



Análisis de la influencia del espesor sobre la adherencia de un recubrimiento termoplástico aplicado sobre la superficie de las fibras de fique en una matriz termoestable a través de pruebas de microdroplet

Angie Vanessa Soto Jiménez, angie.soto758@pascualbravo.edu.co

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor: Cesar Augusto Isaza Merino, PhD.
c.isaza2059@pascualbravo.edu.co

Co-asesor: Johnattan Vargas Londoño, ME.
jovargasl@unal.edu.co

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica
Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia

2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profunda gratitud a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor César A. Isaza Merino, por su paciencia, orientación y apoyo constante. También agradezco a Johnattan Vargas y Julio Cuellar por sus valiosas sugerencias, las cuales han enriquecido enormemente este trabajo.

No puedo dejar de agradecer a mis familiares y amigos por su apoyo incondicional.

Quiero reconocer a la Universidad Nacional de Colombia y la Institución Universitaria Pascual Bravo, por proporcionar los recursos necesarios y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, mi agradecimiento se a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron a mi crecimiento académico y personal. Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo, y estoy agradecida por haber tenido el privilegio de contar con su apoyo.

Gracias a todos los que formaron parte de este viaje académico. Su impacto perdurará en mi carrera y en mi vida.

Angie Soto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Foco de investigación.....	12
1.1.1 Objetivos específicos.....	12
2 MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Desarrollo actual de los materiales compuestos.....	14
2.2 Fundamentos de los materiales compuestos.....	14
2.3 Materiales compuestos de matriz polimérica	16
2.3.1 La matriz polimérica	16
2.3.2 Fibras como refuerzo.....	17
2.3.3 Procesos de manufactura en NFRP	22
2.4 Intercara en materiales compuestos reforzados de matriz polimérica (PMCs).....	27
2.4.1 Interacciones fisicoquímicas	28
2.4.2 Enlace químico	29
2.4.3 Entrelazamiento mecánico	29
3 ESTADO DEL ARTE.....	31
4 METODOLOGÍA	37
4.1 Selección del recubrimiento	37
4.1.1 Método de Ashby con CES Edupack	38
4.1.2 Método ponderado.....	41
4.2 Materiales utilizados para el recubrimiento	42
4.2.1 Polipropileno (PP).....	42
4.2.2 Alcohol polivinílico (PVA).....	43

4.3	Procedimiento experimental.....	43
4.3.1	Secado de la fibra de fique y almacenamiento de la fibra.....	44
4.3.2	Preparación de los polímeros (PP y PVA)	45
4.3.3	Técnica de recubrimiento por inmersión.....	46
4.4	Caracterización mecánica y microestructural de la fibra recubierta.	47
4.4.1	Equipos para la caracterización mecánica y microestructural	48
4.4.2	Descripción del proceso para la caracterización por medio de microdroplet.....	49
4.4.3	Descripción del proceso para el análisis del espesor.....	53
4.5	Fabricación y caracterización mecánica del material compuesto	54
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
5.1	Resultados de selección del material.....	60
5.1.1	Gráficas de Ashby	60
5.1.2	Método ponderado.....	62
5.2	Caracterización mecánica y microestructural de la fibra recubierta.	65
5.2.1	Análisis del ensayo de microdroplet	69
5.2.2	Análisis de espesor	71
5.2.3	Relación entre la resistencia interfacial vs el espesor del recubrimiento	76
5.3	Caracterización mecánica del material compuesto	77
6	CONCLUSIONES	78
7	REFERENCIAS.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los diferentes tipos de fibras sintéticas de refuerzo [11].....	18
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de algunas fibras naturales [14].	18
Tabla 3. Comparativo de las fibras naturales y fibra de vidrio [2].....	21
Tabla 4. Origen y producción mundial anual de diferentes fibras naturales [5].	21
Tabla 5. Características de la fibra de fique [17].	22
Tabla 6. Propiedades mecánicas del compuesto [22].....	32
Tabla 7. Propiedades mecánicas de composites recubiertos de curado UV [30].	36
Tabla 8. Selección de material por método de ponderación.....	41
Tabla 9. Método de ponderación en relación a las propiedades seleccionadas.....	63
Tabla 10. Resultados totales del método de ponderación para la selección de material	64
Tabla 11. Resultados del análisis del espesor de las muestras de fibra recubierta.	74
Tabla 12. Coeficiente de correlación entre τ y espesor del recubrimiento	76
Tabla 13. Resultados de ensayo de tensión en el material compuesto.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resumen de la investigación.....	13
Figura 2. Materiales compuestos en algunas industrias.	14
Figura 3. Configuración de los materiales compuestos [10].....	15
Figura 4. Clasificación de los materiales compuestos según el refuerzo [12]	15
Figura 5. Constituyentes de los composites [11].....	16
Figura 6. Entrecruzamiento en red de moléculas [9]	17
Figura 7. Diferentes configuraciones de cadenas moleculares: (a) lineal, (b) ramificada [9].....	17
Figura 8. Clasificación de las fibras naturales [13].....	19
Figura 9. Microestructura de la fibra natural [15].....	20
Figura 10. Estructura de la fibra natural [15].....	20
Figura 11. Clasificación de manufactura según las materias primas para compuestos [10].	23
Figura 12. Método por laminación manual [9].	24
Figura 13. Esquema del proceso de RTM [18].	24
Figura 14. Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) [19].....	25
Figura 15. Proceso de conformado por pultrusión [18].	25
Figura 16. Moldeo por compresión [12].	26
Figura 17. Proceso de apilamiento de películas para laminados compuesto termoplástico [20]...	26
Figura 18. Componentes de los materiales compuestos reforzados con fibra [18].....	27
Figura 19. Tres condiciones diferentes de humectación: a) humectación completa, b) no humectación y c) humectación parcial.[6]	28
Figura 20. Una forma irregular entre fibra y matriz [6].....	30
Figura 21. Porcentaje de absorción de agua durante la exposición al agua frente al tiempo para compuestos de compuestos de lino no tratados y recubiertos [22].	31
Figura 22. Propiedades mecánicas de compuesto de fibra de sisal modificada por tratamiento de recubrimiento de álcali/PVA, a) resistencia a la tracción, b) resistencia a la flexión, c) resistencia al impacto y d) absorción de agua del compuesto [26].	33

