de la incorporación del endurecedor y su mezcla con fibra de carbono, utilizando la técnica de embolsado al vacío (Koutroumanis et al., 2024)

La microestructura de los compuestos se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía Raman, evaluando los resultados en función del contenido de grafeno; el estudio concluyó que, aunque la adición de partículas de grafeno no modifica significativamente las propiedades mecánicas de la resina, sí mejora sustancialmente la interacción con la fibra de carbono, aumentando sus propiedades mecánicas y alcanzando un incremento de hasta un 35% en su resistencia máxima con una adición del 2% de polvo de grafeno (Koutroumanis et al., 2024).

2.3 Reciclado de materiales compuestos fibroreforzados

Los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra (FRPC) se han introducido en nuestra vida diaria debido a su excelente relación resistencia-peso y su larga vida útil, es por esto y su alta demanda que la producción ha incrementado drásticamente desde los años 2000 y a su vez el desperdicio generado por dicha industria (Khurshid et al., 2019). Es por esto que reutilizar estos materiales es un tema que llama la atención por la comunidad científica, los sobrantes de recortes de fibras secas son cortadas en fracciones más pequeñas para así tener un control de dispersión al momento de conformar la pieza, Koçoğlu et al. (2022) realizó laminados híbridos con fibras cortas de carbono y fibras recicladas de vidrio, agregando un agente de acople de tipo silano para mejorar la interacción con la matriz de resina epóxica, se realizaron probetas con variación en la composición de fibra de carbono reciclada entre 10 y 30%, dichos laminados alcanzaron resistencias hasta de 567 MPa en tracción (Koçoğlu et al., 2022).

Los tratamientos térmicos en atmósfera de oxígeno o inerte y los tratamientos químicos con ácidos altamente concentrados son los métodos más comunes para recuperar las fibras de carbono que fueron previamente impregnadas con resina, esto con el fin de eliminar la resina epóxica presente en las láminas y recuperar la fibra sin degradarla drásticamente, otros autores han propuesto métodos capaces de despolimerizar la resina permitiendo recuperar los tejidos y el monómero residual (Z. Yu et al., 2026). Hanaoka et al. (2022) realizó un estudio de la recuperación de preimpregnados de fibra de carbono ya curados, para ellos uso ácido nítrico, ya que a diferencia de la pirolisis, este requiere menos temperatura para eliminar la matriz presente (Witik et al., 2013). Para ello usó telas de fibra de carbono T800 preimpregnadas y se introdujo a un reactor con una solución de HNO_3 al 7.5M durante 30

minutos a temperaturas entre 60 y 80°C, realizó materiales compuestos con las fibras recuperadas y no obtuvo pérdidas en cuanto a la resistencia a la tracción con respecto a los compuestos con fibras vírgenes (Hanaoka et al., 2022).

La fibra de carbono reciclada principalmente es cortada en pequeños fragmentos debido a su difícil recuperación, esta se incorpora en resinas termoestables, Wongkhuenkaew et al (2026) reutilizó compuestos de fibras de carbono proveniente de piezas de vehículos e industrias privadas productoras de FRPC, las fibras de carbono fueron recuperadas mediante un tratamiento térmico a temperaturas entre 500 a 600°C, y se incorporaron en una matriz de polipropileno reciclado en una proporción de 5 a 10% en peso. Mediante un análisis termogravimétrico TGA, se determinó que la temperatura de descomposición inicial de los preimpregnados de carbono se encuentra a partir de 350°C y finaliza en 446°C en atmósfera inerte, sin embargo en presencia de oxígeno la descomposición inicial comienza a 172°C (Wongkhuenkaew et al., 2026), entre 200 y 350°C ocurre la descomposición oxidativa de la resina y una segunda reducción a temperaturas entre 350 y 450°C, a temperaturas cercanas a los 600°C la masa perdida corresponde a la oxidación severa de la resina y las fibras de carbono (Xian et al., 2024). Los ensayos mecánicos indicaron una resistencia a la tracción entre 20 y 30 MPa y una reducción significativa de la resistencia al impacto (Ghanbari et al., 2022).

2.4 Tratamientos superficiales a fibras de carbono

Una de las principales desventajas de los materiales compuestos con matriz epóxica y reforzados con fibra de carbono, es la débil interacción entre las fases, esto se debe principalmente a la polaridad de las fibras, además de esto las fibras de carbono presentan altas tensiones superficiales y una baja rugosidad o porosidad lo que disminuye el anclaje mecánico y las interacciones físicas y químicas con matrices poliméricas. En la Figura 2.5, se identifica las técnicas más usadas para modificar la superficie de las fibras de carbono y que el material compuesto encuentre una mayor sinergia entre sus fases (Sanjay et al., 2018) (Ansari et al., 2023).

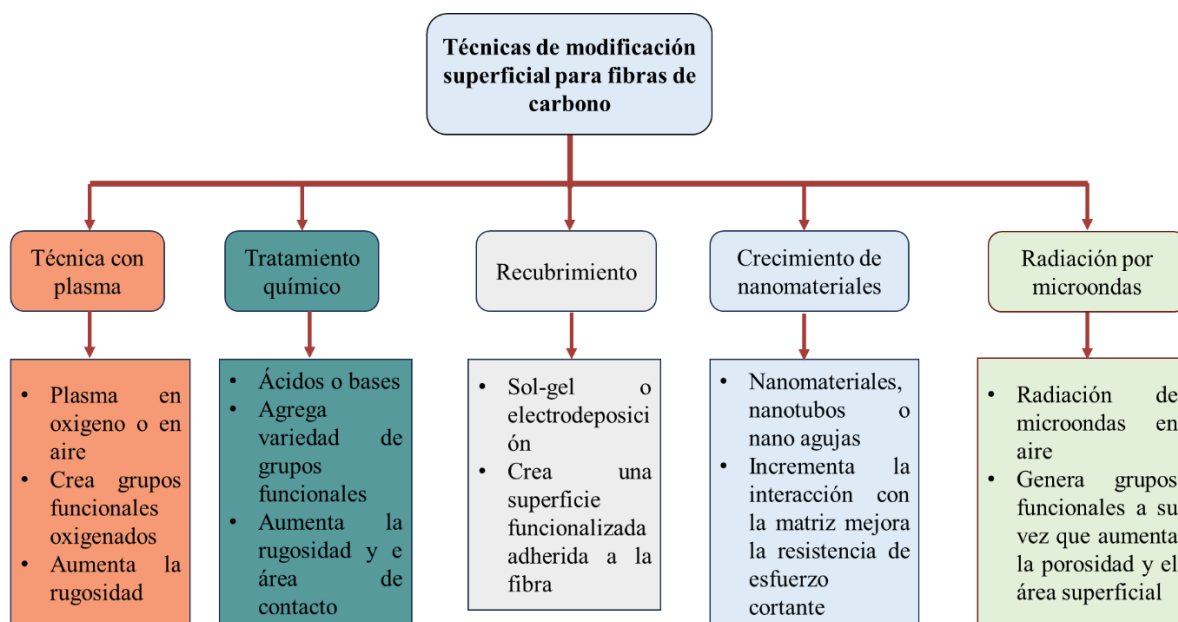


Figura 2.5. Técnicas de modificación superficial a fibras de carbono

Principalmente las técnicas de modificación superficial tienen como función principal mejorar la interacción entre el refuerzo y la matriz, mejorando el anclaje mecánico o químico entre las fases, estos se consiguen aumentando la rugosidad, creando poros o disminuyendo tensiones superficiales, se han reportado hasta un incremento de rugosidad en un 70% mediante un tratamiento superficial con plasma (Xiao et al., 2022). La funcionalización de las fibras mejora de igual manera dicha interfaz, creando grupos funcionales en la superficie que generan enlaces débiles o fuertes con la matriz, Wu et al. (2017) demostró que la incorporación de grupos silano Si-O en la superficie de una fibra de carbono incremento la fuerza de interfaz en un 40% y Chen et al. (2020) logro un aumento del 104% con la adición de nanotubos de carbono, reduciendo el ángulo de contacto entre un tejido de fibras y resina epóxica (Q. Chen et al., 2020; G. Wu et al., 2017).

La Tabla 2.2 indica algunos estudios en los cuales se realizó distintos tratamientos superficiales a fibras de carbono con varias matrices poliméricas, se incluye el incremento de la fuerza de adhesión con respecto al material sin tratamiento, algunos de los estudios demuestran combinaciones de uno o más tratamientos, modificando la matriz para mejorar la interacción con el refuerzo.

Tabla 2.2 Tratamientos superficiales aplicados a fibras de carbono en materiales compuestos

<i>Fases</i>	<i>Técnica</i>	<i>Incremento de fuerza de adherencia (%)</i>	<i>Referencia</i>
Resina epóxica/fibra de carbono	Recubrimiento Dapsona Plasma +	43,4	(Q. Wu et al., 2020)
Nylon 6/fibra de carbono	Recubrimiento (ZnO) + Nanotubos de carbono	108,6	(B.-J. Kim et al., 2018)
Nylon 12/Fibra de carbono	Injerto Nylon 6	30,7	(Hui et al., 2018)
Nylon 6 y tetrahidrofurano /fibra de carbono	Recubrimiento con escamas grafeno + tratamiento químico con HNO ₃	42,5	(Y. Ma et al., 2018)
Resina epóxica/fibra de carbono	Oxidativo con H ₂ O ₂ + Nanotubos de carbono	66,6	(Qin et al., 2020)

2.4.1 Tratamiento superficial con ácidos fuertes

El tratamiento a fibras de carbono con ácido sulfúrico H₂SO₄ o ácido nítrico HNO₃ es usado principalmente para modificar la superficie de las fibras de carbono, otorgándole más rugosidad mientras se funcionaliza con grupos oxigenados como COOH, C-O u OH (Tokonami et al., 2022). En algunos casos se han realizado tratamientos mediante una solución de ambos ácidos en diferentes proporciones, usando impregnaciones con ayuda de calor y ultrasonido (Gallyamova et al., 2023), a este tratamiento se lo conoce como oxidación superficial y también puede realizarse mediante gases oxidativos como peróxido de hidrogeno o gas ionizado (D.-K. Kim et al., 2016).

G. Kim et al. (2023) realizó una investigación a fibras de carbono recicladas en las que trató superficialmente con ácido nítrico en una concentración de 65% v/v, realizó diferentes ensayos modificando el tiempo del tratamiento a dichas fibras, mediante FTIR obtuvo incrementos en las bandas características de los grupos C-O, O-H y C=O, mejorando así la tensión superficial, esto lo corroboró midiendo el ángulo de contacto y calculando la tensión superficial favoreciendo a las fibras tratadas en comparación con las no tratadas (G. Kim et al., 2023).

2.4.2 Tratamiento sol-gel de óxidos metálicos

Los óxidos metálicos son materiales cerámicos que aplicados mediante la técnica de sol-gel, forman una capa delgada con partículas de diferentes tamaños sobre la superficie del sustrato, esta técnica consiste crear una solución coloidal con partículas de tamaños micrométricos y nanométricos suspendidas en un líquido, posteriormente se forma un gel cuando las especies reaccionan a través de condensación creando una red tridimensional del óxido metálico, cuando este material se seca a temperaturas elevadas, forma un sólido denso anclado al sustrato mediante fuerzas de Van Der Waals (Pandey & Mishra, 2011). Esta capa puede ser tan gruesa o delgada dependiendo del sol-gel que se prepare, de esta forma los óxidos metálicos con una estabilidad química y térmica elevada son capaces de aumentar la barrera de eficiencia de difusión, lo que impediría el desplazamiento de la fibra con la matriz (Gadiou et al., 2008).

Gallyamova et al. (2019) recubrió fibras de carbono T300/12K con la técnica de sol-gel con partículas de dióxido de silicio, mediante el precursor TEOS, recubriendo durante tiempos entre 15 segundos y 5 minutos y posterior un tratamiento a 500°C durante 30 minutos (Gallyamova et al., 2019). Se realizaron estudios de estabilidad en atmósfera oxidante a 600°C durante 6 horas, se determinó la eficacia de este tratamiento incluyó a tiempos bajos de impregnado. Por otra parte D. Yang et al. (2022) determinó mediante dicha técnica la influencia en la densidad del tratamiento y como este afecta la resistencia a la compresión del material compuesto, además determinó la importancia del secado y del tratamiento térmico final, ya que de este depende la distribución de la capa en la superficie, además demostró que según el tratamiento se puede o no mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del material recubierto (D. Yang et al., 2022).

2.5 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Estudios acerca de la incorporación de fibras naturales en compuestos poliméricos han demostrado propiedades mecánicas llamativas para ser aplicadas en diferentes tecnologías y productos de alto valor. Estas fibras son una propuesta resistente, ligera y relativamente económica ante las fibras sintéticas de alta pureza, sin embargo, presentan defectos como son: impurezas, diámetros irregulares, composiciones microestructurales diferentes, que pueden afectar la homogeneidad estructural de un material compuesto. Por ello desde hace varios años se han realizado estudios acerca de modificaciones de tipo física y química que mejoran y aumentan su potencial mecánico (Balasubramanian et al., 2024)

Sakuri et al. (2020) estudiaron las propiedades mecánicas de un compuesto con una matriz polimérica de poliéster insaturado adicionando fibras de *agave cantala var.* modificadas mediante un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio, para ello se tomó la fibra de *agave cantala var.* debido a que esta especie tiene una composición de 65% de hemicelulosa, este grupo de polisacáridos presente en la célula vegetal le aportan rigidez a la estructura. Estudios previos han demostrado que tratar este tipo de fibras con una solución de 5% hidróxido de sodio, mejora la superficie de la fibra aumentando la resistencia a la flexión de hasta un 31%, además de mejorar las propiedades a la tracción y al impacto. Se realizaron análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, difracción de rayos X, análisis termogravimétrico, MEB, medición de ángulo de contacto.

Como resultado se concluye que las fibras de agave son hidrófobas y tiene un nivel de polaridad relativamente bajo, el tratamiento con hidróxido de sodio aumentó la rugosidad de la superficie de la fibra mostrando un valor de unión interfacial superior en comparación a la fibra sin tratar, el análisis termogravimétrico indicó un leve aumento de la estabilidad térmica después del tratamiento alcalino y la difracción de rayos X mostró un contenido amorfo además de un aumento en el índice de cristalinidad (Sakuri et al., 2020).

En el 2023 se realizaron estudios para determinar la influencia de la modificación de superficie de la fibra de agave lechuguilla en las propiedades de impacto de un material compuesto con matriz polimérica.

Majhi et al. (2023) usaron fibras de *agave lechuguilla* con una longitud de 10 mm y resina epóxica comercial. Las fibras discontinuas se sumergieron en una solución de hidróxido de sodio al 5% durante 6 h, para evaluar el efecto del hidróxido de sodio se realizó análisis

elemental de la superficie, microscopia electrónica de barrido, y resistencia al impacto Charpy, se fabricaron materiales compuestos mediante laminado convencional variando el porcentaje de adición de fibra de 10 a 40% en peso, los moldes se sometieron a presión constante, para completar el curado. Como resultado se obtuvo que el tratamiento alcalino a la fibra incrementa las propiedades de impacto además de que la adición de 30% en fibras incrementa significativamente la resistencia al impacto del compuesto. Las micrografías mostraron que las fibras tratadas presentan una mayor interacción con la matriz polimérica (Majhi et al., 2023).

2.6 Tratamientos superficiales a fibras naturales

Las fibras naturales pueden ser sometidas a diferentes tratamientos físicos y químicos, esto con el fin de mejorar la adhesión con matrices poliméricas, de esta forma tener un uso eficiente como refuerzo para materiales compuestos. Los tratamientos químicos son usados principalmente para crear grupos funcionales en la superficie, eliminar ciertos componentes que desfavorecen en comportamiento mecánico ayudando a mejorar la zona interfacial del material compuesto (Vignesh et al., 2024).

Dentro de los tratamientos químicos más utilizados se encuentran el tratamiento alcalino, en el cual se sumergen las fibras en soluciones con hidróxido de sodio (NaOH) o de potasio (KOH), este tratamiento tiene como finalidad eliminar la lignina presente en la superficie, en este se puede variar concentraciones, tiempo y temperatura de impregnado para conseguir superficies específicas para diferentes aplicaciones (Khalid et al., 2021). Ramakrishnan et al (2023) demostró que el tratamiento con NaOH disminuye el diámetro aparente de las fibras de *agave tequilana* a medida que aumenta la concentración de hidróxido, la resistencia a la tracción también incrementa, sin embargo, a concentraciones muy altas la resistencia no aumenta de manera significativa (Ramakrishnan et al., 2023).

El tratamiento de acetilación es un procedimiento químico que consiste en agregar grupos acetilo $-\text{COCH}_3$ interactuando con los grupos hidroxilo presentes, para ello se usa ácido acético y anhídrido acético, para ello comúnmente se usa temperaturas superiores al ambiente para favorecer el intercambio de los grupos funcionales mediante tiempos entre 1 y 3 horas (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020). Ezeamaku et al. (2023) evaluó el efecto de la acetilación en fibras de piña en una matriz de almidón de yuca, se observó que la resistencia

a la tracción de la fibra aumentaba a medida que se trataba la fibra durante más tiempo, este comportamiento también se observó en los materiales compuestos conformados (Ezeamaku et al., 2023).

2.7 Resistencia al corte interfacial (IFSS)

La calidad de la interfaz es una propiedad clave para el desempeño de un material compuesto, debido a que en esta se controla la transferencia de esfuerzos mecánicos, la caracterización de dicha interfaz se considera un desafío (Drzal & Herrera-Franco, 2002), ya que se necesitan técnicas para medir propiedades micromecánicas. Existen diferentes métodos experimentales para determinar la IFSS, los ensayos “push in y push out” son las mejores opciones para encontrar este esfuerzo (Ding et al., 2021), para estos ensayos se requieren una preparación de muestra, realizando un corte delgado mediante un cortador de alambre diamantado, con el fin de ubicar las fibras de manera perpendicular al corte, posteriormente con un nanoidentador entre 3 y 5 μm se empuja la fibra, registrando el esfuerzo requerido, posteriormente se analiza el desplazamiento de la microfibras, determinando así la carga crítica y posterior la IFSS (Zhen et al., 2025).

Otros métodos para caracterizar la interfaz en un material compuesto es la técnica de microgota y “pull out”, en la que se embebe un solo filamento en la matriz o se añade una microgota de la matriz en un filamento tensado, por su tensión superficial la gota recubrirá la superficie de la fibra, la técnica consiste en realizar un ensayo de tracción bajo la norma ASTM D-638 tipo 5 en la que, sobre un soporte, se fija la gota y se somete a tracción el monofilamento, es importante medir la longitud embebida y el diámetro de la fibra a ensayar, la IFSS se obtienen mediante una curva donde se observa el desplazamiento de la fibra y la ruptura de la misma (Lee et al., 2024).

Existe otra técnica que no requiere equipos con alta sensibilidad como es la técnica de fragmentación de monofilamento, sin embargo, para ello se debe cumplir ciertas características entre los materiales compuestos, la matriz debe ser traslúcida y tener una capacidad de deformación 4 veces superior a la de la fibra, la longitud promedio de cada fragmento representara la longitud critica, mediante la ecuación de Kelly-Tyson se calcula

IFSS (Kelly, A. and Tyson, 1965; Romero et al., 2025). La representación gráfica de los ensayos para encontrar la IFSS se muestran en la Figura 2.6.

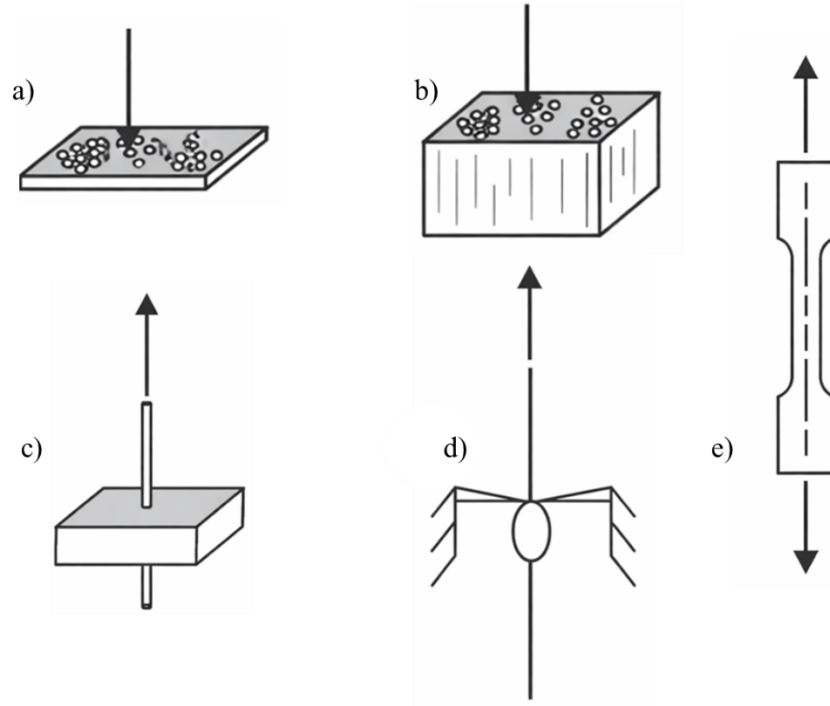


Figura 2.6. Ensayos para calcular IFSS, a) Push out; b) Push in; c) Pull out; d) Microgota; e) fragmentación de fibra

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología empleada para la elaboración de materiales compuestos híbridos reforzados con fibras y microfibras en una matriz de resina epóxica. Se llevó a cabo la funcionalización de fibras sintéticas mediante tratamiento con una solución de ácido nítrico al 65% p/p e impregnación sol-gel con dióxido de silicio (SiO_2), mientras que las fibras naturales fueron sometidas a tratamientos con ácido acético e hidróxido de sodio. Para la fabricación de los materiales compuestos, se establecieron parámetros como el tiempo de dispersión y porcentaje de aditivos, el tipo de fibra estabilizada, y la relación de mezcla entre la resina y el catalizador.

3.1 Preparación de fibras de refuerzo

Se utilizaron dos fibras de refuerzo estabilizadas: i) una fibra de naturaleza precursora OPAN obtenida bajo condiciones optimizadas mediante un diseño de experimentos de extrusión, hilado y estabilización de un polímero precursor no comercial y ii) fibra de grado textil r-OPAN obtenida a partir de la extrusión, hilado y tratamiento térmico usando como materia prima un residuo de una industria textil local (empresa Grupo textil de Aguascalientes S.A.)

3.1.1 Fibra precursora OPAN

La fibra precursora de fibra de carbono estabilizada hasta 240 °C provenientes de un proceso industrial de la empresa Cydsa S.A. de C.V en adelante denominada OPAN. Dicha fibra se obtuvo a partir de un copolímero precursor basado en los monómeros, acrilonitrilo y vinil acetato (Nguyen, Creighton, et al., 2024).

3.1.2 Residuo textil acrílico r-OPAN

Se utilizó fibra acrílica residual grado textil producida en los diferentes procesos dentro de la empresa Grupo textil de Aguascalientes S.A., como polímero precursor de fibras sintéticas continuas a través de un sistema de extrusión e hilado especial desarrollado en el grupo de investigación de polímeros localizado en el instituto tecnológico de Aguascalientes, en adelante denominada r-OPAN. Esta fibra fue sometida a un proceso de estabilización térmica en una mufla precalentada a 190 °C, en la que se incrementó la temperatura 10 °C

cada 30 minutos hasta llegar a los 220 °C. Esta fibra es de grado textil; por lo tanto, la materia prima que lo conforma es un copolímero con monómeros acrilonitrilo y acrilato de metilo, en una menor proporción de acrilonitrilo comparado con OPAN, lo que hace que este material tenga un menor costo en relación con una fibra precursora (Le Thao Nguyen et al., 2025).

3.2 Tratamiento sol-gel de SiO₂ a fibras de refuerzo

El recubrimiento sol-gel de SiO₂ se preparó a partir del precursor tetraetil ortosilicato (TEOS), empleando etanol como solvente e hidróxido de amonio como catalizador básico. Inicialmente, el precursor TEOS se mezcló con etanol en una relación de volumen 1:3 (solución A), considerando una concentración de sílice de 0,4 mol L⁻¹, la solución se agitó durante 10 minutos a temperatura ambiente. En un recipiente separado (solución B), se preparó una solución catalítica de hidróxido de amonio a una concentración de 0,2 M, con agua destilada en relación molar 10:1 respecto al precursor TEOS y etanol al 8 M. Posteriormente, se mezcló las soluciones A y B bajo agitación constante durante 60 min a 55°C. Finalmente la solución se deja en reposo durante 24 h para posterior impregnación a las fibras (Ludeña, 2021)

Se impregnaron 6 gramos de las fibras OPAN y r-OPAN en recipientes por separado durante 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, las fibras se retiraron de la solución y se secaron en un horno convencional a 65°C durante 24 horas (Gul et al., 2021).

3.3 Tratamiento con ácido nítrico a fibras de refuerzo

Se llevó a cabo un tratamiento superficial oxidativo mediante la inmersión de 4 gramos de las fibras OPAN y r-OPAN en una solución con ácido nítrico (HNO₃) al 65% en peso, empleando un baño de ultrasonido de marca Emerson Branson 1800 a una temperatura de 40°C y una frecuencia nominal de 40 kHz durante 30 minutos. Posteriormente, las fibras fueron lavadas con agua desionizada repetidas veces hasta conseguir un pH neutro. Después, las fibras fueron estiradas en un recipiente plano de vidrio y posteriormente secadas en un horno convencional a 65°C durante 24 horas para eliminar el exceso de agua (Casimero et al., 2020; Roseno et al., 2024).