Figura 23. Zona interfacial del material compuesto en la zona de la falla [26].	33
Figura 24. Diferentes fibras con recubrimiento polimérico [27].	34
Figura 25. Micrografías SEM de fibras de sisal: a) sin tratar, b) tratadas con NaHCO ₃ , y c) tratado y recubierto de PLA [28].	35
Figura 26. Diagrama metodológico del proceso.	37
Figura 27. Softwares utilizados para la selección del recubrimiento. Fuente: internet.	38
Figura 28. Diagrama de categorías de materiales en CES Edupack con orientación general para optimizar el rendimiento en la selección[33].	39
Figura 29. Captura de pantalla: a) opciones de inicio y b) proyecto de selección, de CES Edupack 2019.	40
Figura 30. Pellets de polipropileno y Xilol.	42
Figura 31. PVA de Sumiglas S.A.	43
Figura 32. Secado de las fibras de fique.	44
Figura 33. Almacenamiento de las fibras.	45
Figura 34. Diagrama de dilución de PP.	46
Figura 35. Diseño de sistema para realizar la técnica de inmersión [37].	46
Figura 36. Montaje de sistema de recubrimiento de inmersión [37].	47
Figura 37. Equipos de microscopia: a) Microscopio electrónico de barrido (SEM), b) Microscopio óptico (MO).	48
Figura 38. Maquina Universal de Ensayo.	49
Figura 39. Proceso para aplicación de gotas para la caracterización: a) aplicación de la gota en la fibra recubierta, b) poliéster preacelerado con su respectivo catalizador.	50
Figura 40. Proceso de curado a la fibra con la gota.	50
Figura 41. a) Medición del tamaño de la gota, b) medición de la sección transversal de la fibra con ayuda de ImageJ.	51
Figura 42: Ensayo de microdroplet: a) esquema; b) montaje.	52
Figura 43. Proceso de preparación de muestras para análisis en SEM: a) equipo para baño de oro, b) ubicación de las muestras y c) montaje en el SEM.	53

Figura 44. Proceso de preparación de tela para fabricación: a) orientación de las fibras; b)eliminación de fibras transversales; c) tejido plano[10].	55
Figura 45. Materias primas para el proceso de infusión de PVA.....	56
Figura 46. Proceso de infusión y polimerización del PVA en el tejido de fibra de fique	57
Figura 47. Proceso de fabricación del compuesto: a) materias primas, b) técnica por bolsa de vacío, c) material compuesto final y d)corte de pruebas para ensayos	58
Figura 48. Montaje de ensayo de tensión en el compuesto.....	59
Figura 49. Módulo de Young vs. Densidad, aplicando los límites.	60
Figura 50. Módulo de Young vs Densidad, materiales seleccionados	61
Figura 51. Identificación del recubrimiento en FFPP mediante SEM: a)Fibra 1, b)Fibra 2	65
Figura 52. Fractura interna en la fibra recubierta de PP y mala adherencia.	66
Figura 53. Identificación del recubrimiento en PVA mediante SEM	67
Figura 54. Resultados de carga máxima (Fmax) en el ensayo de microdroplet con recubrimiento de PVA.	68
Figura 55. Análisis del recubrimiento y espesor mediante SEM en FFPVA-1.....	68
Figura 56. Resultados resistencia al cortante interfacial ensayo1	69
Figura 57. Resultados FFPVA-1 comparado con ensayo 1	70
Figura 58. Comparación de resistencia al cortante interfacial (τ) de fibra de fique con otros polímeros.....	71
Figura 59. Distribución irregular del recubrimiento.	72
Figura 60. Variabilidad en espesores en 5 puntos: a) sección con espesores homogéneos, b) sección con diferencias en longitud de espesor.....	73
Figura 61. Gráfico de barras: espesores promedio de las muestras	75

RESUMEN

El uso de nuevos materiales y procesos de manufactura que ofrecen bajos costos, bajo impacto ambiental y buena resistencia mecánica ha resultado del creciente uso de materiales compuestos en aplicaciones donde se requieren características con una alta relación resistencia/peso. Dentro de estos materiales ha aumentado la importancia de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, los cuales son denominados compuestos verdes y algunas de sus ventajas son: fáciles de obtener, asequibles, respetuosos con el medio ambiente, renovables y sin efectos secundarios descubiertos para la salud humana. Sin embargo, las propiedades fisicoquímico-mecánicas del compuesto fabricado con fibras naturales dependen de las características superficiales de la fibra natural y su interacción con la matriz polimérica. Con el fin de aumentar la adherencia de la fibra natural en una matriz de polimérica se han propuestos tratamientos térmicos y químicos en busca de aumentar las propiedades mecánicas en la zona interfacial, además varias investigaciones han apuntado al recubrimiento de la fibra natural como un mecanismo para el aumento de la adherencia y por ende las propiedades mecánicas del compuesto.

En este trabajo se investigará el efecto del espesor de una película termoplástica utilizada como recubrimiento en fibras naturales de fique sobre la adherencia en una matriz polimérica. El material de recubrimiento se determinará utilizando metodologías de selección de materiales teniendo en cuenta variables como viscosidad y temperatura, entre otros. Finalmente, para validar el efecto del recubrimiento sobre las propiedades mecánicas del compuesto elaborado con fibra natural, se realizarán caracterizaciones microestructurales y mecánicas, adicional se probará extrayendo la fibra recubierta de la matriz termoestable por medio de técnicas de microdroplet.

***Palabras clave* — Fibras naturales, fibras de fique, recubrimientos, características interfaciales, propiedades mecánicas.**

ABSTRACT

The use of new materials and manufacturing processes that offer low costs, low environmental impact, and good mechanical strength has resulted from the growing use of composite materials in applications where characteristics with a high strength-to-weight ratio are required. Within these materials, the importance of polymer matrix composites reinforced with natural fibers has increased. These are referred to as green composites, and some of their advantages include being easy to obtain, affordable, environmentally friendly, renewable, and with no discovered side effects on human health. However, the physicochemical and mechanical properties of the composite made with natural fibers depend on the surface characteristics of the natural fiber and its interaction with the polymer matrix. In order to enhance the adhesion of natural fibers in a polymer matrix, thermal and chemical treatments have been proposed to increase the mechanical properties in the interfacial zone. Additionally, several studies have focused on the coating of natural fibers as a mechanism to increase adhesion and therefore the mechanical properties of the composite.

This work will investigate the effect of the thickness of a thermoplastic film used as a coating on natural fibers of fique on adhesion in a polymer matrix. The coating material will be determined using material selection methodologies, taking into account variables such as viscosity and temperature, among others. Finally, to validate the effect of the coating on the mechanical properties of the composite made with natural fibers, microstructural and mechanical characterizations will be carried out. Additionally, extraction of the coated fiber from the thermosetting matrix will be tested using microdroplet techniques

Keywords — Natural fibers, fique fibers, coatings, interfacial characteristics, mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los materiales compuestos han incrementado su uso en varios campos industriales debido a su alta resistencia, rigidez y ligereza. Sin embargo, la crisis ambiental ha generado una mayor preocupación por el impacto ambiental de los materiales compuestos tradicionales, especialmente los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas, como vidrio y carbono, los cuales tienen buenas propiedades y resistencia mecánica, pero son muy costosos y poco biodegradable [1]. Esto ha dado lugar a un creciente interés en la búsqueda de alternativas sostenibles, por consiguiente, el uso de materiales compuestos reforzados con fibras naturales ha ido incrementado su estudio como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales (NFRP, por sus siglas en inglés, también denominados “biocompuestos” o “compuestos verdes”), ha llamado la atención a investigadores y académicos debido a que son renovables, de bajo costo y asequibles, entre otros. Asimismo, este tipo de materiales se han usado en aplicaciones donde se requieren un comportamiento no estructural como paneles, embalajes, estuches, compuertas y algunas partes automotrices, etc. [1]. En la industria ferroviaria, se ha reemplazado la madera y el hormigón por materiales compuestos a base de plásticos reforzados con fibras naturales para producir las traviesas o durmientes del ferrocarril [2]. En efecto, con un mayor desarrollo de estos materiales se puede llegar a utilizar en muchas más aplicaciones en el futuro, sin embargo, existen problemas de adhesión y humectabilidad entre la matriz y la fibra [3], problemas superficiales [4], y esto se debe a la baja compatibilidad que existe entre las fibras y la matriz polimérica, puesto que la estructura principalmente hidrófila de la fibra no interactúa bien con la matriz polimérica que normalmente es hidrófoba [5].

En los NFRP, la región interfacial juega un papel importante en las propiedades mecánicas finales del material compuesto, porque determina la capacidad del material compuesto para transferir eficazmente los esfuerzos aplicados desde la matriz a las fibras a través de la intercara. Existen varios mecanismos que pueden mejorar o empeorar la adhesión y al mismo tiempo el rendimiento mecánico del material compuesto[6] y alguno métodos han implementado

tratamientos superficiales, métodos físicos, fisicoquímicos, tratamientos y modificaciones químicas dependiendo de las necesidades, en algunos casos se centran en la eliminación de constituyentes no celulósicos para brindar una superficie más limpia, otros agregan ciertos productos químicos o radicales para formar enlaces que facilite la adhesión [7], sin embargo, algunos métodos han reportado una disminución en las características de las fibras.

No obstante, se han desarrollado varios procesos para mejorar los parámetros de procesamiento, pero aún no se obtienen los resultados esperados [3], aun así, se siguen haciendo estudios en busca de métodos que no afecten a la fibra como el aumento de despolimerización, hidrólisis, oxidación, deshidratación, descarboxilación y la recristalización [8]. Por lo tanto, entre los tratamientos superficiales disponibles, el recubrir la fibra es utilizado para mejorar la humectación y la adhesión entre la fibra y la matriz.

Por lo anterior, el presente trabajo busca desarrollar un recubrimiento polimérico para las fibras naturales de fique que respondan a una buena adherencia con la matriz termoplástica, mejorando sus propiedades mecánicas del material compuesto y ampliando sus aplicaciones en ingeniería.

1.1 Foco de investigación

Evaluar la aplicación de un recubrimiento termoplástico sobre la superficie de una fibra de fique para promover la adherencia con una matriz de polipropileno.

1.1.1 Objetivos específicos

- ✓ Seleccionar diferentes tipos de materiales termoplásticos según disponibilidad local y gráficas de Ashby para ser usados como recubrimiento de fibras de fique.
- ✓ Identificar los factores más relevantes que afectan el espesor del recubrimiento sobre la superficie de la fibra de fique y su efecto sobre la adherencia.
- ✓ Evaluar mecánicamente la adherencia entre fibras de fique recubiertas y matriz de poliéster usando la técnica de microdroplet

- ✓ Manufacturar un material compuesto de tejido de fibras de fique evaluando su comportamiento mecánico.

Esta investigación se divide en las siguientes secciones: introducción, revisión bibliográfica, experimentación, resultados y discusión, para finalizar con conclusiones y sugerencias a próximas investigaciones. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** proporciona un resumen visual de la investigación.