3.4 Preparación de aditivos

3.4.1 Aditivos de microfibras de carbono recicladas (PrP)

Se usaron fibras de carbono (FC) obtenidas a partir de residuos preimpregnados, el cual es un material avanzado que consiste en FC de refuerzo impregnadas con una resina termoestable (generalmente resina epóxica). Se prepararon aditivos tomando fibras de carbono recicladas, obtenidas como residuo de la industria automotriz local (México, Aguascalientes Ags). La preparación se realizó tomando como base un estudio realizado previamente por (C. Ma et al., 2020)

Inicialmente los preimpregnados fueron cortados en secciones rectangulares de aproximadamente de 3 cm por lado. Posteriormente, se pesaron 15 gramos de recortes y se ubicaron en un crisol, estos se calcinaron a una mufla, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se lavaron con agua destilada para eliminar los residuos de resina.

Con la solución gel preparada anteriormente (ver subsección 3.2), se impregnaron las fibras de carbono recicladas y posteriormente se secaron a 65 °C durante 6 horas en un horno convencional. A continuación, se realizó, un tratamiento térmico a 500 °C en la mufla durante 30 minutos con la finalidad de aumentar la cristalización, tamaño de las partículas de SiO₂ y su adherencia a la superficie de las FC, seguido de un enfriamiento lento dentro de la mufla hasta los 200 °C para consolidar el recubrimiento orgánico. Las FC funcionalizadas fueron cortadas y posteriormente trituradas manualmente en un mortero durante 5 minutos por cada 3 gramos de fibra reciclada (Alcalá-Sánchez et al., 2025).

3.4.2 Aditivos de fibras de residuo acrílico estabilizadas r-PO

Se emplearon fibras estabilizadas desarrolladas en el laboratorio de polímeros mediante un sistema de hilatura en húmedo especial a partir de residuos textiles acrílicos utilizando condiciones de procesamiento previamente definidas en un trabajo previo (Alcalá-Sánchez et al., 2024), este material en adelante se denomina r-PO.

Dichas fibras fueron sometidas a un tratamiento de térmico en una mufla precalentada a 200 °C; posteriormente la temperatura se incrementó cada 20°C cada 20 min hasta alcanzar 260°C y finalmente se elevó hasta 300 °C durante 20 minutos adicionales, con el propósito

de promover la estabilidad térmica del material. Posteriormente las fibras se cortaron y se molieron manualmente en un mortero durante 5 minutos por cada 3 gramos de material.

3.5 Preparación de resina epóxica.

Se elaboraron mezclas de resina epóxica de marca EPSA RE-41, de baja viscosidad, con una concentración de sólidos de 99%, a base de Bisfenol “A”, presenta una viscosidad baja entre 500-700 cp y una densidad experimental de 1,12 g/cm³, se mezcló con un endurecedor tipo a base de poliamida cicloalifática EPSA EP-05 en relaciones R:E de 1:1, 2:1 y 5:4, mediante agitación constante y desgasificado en ultrasonido.

3.6 Preparación fibras de agave tequilana Weber azul.

Se trataron 2 tipos de fibras naturales de desecho de la industria tequilera. Específicamente, unas fibras fueron recuperadas de una etapa antes del proceso de cocción por lo que se les llamó fibra cruda. Además, se utilizaron fibras naturales después el proceso de cocción por lo que se les llamarán fibras cocidas. Ambas fibras fueron lavadas con agua destilada y secadas a 65°C durante 24 horas.

3.6.1 Tratamiento alcalino con hidróxido de sodio

Se preparó una solución de 200 ml con hidróxido de sodio NaOH al 5% p/p, en la cual se impregnó 10 gramos de cada fibra (cocidas y crudas) a temperatura ambiente durante 2 horas. Para esto las fibras se colocaron en recipientes por separado haciendo que la solución recubra la totalidad de la fibra. Posteriormente, las fibras se recuperaron y se lavaron con abundante agua hasta que el pH sea neutro. Finalmente, las fibras se dejaron secar durante 24 horas en un horno a 60°C (Kululo et al., 2026).

3.6.2 Tratamiento ácido con ácido acético.

De manera similar, se elaboró una solución de ácido acético (CH₃COOH) al 5 % v/v en 200 ml, donde se impregnaron las fibras cruda y cocida a temperatura ambiente durante 3 horas. La solución recubrió completamente las fibras, las cuales fueron lavadas posteriormente con agua destilada hasta neutralizar el pH y secadas en un horno a 60 °C por 24 (Arunachalam et al., 2024).

3.7 Evaluación del contenido de fibra corta de agave tequilana weber azul en materiales compuestos

Para determinar el contenido óptico de fibra corta en los materiales compuestos, se elaboraron probetas con diferentes fracciones máscas de fibra (4, 8, 11 y 14 % en peso). Las fibras se dispersaron manualmente en moldes rectangulares elaborados con silicona y, posteriormente se incorporó mediante vaciado la resina epóxica en relación 2:1 con endurecedor fenólico. Tras el curado, se evaluaron las propiedades mecánicas de las probetas mediante ensayos de tracción y medición de porcentaje de deformación.

3.8 Fabricación de materiales compuestos híbridos reforzados con fibras estabilizadas acrílicas y aditivos de carbono.

Las probetas se fabricaron con dimensiones rectangulares con dimensiones 120 x 4.75 x 1.30 mm, utilizando moldes de silicona con aberturas en sus extremos para ajustar las fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN. Dichas fibras fueron tratadas superficialmente con tratamientos de sol-gel SiO_2 y HNO_3 , posteriormente se incorporan en los extremos del molde en una concentración de 10% en peso de resina. La resina epóxica se preparó en relación 2:1 y 1:1 en peso con endurecedor de tipo fenólico, se agregaron dos aditivos de carbono PrP y r-PO en una concentración entre 0.25 y 1.00 % en peso de resina, se agitó de manera constante durante 1 minuto y posteriormente se dispersó los aditivos usando un baño de ultrasonido marca Emerson Branson 1800 a una frecuencia de 40 kHz entre 2 y 5 min de dispersión. Seguidamente se vació la resina en los moldes de silicona previamente insertados con fibra estabilizada, las probetas se dejaron curar durante 48 horas a temperatura ambiente para luego ser desmoldeadas y caracterizadas mecánicamente luego de 72 horas después para garantizar el curado completo. La metodología anterior se describe gráficamente en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Proceso de preparación de materiales compuestos reforzados con fibras estabilizadas

Se elaboraron materiales compuestos fibroreforzados con fibras cortas de *agave tequilana weber azul* cruda y cocida las cuales fueron tratadas superficial con ácido acético e hidróxido de sodio, siguiendo la metodología similarmente anterior.

3.9 Diseño de experimentos Taguchi L8 para materiales compuestos híbridos

Con el objetivo de evaluar la influencia de las variables del proceso en el desempeño mecánico de los materiales compuestos, se desarrollaron dos diseños de experimentos de tipo ortogonal Taguchi L8, el primer diseño incorporó como fibras de refuerzo las fibras OPAN y r-OPAN, con tratamientos superficiales con Sol-gel SiO_2 y HNO_3 ; el segundo diseño usó fibras naturales de agave cruda y cocida, tratadas superficialmente con NaOH y ácido acético, estos diseños se presentan en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Tabla 3.1 Diseño de experimentos utilizado para la preparación de materiales compuestos con fibras estabilizadas

Exp.	Relación R/E	Tipo de aditivo	Dispersión (min)	Tipo de fibra	% Aditivo	Tratamiento de fibra
1	1:1	r-PO	2	OPAN	1,00	HNO_3

2	1:1	r-PO	2	r-OPAN	0,25	SiO ₂
3	1:1	PrP	5	OPAN	1,00	SiO ₂
4	1:1	PrP	5	r-OPAN	0,25	HNO ₃
5	2:1	r-PO	5	OPAN	0,25	HNO ₃
6	2:1	r-PO	5	r-OPAN	1,00	SiO ₂
7	2:1	PrP	2	OPAN	0,25	SiO ₂
8	2:1	PrP	2	r-OPAN	1,00	HNO ₃

Tabla 3.2. *Diseño de experimentos utilizado para la preparación de materiales compuestos con fibras de agave*

<i>Exp.</i>	<i>Relación R/E</i>	<i>Tipo de aditivo</i>	<i>Dispersión (min)</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>% Aditivo</i>	<i>Tratamiento de fibra</i>
1	1:1	r-PO	2	CRUDA	1,00	HNO ₃
2	1:1	r-PO	2	COCIDA	0,25	SiO ₂
3	1:1	PrP	5	CRUDA	1,00	SiO ₂
4	1:1	PrP	5	COCIDA	0,25	HNO ₃
5	2:1	r-PO	5	CRUDA	0,25	HNO ₃
6	2:1	r-PO	5	COCIDA	1,00	SiO ₂
7	2:1	PrP	2	CRUDA	0,25	SiO ₂
8	2:1	PrP	2	COCIDA	1,00	HNO ₃

En el diseño de experimentos las variables de respuesta analizadas fueron la resistencia a la tracción y la capacidad de deformación, estas se seleccionaron como indicadores cuantitativos acerca del desempeño mecánico de los materiales compuestos fabricados.

3.10 Caracterización mecánica de materiales compuestos

3.10.1 Ensayo de tracción

La evaluación de las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y porcentaje de deformación de los materiales compuestos, se llevó a cabo mediante ensayos de tracción uniaxial bajo la norma ASTM D3039 con una repetividad de 6 muestras, ajustándose a los procesos del laboratorio (American Society for Testing and Materials, 2017). Las probetas

rectangulares se montaron en mordazas acopladas con soportes metálicos rectangulares y ajustados mediante tornillos en cada extremo, la carga se registró mediante un dinamómetro digital de marca PRETUL 50-Cp y la elongación se midió con un calibrador Vernier digital, la carga incrementa de manera constante cada 400 gramos por medición, se determinó la resistencia a la tracción como el esfuerzo máximo hasta la ruptura de la probeta mediante la Ecuación 3.1, el porcentaje de deformación ε se determinó mediante el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial a través de la Ecuación 3.2.

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$\varepsilon = \frac{l_o - l_f}{l_o} * 100 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

La resistencia a la tracción (σ_T) se calculó mediante la razón de la fuerza aplicada (F) en Newtons entre el área transversal (A) de la probeta en milímetros cuadrados, la deformación

l_f entre l_o , multiplicada por 100 para expresarla en porcentaje, se realizaron gráficas de esfuerzo versus deformación para entender el comportamiento mecánico del material compuesto. El esquema del ensayo de tracción se muestra en la Figura 3.2.

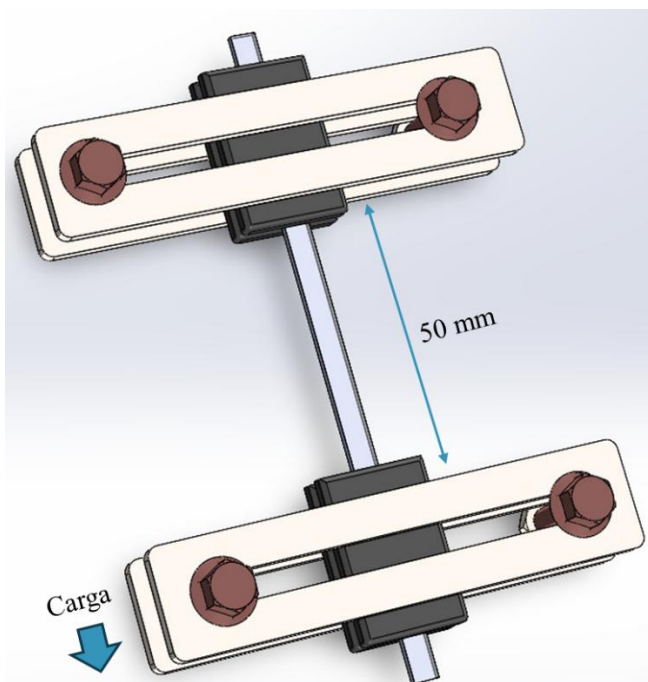


Figura 3.2 Esquema representativo de sujeción de probeta para ensayo de tracción

3.10.2 Caracterización fisicoquímica

Se identificaron los grupos funcionales presentes en las fases que componen el material compuesto mediante espectroscopia infrarroja por trasformada de Fourier (FTIR), los espectros infrarrojos se obtuvieron a través de un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet iS10 a temperatura ambiente en un rango de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} , usando 32 barridos por muestra y una resolución de 4 cm^{-1} , las muestras se analizaron usando pastillas de bromuro de potasio (KBr) como medio de dispersión, además se usó para las fibras de agave el accesorio Smart iTRTMA ATR con un barrido de 650 a 4000 cm^{-1} .

Se caracterizó la morfología de las fibras estabilizadas utilizadas como refuerzo de la resina epóxica usando la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM). Adicionalmente, se obtuvieron imágenes SEM de la zona de ruptura de los materiales compuestos fabricados para el diseño de experimentos, después de los ensayos mecánicos. El equipo utilizado fue un microscopio Thermo Fisher Scientific de referencia FEI Quanta 250 y FIB Helios 5, equipados con espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para tener un análisis semi cuantitativo de los elementos presentes en las muestras.

3.11 Caracterización mecánica de fibras de refuerzo.

Se realizó el ensayo de tracción a las fibras de agave cruda y cocida, además de las fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN, el ensayo se basó en la norma ASTM D-3822 con una repetitividad de 6 muestras. Para ellos se empleó una plantilla de papel blanco en forma de marco con una longitud intermedia de 5 centímetros para las fibras sintéticas y 3 centímetros para las fibras naturales, los marcos se sujetaron en sus extremos mediante cinta tipo Masking para ser halados con cargas que incrementaban aproximadamente en 0.2 gramos fuerza, para determinar el área trasversal de la fibra se observaron los costados de cada una mediante un microscopio digital VXH 600 y medir el diámetro aparente de la fibra a ensayar. La representación de los marcos se muestra en la Figura 3.3 (American Society for Testing and Materials, 2014).

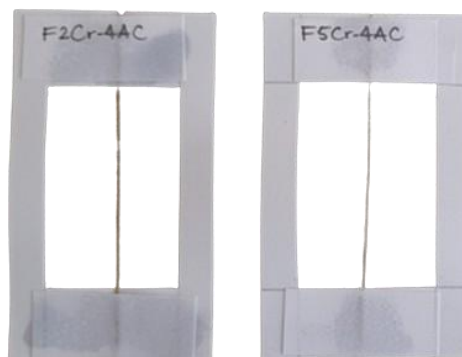


Figura 3.3 Marco para sujeción de fibra durante ensayo de tracción

3.12 Evaluación de esfuerzo al corte interfacial para fibras estabilizadas

Se realizó el ensayo de fragmentación a las fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN con tratamiento superficial, con el propósito de evaluar la interacción interfacial entre fibra y matriz, para ello se utilizaron monofilamentos cuidadosamente insertados en los extremos los moldes de silicona para probetas tipo hueso bajo la norma ASTM D368, se preparó la resina epóxica en una relación 5:4 con el endurecedor para tener la ductilidad necesaria para la prueba, se vació la resina de tal manera que el monofilamento quedara embebido en la mitad de la probeta sin que este se doblara o flexionara, se dejó curar las probetas durante 72 horas antes del desmoldeo. Posteriormente las probetas se sometieron a un ensayo de tracción

uniaxial a bajas velocidades para conseguir la deformación necesaria para la prueba, durante la prueba se registró la evolución de la fragmentación de la fibra. Seguidamente se las muestras ensayadas se observaron en un microscopio electrónico para obtener una longitud promedio de cada fragmento y determinar la longitud crítica de la fibra l_c en micrómetros. Para el cálculo de la resistencia al corte interfacial τ_s en MPa, se utilizó el modelo propuesto por Kelly y Tyson (1965) mediante la Ecuación 3.3, que relaciona el diámetro de la fibra (d) en μm y la resistencia de la fibra σ_f en MPa. La Figura 3.4 representa el ensayo aplicado a las fibras estabilizadas (Kelly, A. and Tyson, 1965).

$$\tau_s = \frac{\sigma_f d}{2l_c} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

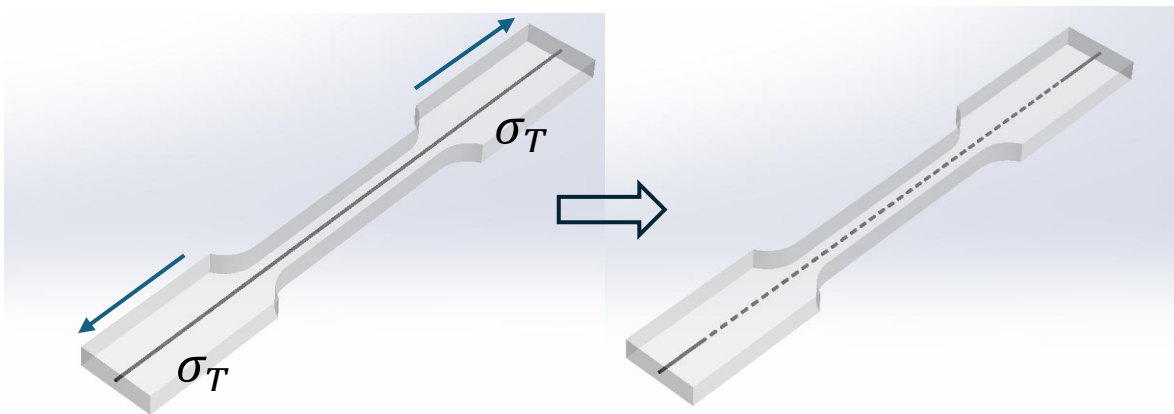


Figura 3.4 Representación ensayo de fragmentación de monofilamento a fibras estabilizadas

Capítulo 4. Resultados

4.1 Caracterización de las fibras estabilizadas térmicamente

4.1.1 Evaluación de propiedades mecánicas de monofilamento de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente con HNO_3 y Sol-gel de SiO_2

Las fibras estabilizadas previamente, tratadas con ácido nítrico y con sol-gel de SiO_2 se sometieron a ensayos de tracción. En la Figura 4.1 se observa los resultados de las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y deformación de las fibras estabilizadas, se puede observar que las fibras OPAN tienen una resistencia a la tracción superior a las fibras r-OPAN. Esto se debe a la materia prima precursora de fibra estabilizada que tiene OPAN, a diferencia de r-OPAN, esta presenta un mayor grado de reordenamiento de capas aromáticas apiladas, lo que indica un mayor grado de cristalización el cual se traduce en una mayor resistencia mecánica, de esta forma se espera una mayor resistencia a la tracción en materiales compuestos (Choi et al., 2019; Hiremath et al., 2020). Asimismo, se puede observar que el tratamiento con sol-gel de SiO_2 afectó la resistencia a la tracción de la fibra hasta un 8,3% para la fibra r-OPAN, la capacidad de deformación de las fibras también se vio afectada con dicho tratamiento hasta un 34,1% de reducción para las fibras OPAN, este tratamiento es utilizado con el fin de proteger química y térmicamente la superficie de la fibra además de funcionalizar con óxidos de silicio polares que permitan un mejor anclaje con la matriz (Avila-Ortega et al., 2025; L. Ma et al., 2019).

Las fibras tratadas con HNO_3 presentaron una degradación mecánica debido a las altas concentraciones de ácido, se observa una reducción de resistencia a la tracción de 65% y 70% para las fibras tratadas OPAN y r-OPAN respectivamente, además de una fragilización de ambas fibras hasta un 90% en la capacidad de deformación, resultados que coinciden con los reportados por Roseno et al. (2024), en donde la reducción fue hasta de 51% en la resistencia a la tracción. Este tratamiento se aplica comúnmente a fibras de carbono, y su función principal es aumentar la rugosidad de la fibra sacrificando propiedades mecánicas, (Roseno et al., 2024). La resistencia química y mecánica de las fibras estabilizadas es inferior a las fibras de carbono, esto se debe a que aún no ocurre el reordenamiento de la estructura

carbonosa, siendo esta superior en aquellas fibras precursoras en comparación con las de grado textil (H. Khan et al., 2022).

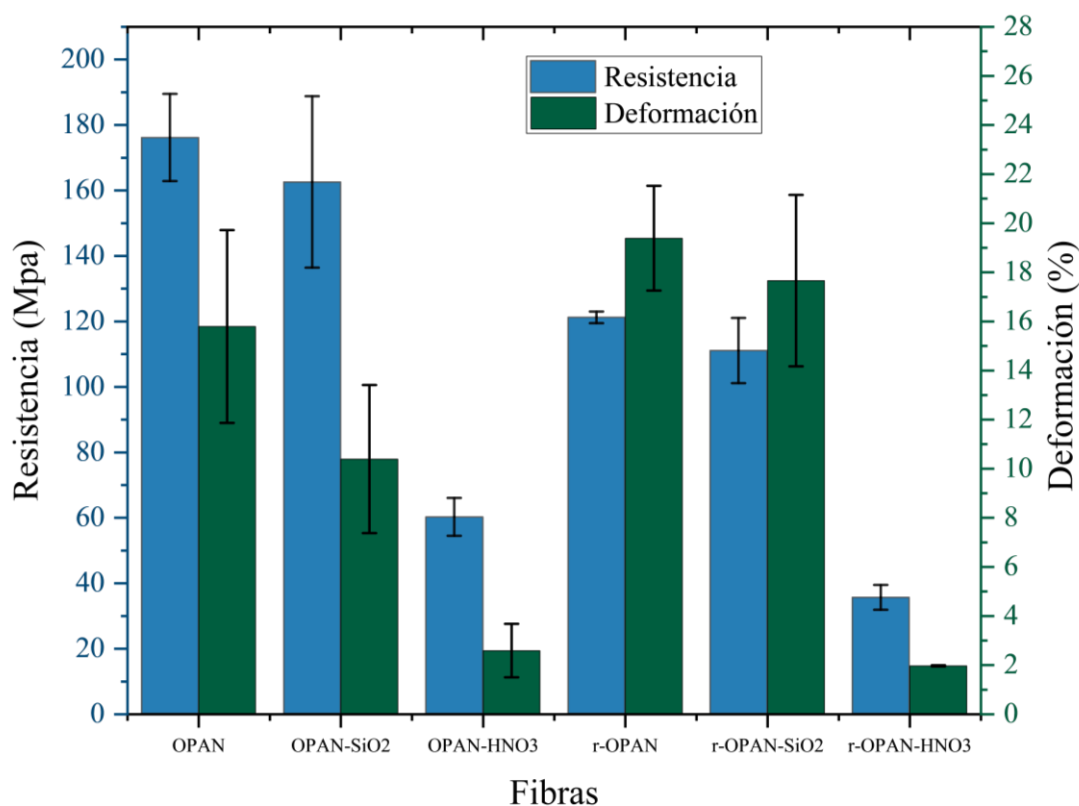


Figura 4.1. Ensayo de tracción de monofilamento a fibras OPAN y r-OPAN con tratamientos superficiales

4.1.2 Microscopia de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente

Se tomaron micrografías mediante microscopia digital, con el propósito de observar la superficie y características de las fibras tratadas. En la Figura 4.2 se presenta la comparación de las fibras OPAN y r-OPAN sin tratamiento con aquellas tratadas, donde se observa la presencia de depósitos que corresponden a geles o cristales de SiO₂ o precursores de SiO₂

(Dubey et al., 2015). Además, se percibe un cambio de la rugosidad de aquellas fibras sin tratar con respecto a aquellas tratadas con HNO_3 para ambas fibras.

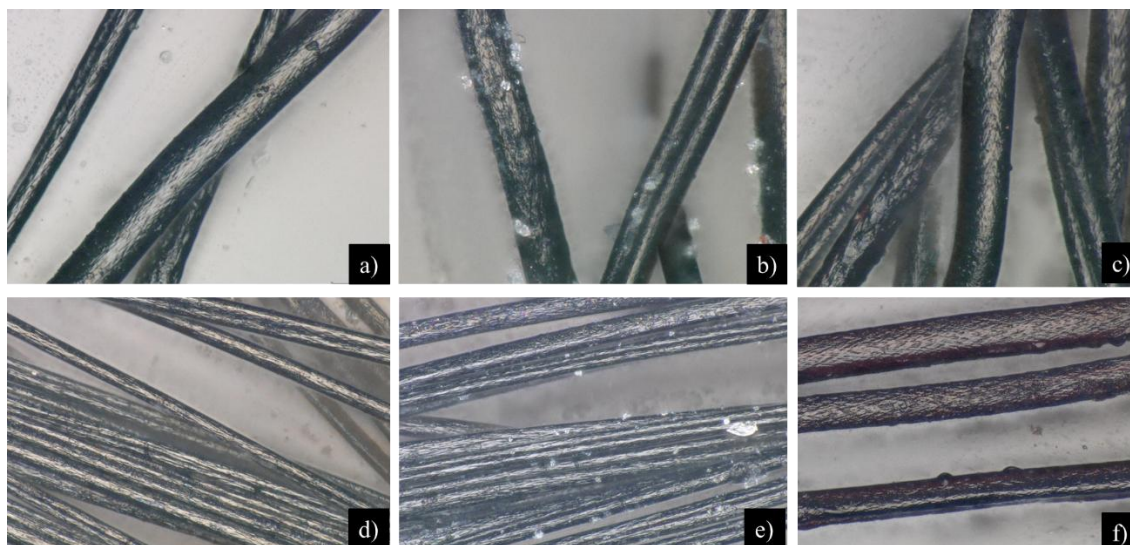


Figura 4.2. Micrografías de fibras tratadas superficialmente, a) *r*-OPAN sin tratamiento, b) *r*-OPAN con SiO_2 , c) *r*-OPAN con HNO_3 , d) OPAN sin tratamiento, e) OPAN con SiO_2 , f) OPAN con HNO_3

Se realizó microscopía electrónica de barrido SEM a las fibras tratadas con SiO_2 y HNO_3 , en la Figura 4.3, se observa de manera más notoria el efecto del tratamiento con HNO_3 , el ácido degradó la superficie de la fibra *r*-OPAN, otorgando mayor rugosidad y un aspecto de escamas, similar a la piel de serpiente, el mismo efecto pero menos notorio se observa en las fibras estabilizadas OPAN, este efecto se debe principalmente a la materia prima precursora, las fibras OPAN a diferencia de las *r*-OPAN, presenta una mayor ciclización durante el tratamiento de estabilización debido a que el monómero de acrilonitrilo favorece este mecanismo, aumentando la estructura tipo escalera y por lo tanto una estructura más compacta, el tratamiento ácido ayuda a remover algunas fases amorfas de la fibra creando surcos o cavidades lo que puede favorecer a una mayor área de contacto con la resina al momento de formar el material compuesto (L. Wang et al., 2016; Xiong et al., 2017). Las fibras tratadas con SiO_2 muestran una capa gelificada con diferentes espesores y con una mala distribución. Asimismo, se evidencia que las fibras OPAN con SiO_2 presenta una capa

de recubrimiento superior a las fibras r-OPAN la cual aparenta una adhesión deficiente con la fibra.

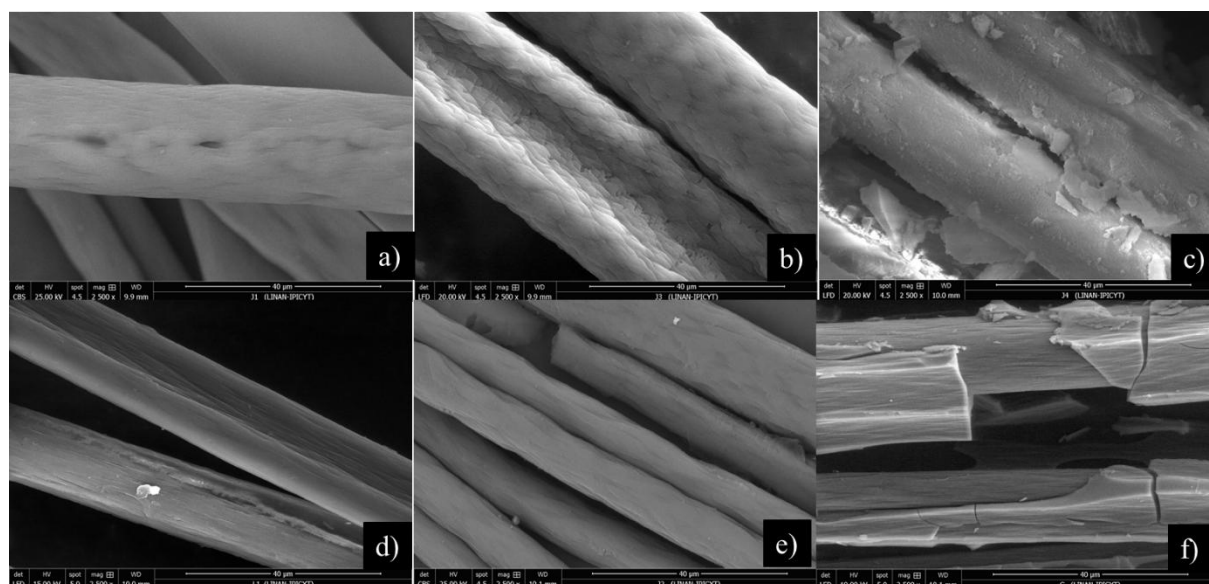


Figura 4.3. Microscopia SEM de fibras tratadas superficialmente, a) r-OPAN sin tratamiento, b) r-OPAN con SiO₂, c) r-OPAN con HNO₃, d) OPAN sin tratamiento, e) OPAN con SiO₂, f) OPAN con HNO₃

Se realizó espectroscopia de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) acoplado al SEM como técnica de análisis elemental, los resultados de esta medición se reportan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Composición elemental por EDS de las fibras OPAN y r-OPAN tratadas superficialmente

Fibras	Contenido relativo de elementos en peso (%)				
	C	N	O	Al	Si
r-OPAN	68,81	22,85	7,99	0,35	0,00
r-OPAN-HNO ₃	67,22	20,20	11,40	1,18	0,00
r-OPAN-SiO ₂	42,94	9,59	39,20	0,32	7,95
OPAN	68,25	23,25	7,38	1,12	0,00
OPAN-HNO ₃	69,94	19,12	10,74	0,20	0,00
OPAN-SiO ₂	46,02	4,11	31,29	2,11	16,47

Se puede determinar mediante esta técnica semicuantitativa un incremento en el porcentaje relativo de oxígeno con el tratamiento de HNO_3 , siendo ligeramente superior en las fibras r-OPAN debido a la mayor accesibilidad del agente oxidante (G. Kim et al., 2023). Por otra parte, el tratamiento con SiO_2 muestra una deposición de silicio superior en las fibras OPAN- SiO_2 lo cual se evidencia con las micrografías SEM anteriormente presentadas y además confirma que dicha capa corresponde a compuestos a base de silicio.

4.1.3 FTIR de fibras estabilizadas OPAN y r-OPAN con tratamientos superficiales

Se realizó espectroscopia infrarroja por trasformada de Fourier a cada muestra de fibra, mediante la fabricación de pastillas de KBr agregando igual cantidad en masa de cada fibra, para los espectros obtenidos, se realizó una corrección de línea base automática y se normalizaron los datos con el fin de identificar los cambios en los grupos funcionales que ocurren durante los tratamientos aplicados.

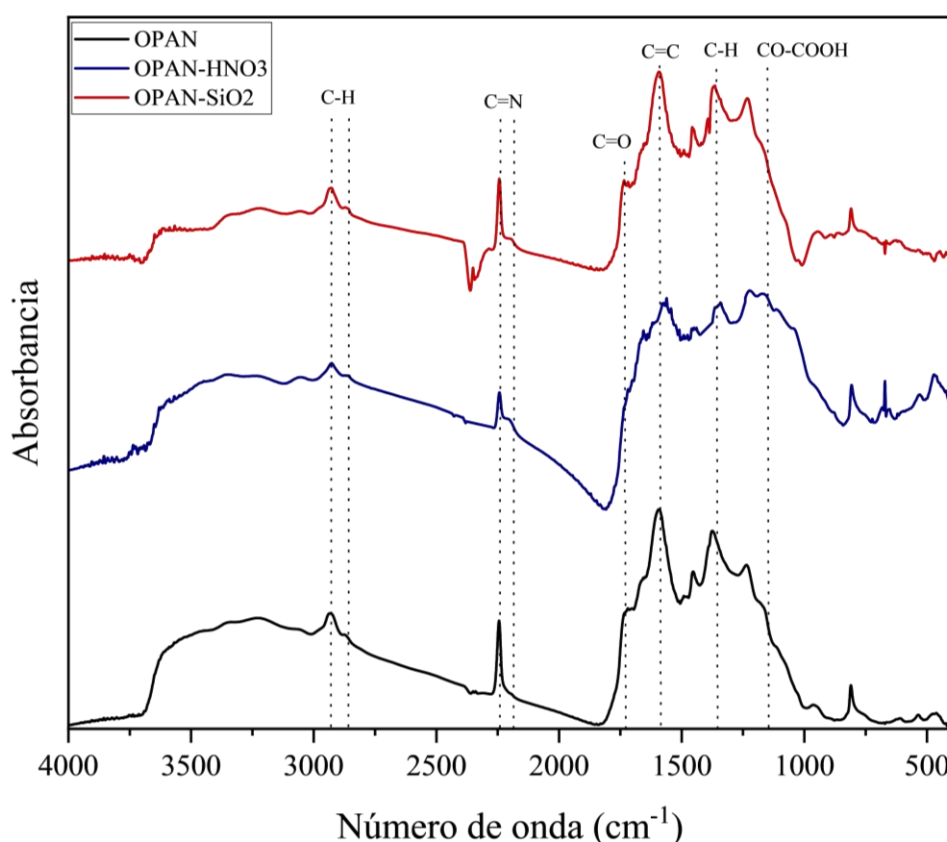


Figura 4.4. FTIR de fibras OPAN con tratamiento superficial

En la Figura 4.4 se observa la reducción de intensidad de los picos 2908 y 2864 cm^{-1} correspondientes al estiramiento de los grupos C-H, además del pico 1361 cm^{-1} característico de la deformación del grupo metilo C-H; se observa la aparición de picos a 2241 cm^{-1} presentes en el grupo nitrilo C=N y a 1710 cm^{-1} del grupo carboxilo C=O (Roseno et al., 2024). Adicionalmente, se observa un cambio en la intensidad de los picos correspondientes al estiramiento del grupo C-O y carboxilo -COOH a 1100 cm^{-1} y 1225 cm^{-1} respectivamente, estos grupos funcionales son altamente polares debido a la presencia de oxígeno electronegativo, la capacidad de generar dipolos y puentes de hidrogeno en la superficie, lo que conlleva a una reducción del ángulo de contacto con líquidos polares, como la resina epóxica, de esta forma aumentando la humectabilidad lo que conlleva un mejor anclaje entre la superficie de la fibra y la matriz de resina (Leistenschneider et al., 2021; Sun et al., 2020).

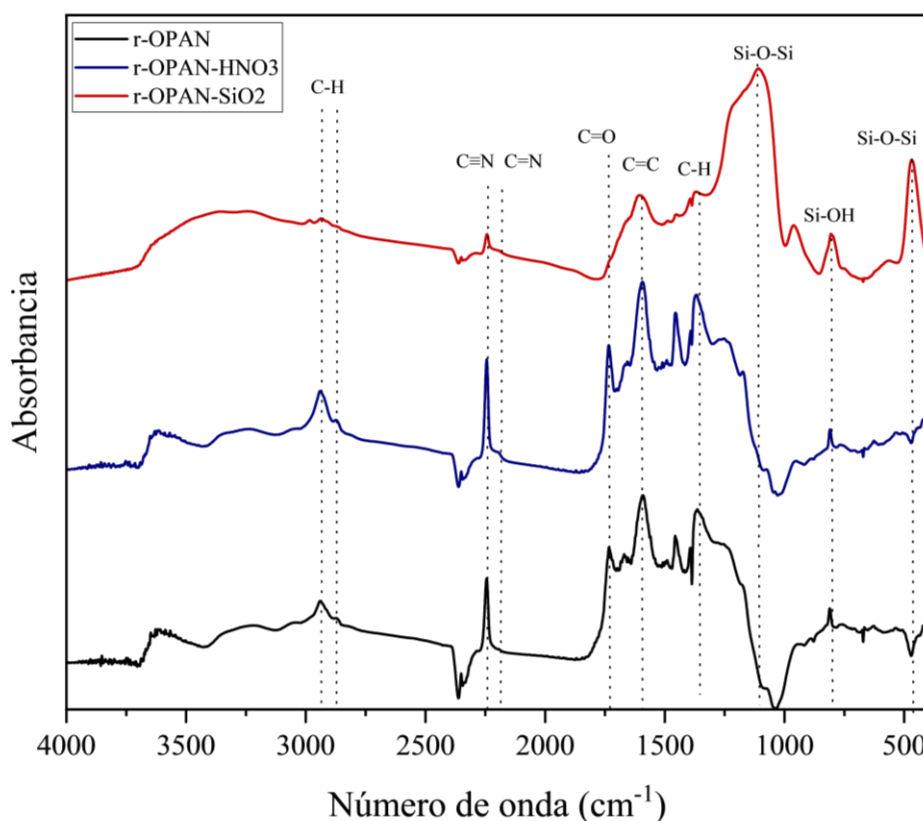


Figura 4.5. FTIR de fibras r-OPAN con tratamiento superficial

En la Figura 4.5, para la fibra r-OPAN, se observa que el tratamiento ácido, no realizó cambios significativos en los grupos funcionales, es posible identificar un incremento en la

intensidad a 1726 cm^{-1} y a 1164 cm^{-1} , lo que indica la formación de grupos oxigenados. Además, es posible identificar la señal a 2241 cm^{-1} asignada a los grupos nitrilo de las fibras OPAN y r-OPAN, los cuales corresponden a las estructuras lineales de poliacrilonitrilo que no se han sido transformadas a estructuras en escalera, esto confirma la baja pureza en carbono de las fibras, lo que es característico de las fibras estabilizadas a temperaturas relativamente bajas (X. Wang et al., 2021). Por otra parte, se observa una menor incorporación de grupos funcionales oxigenados en comparación con las fibras OPAN tratadas con ácido nítrico. Con el fin de evaluar el porcentaje de ciclización, grado de deshidrogenación y de oxidación de las fibras que presentaron durante el tratamiento, se utilizó las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 (H. Khan et al., 2022), donde IE corresponde al índice de estabilización, GC el porcentaje de ciclización, ID el índice de deshidrogenación. Para ellos se tomó los valores de absorbancia de los grupos nitrilo $\text{C}\equiv\text{N}$ (A_{2240}), el enlace $\text{C}=\text{C}$ (A_{1590}), y el grupo metilo $\text{C}-\text{H}$ (A_{1360} y A_{1454}) (Moskowitz & Wiggins, 2016; Nguyen, Creighton, et al., 2024).

$$IE = \frac{A_{1590}}{A_{2240}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$GC = \frac{0,29 \cdot A_{1590}}{A_{2240} + 0,29 \cdot A_{1590}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$ID = \frac{A_{1360}}{A_{1454}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Se evidencia en las fibras r-OPAN-SiO₂ la presencia de dos picos característicos con bastante intensidad a 1100 cm^{-1} y 460 cm^{-1} , correspondiente a flexiones de Si-O-Si, la banda de absorción de 800 cm^{-1} que corresponde al estiramiento del grupo Si-O-Si, el pico característico del grupo Si-OH se encuentra a 958 cm^{-1} . La ausencia de dichas intensidades en las fibras OPAN-SiO₂ sugiere una baja deposición de sílice durante el tratamiento, lo que indica una incorporación superficial limitada o una distribución heterogénea del recubrimiento del sol-gel (Elizondo-Villarreal et al., 2024; Sonawane et al., 2025).

En la Tabla 4.2 se muestra que el índice de estabilización IE de la fibra OPAN es superior a la fibra r-OPAN, de la misma forma el índice de deshidrogenación es inferior para las fibras de residuo, se observa además que el porcentaje de ciclización es un 3.5% superior para las fibras OPAN, esto se debe a la mayor facilidad de ciclar durante la estabilización, asociado

al mayor contenido de unidades de acrilonitrilo, el cual incrementa la densidad de los grupo nitrilo disponibles, fomentando una estructura más ordenada y conjugada en comparación con las fibras r-OPAN (L. Chen et al., 2020)

Tabla 4.2. Porcentaje de ciclización de las fibras estabilizadas

<i>Fibra</i>	<i>GC (%)</i>	<i>IE</i>	<i>ID</i>
OPAN	37,56	2,07	1,23
r-OPAN	32,80	1,68	1,15

4.2 Caracterización fibras agave tequilana weber azul.

4.2.1 Evaluación de propiedades mecánicas de fibras cruda y cocida tratadas superficialmente con NaOH y ácido acético

Las fibras de *agave tequilana weber azul* cruda y cocida tratadas con hidróxido de sodio y ácido acético fueron sometidas a ensayos de tracción, con el fin de obtener la resistencia máxima de tracción y la capacidad de deformación. En la Figura 4.6 se identifica un mejor comportamiento mecánico de las fibras cocidas, FCoAAc tratado con ácido acético y FCoNaOH tratada con hidróxido de sodio, siendo superiores en un 97.2% e incluso hasta 8 veces mayores que sus homónimas crudas FCrAAc y FCrNaOH, se muestra además una superior resistencia a la tracción en las fibras cocidas luego del tratamiento alcalino, el hidróxido de sodio, actuó eliminando la mayor parte de lignina presente, dejando celulosa y hemicelulosa puedan interactuar mecánicamente. Estos polisacáridos son más resistentes al tener una estructura polimérica mejor alineada en comparación con la estructura amorfa de la lignina. A diferencia de ello el tratamiento con ácido acético permite mejorar la impermeabilidad de las fibras, ya que este tipo de material lignocelulósico tienen un alto

comportamiento higroscópico que dificulta una buena adhesión con la resina epóxica (Aravinth et al., 2023; Mylsamy & I., 2010; Rojas et al., 2022).

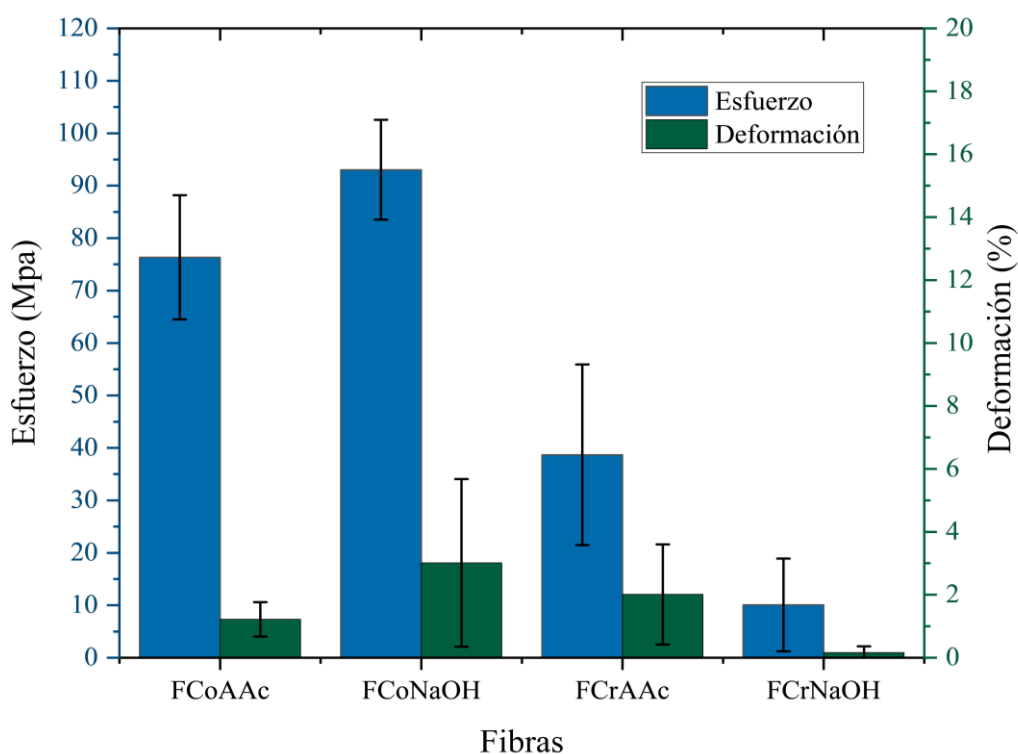


Figura 4.6 Ensayo de tracción a fibras crudas y cocidas con tratamientos superficiales

4.1.2 Microscopia SEM a fibras crudas y cocidas tratadas superficialmente

Se realizó microscopia electrónica de barrido a las fibras crudas y cocidas, con el fin de observar cambios en la morfología con cada tratamiento aplicado, estas fibras de desecho presentan una tonalidad característica como resultado del proceso de cocción al momento de extraer el jugo o mosto dulce, en la Figura 4.7 se observa que la fibra cocida presenta una tonalidad más clara en comparación con la fibra cruda.



Figura 4.7. a) Fibra de bagazo de agave cruda, b) Fibra de bagazo de agave cocida

En la Figura 4.8, se observa que la fibra cruda sin tratamiento muestra una superficie con rugosidad característica, la cual se asemeja a la presencia de un recubrimiento superficial. Por el contrario, la fibra cocida sin tratamiento presenta una remoción parcial de algunos componentes superficiales referentes a ceras y lignina. Las fibras tratadas con NaOH (FCrNaOH y FCoNaOH) muestran una superficie más limpia y definida en comparación con las fibras tratadas con ácido acético. Indica que el tratamiento alcalino es más agresivo eliminando una mayor cantidad de hemicelulosa, lignina y ceras superficiales, mientras que el ácido acético muestra una acción menos intensa en la remoción de estos componentes. Por otra parte, las fibras FCoNaOH reflejan una remoción de filamentos rectangulares incrustados a lo largo de las fibras debido al hinchamiento de la fibra durante el tratamiento, mostrando una mayor rugosidad y porosidad con respecto a las fibras sin tratar, del mismo modo las fibras FCoAAc muestran menor fibrilación que aquellas tratadas con NaOH ya que se eliminan en menor cantidad ciertos materiales cementantes. Estos cambios en la superficie pueden mejorar el anclaje con la resina epóxica favoreciendo la resistencia mecánica del material compuesto (Rosales et al., 2021; Sifuentes-Nieves et al., 2022; Solís Rosales et al., 2022).

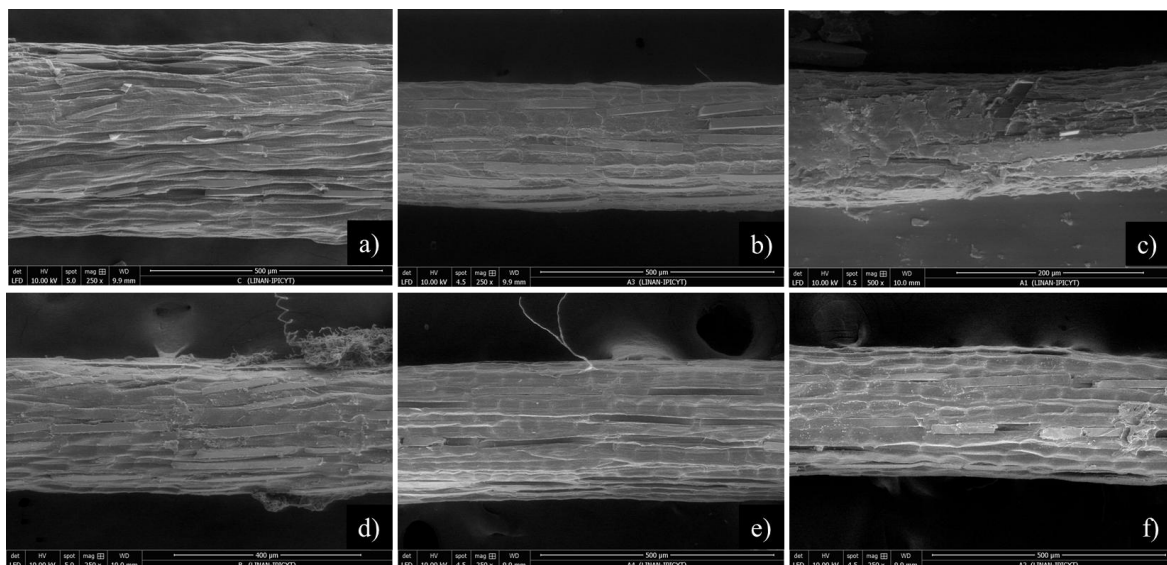


Figura 4.8. Microscopia SEM de fibras tratadas superficialmente, a) Cruda sin tratamiento, b) FCrNaOH, c) FCrAAc, d) Cocida sin tratamiento, e) FCoNaOH, f) FCoAAc

El análisis semicuantitativo EDS se muestra en la Tabla 4.3 , se muestra la presencia de calcio y silicio en las fibras, los valores se encuentran entre 5,3 y 8,3% en peso relativo de cada elemento, este valor puede deberse a la presencia de algunos oxalatos o pectatos de calcio comúnmente presente en plantas de tipo xerófilas, (Delgado-Espitia et al., 2024; Rios-Del Toro et al., 2021) además existe la presencia de magnesio en las fibras crudas sin tratamiento elemento que se incorpora en los tejidos vegetales a través de la absorción con el suelo (Saraswat et al., 2023).

Tabla 4.3 Composición elemental por EDS de las fibras Crudas y Cocidas tratadas superficialmente

Fibras	Contenido relativo de elementos en peso (%)				
	C	O	Si	Ca	Mg
FcrST	61,80	34,90	0,92	1,83	0,55
FCrAAc	48,22	37,50	2,68	11,60	-
FCrNaOH	43,91	44,80	2,16	9,13	-
FcoST	55,25	40,59	0,45	3,72	-
FCoAAc	45,26	42,83	3,78	8,13	-
FCoNaOH	47,78	43,67	1,81	6,75	-

4.1.3 FTIR de fibras cruda y cocida con tratamientos superficiales

Se realizó espectroscopia infrarroja por trasformada de Fourier a cada muestra de fibra cruda y cocida, con el fin de identificar los grupos funcionales que se presentan durante el tratamiento superficial comparado con aquellas fibras sin tratamiento (ST).