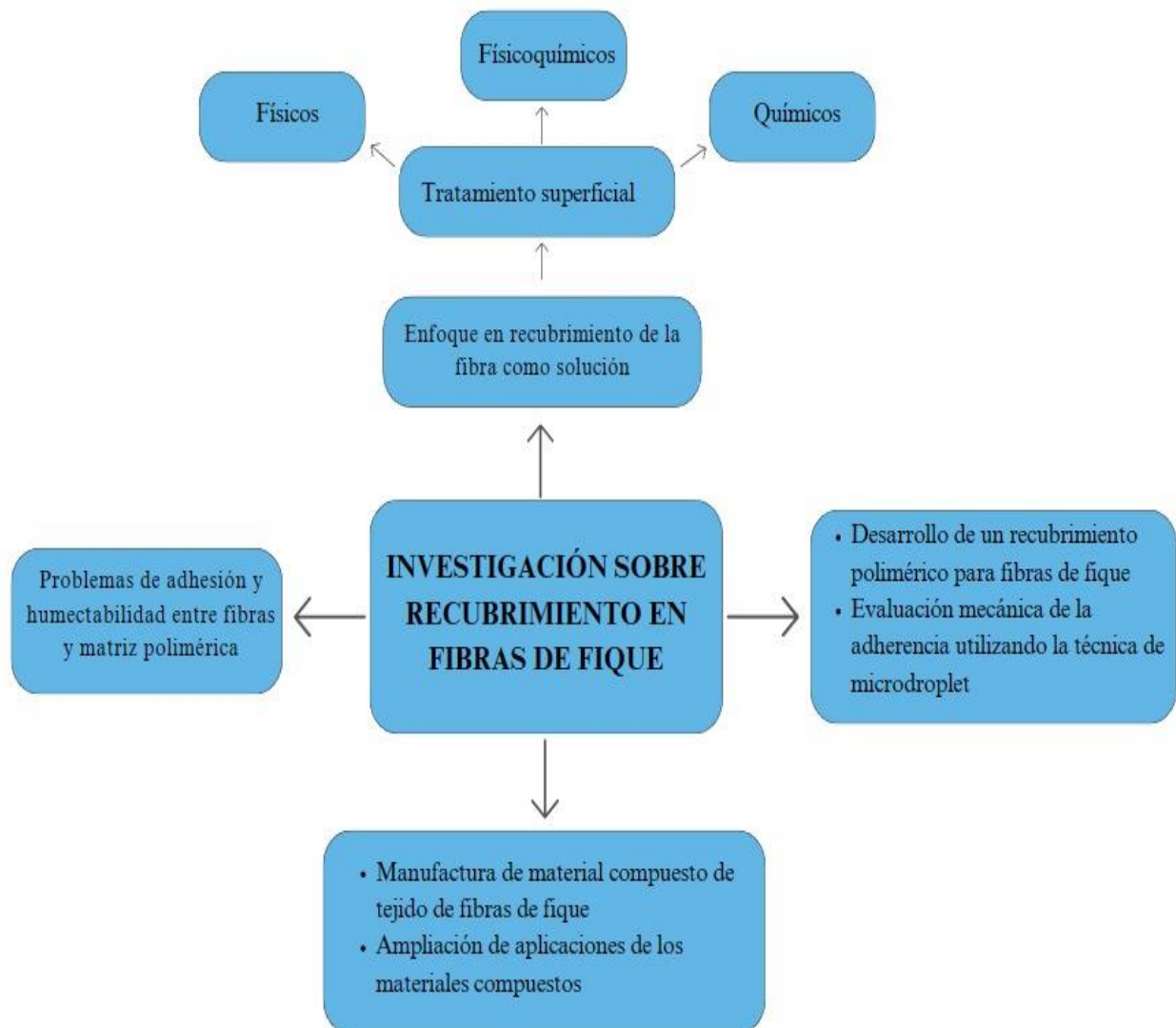


Figura 1. Resumen de la investigación

2 MARCO TEÓRICO

2.1 *Desarrollo actual de los materiales compuestos*

Los materiales compuestos (composites) son combinaciones de dos o más elementos, naturales o artificiales, que al combinarse proporcionan propiedades superiores que de forma individual no son capaces de lograr [9]. En particular, los materiales compuestos están diseñados para mejorar propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, permitiendo un amplio uso en diversas industrias como la aeroespacial, automotriz, construcción y deportes, entre otras, como se muestra en la Figura 2. Su popularidad se debe a su alta resistencia específica, rigidez, resistencia a la corrosión, capacidad de diseño personalizado y baja densidad en comparación con los materiales metálicos convencionales.



Figura 2. Materiales compuestos en algunas industrias¹.

2.2 *Fundamentos de los materiales compuestos*

En general los materiales compuestos se componen de dos fases como se puede observar en la Figura 3 se muestra la configuración básica de un material compuesto. La primera fase es la

¹ Fuente (<https://halnn-group.com/es/solution/>)

matriz, el cual es el medio continuo en el que se encuentra uniformemente dispersa la fase del refuerzo, cumpliendo la función de proteger al refuerzo y posibilitar la transferencia de las cargas externas hacia éste. Los elementos que se utilizan para las matrices son: metálicas, cerámicas y poliméricas, esta última se divide en dos grandes grupos termoestables y termoplásticos.

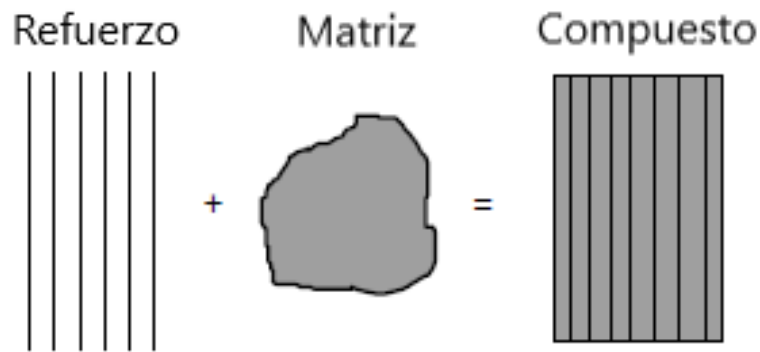


Figura 3. Configuración de los materiales compuestos [10]

Por otro lado, la segunda fase también denominada fase discontinua es el refuerzo, el cual se encuentra disperso dentro de la matriz en forma discreta. Cumple la función de soportar gran parte de la carga al redistribuirla y transmitir las fuerzas mediante la matriz. La Figura 4 presenta una representación esquemática empleada para categorizar los materiales compuestos según el tipo de refuerzo presente, ya sean fibras, hojuelas (whiskers) o partículas [5], [10], [11].

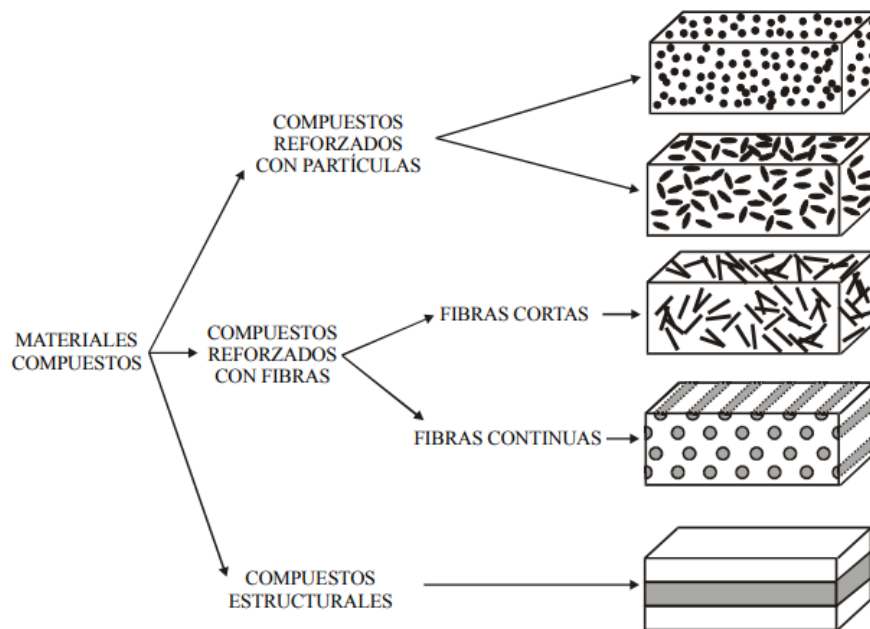


Figura 4. Clasificación de los materiales compuestos según el refuerzo [12]

Como se mencionó anteriormente, un material compuesto se compone de al menos dos elementos, las cuales pueden ser similares o diferentes en su naturaleza, separados por una frontera física claramente definida. Esta combinación da lugar a mejores propiedades que sobrepasan las características de sus componentes individuales por el cual es importante conocer los componentes para predecir y diseñar las propiedades del compuesto requeridos para una aplicación particular. Esto se debe a que las propiedades varían con la cantidad y/o formulación del material base. En la Figura 5 se puede observar algunos materiales utilizados para los composites.

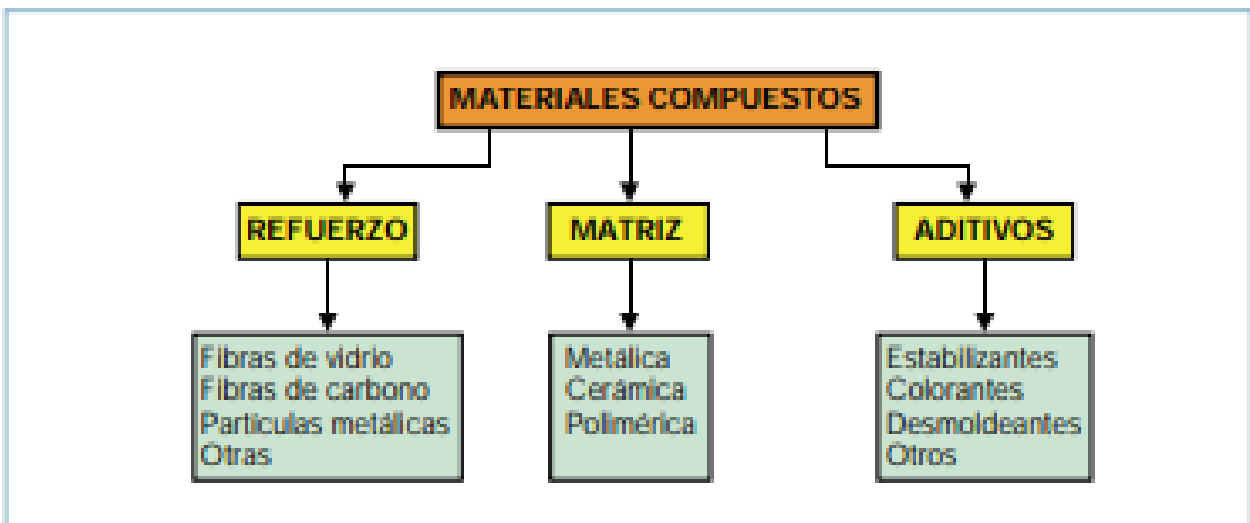


Figura 5. Constituyentes de los composites [11].