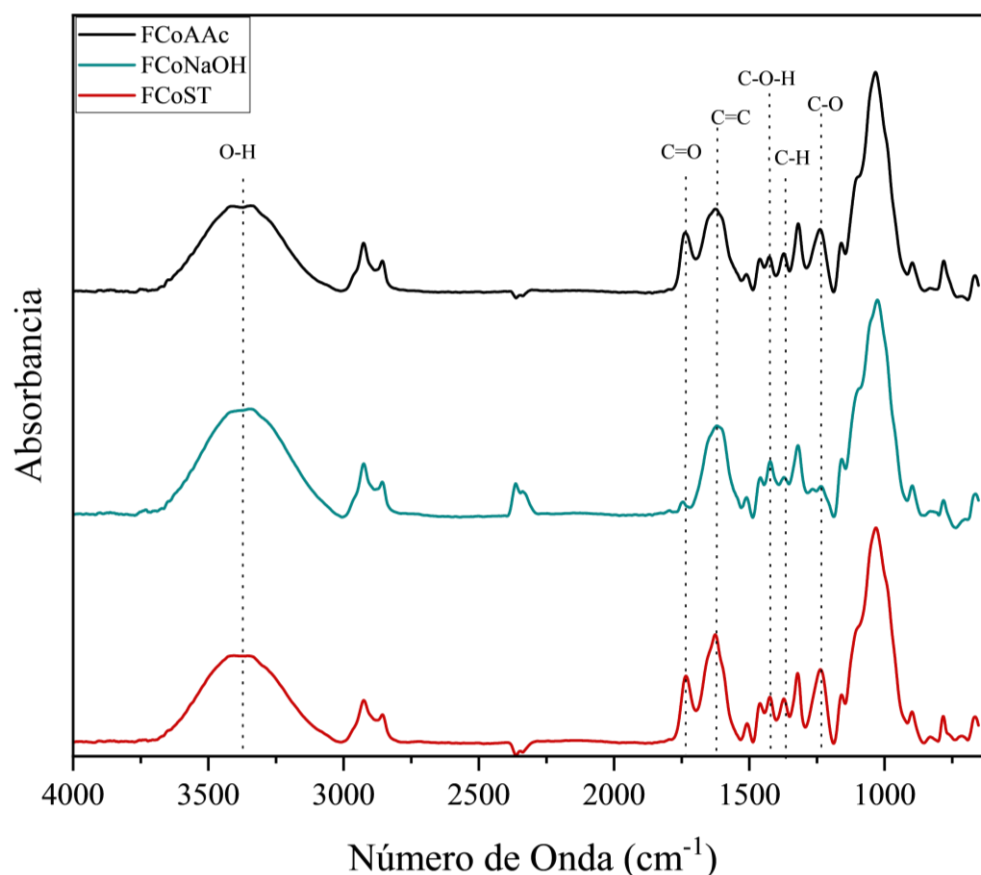


Figura 4.9. FTIR de fibras de agave cocidas con tratamiento superficial

En la Figura 4.9 se presentan los espectros FTIR de las fibras de agave con y sin tratamiento, donde es posible identificar variaciones en la intensidad de diversas bandas características, lo que evidencia modificaciones en su composición química superficial. En el intervalo comprendido entre 3000 y 3600 cm^{-1} se observan cambios en la intensidad de las bandas asociadas a los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) libres y enlazados, los cuales están principalmente relacionados con la celulosa y, en menor medida, con la hemicelulosa. Estas variaciones sugieren alteraciones en el contenido de grupos polares y en la red de enlaces por puente de hidrógeno como resultado del tratamiento aplicado (Kululo et al., 2026).

Asimismo, la banda localizada alrededor de 1740 cm^{-1} se atribuye a las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), característica de los grupos acetilo presentes en la hemicelulosa, cuya disminución o modificación en intensidad es indicativa de una remoción parcial de este componente. Por otra parte, las bandas observadas en 1630 y 1235 cm^{-1} se asocian a las vibraciones $\text{C}=\text{C}$ de los anillos aromáticos, correspondientes a la estructura de la lignina, lo que permite evaluar los cambios inducidos por el tratamiento sobre este componente amorfo. Finalmente, la banda situada alrededor de 1240 cm^{-1} , atribuida al estiramiento $\text{C}-\text{O}$ del grupo carbonilo, refuerza la presencia de hemicelulosa en las fibras y sugiere modificaciones en su superficie tras el tratamiento (Gowtham et al., 2025; Saraswat et al., 2023).

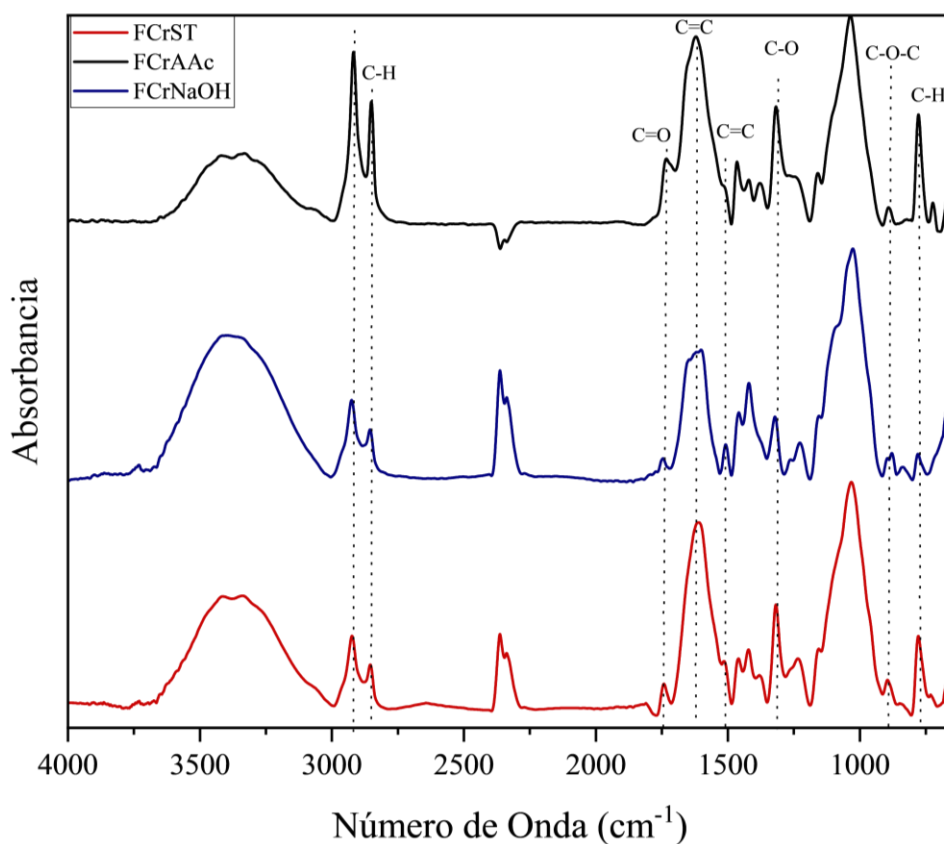


Figura 4.10. FTIR de fibras de agave crudas con tratamiento superficial

Los espectros FTIR correspondientes a las fibras crudas se muestran en la Figura 4.10, en ella se evidencia las variaciones significativas en la intensidad de diversas bandas características, lo que refleja la composición química superficial propia del material sin

tratamiento. En la región comprendida entre 600 y 800 cm^{-1} se identifican bandas asociadas a grupos hidroxilo disponibles, cuya presencia está relacionada con los constituyentes polisacáridos de la pared celular. Adicionalmente, las bandas localizadas en 2860 y 2920 cm^{-1} , atribuidas a las vibraciones de estiramiento C–H, se asocian a la presencia de ceras, lípidos y otros extractivos que recubren la superficie de la fibra (Ramakrishnan et al., 2023; Ronald Aseer et al., 2022).

Asimismo, la banda observada alrededor de 1320 cm^{-1} , relacionada con deformaciones C–O y C–H, es característica de la lignina, lo que confirma la elevada proporción de componentes amorfos presentes en las fibras sin tratamiento, lo anillos de glucosa se ven reflejados en las bandas de 890 y 770 cm^{-1} en los grupos metilo C–H, los grupos carbonilo C=O se presenta en las bandas de 1750 cm^{-1} , se usó la relación de absorbancias A_{1372}/A_{1505} para determinar el índice de pérdida de lignina PL en la estructura de la fibra. Esta relación indica un cambio en los enlaces glicosídicos, y la vibración de los enlaces C=C aromáticos representativos de la lignina, se evidenció que las fibras sin tratamiento obtuvieron un valor PL de 0,72, las fibras tratadas con NaOH y ácido acético un valor de 1,17 y 1,05 respectivamente, indicando una pérdida de lignina con el tratamiento alcalino. Estos resultados son consistentes con las observaciones realizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), donde las fibras crudas exhiben una superficie relativamente lisa y recubierta por una capa continua, atribuida a la presencia de ceras, lignina y otros materiales cementantes. La correlación entre los resultados FTIR y el análisis morfológico sugiere que estos componentes superficiales actúan como una barrera que limita la exposición de las microfibrillas de celulosa, influye negativamente en la adhesión fibra–matriz en materiales compuestos (Jardon-Maximino et al., 2023).

4.3 Caracterización mecánica de resina epóxica bisfenol A

Se evaluaron dos formulaciones de resina epóxica basada en bisfenol A curadas con un endurecedor de poliamina cicloalifática, empleando relaciones estequiométricas 2:1 y 1:1 (resina:endurecedor). Con el objetivo de incrementar la ductilidad del sistema, se aumentó la proporción del endurecedor en la mezcla 1:1, favoreciendo su función como agente plastificante y limitando la formación de una red de entrecruzamiento altamente rígida entre

los grupos epóxido. Para cada formulación se prepararon seis probetas, las cuales fueron sometidas a ensayos de tracción (K. Jin et al., 2020).

La Figura 4.11 presenta las curvas esfuerzo–deformación correspondiente a ambas mezclas de resina, los datos puntuales se unieron con líneas con el fin de obtener una tendencia. Los resultados evidencian que la formulación 1:1 exhibe un comportamiento marcadamente más dúctil, caracterizado por una región plástica más extensa y una mayor capacidad de deformación antes de la fractura. En contraste, la mezcla 2:1 presenta valores superiores de resistencia a la tracción y módulo elástico, lo cual se atribuye a un mayor grado de entrecruzamiento, resultando en una respuesta mecánica más rígida, una región plástica reducida y un comportamiento predominantemente elástico previo a la falla (Bayomi et al., 2024).

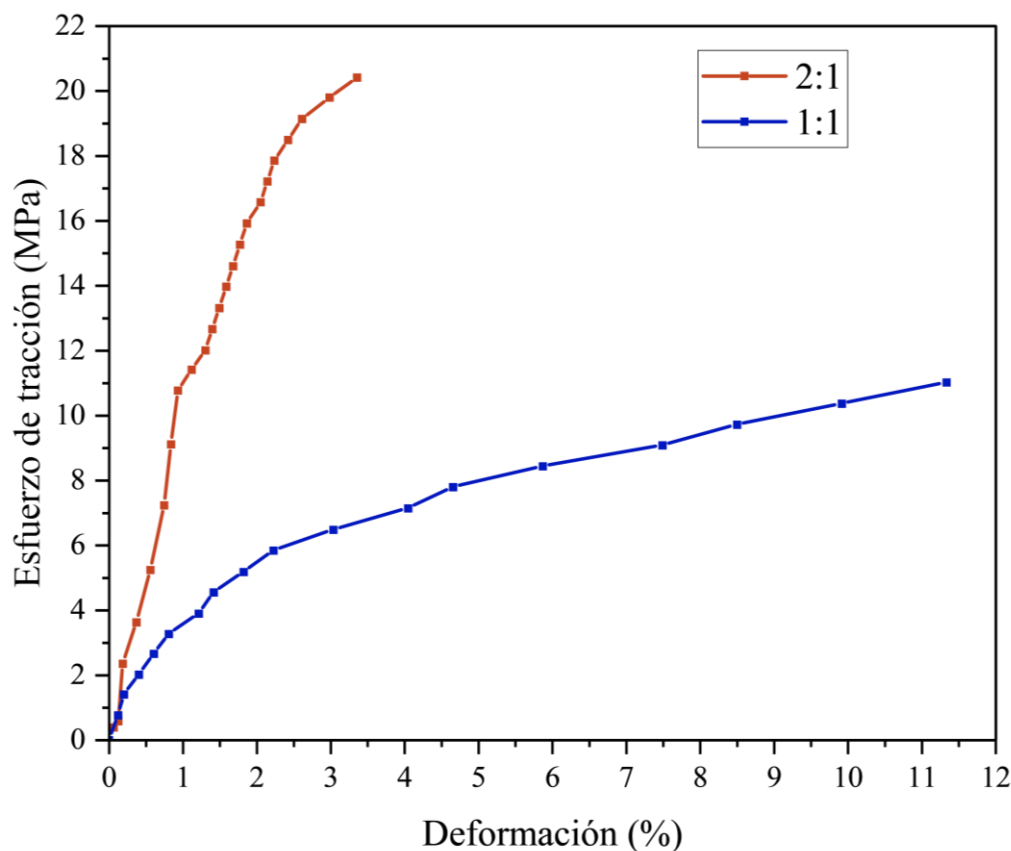


Figura 4.11. Curva esfuerzo-deformación resina epóxica

El análisis de la falla de los materiales constituye una herramienta fundamental para comprender su comportamiento dúctil o frágil. En la Figura 4.12 se muestran las superficies de fractura de algunas de las probetas ensayadas, donde se aprecia que la mezcla con relación

1:1 presenta una deformación extendida previa a la fractura, característica de un comportamiento dúctil. Por otra parte, la resina formulada en proporción 2:1 exhibe una fractura frágil, con evidencia de deformación plástica inferior al 4% en la zona de falla (H. Liu et al., 2023).

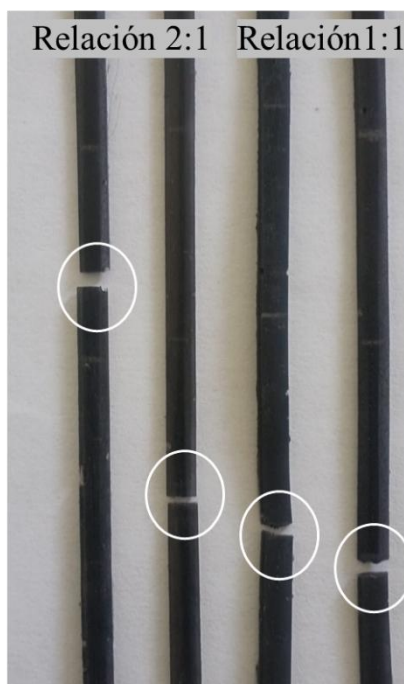


Figura 4.12. Fractura de mezcla de resina/endurecedor 2:1 y 1:1

La mezcla 2:1 presenta una resistencia a la tracción superior a 40% en comparación con la mezcla 1:1, la capacidad de deformación es aproximadamente 2 veces mayor a la mezcla 2:1, lo que implica una mayor tenacidad y ductilidad.

4.4 Caracterización de aditivos PrP y r-PO

4.4.1 FTIR de aditivos de microfibras PrP y r-PO

En la Figura 4.13 se evidencia una banda de alta intensidad localizada en 1556 cm^{-1} en la muestra r-PO, la cual se asocia al estiramiento del grupo $\text{C}=\text{O}$ y está directamente relacionada con el proceso de ciclización del poliacrilonitrilo (PAN) durante la etapa de estabilización. Asimismo, se identifica una banda característica en 2220 cm^{-1} , atribuida al estiramiento del grupo nitrilo ($\text{C}\equiv\text{N}$), típica de fibras estabilizadas u oxidadas, lo que confirma la presencia de estructuras químicas propias del PAN parcialmente transformado (Terra et al., 2021). Por

el contrario, las fibras de carbono PrP no presentan la banda en 2220 cm^{-1} , lo cual se atribuye a la carbonización ocurrida durante el tratamiento térmico, proceso que conduce a la eliminación de grupos funcionales nitrogenados y a la formación de una estructura carbonosa más estable. Adicionalmente, la banda observada alrededor de 1090 cm^{-1} se asocia al estiramiento C–O, resultado del tratamiento térmico, así como a la presencia de enlaces Si–O–Si, derivados del tratamiento por sol-gel, lo que sugiere la deposición de sílice sobre la superficie de la fibra (Ballout et al., 2022).

Finalmente, las bandas localizadas en 1340 y 1210 cm^{-1} se atribuyen a vibraciones C–N y C–O, respectivamente, las cuales están relacionadas con la ciclización del PAN, confirmando las transformaciones químicas inducidas por los tratamientos térmicos y superficiales aplicados.

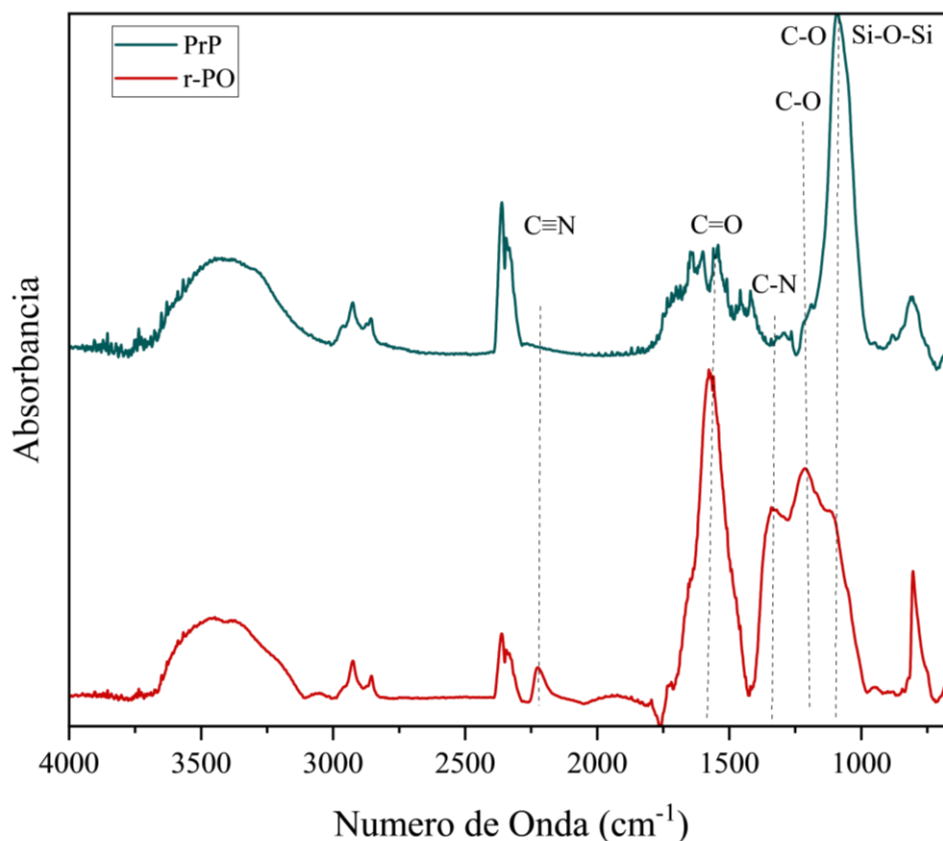


Figura 4.13. FTIR aditivos PrP y r-PO

4.4.2 Evaluación de aditivos como material de refuerzo de resina epóxica

Se fabricaron probetas de resina epóxica curada con endurecedor en una relación 2:1, incorporando un 0,5 % en peso de aditivo respecto a la resina, con el objetivo de evaluar el efecto de estos materiales sobre las propiedades mecánicas de la matriz polimérica. En la Figura 4.14 se presentan los valores promedio de resistencia a la tracción y capacidad de deformación correspondientes a las probetas reforzadas con PrP y r-PO.

Los resultados evidencian que los materiales reforzados con PrP presentan un desempeño superior frente al esfuerzo de tracción, alcanzando un incremento aproximado del 33 % en comparación con los sistemas reforzados con r-PO. No obstante, las probetas reforzadas con r-PO muestran una mayor dispersión de los resultados respecto al valor medio, lo cual sugiere una menor homogeneidad del sistema. Este comportamiento puede atribuirse a una distribución no uniforme del refuerzo dentro de la matriz epóxica, así como a la posible formación de aglomerados, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos y favorecen la iniciación y propagación de fallas durante el ensayo mecánico (Sanchez & Borwankar, 2010; S. Wang et al., 2024) .

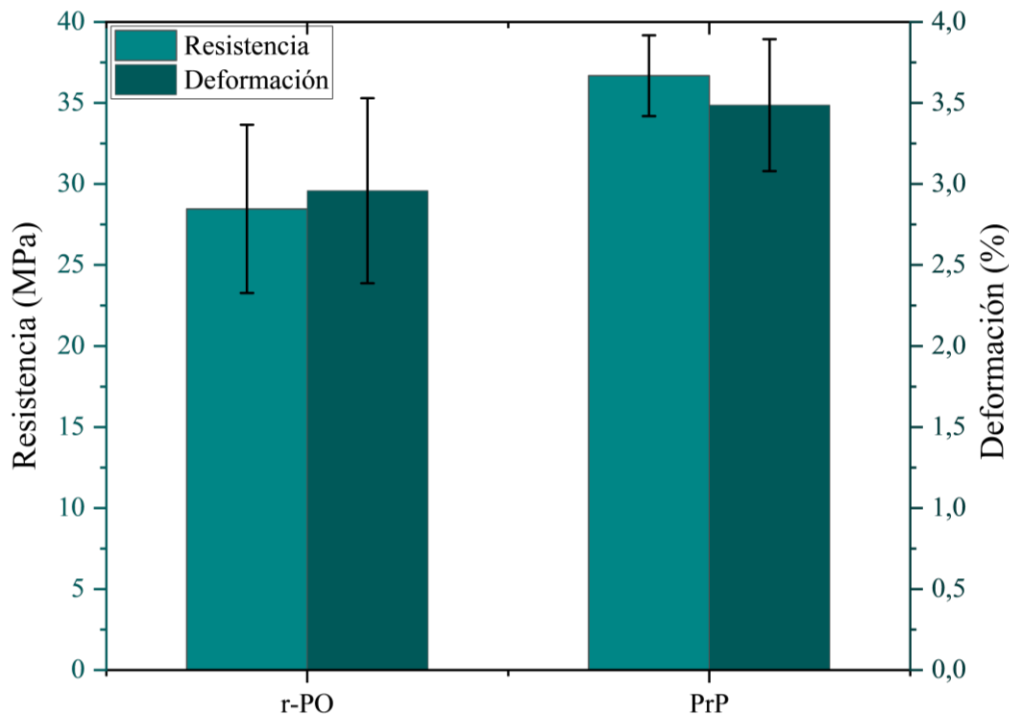


Figura 4.14. *Propiedades mecánicas de compuesto resina epóxica/aditivos PrP y r-PO*

4.4.3 Evaluación de morfología y tamaño de aditivos.

Se realizó microscopía electrónica de barrido (SEM) a los aditivos con el propósito de analizar su morfología y distribución de tamaños. Los diámetros característicos se determinaron mediante el software ImageJ, a partir de la medición de 80 microfibras para cada tipo de aditivo, lo que permitió obtener una distribución representativa. En la Figura 4.15 se presentan las micrografías correspondientes, donde se aprecia la morfología y dispersión dimensional de los aditivos analizados.

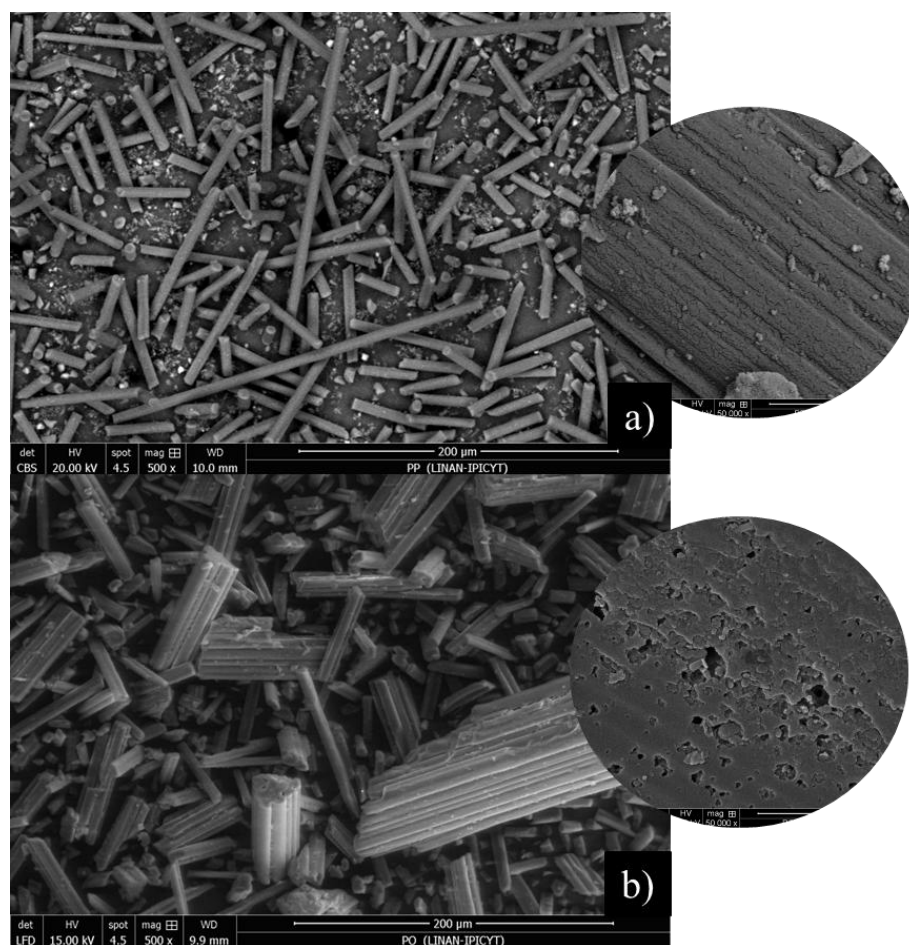


Figura 4.15. SEM aditivos a) PrP, b) r-PO

Las medidas de longitud y diámetro de cada microfibr correspondiente de cada aditivo se presentan en la Figura 4.16 donde se evidencia que las fibras PrP presentan diámetros promedio de 6,78 µm y una desviación de 0,77 µm, por otra parte las microfibras de los aditivos r-PO presentan diámetros mayores con un promedio de 10.24 y una desviación de 5.57, esta heterogeneidad podría causar una mala distribución o aglomeración al momento

de ser dispersado por en la resina, por otra parte la longitud de las microfibras de los aditivos r-PO y PrP se encuentra en un promedio de 47,3 y 53,7 μm respectivamente, con dispersión superior al 80% (Pei et al., 2023).

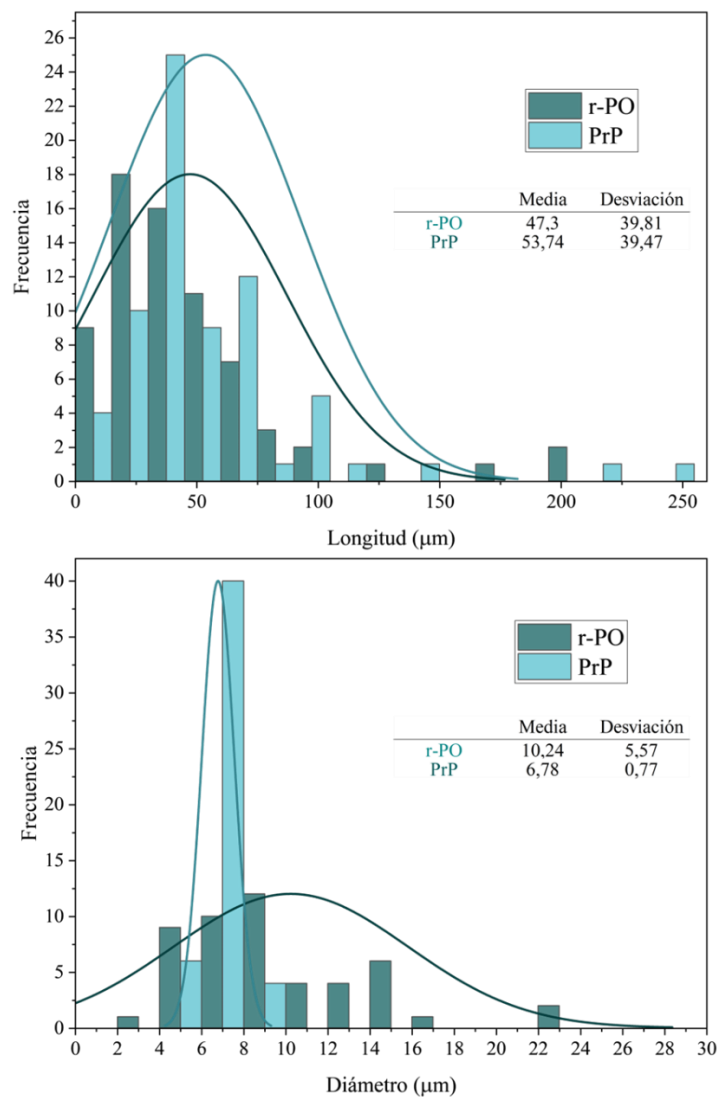


Figura 4.16. Distribución de medida de diámetro y longitud de microfibras de los aditivos

Se obtuvieron micrografías SEM de los cortes transversales de las microfibras correspondientes a los aditivos analizados. En la Figura 4.17 se observa que las microfibras r-PO presentan una morfología transversal de tipo arriñonada o en forma de frijol, característica de materiales obtenidos mediante procesos de hilatura en húmedo. Esta

geometría se asocia al mecanismo de coagulación durante la formación de la fibra, dando lugar a una estructura interna típica del poliacrilonitrilo (PAN).

Por otra parte, los cortes transversales de las microfibras PrP exhiben una morfología predominantemente circular, lo cual indica los procesos térmicos en la que estas fibras fueron producidas, la forma se debe a que ocurre una contracción isotrópica como resultado de la pérdida de masa a temperaturas superiores de 350°C. Estas diferencias morfológicas reflejan variaciones en los parámetros de procesamiento y son consistentes con las observaciones de uniformidad dimensional reportadas previamente (Y. Liu et al., 2024; Z. Xu et al., 2008).

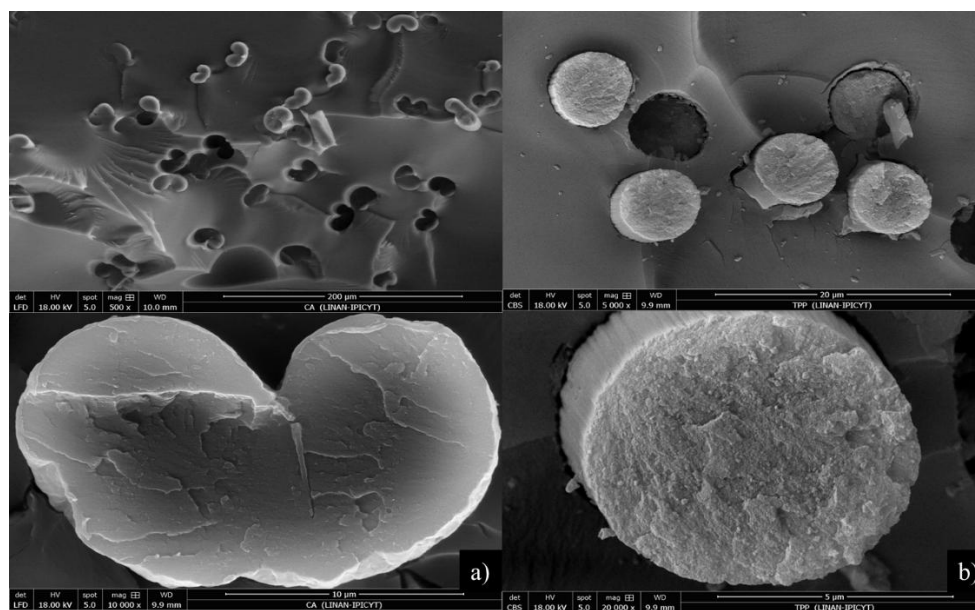


Figura 4.17. Cortes transversales microfibras de aditivos a) r-PO b) PrP

4.5 Evaluación del contenido de fibra corta de agave tequilana weber azul

Con el fin de determinar el límite de contenido de fibra corta de agave, se realizaron probetas con una mezcla de resina y catalizador en relación 2:1 y fibra corta cocida de agave, incrementando el porcentaje en peso de fibra. Se realizaron curvas de esfuerzo versus deformación de los compuestos fabricados para evaluar cómo cambia la resistencia a la tracción y la deformación a medida que se incrementa el porcentaje de fibra en el material. En la figura 4.18 se observa el incremento en la resistencia cada que aumenta el contenido de fibra, además se observa como disminuye la capacidad para deformar antes de la fractura, un comportamiento común en el refuerzo de matrices poliméricas, sin embargo, cuando se agrega un 14% fibra corta de agave las dos propiedades mecánicas se ven afectando lo cual

indica un límite de refuerzo en el que se crean tensiones internas que evitan el soporte de cargas entre las dos fases.

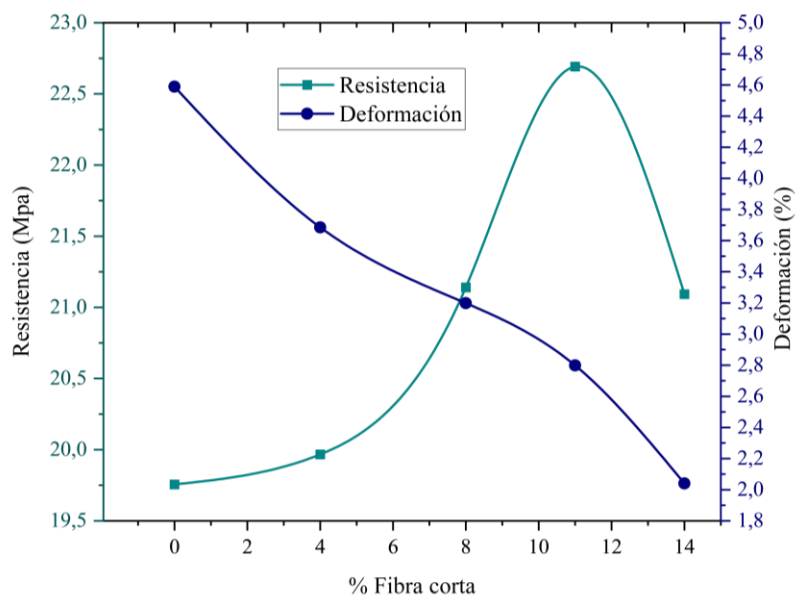


Figura 4.18. Influencia del contenido de fibra corta de agave en las propiedades mecánicas del material compuesto

En la Figura 4.19 se muestra el comportamiento mecánico con la adición en diferente composición de fibra de agave mediante curvas de esfuerzo deformación, se evidencia una notable disminución de la ductilidad a medida que se incrementa el porcentaje de fibra. De manera similar, se observa el incremento del módulo elástico con la adición de fibras de refuerzo. Es un comportamiento característico de materiales compuestos reforzados con fibras de diferentes morfologías y tamaños, distribuidas de manera aleatoria, la reducción de la capacidad de deformación de la matriz conlleva a un incremento de la rigidez global ya que no ofrece un refuerzo de manera unidireccional al esfuerzo de carga que se aplica durante el ensayo.

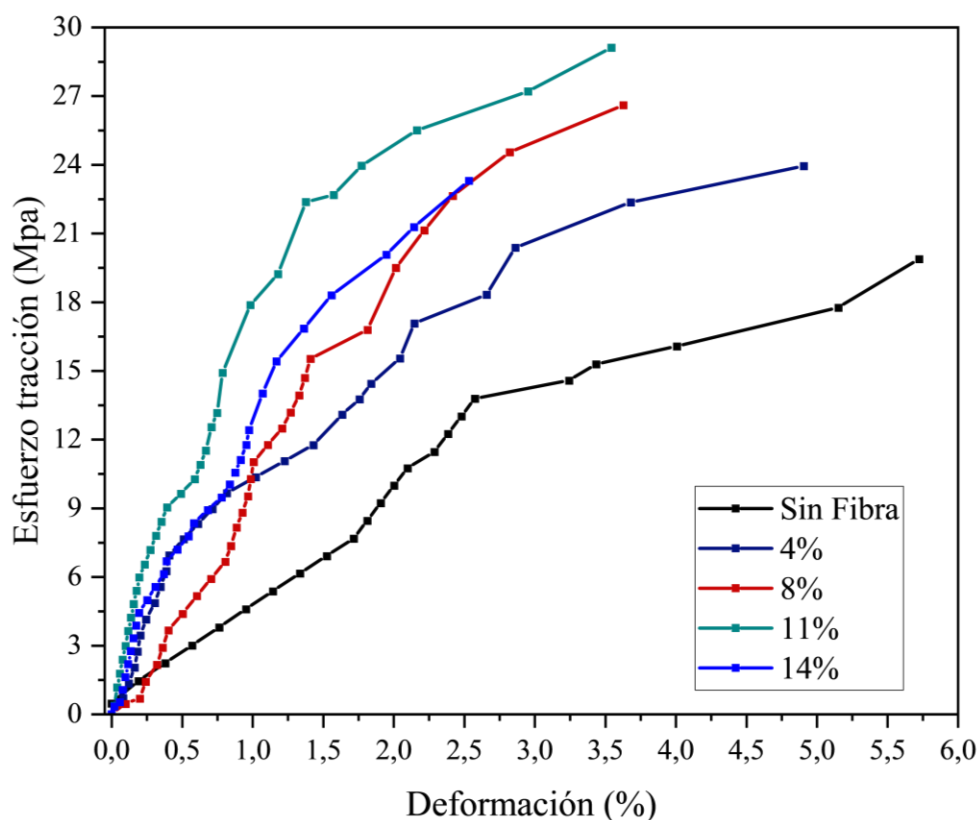


Figura 4.19. Curva esfuerzo vs deformación en función del contenido de fibra corta de agave

4.5 Resistencia al corte interfacial (IFSS) de las fibras OPAN y r-OPAN

Debido a la importancia que tiene la fuerza de adherencia o resistencia al corte interfacial en el comportamiento mecánico de un material compuesto, se evaluó esta propiedad con las fibras estabilizadas. Asimismo, se analizó el efecto del tratamiento superficial sobre la interacción con la matriz, para ello se realizó la técnica de fragmentación de un monofilamento en resina epóxica. Para cumplir con la plasticidad requerida para la prueba se elaboraron probetas en una relación resina endurecedor de 5:4, ya que al incrementar la proporción de endurecedor las aminas actúan como plastificante incrementando la capacidad de deformación superior al doble de la fibra, este valor se estipuló como resultado de diferentes pruebas, variando la proporción de resina y endurecedor para conseguir una deformación antes de la ruptura de 70%. se sometió las probetas a tracción hasta alcanzar una deformación superior al 50%, se mide los fragmentos en un microscopio óptico para determinar la longitud crítica (l_c) y posteriormente la IFSS (τ_s) mediante la Ecuación 4.4. para

ello se requiere los valores del diámetro (d) de la fibra a evaluar y la resistencia a la tracción (σ_f) de dicha fibra.

$$\tau_s = \frac{\sigma_f d}{2l_c} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

En la Figura 4.20 se observa como la fibra se fragmentó en trozos con diferentes longitudes, debido a la alta zona elástica que presenta la resina, posterior al ensayo esta se recupera y retrocede la deformación elástica aplicada, es por esta razón que los filamentos fragmentados se recogen y no es posible observar el espaciamiento entre ellos.

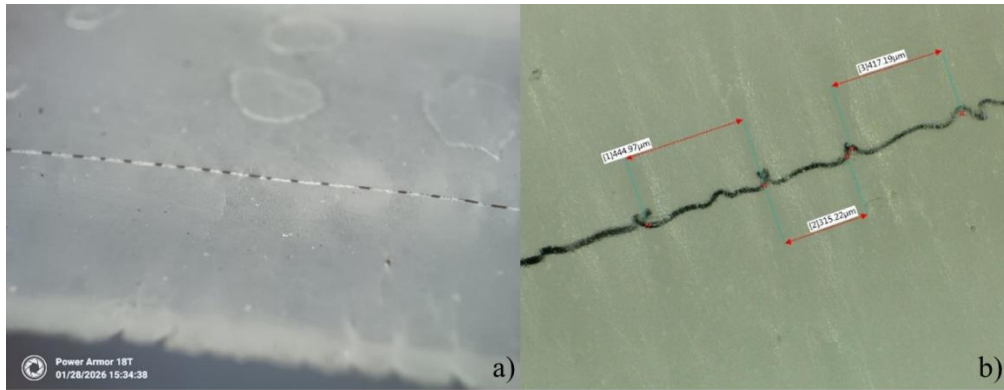


Figura 4.20. Fragmentación de monofilamento a) Durante la deformación. b) Mediciones de longitud después de la deformación elástica

Los valores de longitud crítica promedio de fragmentación obtenidos a partir del ensayo se presentan en la Tabla 4.4. Un mejor anclaje interfacial entre la fibra y la matriz se demuestra en una reducción en la longitud de los fragmentos de la fibra durante el ensayo de tracción del monofilamento, ya que la fibra tendrá una menor tendencia al deslizamiento conforme a la deformación de la matriz. Los resultados obtenidos mediante este ensayo evidencian que el tratamiento con ácido nítrico promueve un incremento de la rugosidad superficial, lo que traduce un aumento del área de contacto efectiva con la matriz de resina epóxica. Como consecuencia, la fibra tratada muestra un mayor esfuerzo cortante interfacial, reflejando una mayor transferencia de carga entre la fibra y la matriz. No obstante, se observa que a pesar de esta mejora interfacial, el IFSS se encuentra relativamente bajo en comparación con los reportados en la literatura, ver Tabla 4.5, Esto se debe a la pérdida de resistencia a la tracción de los filamentos posterior al tratamiento químico, presentado en la

Figura 4.1, además de la inferior resistencia en tracción de la fibras estabilizadas en comparación con fibras de carbono, comúnmente usadas para materiales compuestos de alto rendimiento (Q. Wu et al., 2020).

Tabla 4.4. Resistencia al corte interfacial IFSS de fibras estabilizadas con tratamiento superficial

Fibra	Diámetro (μm)	σ_f (Mpa)	Longitud crítica (μm)	IFSS τ_s (MPa)
r-OPAN-ST	21,3	121,18	1149,06	1,128
r-OPAN-HNO ₃	17,6	35,51	115,75	2,708
r-OPAN-SiO ₂	22,0	110,96	1535,12	0,80
OPAN-ST	15,7	176,11	131,1	10,52
OPAN-HNO ₃	16,0	60,11	94,8	5,07
OPAN-SiO ₂	17,7	162,52	810,07	1,77

Tabla 4.5 Valores de IFSS reportados en la literatura

Matriz	Refuerzo	Tratamiento	IFSS τ_s (MPa)	Referencia
Resina epóxica	Fibra de carbono	Recubrimiento con Dapsona	77,8-96,9	(Q. Wu et al., 2020)
Resina epóxica	Fibra de carbono	Oxidativo con H ₂ O ₂ + Nanotubos de carbono	66,2-75,1	(Qin et al., 2020)
PEEK	Fibra de carbono	Tratamiento químico con ácido	54,0-92,0	(Umemura et al., 2025)

En la Tabla 4.4 es posible evidenciar que el tratamiento con sol-gel SiO₂ no es favorable para la interfaz con la resina epóxica, por el contrario el tratamiento con HNO₃ presenta una adherencia más fuerte, sin embargo dicho tratamiento deteriora las propiedades mecánicas de las fibras y a pesar de disminuir la longitud crítica, su resistencia individual es relativamente baja en comparación con las fibras sin tratamiento, por esta razón la fibra con mayor IFSS es la OPAN sin tratamiento, dado a su longitud crítica y mejor resistencia

individual, por otra parte las fibras r-OPAN-HNO₃ presentaron un incremento de IFSS de 140% con respecto a las fibras sin tratamiento y la fibra OPAN-HNO₃ redujo un 51,8 % el valor de IFSS con respecto a la fibra sin tratar. Las fibras OPAN-SiO₂ y r-OPAN-SiO₂ presentaron un bajo desempeño en la IFSS reduciendo en un 83,1 y 29,1% respectivamente en comparación a las fibras sin tratar, esto se debe a la superior resistencia a la tracción de la fibra individual estabilizada OPAN, aunque el tratamiento con ácido disminuye la longitud critica, la cual indica un mejor de anclaje con la matriz, la fuerza de adherencia no es significativa debido a la baja resistencia a la tracción de la fibra, dicho valor (σ_f) representa el límite de carga que puede soportar la fibra antes de la fractura, al tener un bajo σ_f , la fibra se fractura antes de aprovechar la buena adherencia que ha ganado tras el tratamiento con H₂NO₃ (Bourdeau et al., 2024).

4.6 Diseño de experimentos Taguchi L8 de fibras estabilizadas

Se desarrolló un diseño de experimentos de arreglo ortogonal tipo Taguchi L8, en donde los factores seleccionados se definieron con base a los materiales constituyentes de cada fase y las variables del proceso de fabricación de los materiales compuestos de cada experimento. A cada factor se propuso dos niveles, teniendo en cuenta la relación resina:endurecedor, el tipo de fibra (OPAN y r-OPAN), el tipo de aditivo (PrP y r-PO), la concentración del aditivo, el tratamiento aplicado a las fibras estabilizadas, y el tiempo de dispersión de los aditivos en la matriz de resina epóxica.

Como variables de respuesta del diseño se seleccionaron la resistencia a la tracción y la capacidad de deformación del material compuesto, ya que dichas variables permiten evaluar el desempeño mecánico del sistema. La Tabla 4.6 se presenta el resumen de los factores y niveles considerados en el diseño experimental, así como los valores obtenidos para las variables de respuesta correspondientes a cada experimento.

Tabla 4.6 *Diseño de experimentos para fibras estabilizadas*

<i>Exp.</i>	<i>Relación R/E</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>% aditivo</i>	<i>Tratamiento superficial</i>	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>Deformación (%)</i>
1	1:1	r-PO	2	OPAN	1,00	HNO ₃	7,24	9,31

2	1:1	r-PO	2	r-OPAN	0,25	SiO ₂	1,05	14,17
3	1:1	PrP	5	OPAN	1,00	SiO ₂	5,08	17,5
4	1:1	PrP	5	r-OPAN	0,25	HNO ₃	2,53	12,31
5	2:1	r-PO	5	OPAN	0,25	HNO ₃	17,50	5,1
6	2:1	r-PO	5	r-OPAN	1,00	SiO ₂	12,48	8,02
7	2:1	PrP	2	OPAN	0,25	SiO ₂	13,04	6,64
8	2:1	PrP	2	r-OPAN	1,00	HNO ₃	20,37	4,72

En la Tabla 4.6 se muestra los experimentos realizados y las variables de respuesta porcentaje de deformación y resistencia a la tracción para cada experimento, en esta se observa una diferencia significativa entre los experimentos realizados con relaciones resina y endurecedor de 1:1 y 2:1.

Se realizó el análisis de varianza ANOVA con el fin de encontrar los valores de F de Fisher o razón F que relacionan la varianza de cada factor con la varianza del error; los valores inferiores a 2 indican que el error es superior al factor evaluado, por lo tanto, ese factor no es significativo con la propiedad a analizar (Ramabulana et al., 2019). En la Tabla 4.7, se muestra que los factores más significativos son la relación resina-catalizador y el tratamiento superficial realizado a la fibra, ambos factores afectan la resistencia a la tracción del material, es evidente que los compuestos preparados con una relación de resina-catalizador de 1:1 presentan una menor resistencia a la tracción en comparación con aquellos preparados en relación 2:1, esto se debe principalmente al exceso del grupo amina durante el entrecruzamiento lo que disminuye la fuerza de este enlace actuando como plastificante y otorgándole más ductilidad a sacrificio de resistencia mecánica, como se muestra en la Figura 4.11. El tratamiento con ácido nítrico por su parte incrementó la variable de respuesta dado al aumento de rugosidad y funcionalización con grupos oxigenados que le otorgan una mayor impregnación con la resina epóxica, como se muestra en la sección 4.2 en la que se indica los grupos funcionales presentes después del tratamiento con ácido nítrico. Por otro lado, los demás factores no fueron significativos para esta propiedad (Mustapha et al., 2021).

En la Tabla 4.8 se registran los valores de F para la variable de deformación, indicando un resultado similar con preferencia al nivel opuesto de la variable de resistencia a la tracción, los compuestos fabricados con una relación resina y catalizador 1:1 presentan un

comportamiento más dúctil debido a un débil entrecruzamiento de los grupos epoxi, producto del exceso de aminas al momento de la polimerización, lo que se demuestra en una mayor capacidad dúctil (ver sección 4.3). Además, las fibras tratadas con SiO_2 no presentan una favorable interacción con la matriz, lo que favorece el desplazamiento entre fases, por lo tanto, una mayor deformación. El tiempo de dispersión en el ultrasonido, fomenta una mejor distribución de los aditivos con la matriz, con el fin de evitar aglomeración que puedan concentrar esfuerzos y provocar una falla prematura, este es un factor significativo en la capacidad de deformación, con un valor de F de 2,37 favoreciendo al nivel más alto que incrementa la ductilidad del compuesto. El tratamiento de sol-gel por su parte favorece la capacidad de deformación la causar un anclaje débil entre las fases, de esta forma no permite una correcta transferencia de carga lo que se traduce en una libertad en elongación de la matriz al momento de ser afectada por el esfuerzo de tensión, estos resultados concuerdan con los resultados de la resistencia al corte interfacial IFSS en la que dicho tratamiento presenta el menor valor del esfuerzo cortante superficial τ_s .