2.3 Materiales compuestos de matriz polimérica

2.3.1 La matriz polimérica

La selección de la matriz se realiza con base en criterios químicos, térmicos, eléctricos, requisitos medioambientales, costos, rendimiento y fabricación. Por ende, la selección de la matriz polimérica se diferencia entre los dos grupos (termoestables y termoplásticos). Los termoestables genera un comportamiento molecular el cual se entrecruzan las moléculas al momento del curado (Figura 6), los cuales a ciertas temperaturas provoca su descomposición [10]. En cuanto a los compuestos de matriz termoplástica tienen una configuración molecular lineal y ramificada como se muestra en la Figura 7, lo que permite que las piezas se puedan fabricar y unir mediante calentamiento, es decir, se puede hacer reprocesamiento lo que permite reciclar [6].

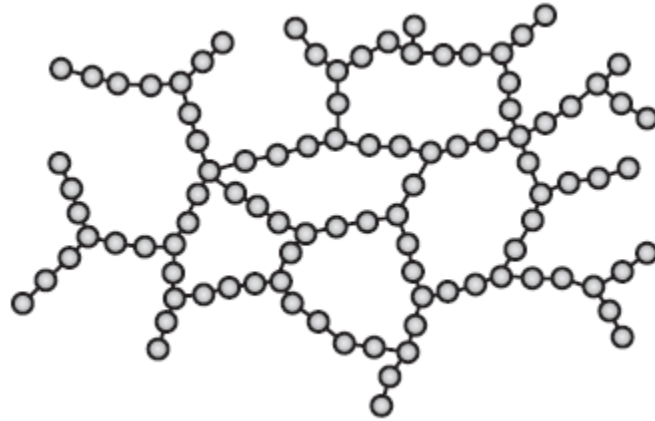


Figura 6. Entrecruzamiento en red de moléculas [9]

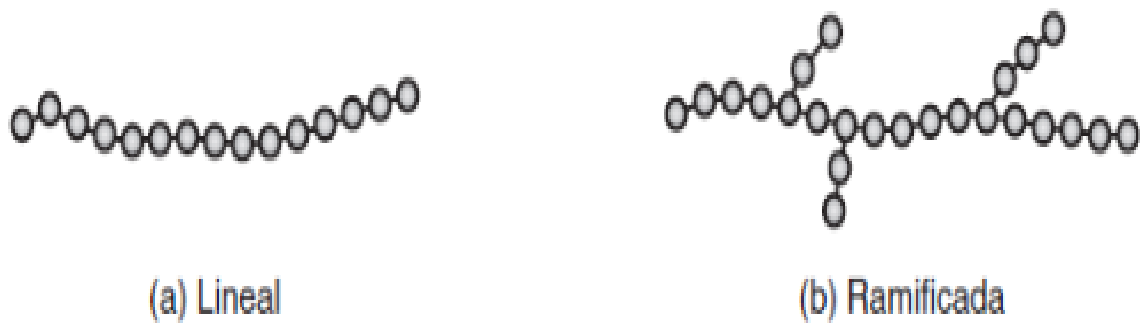


Figura 7. Diferentes configuraciones de cadenas moleculares: (a) lineal, (b) ramificada [9].

2.3.2 Fibras como refuerzo

En la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica, los refuerzos más comunes son los whiskers, las partículas y fibras, entre otros. Estas últimas se dividen en fibras naturales y fibras sintéticas. La mayoría de los materiales compuestos convencionales son reforzados por fibras sintéticas las cuales se obtienen de procesos químicos y/o productos derivados del petróleo, como la fibra de vidrio, carbono, aramida, y demás: En la **Tabla 1** se hace una comparación de los tipos de fibras sintéticas y sus aplicaciones en la industria.

Tabla 1. Comparación entre los diferentes tipos de fibras sintéticas de refuerzo [11]

	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
<i>VIDRIO</i>	Buena relación peso/prestaciones mecánicas Facilidad de aplicación	Elevadas prestaciones mecánicas específicas	Automoción Construcción Aeronáutica
<i>CARBONO</i>	Excelente resistencia a la rotura en tracción y compresión Buena resistencia a la humedad	Precio elevado Escasa resistencia al choque	Aeronáutica Automoción Biomecánica Deporte
<i>ARAMIDA</i>	Buen comportamiento al choque Buena resistencia a la humedad	Baja resistencia a la compresión	Automoción Construcción
<i>BORO</i>	Elasticidad elevada Buen comportamiento al choque	Dificultad de utilización	Aeronáutica militar

Las fibras naturales son materiales fibrosos que se obtienen de fuentes naturales, como se muestra en la Figura 8, cuyo origen es lignocelulósicas, animales y minerales. Además, poseen propiedades específicas únicas, que, por sus características físicas, químicas y mecánicas (ver **Tabla 2**) tienen aplicaciones muy diversas. Asimismo, las fibras naturales se caracterizan por ser biodegradables y renovables, siendo una opción sostenible en comparación con las fibras sintéticas. Algunas de las aplicaciones de las fibras sintéticas son: papel, telas, biocombustibles, revestimientos de puertas y baúles, respaldos de asientos, protectores interiores de techo corredizo y reposacabezas en la industria automotriz, entre otras [13].

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de algunas fibras naturales [14].