Tabla 4.7. *Análisis de varianza ANOVA para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras estabilizadas*

<i>Factor</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de Libertad (GL)</i>	<i>Varianza (V)</i>	<i>F</i>
R:C	282,1036	1	282,10	29,78
Aditivo	0,9461	1	0,95	0,10
Tiempo	2,1055	1	2,11	0,22
Fibra	5,1616	1	5,16	0,54
% Aditivo	15,2885	1	15,29	1,61
Tratamiento	31,9918	1	31,99	3,38
Error	9,4735	1	9,47	-
Total	356,54	7		

Tabla 4.8. *Análisis de varianza ANOVA para la deformación del material compuesto con fibras estabilizadas*

<i>Factor</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de Libertad (GL)</i>	<i>Varianza (V)</i>	<i>F</i>
R:C	0,0104	1	0,0104	29,52
Aditivo	0,0003	1	0,0003	0,76
Tiempo	0,0008	1	0,0008	2,37
Fibra	0,0000	1	0,0000	0,01
% Aditivo	0,0000	1	0,0000	0,07
Tratamiento	0,0028	1	0,0028	7,91
Error	0,0004	1	0,0004	-
Total	0,0151	7		

Por otro lado, el tratamiento superficial aplicado a las fibras estabilizadas muestra un efecto visualmente distinguible. El tratamiento con ácido nítrico (HNO_3) obtiene un incremento en la resistencia a la tracción, lo cual puede atribuirse a una mejora en la adhesión con la matriz, asociada al aumento de rugosidad y a la incorporación de grupos funcionales polares oxidados en su superficie. En cambio, el tratamiento mediante impregnación de sol-gel de dióxido de silicio favorece en la capacidad de deformación, lo que nos indica una adherencia menor relacionado con la formación de una capa cerámica que no produjo una adherencia adecuada con la superficie de la fibra, por lo tanto esta actúa de manera deslizante con la matriz, permitiendo una menor transferencia de carga entre las fases (That et al., 1996; Zheng et al., 2019)

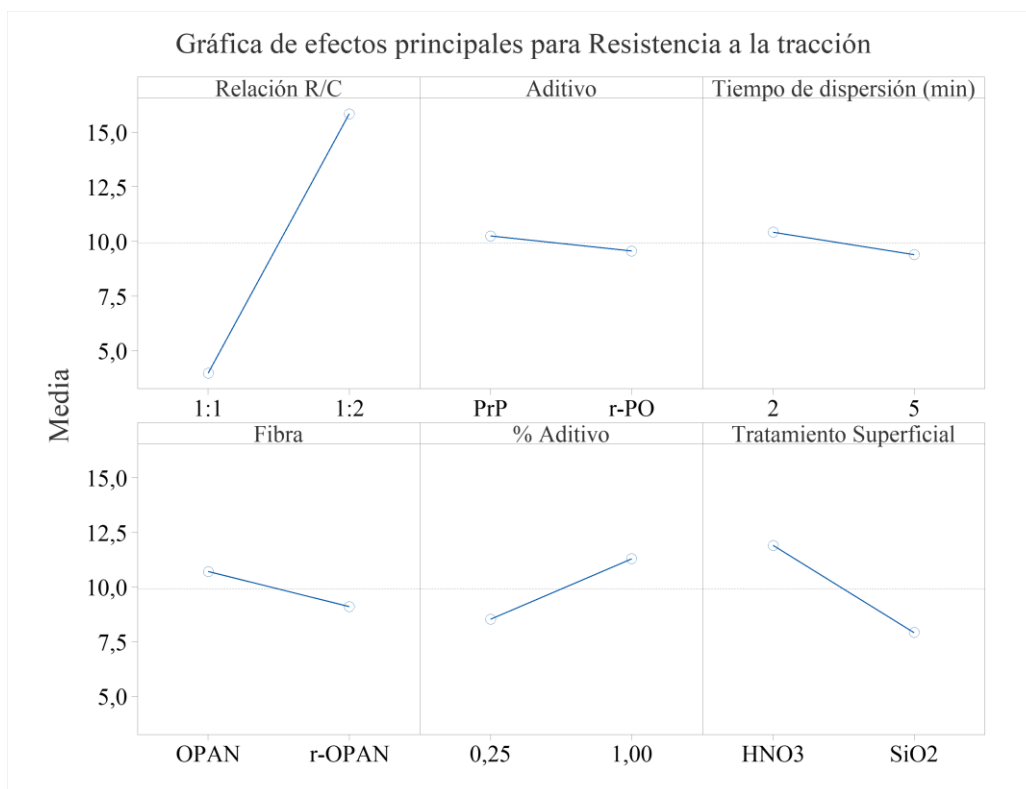


Figura 4.21. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción del diseño de experimentos con fibras estabilizadas

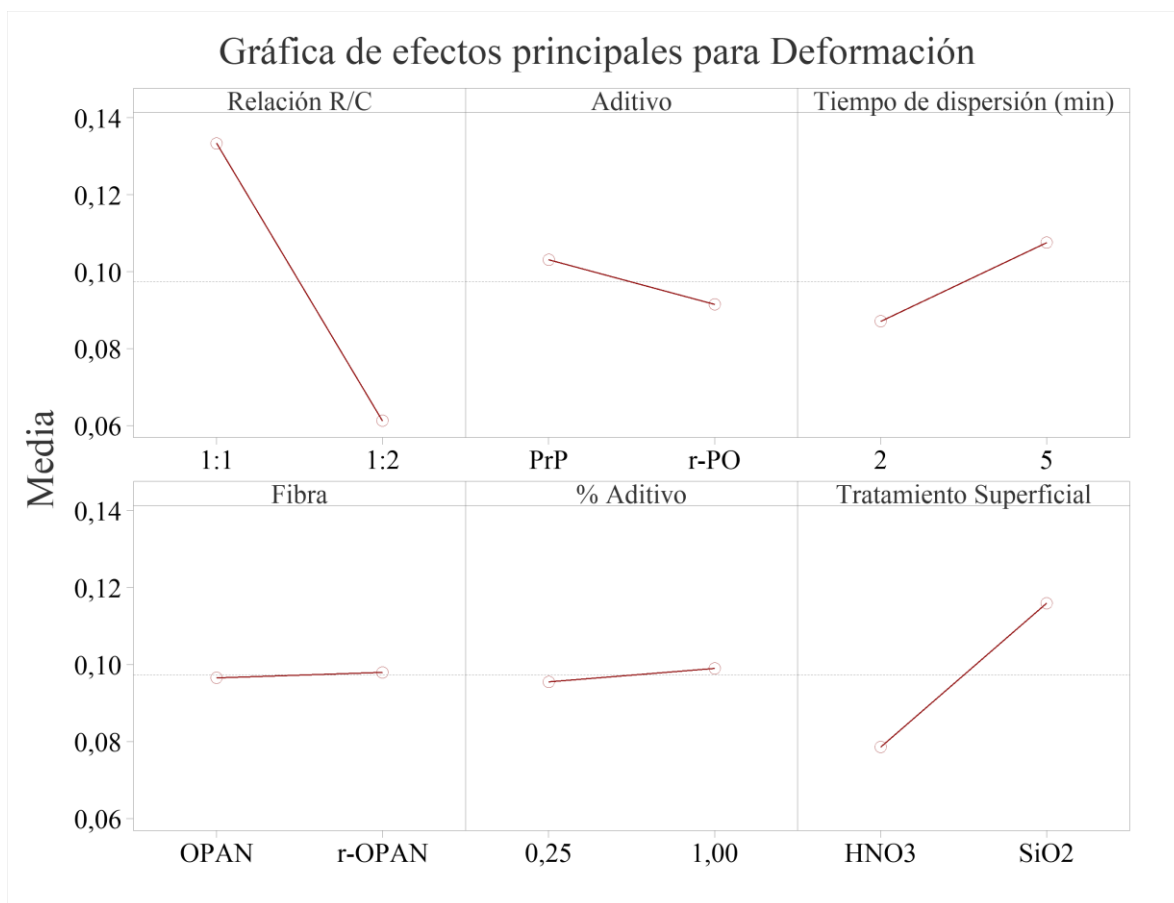


Figura 4.22 Gráfica de efectos principales para resistencia a la deformación del diseño de experimentos con fibras estabilizadas

El tratamiento con ácido nítrico, resulta ser un factor claramente influyente. Este comportamiento va relacionado con los resultados obtenidos mediante microscopía SEM donde las fibras tratadas evidencian un incremento en la rugosidad superficial, lo que incrementa el área de contacto con la matriz, y por lo tanto un mayor anclaje. Los análisis FTIR evidencian cambios en los grupos funcionales de la superficie de la fibra tras el tratamiento ácido, ligadas a la incorporación de grupos funcionales oxigenados, los cuales aumenta la humectabilidad de la fibra y por lo tanto la afinidad fibra-matriz (Mei et al., 2022).

Los resultados del ensayo de fragmentación de filamento reafirman la mejora en el IFSS de las fibras tratadas con HNO₃, estas presentan longitudes promedio inferiores, lo que indica un mayor esfuerzo cortante el cual disminuye el deslizamiento de la fibra y una mejor transferencia, dicho tratamiento confirma que es más relevante y efectivo para mejorar la

interfaz y el desempeño del material, lo que se ve representado en los resultados del diseño de experimentos.

Se realizó un análisis de las fracturas de los materiales compuestos mediante SEM, con el fin de observar morfologías y características de las fallas, en la Figura 4.23 a) y 4.23 d) se muestra como las fibras r-OPAN se acumularon en la zona centro de la falla donde ocurre la deformación del material, se observa el desprendimiento de las fibras tratadas con sol-gel de SiO_2 y una zona de interfaz relativamente amplia con la matriz de resina epóxica en relación 1:1. En la Figura 4.23 b) y Figura 4.23 e), se evidencia una fractura frágil en la que las fibras OPAN tratadas con HNO_3 son cortadas a medida que se propaga la falla, no se observa desplazamiento de dichas fibras, mejorando la superficie de anclaje de la fibra debido a la deposición de grupos funcionales oxidados y al aumento de rugosidad apreciable, esto conlleva a una interfaz fuerte y estable. Por otra parte, la figura 4.23 c) y Figura 4.23 f), muestran un crecimiento de la fractura frágil desde el lado superior izquierdo de la probeta, además es posible identificar los cortes de las fibras r-OPAN tratada con HNO_3 , sin evidenciar desplazamiento, se observa la interacción del aditivo PrP en la zona de fractura indicando una contribución retardando la propagación de la fractura, el experimento 8 es aquel con mejores resultados en resistencia a la tracción, ya que fue preparado con el nivel más contribuyente de cada factor.

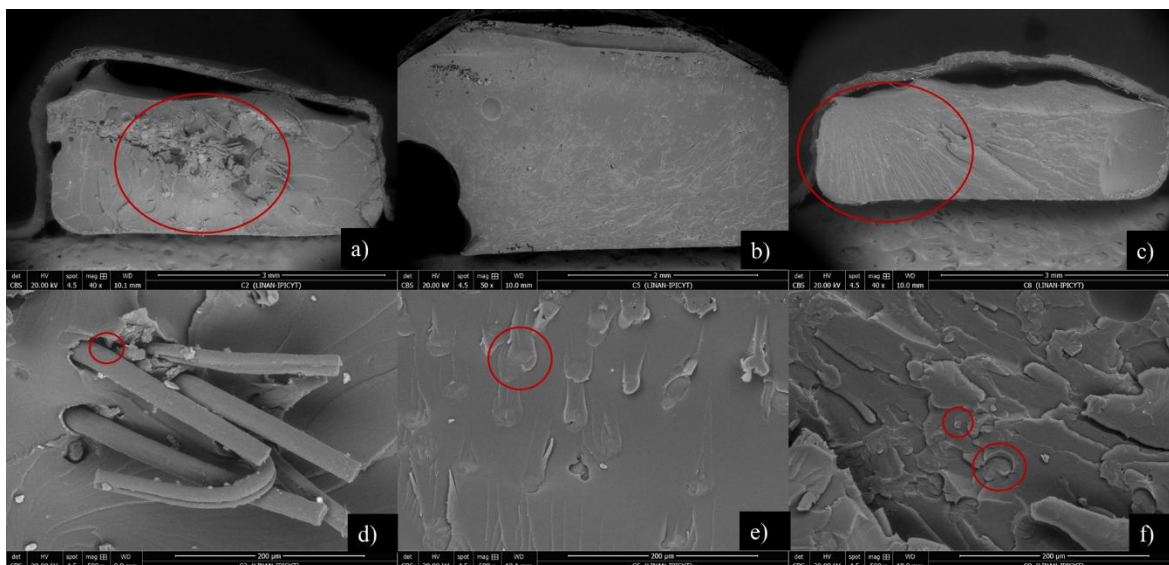


Figura 4.23. Micrografías SEM de la superficie de fracturas de materiales compuestos con fibras estabilizadas, a) Experimento 2 40X, b) Experimento 5 40X, c) Experimento 8 40X, d) Experimento 2 500X, e) Experimento 5 500X, f) Experimento 8 500X

4.7 Diseño de experimentos Taguchi L8 de fibras de agave tequilana weber azul

Se elaboró un diseño de experimentos similar al realizado a las fibras estabilizadas, cambiando el tratamiento, con el fin de determinar los efectos principales que repercuten en las variables de respuesta (ver Tabla 3.2).

Se realizó el análisis de varianza para las variables de respuesta, en este se determinó el valor de F, con la Tabla 4.9 se concluye que los factores más relevantes son la relación de resina, el tipo de fibra y el porcentaje de aditivo, aquellos compuestos con una relación 2:1 presentan una mayor resistencia a la tracción, las fibras cocidas tienen una resistencia superior a las fibras crudas, por otra parte aumentar la concentración de aditivo, favorece la resistencia, ya que rigidiza la matriz de resina epóxica. Debido a que el diseño experimental presentado solo tiene un grado de libertad como error y los valores de F calculados son elevados, se procede a realizar el procedimiento de pooling, con el fin de obtener una estimación más confiable, para ello se agrupó como error, los factores con una contribución porcentual menor, dichos factores fueron el tipo de aditivo, el tiempo de dispersión y el tratamiento. El tratamiento de la fibra es un factor no relevante, a pesar que los resultados del FTIR indican una mayor limpieza de las fibras tratadas con NaOH en comparación con aquellas sin tratamiento, esto puede deberse que la adhesión entre la fibra y la matriz no es la suficiente para tener una buena cohesión aun después de los tratamientos, además existen

otros factores que no fueron considerados, como la orientación de las fibras cortas dispersas en la matriz este factor puede cambiar la resistencia a la tracción ya que es un esfuerzo que se realiza en una sola dirección, por esta razón el valor del factor del error debe ser mayor para diferenciar de aquellos factores que sin son realmente contribuyentes.

Respecto al tratamiento superficial, el análisis de varianza indica que esta variable no es significativa en la capacidad de deformación del material y en la resistencia a la tracción, ya que ambos tratamientos incrementan las resistencia de la fibra con valores similares, algo comparable con estudios reportados en la literatura (Sukmawan et al., 2024). El tratamiento ácido favorece una mejor compatibilidad interfacial, haciendo que la transferencia de esfuerzos sea más efectiva, en cambio el tratamiento alcalino puede realizar modificaciones superficiales que mejoran la ductilidad del sistema favoreciendo el deslizamiento entre las fases. Sin embargo, no existe una diferencia estadística en el nivel de este factor, ambos tratamientos otorgan un incremento equivalente en la resistencia mecánica de los materiales compuestos, el NaOH limpia la superficie y reduce la lignina con el fin de mejorar la interacción con la matriz, por otra parte el ácido acético le proporciona hidrofobicidad, fomentando grietas en la superficie para que esta interactúe mejor con la matriz, es un tratamiento usado en fibras de origen natural (Arunachalam et al., 2024; Mundhe & Kandasubramanian, 2024).

En la Tabla 4.10, se puede identificar que el comportamiento de la deformación solo depende principalmente de la relación entre resina y catalizador, otorgándole un comportamiento dúctil al material compuesto.

Tabla 4.9 *Análisis de varianza ANOVA para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras de agave*

<i>Factor</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de Libertad (GL)</i>	<i>Varianza (V)</i>	<i>F</i>
R:C	903,7357	1	903,736	156.255,62
Aditivo	0,2243	1	0,224	38,79
Tiempo	0,2268	1	0,227	39,21
Fibra	2,8050	1	2,805	484,98
% Aditivo	3,2630	1	3,263	564,17
Tratamiento	0,0106	1	0,011	1,83

Error	0,0058	1	0,006	-
Total	910,28	7		

Tabla 4.10. *Análisis de varianza ANOVA para la deformación del material compuesto con fibras de agave*

<i>Factor</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de Libertad (GL)</i>	<i>Varianza (V)</i>	<i>F</i>
R:C	0,2947	1	0,295	61,60
Aditivo	0,0031	1	0,003	0,66
Tiempo	0,0038	1	0,004	0,80
Fibra	0,0025	1	0,003	0,53
% Aditivo	0,0038	1	0,004	0,80
Tratamiento	0,0037	1	0,004	0,78
Error	0,0048	1	0,005	-
Total	0,32	7		

En la Tabla 4.11 se observa tras el pooling los valores de F calculados tomando en cuenta la asignación de 4 grados de libertad para el error, se observa que los valores de F son inferiores a los de la Tabla 4.8, esto se debe a al incremento del cuadrado del error, este ajuste nos proporciona una mejor estimación de la varianza reduciendo el riesgo de falsos positivos.

Tabla 4.11. *Análisis de varianza ANOVA con pooling para la resistencia a la tracción del material compuesto con fibras de agave*

<i>Factor</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de Libertad (GL)</i>	<i>Varianza (V)</i>	<i>F</i>
R:C	903,7357	1	903,736	7.732,81
Fibra	2,8050	1	2,805	24,00
% Aditivo	3,2630	1	3,263	27,92
Error	0,4675	4	0,12	-
Total	911,20	7		

Tabla 4.12. *Diseño de experimentos para fibras de bagazo de agave*

<i>Exp.</i>	<i>Relación R/E</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>% aditivo</i>	<i>Tratamiento superficial</i>	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>Deformación</i>
1	1:1	r-PO	2	Cruda	1,00	NaOH	0,91	45,8%
2	1:1	r-PO	2	Cocida	0,25	A. acético	0,80	44,5%
3	1:1	PrP	5	Cruda	1,00	NaOH	0,89	28,3%
4	1:1	PrP	5	Cocida	0,25	A. acético	0,82	45,4%
5	2:1	r-PO	5	Cruda	0,25	A. acético	20,61	2,5%
6	2:1	r-PO	5	Cocida	1,00	NaOH	22,94	2,3%
7	2:1	PrP	2	Cruda	0,25	NaOH	21,15	3,5%
8	2:1	PrP	2	Cocida	1,00	A. acético	23,74	2,1%

Los resultados del segundo diseño de experimentos tipo Taguchi L8 se muestran en la Tabla 4.12, estos confirman que la relación resina/endurecedor (R/E) es el factor que más influye en las propiedades mecánicas de los experimentos. Aquellos con relación 1:1 indican valores de resistencia a la tracción inferiores a 1 MPa y una deformación hasta de 46%, este comportamiento indica una matriz significativamente más dúctil en relación con aquellos compuestos con una relación 2:1, Estos se da por el grado de reticulación lo que interfiere en la estabilidad mecánica y térmica de la matriz. Por el contrario, los experimentos con una relación de resina de 2:1, presentan mayor rigidez en su estructura polimérica lo cual impide el paso libre de esfuerzos, lo que se traduce en una menor capacidad de deformación con un máximo de 3,5%.

Al analizar los factores tipo de aditivo PrP y r-PO y a las fibras cruda y cocida incorporadas en una matriz de resina con relación R/E = 2:1, se observa que no presentan influencia sobre la capacidad de deformación, lo cual indica que, bajo condiciones adecuadas de curado, los aditivos aportan un refuerzo mecánico similar. Las fibras de agave cocidas generan una marcada diferencia en la resistencia final, lo que indica que el desempeño

mecánico del compuesto está dominado por la matriz epóxica y la fibra de refuerzo más el aditivo de anclaje utilizado.

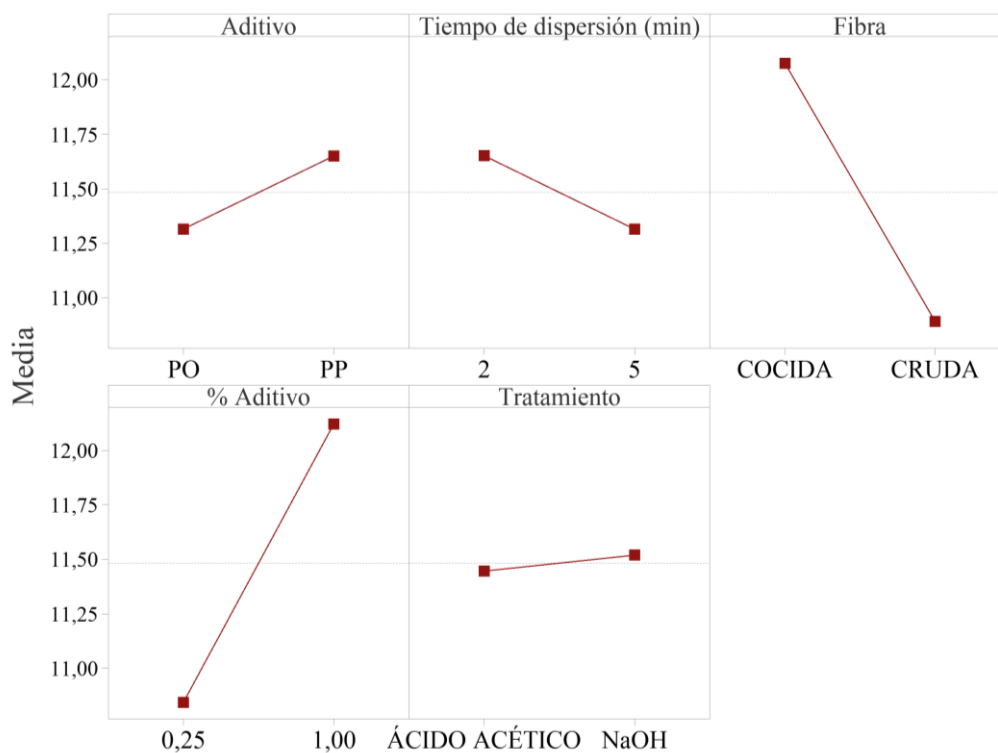


Figura 4.24 Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción del diseño de experimentos con fibras de agave

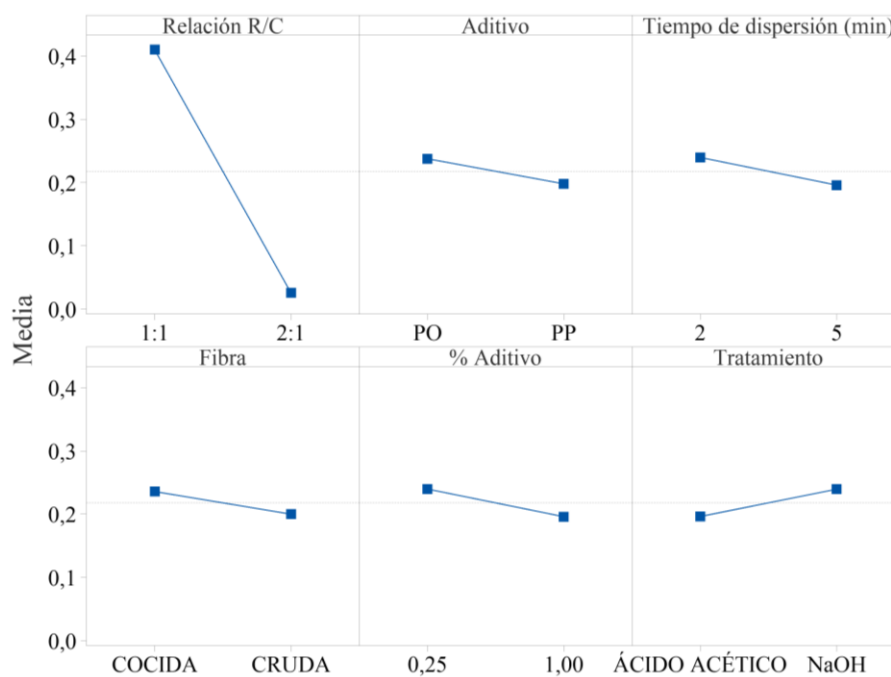


Figura 4.25 *Gráfica de efectos principales para resistencia a la deformación del diseño de experimentos con fibras de agave*

En la Figura 4.24 se presentan las gráficas de efectos principales para la resistencia a la tracción. Los resultados indican que el uso de fibra cocida ejerce un efecto positivo sobre la resistencia a la tracción, lo que sugiere un mejor desempeño de esta fase como elemento de refuerzo dentro del material compuesto, en concordancia con su resistencia intrínseca como fase individual. Si bien los análisis fisicoquímicos y mecánicos favorecen el tratamiento superficial con NaOH, este factor no se identifica como una variable principal que afecte de manera significativa la resistencia a la tracción dentro del diseño experimental. Asimismo, la incorporación de aditivos conduce a un incremento considerable de la resistencia mecánica, aunque a expensas de una ligera reducción en la deformación.

Por otra parte, en la Figura 4.25 se muestran las gráficas de efectos principales para la deformación, donde se observa que el único factor determinante para esta propiedad es la relación de resina, 5 factores restantes presentan un valor de F inferior a 2, lo que indica que no aportan a esta propiedad. Se analizó la morfología de fractura de los experimentos con altas y bajas propiedades mecánicas, en la Figura 4.26 a), se observa como interactúa la fibra cocida con la matriz de resina en relación 1:1, se observa en la micrografía Figura 4.26 d) que esta presenta una buena adherencia aparente con la resina, además se distingue la deformación que le otorga la fibra cuando esta pretende desplazarse para soportar la carga durante el ensayo, sin embargo debido a la distribución aleatoria de las fibras y el porcentaje de carga adicionada a la matriz, esta crea defectos que combinado con una resina con menor entrecruzamiento provoca fallas prematuras y por lo tanto baja resistencia a la tracción, en la Figura 4.26 b) y Figura 4.26 e) se identifica que dicha fibra fue fracturada lo que se puede interpretar como un soporte de tracción por parte de la fibra, además es posible observar que no existe un espaciamiento relativamente amplio entre la superficie de la fibra cruda y la matriz de resina en relación 2:1, el porcentaje de adición de aditivo fue una variable significativa ya que le otorga mayor refuerzo a una matriz con mejor entrecruzamiento (Bao et al., 2011). Por último, en las Figura 4.26 c) y Figura 4.26 f) se observa una zona menor de interfaz entre la fibra cocida y la resina en relación 2:1, es posible observar las microfibras del aditivo PrP presente, interactuando en la zona de falla, se observa además una fractura frágil resultado de una matriz con un mejor entrecruzamiento, el experimento 8 mostró la

mejor resistencia a la tracción fabricado con las mejores condiciones tomando los factores de relación 2:1, fibra cocida y la incorporación del aditivo al 1%, determinado por las variables más significativas establecidas por los valores de F.

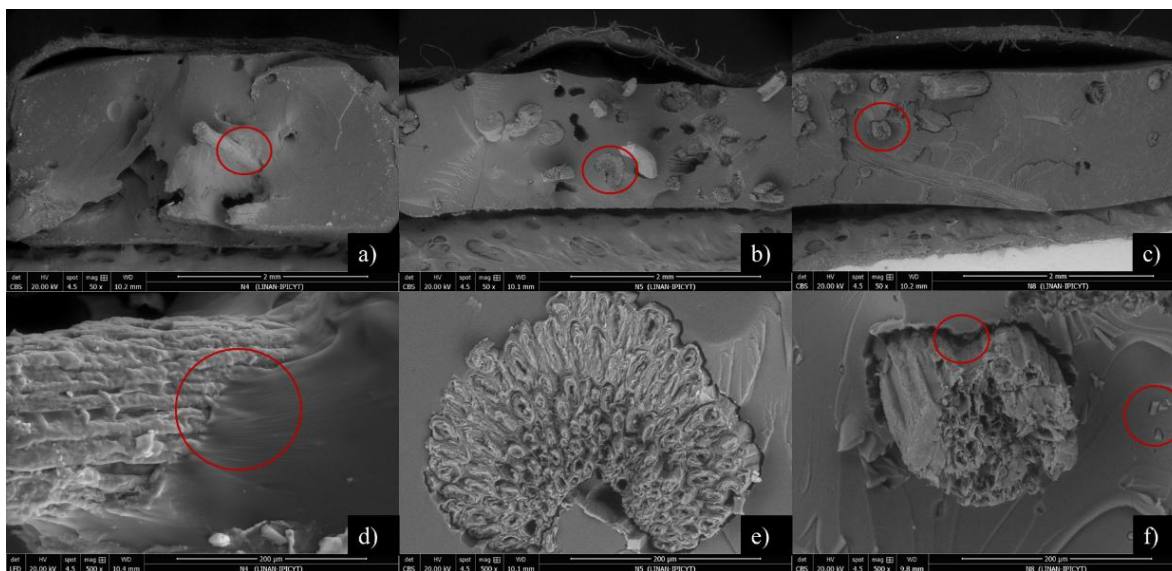


Figura 4.26. Micrografías SEM de la superficie de fracturas de materiales compuestos con fibras de agave, a) Experimento 4 50X, b) Experimento 5 50X, c) Experimento 8 50X, d) Experimento 4 500X, e) Experimento 5 500X, f) Experimento 8 500X

Capítulo 5. Conclusiones

Para las fibras estabilizadas, el tratamiento con ácido nítrico demostró ser un factor concluyente en el desempeño de los materiales compuestos fabricados. Se evidenció mediante los resultados, la importancia del tratamiento superficial aplicado y los cambios morfológicos y químicos que estos aportan. En particular, el tratamiento permitió mejorar la resistencia a la tracción de los materiales compuestos obtenidos a pesar de sacrificar el comportamiento mecánico del material de refuerzo para incrementar su adherencia con la matriz.

El análisis de esfuerzo cortante interfacial mediante la técnica de fragmentación de fibra permitió evaluar la influencia del tratamiento en la transferencia de esfuerzos desde la matriz hasta el refuerzo, se determinó un valor dos veces superior con el tratamiento ácido comparado con la fibra prístina r-OPAN.

Se concluye que al incrementar la proporción de endurecedor fenólico por encima de la relación de resina (EPSA-RE41)/catalizador 2:1, el esfuerzo a la tracción (σ) cae en promedio alrededor de 25 veces en aquellos experimentos reforzados con fibras naturales y solo 3 veces en aquellos reforzadas con fibras estabilizadas. Esto está atribuido a la combinación de dos factores principales: i) un entrecruzamiento poco efectivo de las cadenas poliméricas de resina epóxica debido al uso de catalizador en una proporción inadecuada y ii) un incremento en la densidad de defectos en la matriz polimérica derivados del uso de fibras naturales cortas en comparación con aquellos materiales compuestos producidos con fibras continuas oxidadas.

Por otra parte, los materiales compuestos híbridos curados 2:1 resina/catalizador y reforzados con fibras con tratamientos superficiales manifestaron propiedades mecánicas similares ($\sigma = 25\text{--}50$ MPa) a las encontradas en aplicaciones estructurales de bajo esfuerzo como carcasas de equipos eléctricos y electrónicos comúnmente elaborados con polímeros como el ABS y HDPE, para ello se determinó como mejores condiciones los compuestos fabricados con una incorporación de microfibras de carbono como aditivo en una concentración de 1% en peso, un tiempo de dispersión de ultrasonido de 5 minutos, tratamiento oxidativo con ácido nítrico para las fibras estabilizadas OPAN o r-OPAN y para los compuestos reforzados con fibras naturales, las fibras cocidas ofrecen un mejor

comportamiento mecánico. Sin embargo, el tratamiento superficial de NaOH y ácido acético aplicado a las fibras naturales no fue una variable significativa ya que ambos tratamientos limpian y remueven grasas y lignina de las fibras de manera similar. De esta manera, para obtener materiales compuestos a un menor costo, la incorporación de microfibras de carbono recicladas, fibras textiles como residuo y fibras de bagazo de agave cocidas resultan ser la opción más viable fabricándolas a las condiciones mencionadas anteriormente.

El uso de fibras estabilizadas precursoras y recicladas, al igual que las fibras de bagazo de agave resultaron ser beneficiosas para el desarrollo de materiales compuestos, es importante resaltar la resistencia a la tracción obtenida por los materiales fabricados con fibras naturales, que en comparación con materiales reforzados con fibras estabilizadas muestran propiedades competitivas ofreciendo ventajas en términos de sostenibilidad y reducción de impacto ambiental. Ambos materiales compuestos llevan materias primas de desecho y residuo de procesos industriales dando la posibilidad de fabricar materiales para ciertas aplicaciones a un menor costo.

Se debe continuar con investigaciones en cuanto a la cantidad de fibra límite, orientación y tratamientos superficiales que permitan obtener las propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones específicas. Incrementando así una mayor cantidad de fibras de carbono recicladas que contribuyan con la fabricación de compuestos más eficientes, este tipo de residuo puede ser aplicado en otras matrices poliméricas y en la fabricación de piezas mediante manufactura aditiva. Para determinar una aplicación específica para los materiales compuestos propuestos, es necesario realizar una caracterización mecánica complementaria, determinando propiedades a flexión, compresión o impacto que permitan encontrar relaciones directas con variables asociadas al material y al proceso de conformación de las piezas.

Capítulo 6. Referencias

- Alcalá-Sánchez, D., Tapia-Picazo, J. C., Martínez-Pérez, A., & Ramírez-Alfonso, Y. (2024). Fibras de carbón como soporte de catalizadores heterogéneos a partir de fibras textiles residuales. *1er Foro Nacional de Divulgación de Ingeniería y Desarrollo Sustentable “El Impacto de La Ingeniería En La Sociedad e Industria.”*
- Alcalá-Sánchez, D., Tapia-Picazo, J. C., Serralta-Macías, J. de J., & Villaseñor-Burgos, C. D. (2025). Recovery and reuse of carbon fiber from automotive composites for sustainable environmental remediation systems. In *Symposium, 33rd International Materials Research Congress*.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D3822 Tensile Properties of Textile Fibers*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D3039: Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
- Amin, M. M., Mohamed, L. S., Hossain, M. M., Razzak, S. A., & Siddiquee, M. N. (2024). Prospects and Challenges of Carbon Fiber Production from Heavy Petroleum Fractions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(36), 15613–15636. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01136>
- Ansari, M. S., Zafar, S., & Pathak, H. (2023). A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites. *Results in Surfaces and Interfaces*, 12, 100141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100141>
- Aravinth, K., Ramakrishnan, T., Tamilarasan, V. D., & Veeramanikandan, K. (2022). A brief review on plant fibres composites: Extraction, chemical treatment and fibre orientation. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2005–2009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.291>
- Aravinth, K., Sathish, R., Ramakrishnan, T., Balu Mahandiran, S., & Shiyam Sundhar, S. (2023). Mechanical investigation of agave fiber reinforced composites based on fiber orientation, fiber length, and fiber volume fraction. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.436>

- Arcos-Alomía, A., Bartolo-Pérez, P., Valadez-González, A., & Herrera-Franco, P. J. (2020). Enhancement of the in-plane and pin-load bearing behavior of a quasi-isotropic carbon fiber/epoxy matrix multi-scale laminate by modifying the fiber-matrix interphase using graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13855–13869. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.083>
- Arcos-Alomía, A., Rivas-Menchi, A., Valadez-González, A., & Herrera-Franco, P. J. (2024). Enhancement of the contact behavior of a quasi-isotropic carbon fiber/epoxy matrix laminate with an elastic body by modifying the fiber-matrix interphase using graphene nanoplatelets. *Journal of Composite Materials*, 58(14), 1641–1658. <https://doi.org/10.1177/00219983241245715>
- Arunachalam, S. J., Saravanan, R., & Anbuechezhiyan, G. (2024). An overview on chemical treatment in natural fiber composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.108>
- Ateeq, M. (2023). A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100412>
- Avila-Ortega, A., Arcos-Alomía, A., Muñoz-Rodríguez, D., Carrera-Figueiras, C., & Juárez-Moreno, J. A. (2025). Effect of Substituents on Organically-Modified Silica Hybrid Sol–Gel Membranes on the Physicochemical and Tensile Mechanical Properties. *ChemistrySelect*, 10. <https://doi.org/10.1002/slct.202501013>
- Balasubramanian, M., Saravanan, R., & T, S. (2024). Exploring natural plant fiber choices and treatment methods for contemporary composites: A comprehensive review. *Results in Engineering*, 24, 103270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103270>
- Ballout, W., Sallem, N., Sclavons, M., Doneux, C., Bailly, C., Pardoën, T., & Van Velthem, P. (2022). High performance recycled CFRP composites based on reused carbon fabrics through sustainable mild solvolysis route. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09932-0>
- Bao, J., Li, Y., Zhong, X., & Chen, X. (2011). The Effect of Sizing Agent of Carbon Fibre on the Interface of Electron Beam Cured Composites. *Advanced Composites Letters*, 20, 149–153. <https://doi.org/10.1177/096369351102000601>

- Bayomi, R. A. H., Chu, C.-W., Obayashi, K., Ando, Y., Cheng, C.-H., Takahara, A., & Kojio, K. (2024). Influences of amine/epoxide ratio on cross-linking structure and mechanical properties of cured hydrogenated epoxy resin sheets and single-lap joints. *Polymer*, 298, 126882. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126882>
- Bhong, M., Khan, T. K. H., Devade, K., Vijay Krishna, B., Sura, S., Eftikhaar, H. K., Pal Thethi, H., & Gupta, N. (2023). Review of composite materials and applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>
- Bourdeau, J., Mintz, K. J., Jony, B., Kirmani, M. H., Gupta, K., & Kumar, S. (2024). Improvement of apparent IFSS and specific modulus of CNT yarns. *Composites Part B: Engineering*, 284, 111683. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111683>
- Brunner, A. J., Schwiedrzik, J. J., Mohanty, G., & Michler, J. (2020). Fiber push-in failure in carbon fiber epoxy composites. *Procedia Structural Integrity*, 28(2019), 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.063>
- Casimero, C., Hegarty, C., McGlynn, R. J., & Davis, J. (2020). Ultrasonic exfoliation of carbon fiber: electroanalytical perspectives. *Journal of Applied Electrochemistry*, 50(3), 383–394. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01379-y>
- Chen, H., Liddell, H. P. H., Ogale, A. A., Miao, Z. C., Ijeoma, M. W., & Carbajales-Dale, M. (2025). A critical review and meta-analysis of energy demand, carbon footprint, and other environmental impacts from carbon fiber manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 219, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108302>
- Chen, J., Wang, C., Dong, X., & Liu, H. (2006). Study on the Coagulation Mechanism of Wet-Spinning PAN Fibers. *Journal of Polymer Research*, 13(6), 515–519. <https://doi.org/10.1007/s10965-006-9075-5>
- Chen, L., Shen, Z., Liu, J., Liang, J., & Wang, X. (2020). Effects of oxygen on the structural evolution of polyacrylonitrile fibers during rapid thermal treatment. *RSC Advances*, 10(11), 6356–6361. <https://doi.org/10.1039/C9RA08881D>
- Chen, Q., Peng, Q., Zhao, X., Sun, H., Wang, S., Zhu, Y., Liu, Z., Wang, C., & He, X. (2020). Grafting carbon nanotubes densely on carbon fibers by poly(propylene imine)

- for interfacial enhancement of carbon fiber composites. *Carbon*, 158, 704–710.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.11.043>
- Choi, D., Kil, H.-S., & Lee, S. (2019). Fabrication of low-cost carbon fibers using economical precursors and advanced processing technologies. *Carbon*, 142, 610–649.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.028>
- Cruz, J., & Figueiro, R. (2016). Surface Modification of Natural Fibers: A Review. *Procedia Engineering*, 155, 285–288.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.030>
- Delgado-Espitia, P. J., Castillo-Preciado, D. J., Méndez-Acosta, H. O., Razo-Flores, E., & Pérez-Pimienta, J. A. (2024). Enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse pretreated with protic ionic liquids: Saccharification efficiency and hydrogen production. *Industrial Crops and Products*, 211, 118200.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118200>
- Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>
- Ding, J., Ma, X., Fan, X., Xue, J., Ye, F., & Cheng, L. (2021). Failure behavior of interfacial domain in SiC-matrix based composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 88, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.02.010>
- Drzal, L., & Herrera-Franco, P. (2002). *Measurement methods for fiber-matrix adhesion in composite materials*. 605–660. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51140-9.50043-3>
- Dubey, R. S. D. O. R. S., Rajesh, Y. B. R. D., & More, M. (2015). Synthesis and Characterization of SiO₂ Nanoparticles via Sol-gel Method for Industrial Applications. *Materials Today: Proceedings*, 2, 3575–3579.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.098>
- Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., & Eslami-Farsani, R. (2017). Thermal and mechanical properties of hybrid carbon/oxidized polyacrylonitrile fibers-epoxy composites. *Polymer Composites*, 38(7), 1412–1417.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.23708>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C.

- (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Elizondo-Villarreal, N., Gandara-Martínez, E., García-Méndez, M., Gracia-Pinilla, M., Guzmán-Hernández, A. M., Castaño, V. M., & Gómez-Rodríguez, C. (2024). Synthesis and Characterization of SiO₂ Nanoparticles for Application as Nanoadsorbent to Clean Wastewater. In *Coatings* (Vol. 14, Issue 7, p. 919). <https://doi.org/10.3390/coatings14070919>
- Ezeamaku, U. L., Nnanwube, I. A., Eze, I. O., & Onukwuli, O. D. (2023). Effects of acetylation treatment on pineapple leaf fiber (*Ananas comosus*) reinforced with tapioca bio-based resin (cassava starch). *Cogent Engineering*, 10(1), 2229109. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2229109>
- Fitzka, M., Simon, Z., Marischler, M., Koch, T., Klitni, V., Fröhlich, A., Plengorth, A., Girolamo, D., Rohr, T., Scheerer, M., Liska, R., & Knaack, P. (2026). Rapid, Energy-Efficient CFRP manufacturing via filament winding of frontal polymerization resins. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109577>
- Frank, E., Steudle, L. M., Ingildeev, D., Spörl, J. M., & Buchmeiser, M. R. (2014). Carbon fibers: precursor systems, processing, structure, and properties. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 53(21), 5262–5298. <https://doi.org/10.1002/anie.201306129>
- Gadiou, R., Serverin, S., Gibot, P., & Vix-Guterl, C. (2008). The synthesis of SiC and TiC protective coatings for carbon fibers by the reactive replica process. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(11), 2265–2274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.022>
- Gallyamova, R., Dokichev, V., & Musin, F. (2023). Acid Treatment of Carbon Fiber Surface. *MATEC Web of Conferences*, 376. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202337601002>
- Gallyamova, R., Galyshev, S., & Musin, F. (2019). Preparation of Barrier SiO₂ Coating on Carbon Fibers by the Sol-Gel Method. *Materials Today: Proceedings*, 11, 286–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.145>

- Ghanbari, A., Jalali, A., Nofar, M. R., & Mamun, A. (2022). Extrinsic toughening of recycled carbon fibers in polypropylene composites in the absence of plasticity penalty. *Journal of Composite Materials*, 56, 941–950.
<https://doi.org/10.1177/00219983211068095>
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Gogoi, R., Maurya, A. K., & Manik, G. (2022). A review on recent development in carbon fiber reinforced polyolefin composites. *Composites Part C: Open Access*, 8, 100279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100279>
- Gowtham, S., kumar, V. N., Hemnath, R., & Sugeshamoorthy, S. (2025). Alkaline treated agave fiber: physicochemical and morphological characterization. *Journal of Physics: Conference Series*, 3045(1), 12018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3045/1/012018>
- Gu, K., Xiao, K., Yang, Y., Shi, X., & Zhao, Z. (2026). Study on Influence of Amine Curing Agents on Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Resin/Copper Interface Using Molecular Dynamics. *Physica B: Condensed Matter*, 418263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2026.418263>
- Gul, C., Albayrak, S., Durmuş, H., & (YÜKSEL) ÇÖMEZ, N. (2021). Characterization of SiO₂ sol-gel coated Ti6Al4V alloy obtained by using TEOS and GPTMS. *Science of Sintering*, 53, 461–473. <https://doi.org/10.2298/SOS2104461G>
- Hanaoka, T., Ikematsu, H., Takahashi, S., Ito, N., Ijuin, N., Kawada, H., Arao, Y., & Kubouchi, M. (2022). Recovery of carbon fiber from prepreg using nitric acid and evaluation of recycled CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 231, 109560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109560>
- Hao, J., Yang, K., Wu, J., Wu, M., & Li, Y. (2025). Overview of Recent Developments in Composite Epoxy Resin in Organic Coating on Steel (2020–2024). In *Materials* (Vol. 18, Issue 7, p. 1531). <https://doi.org/10.3390/ma18071531>
- He, Z., Lv, W., Gao, G., & Yin, Q. (2022). Investigation of the chemical changes and mechanism of the epoxy-amine system by in situ infrared spectroscopy and two-dimensional correlation analysis. *Polymer Journal*, 54(12), 1445–1452.

- <https://doi.org/10.1038/s41428-022-00697-x>
- Hiremath, N., Young, S., Ghossein, H., Penumadu, D., Vaidya, U., & Theodore, M. (2020). Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications. *Composites Part B: Engineering*, 198, 108156.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108156>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Huerta-Cardoso, O., Durazo-Cardenas, I., Marchante-Rodriguez, V., Longhurst, P., Coulon, F., & Encinas-Oropesa, A. (2020). Up-cycling of agave tequilana bagasse-fibres: A study on the effect of fibre-surface treatments on interfacial bonding and mechanical properties. *Results in Materials*, 8(October), 100158.
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100158>
- Hui, C., Qingyu, C., Jing, W., Xiaohong, X., Hongbo, L., & Zhanjun, L. (2018). Interfacial enhancement of carbon fiber/nylon 12 composites by grafting nylon 6 to the surface of carbon fiber. *Applied Surface Science*, 441, 538–545.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.158>
- Jardon-Maximino, N., Dehonor Gómez, M., Villa Moreno, R., Baeza-Alvarado, M. D., & Lugo Uribe, L. E. (2023). Optimization of the Alkali-Silane Treatment of Agave lechuguilla Fibers (Ixtle) for Potential Reinforcement in Polymeric Composites. In *Fibers* (Vol. 11, Issue 10, p. 86). <https://doi.org/10.3390/fib11100086>
- Jin, K., Luo, H., Wang, Z., Wang, H., & Tao, J. (2020). Composition optimization of a high-performance epoxy resin based on molecular dynamics and machine learning. *Materials & Design*, 194, 108932.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108932>
- Jin, X., Feng, C., Creighton, C., Hameed, N., Parameswaranpillai, J., & Salim, N. V. (2021). On the structural evolution of textile grade polyacrylonitrile fibers during stabilization and carbonization: Towards the manufacture of low-cost carbon fiber. *Polymer Degradation and Stability*, 186, 109536.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109536>
- Karger-Kocsis, J., Mahmood, H., & Pegoretti, A. (2015). Recent advances in fiber/matrix

- interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 73, 1–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.003>
- Kelly, A. and Tyson, W. R. (1965). Fiber Strengthened Materials. In: *Zackay, V.F., Ed., High Strength Materials, John Wiley & Sons Inc., New York*, 578–583.
- Khalid, M. Y., Imran, R., Arif, Z. U., Akram, N., Arshad, H., Al Rashid, A., & García Márquez, F. P. (2021). Developments in Chemical Treatments, Manufacturing Techniques and Potential Applications of Natural-Fibers-Based Biodegradable Composites. In *Coatings* (Vol. 11, Issue 3, p. 293). <https://doi.org/10.3390/coatings11030293>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100184>
- Khan, H., Kaur, J., Naebe, M., Hutchinson, S., & Varley, R. J. (2022). Continuous, pilot-scale production of carbon fiber from a textile grade PAN polymer. *Materials Today Communications*, 31, 103231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103231>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- Khurshid, M. F., Hengstermann, M., Hasan, M., Abdqadir, A., & Cherif, C. (2019). Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites – A review. *Journal of Composite Materials*, 54, 1925–1944. <https://doi.org/10.1177/0021998319886043>
- Kim, B.-J., Cha, S.-H., Kong, K., Ji, W., Park, H. W., & Park, Y.-B. (2018). Synergistic interfacial reinforcement of carbon fiber/polyamide 6 composites using carbon-nanotube-modified silane coating on ZnO-nanorod-grown carbon fiber. *Composites Science and Technology*, 165, 362–372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.07.015>

- Kim, D.-K., An, K.-H., Bang, Y., Kwac, L., Oh, S.-Y., & Kim, B.-J. (2016). Effects of electrochemical oxidation of carbon fibers on interfacial shear strength using a micro-bond method. *Carbon Letters*, 19, 32–39. <https://doi.org/10.5714/CL.2016.19.032>
- Kim, G., Lee, H., Kim, M., & Kim, D. U. (2023). Investigating the Effects of Nitric Acid Treatments on the Properties of Recycled Carbon Fiber. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 4, p. 824). <https://doi.org/10.3390/polym15040824>
- Kim, H., Moon, H., Lim, D., & Jeong, W. (2021). Process Optimization for Manufacturing PAN-Based Conductive Yarn with Carbon Nanomaterials through Wet Spinning. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 20, p. 3544). <https://doi.org/10.3390/polym13203544>
- Kim, Y. M., Kim, Y., Yang, H.-S., Choi, H. W., Youk, J. H., & Yu, W.-R. (2025). Enhanced mechanical properties of PAN fibers via cation-assisted electrochemical wet spinning. *Polymer*, 337, 128992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128992>
- Koçoğlu, H., Kodal, M., Altan, M. C., Özçelik, B., & Özkoç, G. (2022). A new approach for the reuse of scrap carbon fiber in high-added value continuous fiber reinforced composite structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 163, 107272. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107272>
- Konstantopoulos, G., Soulis, S., Dragatogiannis, D., & Charitidis, C. (2020). Introduction of a Methodology to Enhance the Stabilization Process of PAN Fibers by Modeling and Advanced Characterization. In *Materials* (Vol. 13, Issue 12, p. 2749). <https://doi.org/10.3390/ma13122749>
- Koutroumanis, N., Manikas, A. C., Pappas, P. N., Anagnostopoulos, G., & Galiotis, C. (2024). Interfacial properties and mechanical performance of hybrid graphene/carbon fibre composites. *Materials Today Communications*, 41, 110458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110458>
- Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., & Jørgensen, J. K. (2021). Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. In *Journal of Composites Science* (Vol. 5, Issue 1, p. 28). <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
- Kululo, W. W., Habtu, N. G., Ojha, N., Abera, M. K., Sendekie, Z. B., & Fanta, S. W. (2026). Low-alkaline-assisted disk mill pretreatment of *Agave sisalana* Perrine ex

- Engelmann fiber to enhance total reducing sugar recovery using response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 206, 108699.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108699>
- Lamouroux, F., Bourrat, X., Nasalain, R., & Sevely, J. (1993). Structure/oxidation behavior relationship in the carbonaceous constituents of 2D-C/PyC/SiC composites. *Carbon*, 31(8), 1273–1288. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-6223\(93\)90086-P](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-6223(93)90086-P)
- Le Thao Nguyen, N., Maghe, M., Mota-Santiago, P., Creighton, C., Groetsch, T., Nunna, S., & Varley, R. J. (2025). Increasing oxygen diffusion during rapid stabilization of a PAN precursor fibre and its impact on the microstructure and properties of carbon fibre. *Materials Today Communications*, 45, 112329.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112329>
- Lee, D., Kim, J.-H., Lee, S. J., Kim, M., & Kwon, D.-J. (2024). Microdroplet pull-out testing: Significance of fiber fracture results. *Polymer Testing*, 141, 108631.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108631>
- Leistenschneider, D., Zuo, P., Kim, Y., Abedi, Z., Ivey, D. G., de Klerk, A., Zhang, X., & Chen, W. (2021). A mechanism study of acid-assisted oxidative stabilization of asphaltene-derived carbon fibers. *Carbon Trends*, 5, 100090.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100090>
- Li, B., Wang, X., Liu, P., Liu, G., Wang, K., & Yu, H. (2025). In situ tensile testing under fire conditions: Thermo-mechanical coupling failure analysis of carbon fiber composites in high-pressure hydrogen storage tanks. *Journal of Energy Storage*, 129, 117413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117413>
- Li, B., Wu, X., Huang, D., Ye, C., Chen, X., Cao, X., Shen, K., & Liu, J. (2024). High-purity rayon-based carbon fiber felt prepared by halogen gas purification for superior thermal insulation and oxidation resistance. *Carbon*, 224, 119056.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119056>
- Lim, S. H., Kim, W., Kim, W., Jeon, D., & Kim, S. S. (2024). Schematic construction of carbon fiber tow microstructure models and their effect on tensile strength of carbon fiber tow/epoxy composites: Quantification of carbon fiber distribution, misalignment, and interlacing. *Composites Science and Technology*, 256, 110786.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110786>