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a la ruptura (%)
Sisal	1,27-1,50	126-800	3,80-62,0	2,8-10
Coco	1,15-1,50	95-149	2,80-13,7	3,3-5,1
Yute	1,50	320-500	12,0-100	1,3-2,8
Malva	1,41	160	17,4	5,2
Ramío	1,51	393-900	7,30-25,0	1,8-5,3
Abacá	1,30	307	19,79	-

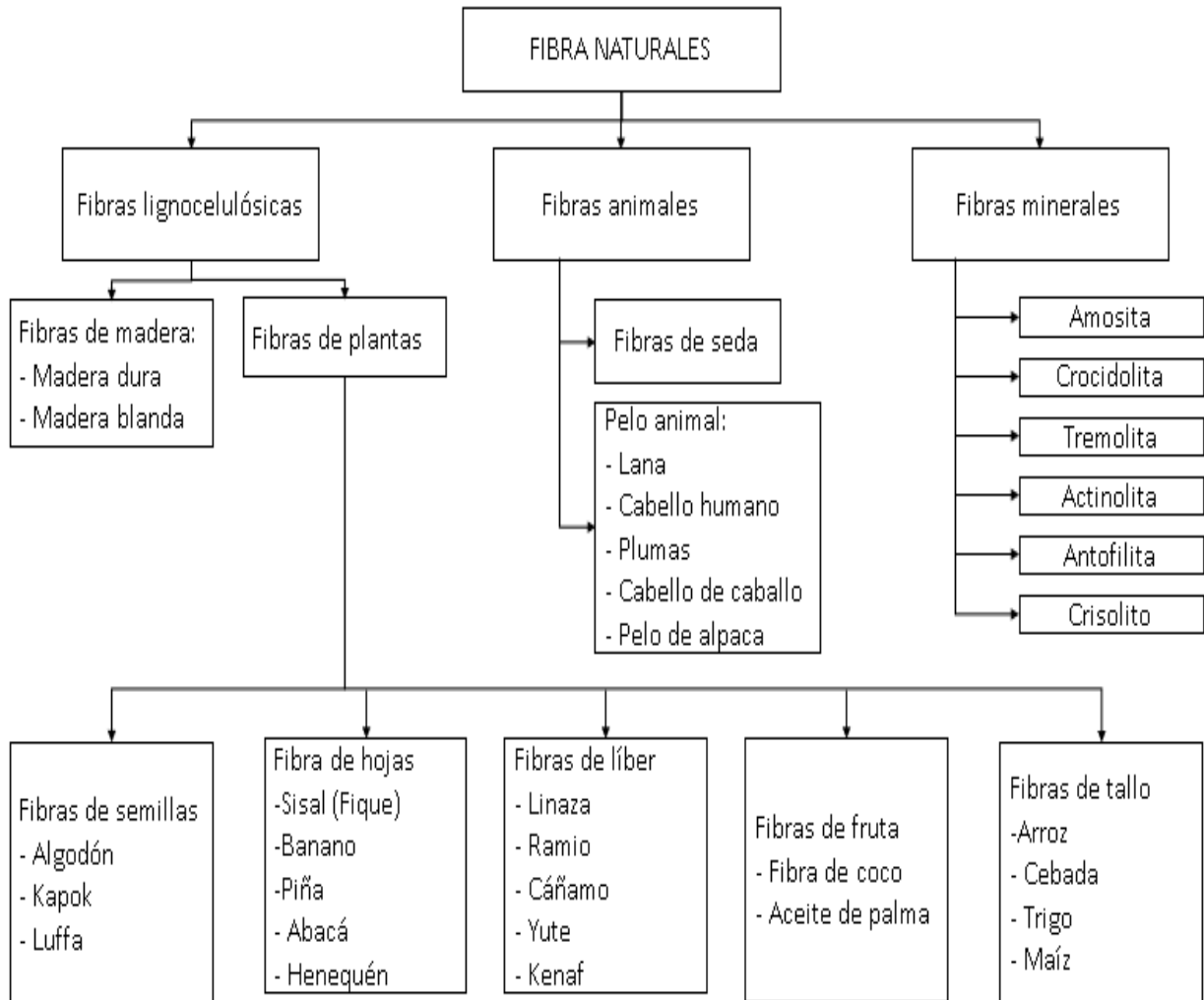


Figura 8. Clasificación de las fibras naturales [13].

Las fibras naturales basadas en plantas son de naturaleza lignocelulósica y están compuestas por celulosa, hemicelulosa y lignina, en la Figura 9 se presenta el modelo de la organización microestructural de los tres principales constituyentes estructurales de la pared celular de la fibra, en el cual, la celulosa proporciona resistencia y rigidez a la fibra. La hemicelulosa se encuentra principalmente en la pared celular primaria y la lignina es amorfa y tiene una estructura aromática [15]. La estructura de la fibra, como se muestra en la Figura 10 se compone de paredes celulares primarias y secundarias, donde la disposición de las microfibrillas de celulosa varía y sus propiedades mecánicas están influenciadas por el contenido de celulosa y el ángulo microfibrilar.

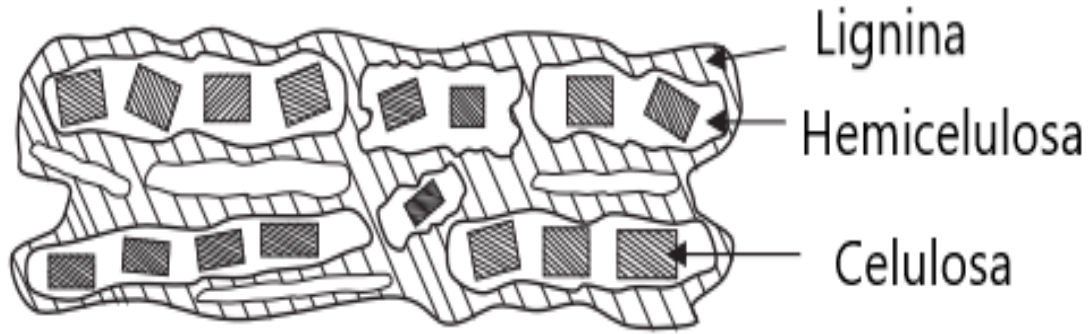


Figura 9. Microestructura de la fibra natural [15].

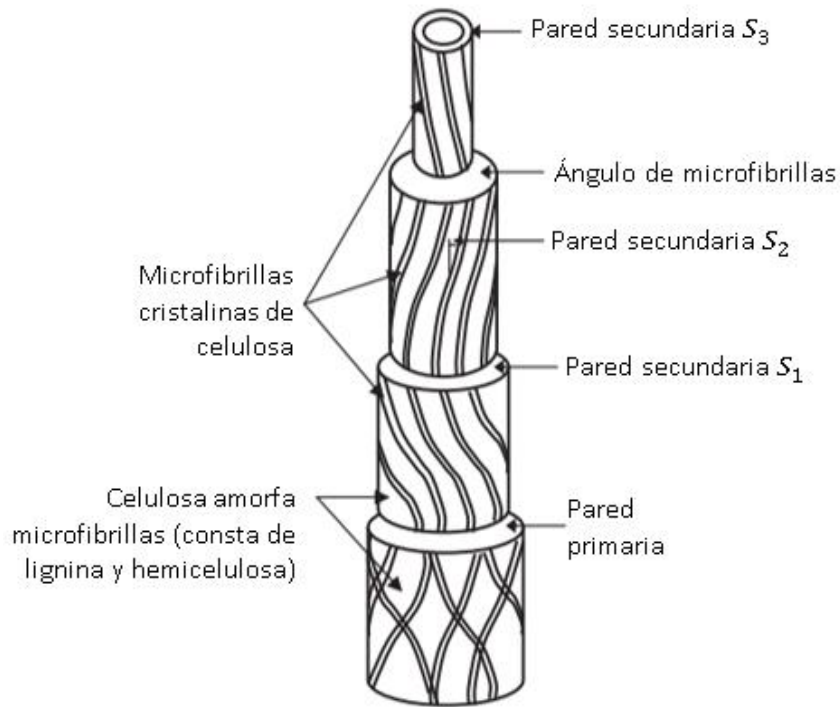


Figura 10. Estructura de la fibra natural [15].