- Liu, H., Ding, Z., Fan, Y., Luo, Y., & Yang, Y. (2023). Comparison of Mechanical Properties of Ductile/Brittle Epoxy Resin BFRP-AL Joints under Different Immersion Solutions. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 19, p. 3892).
<https://doi.org/10.3390/polym15193892>
- Liu, X., Lan, P., & Lin, N. (2025). Curing reactions of epoxy powder coatings in perspectives of chemical mechanisms and strategies. *Progress in Organic Coatings*, 199, 108956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108956>
- Liu, X., Wang, H., Zeng, B., Yi, X., Luo, W., Chen, G., Xu, Y., Yuan, C., & Dai, L. (2024). Phosphorus-containing curing agents with dynamic bonds endowing epoxy resins with flame retardancy and remolding capability. *Composites Part B: Engineering*, 273, 111260.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111260>
- Liu, Y., Dai, S., Guo, P., Li, H., Guo, Z., Shang, L., & Ao, Y. (2024). Comprehensive research on the correlation between microstructure and mechanical properties of polyacrylonitrile-based precursor fibers prepared by wet-spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 141. <https://doi.org/10.1002/app.56125>
- Ludeña, M. (2021). Proceso Sol-Gel en la Síntesis de Dióxido de Silicio (SiO₂). *Revista Bases de La Ciencia. e-ISSN 2588-0764*, 6, 1.
https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i2.2548
- Ma, C., Duan, J., Lu, S., Guo, Z., Wang, H., Na, M., & Zhang, L. (2025). Study on tensile damage analysis and failure mechanisms of multi-scale carbon fiber laminated composites. *Diamond and Related Materials*, 159, 112819.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112819>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109199>
- Ma, L., Wang, Y., Wang, Y., & Fu, S. (2019). Formation of C-doped SiO₂ coatings on carbon fibers by the sol-dipping process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 580, 123700.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123700>

- Ma, Y., Yan, C., Xu, H., Liu, D., Shi, P., Zhu, Y., & Liu, J. (2018). Enhanced interfacial properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites by grafting graphene oxide onto fiber surface. *Applied Surface Science*, 452, 286–298.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.274>
- Mahmud, A. Al, Nishu, N. B., Debnath, A. K., Hasib, M. A., Rahim, N., & Uddin, S. (2026). Effect of chemical treatments on the mechanical and physical properties of kenaf-carbon fiber hybrid epoxy composites. *Next Materials*, 10, 101471.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101471>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.416>
- Mei, T., Gao, M., Wang, Y., Huang, Y., & Chu, P. K. (2022). Effects of acid treatment and plasma micromachining on the surface properties of carbon fibers. *Applied Surface Science*, 592, 153261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153261>
- Moriyama, A., Hasegawa, T., Nagaya, C., Hamada, K., Himaki, T., Murakami, M., Horie, M., Takahashi, J., Iwahashi, H., & Moritomi, H. (2019). Assessment of harmfulness and biological effect of carbon fiber dust generated during new carbon fiber recycling method. *Journal of Hazardous Materials*, 378, 120777.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120777>
- Moskowitz, J. D., & Wiggins, J. S. (2016). Thermo-oxidative stabilization of polyacrylonitrile and its copolymers: Effect of molecular weight, dispersity, and polymerization pathway. *Polymer Degradation and Stability*, 125, 76–86.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.12.025>
- Motta de Castro, E., Tabei, A., Cline, D. B. H., Haque, E., Chambers, L. B., Song, K., Perez, L., Kalaitzidou, K., & Asadi, A. (2024). New insights in understanding the fiber-matrix interface and its reinforcement behavior using single fiber fragmentation data. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(1), 5.
<https://doi.org/10.1007/s42114-024-01054-7>
- Mulenga, T. K., Rangappa, S. M., Lai, C. W., Anam, K., Moure, M. M., & Siengchin, S. (2025). Synergistic Performance in Natural Fiber Hybrid Composites: A Review of

- Weathering, Thermal, and Mechanical Properties through Filler Integration. *Journal of Materials Research and Technology*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.077>
- Mundhe, A., & Kandasubramanian, B. (2024). Advancements in natural fiber composites: Innovative chemical surface treatments, characterizat on techniques, environmental sustainability, and wide-ranging applications. *Hybrid Advances*, 7, 100282.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100282>
- Mustapha, A. N., Zhang, Y., Zhang, Z., Ding, Y., Yuan, Q., & Li, Y. (2021). Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 667–680.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.025>
- Mylsamy, K., & I, R. (2010). Investigation on Physio-chemical and Mechanical Properties of Raw and Alkali-treated Agave americana Fiber. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 2925–2935. <https://doi.org/10.1177/0731684410362817>
- Nguyen, N. L. T., Creighton, C., Nunna, S., Maghe, M., Groetsch, T., & Varley, R. J. (2024). PAN-precursor to carbon fibre: An investigation of manufacture and material properties for varying comonomer composition. *Polymer Degradation and Stability*, 227, 110835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110835>
- Nguyen, N. L. T., Maghe, M., Mota-Santiago, P., Nunna, S., Creighton, C., & Varley, R. J. (2024). Using higher rates of stabilization of a wet-spun pan fibre to understand the effect of microstructure on the tensile and compressive properties of carbon fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108524.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108524>
- Pandey, S., & Mishra, S. B. (2011). Sol–gel derived organic–inorganic hybrid materials: synthesis, characterizations and applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 59(1), 73–94. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2465-0>
- Park, D. U., Ryu, J. H., Han, N. K., Park, W. H., & Jeong, Y. G. (2018). Thermal Analysis on the Stabilization Behavior of Ternary Copolymers Based on Acrylonitrile, Methyl Acrylate and Itaconic Acid. *Fibers and Polymers*, 19(12), 2439–2448.
<https://doi.org/10.1007/s12221-018-8782-y>
- Patel, R. V., & Manocha, S. (2013). Studies on Carbon-Fly Ash Composites with Chopped

- PANOX Fibers. *Journal of Composites*, 2013(1), 674073.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2013/674073>
- Pei, Y., Wang, Y., Chang, A.-Y., Liao, Y., Zhang, S., Wen, X., & Wang, S. (2023). Nanofiber-in-microfiber carbon/silicon composite anode with high silicon content for lithium-ion batteries. *Carbon*, 203, 436–444.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.100>
- Peng, X., Wu, Y., & Wei, Z. (2024). Research progress on the surface modification of carbon fiber. *RSC Advances*, 14(6), 4043–4064.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d3ra08577e>
- Qin, J., Wang, C., Lu, R., Su, S., Yao, Z., Zheng, L., Gao, Q., Wang, Y., Wang, Q., & Wei, H. (2020). Uniform growth of carbon nanotubes on carbon fiber cloth after surface oxidation treatment to enhance interfacial strength of composites. *Composites Science and Technology*, 195, 108198.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108198>
- Ramabulana, K., Tambani, M., Machio, C., & Makhatha, M. (2019). Effect of particle size distribution on green properties and sintering of Ti-6Al-4V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 655, 12020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/655/1/012020>
- Ramachandrarao, M., Khan, S. H., & Abdullah, K. (2025). Carbon nanotubes and nanofibers – reinforcement to carbon fiber composites - synthesis, characterizations and applications: A review. *Composites Part C: Open Access*, 16, 100551.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100551>
- Ramakrishnan, T., Aravinth, K., Gokul Prasad, C., Singh, A., & Deepak Raja, S. (2023). Physiochemical investigation of untreated and alkali treated agave plant fiber. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.367>
- Ramana, M. V., & Ramprasad, S. (2017). Experimental Investigation on Jute/Carbon Fibre reinforced Epoxy based Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8654–8664. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.214>
- Reddy, R. A., Yoganandam, K., & Mohanavel, V. (2020). Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites – Review. *Materials Today:*

- Proceedings*, 33, 2996–2999.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.982>
- Rios-Del Toro, E. E., Chi, H., González-Álvarez, V., Méndez-Acosta, H. O., Arreola-Vargas, J., & Liu, H. (2021). Coupling the biochemical and thermochemical biorefinery platforms to enhance energy and product recovery from Agave tequilana bagasse. *Applied Energy*, 299, 117293.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117293>
- Rojas, M., Silva, G., Nakamatsu, J., Aguilar, R., & Kim, S. (2022). Alkali-Treated Agave Americana Fiber for Reinforcement of Fly Ash-Based Geopolymers. *Journal of Natural Fibers*, 19(16), 12647–12663.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2073500>
- Romero, F., Méndez, F., González, J., Tuninetti, V., Medina, C., Valin, M., Valin, J., Salas, A., & Vicuña, C. (2025). Acoustic Emission-Based Method for IFSS Characterization in Single-Fiber Fragmentation Tests. In *Applied Sciences* (Vol. 15, Issue 8, p. 4517).
<https://doi.org/10.3390/app15084517>
- Ronald Aseer, J., Sankaranarayanamsamy, K., Renold Elsen, S., & Thakur, A. K. (2022). Experimental studies on water absorption properties of acetic acid treated banana fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 49, 453–456.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.518>
- Rosales, S. G. S., Naranjo, L. N., Fonseca-Florido, H. A., González-Morones, P., Hernández, Z. G., Macías, R. Y., Romero, G. Y., Gallardo-Vega, C., Sifuentes-Nieves, I., & Hernández-Hernández, E. (2021). Alkali/Ultrasound Treatment as Alternative to Modify Structural and Thermal Properties of Agave tequilana Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19, 9309–9322.
- Roseno, S., Ammarullah, M. I., Rohman, S., Kurniawati, F., Wahyudi, T., Wargadipura, A. H. S., Masmui, M., Budiyanto, D., Effendi, M. D., Wahyudin, W., Kalembang, E., Hernawan, H., Subari, S., Habibie, S., Simanjuntak, T. P. H., Santoso, H., Ahmad, A., & Juwono, A. L. (2024). The effects of carbon fiber surface treatment by oxidation process for enhanced mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites for biomedical application. *AIP Advances*, 14(1), 15044.
<https://doi.org/10.1063/5.0183153>

- Rubio Rosas, E., Rodríguez Lugo, V., & Salgado Delgado, R. (2025). Valorización de bagazo de agave mediante materiales compuestos de PEBD. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 13(Especial4 SE-Artículos de investigación), 245–251. <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.16049>
- Sakuri, S., Surojo, E., Ariawan, D., & Prabowo, A. R. (2020). Investigation of Agave cantala-based composite fibers as prosthetic socket materials accounting for a variety of alkali and microcrystalline cellulose treatments. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 10(6), 405–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.052>
- Sanchez, F., & Borwankar, A. (2010). Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment. *Materials Science and Engineering: A*, 527(13), 3151–3158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.084>
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraiannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- Saraswat, B. K., Sharma, V. K., & Sharma, R. (2023). Alkali treatment effects on agave Americana fiber properties. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.035>
- Sato, M., Kataoka, Y., Higashide, M., Ishida, Y., & Sugimoto, S. (2025). Evaluation of the Mechanical Properties of Highly Oriented Recycled Carbon Fiber Composites Using the Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding, Wet-Layup, and Resin Transfer Molding Methods. In *Polymers* (Vol. 17, Issue 10, p. 1293). <https://doi.org/10.3390/polym17101293>
- Savas, L. A., Tayfun, U., & Dogan, M. (2016). The use of polyethylene copolymers as compatibilizers in carbon fiber reinforced high density polyethylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 99, 188–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.043>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39116>

- Selvaraj, S., Sasi Kumar, M., Makeshkumar, M., Sivanantham, G., Loganathan, P., Gopinathan, M., & Nirmalsagayaraja, R. (2025). 2 - Recent developments in natural and synthetic fibers, polymers, and their composites. In R. Lakshminarasimhan, S. K. Palaniappan, R. Manickam, S. M. Rangappa, & S. B. T.-S. M. and C. of F. Siengchin Polymers, and Composites (Eds.), *Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering* (pp. 19–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22029-6.00002-2>
- Shama Rao, N., Simha, T. G. A., Rao, K. P., & Ravi Kumar, G. V. V. (2018). Carbon Composites are Becoming Competitive and Cost Effective. *Infosys Limited*, 1–12.
- Shehab, E., Meirbekov, A., Amantayeva, A., Suleimen, A., Tokbolat, S., Sarfraz, S., & Ali, M. H. (2021). A fuzzy logic-based cost modelling system for recycling carbon fibre reinforced composites. *Polymers*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/polym13244370>
- Shi, C., Lei, J., Zhou, S., Dai, X., & Zhang, L.-C. (2018). Microstructure and mechanical properties of carbon fibers strengthened Ni-based coatings by laser cladding: The effect of carbon fiber contents. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.063>
- Sifuentes-Nieves, I., Hernández-Gómez, J. F., Flores-Silva, P. C., González-Morones, P., Yáñez-Macías, R., Ramírez-Vargas, E., & Hernández-Hernández, E. (2022). Structural performance of alkali/acid-ultrasound modified Agave fibers during the melt mixing process with polyvinyl alcohol. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Solís Rosales, S. G., Sifuentes-Nieves, I., Naranjo Naranjo, L., González Morones, P., Yáñez Macías, R., Hernández Gómez, J. F., García Hernández, Z., & Hernández Hernández, E. (2022). Insights on the performance of modified agave fibers on polypropylene matrix: physicochemical and mechanical features. *Journal of Polymer Research*, 29(9), 367. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03228-7>
- Sonawane, L. D., Mandawade, A. S., Gite, A. B., Shinde, S. D., Patil, G. E., Nikam, L. K., Goswami, V. H., Bhise, R. B., Sarawade, P. B., & Shinde, M. S. (2025). Sol–gel synthesis of silicon oxide (SiO₂) nanoparticles: exploring gas sensing and photocatalytic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00209-8>

- Srivastava, A. K., Gupta, V., Yerramalli, C. S., & Singh, A. (2019). Flexural strength enhancement in carbon-fiber epoxy composites through graphene nano-platelets coating on fibers. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107539.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107539>
- Sukmawan, R., Kusmono, & Wildan, M. W. (2024). Study of alkali and acetylation treatments on sisal fibers compatibility with low-amine/epoxy stoichiometric ratio. *Results in Engineering*, 24, 103127.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103127>
- Sun, W., Tajvidi, M., Hunt, C., & Howell, C. (2020). All-Natural Smart Mycelium Surface with Tunable Wettability. *ACS Applied Bio Materials*, 4.
<https://doi.org/10.1021/acsabm.0c01449>
- Terra, B., Andrade, D., & de Mesquita, R. (2021). Characterization of polyacrylonitrile thermal stabilization process for carbon fiber production using intelligent algorithms. *Polymer Testing*, 100, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107238>
- That, T., Tan, M., Nieu, N. H., Tan, P. M., & Thanh, N. D. (1996). *Coating of carbon-fiber surface by silicon carbide via sol-gel mixtures of tetraethyl orthosilicate and phenolic resin*. 239, 27–32.
- Tokonami, R., Aoki, K., Goto, T., & Takahashi, T. (2022). Surface Modification of Carbon Fiber for Enhancing the Mechanical Strength of Composites. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 19, p. 3999). <https://doi.org/10.3390/polym14193999>
- Trogen, M., Kilpeläinen, P., Pitkänen, L., Sawada, D., Fliri, L., Schlapp-Hackl, I., & Hummel, M. (2025). Cellulose–xylan composite fibres as precursors for carbon fibres. *RSC Advances*, 15(56), 48061–48071.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d5ra07682j>
- Umemura, M. T., Dalmás, F., Reynaud, P., Long, D., Fantozzi, G., Godin, N., Trouillet-Fonti, L., & Bikard, J. (2025). Fiber-matrix interface characterization in CF/PEEK composites by analysis of single fiber fragmentation. *Composites Science and Technology*, 270, 111301.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111301>
- Unterweger, C., Schlapp-Hackl, I., Fürst, C., Robertson, D., Cho, M., & Hummel, M. (2024). Carbon Fibers Based on Cellulose–Lignin Hybrid Filaments: Role of

- Dehydration Catalyst, Temperature, and Tension during Continuous Stabilization and Carbonization. In *Fibers* (Vol. 12, Issue 7, p. 55). <https://doi.org/10.3390/fib12070055>
- Verschate, O., Nikforooz, M., De Clerck, K., Van Paepegem, W., & Daelemans, L. (2025). Analysis of fiber-matrix interface debonding under normal loading using in-situ microscopy and cruciform-shaped single glass fiber composite specimens. *Composites Science and Technology*, 263, 111089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111089>
- Vignesh, M., Anbuezhayan, G., Mamidi, V. K., & Vivek Anand, A. (2024). Enriching mechanical, wear, and corrosion behaviour of SiO₂/TiO₂ reinforced Al 5754 alloy hybrid composites. *Materials Letters*, 361, 136106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136106>
- Wang, L., Liu, N., Guo, Z., Wu, D., Chen, W., Chang, Z., Yuan, Q., Hui, M., & Wang, J. (2016). Nitric Acid-Treated Carbon Fibers with Enhanced Hydrophilicity for *Candida tropicalis* Immobilization in Xylitol Fermentation. In *Materials* (Vol. 9, Issue 3, p. 206). <https://doi.org/10.3390/ma9030206>
- Wang, S., Xia, D., Xu, X., Song, H., & Qing, Y. (2024). Alkylated MXene–Carbon Nanotube/Microfiber Composite Material with Flexible, Superhydrophobic, and Sensing Properties. In *Materials* (Vol. 17, Issue 18, p. 4499). <https://doi.org/10.3390/ma17184499>
- Wang, T., & Luo, R. (2018). Dynamic oxidation and protection of the PAN pre-oxidized fiber C/C composites. *Ceramics International*, 44(6), 6311–6320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.021>
- Wang, X. L., Wang, W. K., Qu, Z. G., Ren, G. F., & Wang, H. C. (2021). Surface roughness dominated wettability of carbon fiber in gas diffusion layer materials revealed by molecular dynamics simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(52), 26489–26498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.121>
- Wang, X., Qian, X., Zhang, Y., Wang, X., Song, S., & Zhang, C. (2021). Surface oxidation of PAN-based ultrahigh modulus carbon fibers (UHMCFs) and its effect on the properties of UHMCF/EP composites. *Carbon Letters*, 31(3), 449–461. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00173-7>

- Witik, R. A., Teuscher, R., Michaud, V., Ludwig, C., & Månson, J.-A. E. (2013). Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 89–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.009>
- Wongkhuenkaew, N., Tipboonsri, P., Pramoonmak, S., Chongkolnee, B., & Memon, A. (2026). Recycled composite materials from plastic parts of end-of-life vehicles mixed with recycled carbon fiber from automotive manufacturing waste. *Composites Part C: Open Access*, 19, 100696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2026.100696>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.024>
- Wu, Q., Zhao, R., Zhu, J., & Wang, F. (2020). Interfacial improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by tuning the content of curing agent in sizing agent. *Applied Surface Science*, 504, 144384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144384>
- Wu, Y., Gao, X., Nguyen, T. T., Wu, J., Guo, M., Liu, W., & Du, C. (2022). Green and Low-Cost Natural Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Fibers—Processing, Properties, and Applications in Sports Equipment: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 13, p. 2591). <https://doi.org/10.3390/polym14132591>
- Xian, G., Zhou, P., Li, C., Dong, S., Du, H., Tian, J., Guo, R., Peng, Z., Zhang, Z., & He, T. (2024). Mechanical properties evaluation of glass fiber reinforced thermoplastic composite plate under combined bending loading and water immersion. *Construction and Building Materials*, 440, 137470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137470>
- Xiao, J., Zhang, X., Zhao, Z., Liu, J., Chen, Q., & Wang, X. (2022). Rapid and Continuous Atmospheric Plasma Surface Modification of PAN-Based Carbon Fibers. *ACS Omega*, 7(13), 10963–10969. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06818>
- Xiong, L., Qin, X., Liang, H., Huang, S., & Lian, Z. (2017). Covalent functionalization of carbon fiber with poly(acrylamide) by reversible addition–fragmentation chain transfer polymerization for improving carbon fiber/epoxy interface. *Polymer Composites*,

- 38(1), 27–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.23556>
- Xu, Jun, Huang, Yubo, Zhu, Shihui, Abbes, Nedra, Jing, Xiaoning, & Zhang, Liang. (2021). A review of the green synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and their prospects for application in antibacterial textiles. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 16, 15589250211046242. <https://doi.org/10.1177/15589250211046242>
- Xu, Z., Li, J., Wu, X., Huang, Y., Chen, L., & Zhang, G. (2008). Effect of kidney-type and circular cross sections on carbon fiber surface and composite interface. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2), 301–307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.10.015>
- Yang, D., Dong, S., Hong, C., & Zhang, X. (2022). Preparation, modification, and coating for carbon-bonded carbon fiber composites: A review. *Ceramics International*, 48(11), 14935–14958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.055>
- Yang, H.-S., Kim, Y.-M., Choi, H., Jang, J., Youk, J. H., Lee, B.-S., & Yu, W.-R. (2020). Electrochemical wet-spinning process for fabricating strong PAN fibers via an in situ induced plasticizing effect. *Polymer*, 202, 122641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122641>
- Yang, S. M., Muazu, R. I., Tran, E., Talbot, C. B., Shah, N., Shaffer, M. S. P., & Brandt-Talbot, A. (2025). Sustainable low-cost carbon fibres produced by integrating wood fractionation with lignin fibre spinning††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d5su00218d>. *RSC Sustainability*, 3(9), 3972–3986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d5su00218d>
- Yang, W., Wang, J., Chen, L., Puglia, D., Xu, P., Niu, D., & Ma, P. (2026). Closed-loop recycling of an intrinsically flame-retardant epoxy/carbon fiber composite toward formaldehyde-free wood adhesives. *Composites Part B: Engineering*, 312, 113346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113346>
- Yim, Y.-J., Yoon, Y.-H., Kim, S.-H., Lee, J.-H., Chung, D.-C., & Kim, B.-J. (2025). Carbon Nanotube/Polymer Composites for Functional Applications. In *Polymers* (Vol. 17, Issue 1, p. 119). <https://doi.org/10.3390/polym17010119>
- Yin, H. L., Liu, S. Q., Zhao, L. C., Cui, C. X., & Wang, X. (2021). Vacuum infiltration molding and mechanical property of short carbon fiber reinforced Ti-based metallic glass matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117151.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117151>
- Yu, T., Zhang, Z., Song, S., Bai, Y., & Wu, D. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 111147.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>
- Yu, Z., Rander, A. R., Martinez, E. A., Lim, D.-Y., Williams, T. J., & Nutt, S. R. (2026). Monomer and fiber recovery from prepreg via chemical solvolysis. *Composites Part B: Engineering*, 313, 113345.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113345>
- Zeng, L., Liu, X., Chen, X., & Soutis, C. (2021). Π - Π Interaction Between Carbon Fibre and Epoxy Resin for Interface Improvement in Composites. *Composites Part B: Engineering*, 220(May), 108983. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108983>
- Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., & Wang, C. H. (2012). Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 75–80.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.006>
- Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., & Wang, H. (2023). Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110463.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>
- Zhang, S., Wu, N., An, C., Sun, Z., Li, X., Zhao, F., Wang, X., & Chen, Y. (2026). Multiscale finite element prediction and experimental validation of progressive tensile failure in plain-woven carbon fiber composites with polyimine-modified epoxy matrix. *Engineering Failure Analysis*, 186, 110541.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110541>
- Zhang, Y., Ma, F., Shi, L., Lyu, B., & Ma, J. (2023). Recyclable, repairable and malleable bio-based epoxy vitrimers: overview and future prospects. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39, 100726.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100726>
- Zhen, X., Li, L., Zheng, R., & Ma, C. (2025). Optimized interfacial evaluation methods of SiCf/SiC composites: fiber push-out, fiber push-in and micropillar compression.

Materials Characterization, 223, 114873.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.114873>

Zheng, Y., Wang, X., & Wu, G. (2019). Facile Strategy of Improving Interfacial Strength of Silicone Resin Composites Through Self-Polymerized Polydopamine Followed via the Sol-Gel Growing of Silica Nanoparticles onto Carbon Fiber. In *Polymers* (Vol. 11, Issue 10, p. 1639). <https://doi.org/10.3390/polym11101639>

Zhuang, J., Liu, Y., Bian, D., He, F., Li, Y., & Fan, W. (2025). Spinning solution viscosity reducing and wet spinning of carbon black-based elastic conductive fibers for sports monitoring and healthcare electrical heating. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.096>

Zoli, L., Servadei, F., Cicogna, F., Coiai, S., Calucci, L., Forte, C., Sciti, D., & Passaglia, E. (2023). Enhancing PANox fiber properties through controlled oxidation and tensioning: A study on shrinkage inhibition and structural analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 218, 110551.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110551>