Las fibras naturales han demostrado un gran rendimiento en materiales compuestos donde existen sólidas justificaciones para su uso, incluido el bajo costo en relación con las fibras sintéticas, la baja densidad, la buena absorción del sonido y el aislamiento térmico, entre otros. En la **Tabla 3** se hace un comparativo entre las fibras naturales y la fibra de vidrio en base a sus características. Adicionalmente, en la **Tabla 4** se enuncian las cantidades producidas comercialmente a nivel mundial en toneladas para las fibras de plantas más usada, lo que indica que este tipo de material es ampliamente utilizado en diversas industrias.

Tabla 3. Comparativo de las fibras naturales y fibra de vidrio [2].

	Fibras Naturales	Fibras de Vidrio
Densidad	Bajo	El doble de las fibras naturales
Costo	Bajo	Bajo, pero más alto que el de las fibras naturales
Renovabilidad	Si	No
Reciclabilidad	Si	No
Consumo de energía	Bajo	Alto
Distribución	Amplia	Amplia
Abrasión a las máquinas	No	Si
Riesgo a la salud al inhalarse	No	Si
Disposición	Biodegradable	No Biodegradable

Tabla 4. Origen y producción mundial anual de diferentes fibras naturales [5].

Fibra	Origen	Producción mundial (10^6)ton
Algodón	Semilla	18,5
Bagazo de caña de azúcar	Tallo	75
Bambú	Tallo	30
Cáñamo	Tallo	0,22
Fique	Hojas	0,36
Madera	Tallo	1750
Yute	Tallo	2,5

La fibra de fique es una fibra natural de origen vegetal también conocida como “sisal” proviene América del Sur específicamente de Colombia, Brasil, Ecuador y Venezuela. Esta fibra se destaca por su capacidad para tolerar temperaturas alrededor de 220°C sin degradarse, su naturaleza renovable, alta flexibilidad y su eficacia como aislante térmico. Además, el fique es una opción económica debido a su baja densidad en comparación con otras fibras. Sin embargo, una desventaja significativa es su alta capacidad de absorción de humedad, alrededor de un 60%, como se muestra en la

Tabla 5, lo que puede dificultar su adherencia a matrices hidrófobas en aplicaciones de refuerzo [16]. Estas características hacen que el fique sea un material atractivo y versátil para diversas industrias.

Tabla 5. Características de la fibra de fique [17].

Característica	Fique	Media
Diámetro equivalente, (mm)	0,160 – 0,420	0,240
Densidad aparente, (gr/cm ³)	0,720	----
Densidad específica, (gr/cm ³)	1,740	---
Absorción de agua, (%)	60	
Resistencia máxima a la tensión, (MPa)	43 – 571	132,400
Elongación última, (%)	9,800	
Módulo de elasticidad	8,200 – 9,100	

2.3.3 *Procesos de manufactura en NFRP*

Los métodos de manufactura para materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibras naturales presentan similitudes con los métodos usados para fibras sintéticas y convencionales. Cada técnica de fabricación requiere condiciones y herramientas específicas para la elaboración de piezas. En la

Figura 11 muestra las diversas técnicas de manufactura de materiales compuestos según el tipo de materia prima usado. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas en cuanto a procesamiento, tamaño de piezas, formas, costos asociados, etc. Y el éxito depende de seleccionar la técnica adecuada y elegir de manera acertada los parámetros de procesamiento [10].

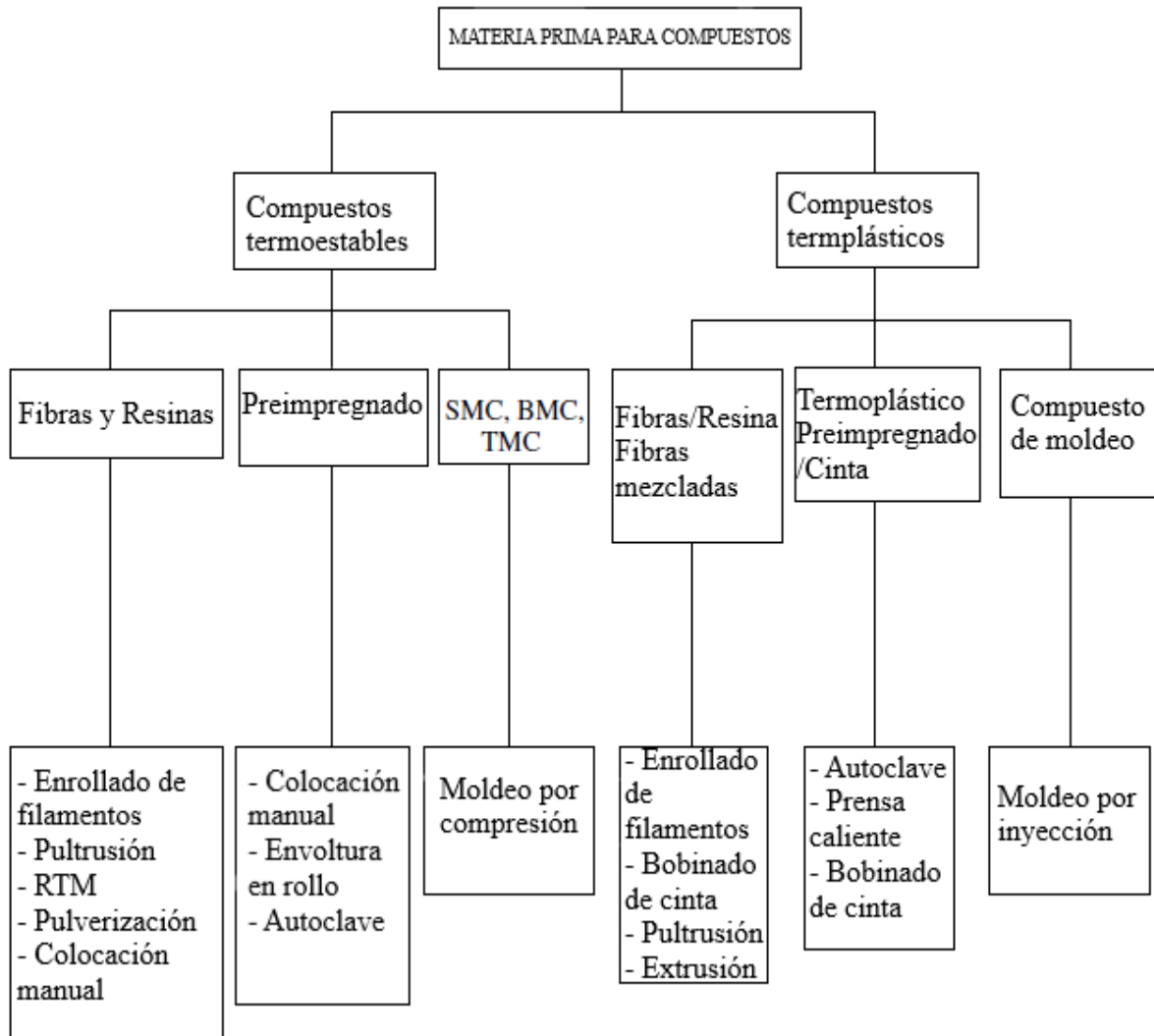


Figura 11. Clasificación de manufactura según las materias primas para compuestos [10].

Los compuestos reforzados con fibras naturales tienen la capacidad de ser elaborados mediante una amplia gama de matrices poliméricas y métodos de procesamiento. En términos generales, se pueden dividir en compuestos termoestables y compuestos termoplásticos.

Para la fabricación de los compuestos reforzados con fibras naturales son utilizados diversos métodos. A continuación, se explica brevemente algunos de estos procesos:

→ Preimpregnados (prepregs), en esta técnica, las fibras se impregnan previamente con resina y se entrega de forma de láminas o rollos listos para su uso.

→ Laminación manual, también llamado hand lay-up, es uno de los métodos más sencillos [18], donde se apilan capas de fibras y resina una encima de otra y luego se aplica presión de forma manual para eliminar el exceso de aire y garantizar una mejor distribución de la resina, como se ve en la

→ Figura 12.

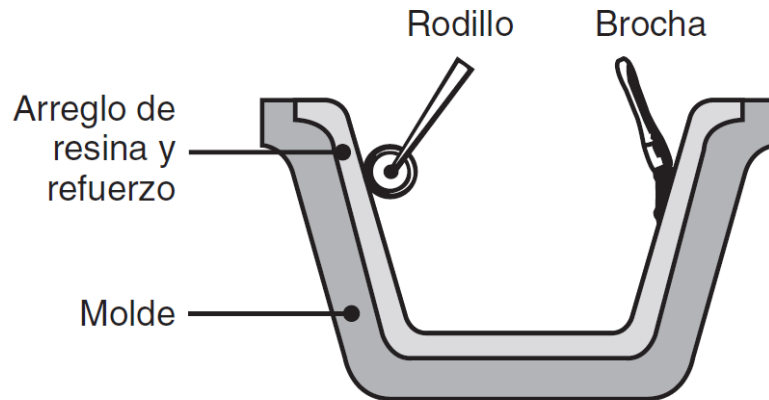


Figura 12. Método por laminación manual [9].

→ Moldeo por transferencia de resina (RTM), también conocido como moldeo por transferencia de líquido, consiste en colocar el material de refuerzo en un molde sellado, donde se inyecta la resina mediante presión permitiendo que esta fluya a través de las fibras (ver

→ Figura 13).

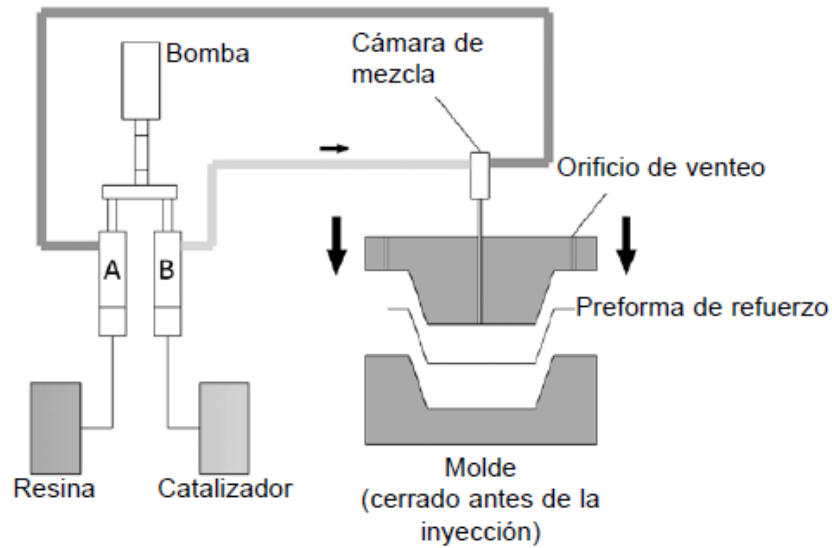


Figura 13. Esquema del proceso de RTM [18].

→ Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM), similar al RTM, en este proceso se colocan las fibras en un lado de un molde abierto y se cubre con una cubierta hermética al vacío (ver Figura 14). Luego, se aplica vacío para extraer el aire y permitir que la resina se impregne de manera uniforme en las fibras.

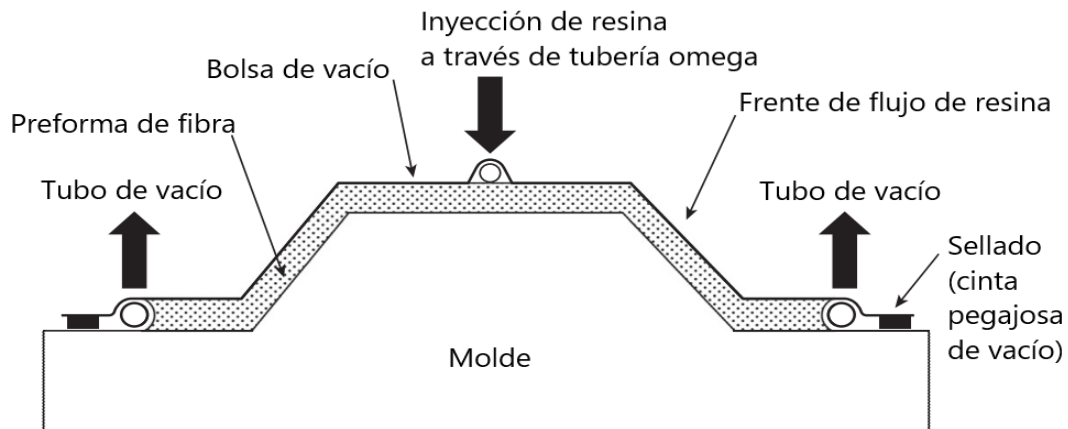


Figura 14. Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) [19].

→ Pultrusión, es un proceso continuo, automatizado práctico y asequible, se utiliza normalmente en matrices termoestables y en menor cantidad en termoplásticos para la fabricación de producciones grandes [18]. Este método consiste en impregnar las fibras del polímero pasarlo a través de una boquilla a una velocidad constante como se muestra en la Figura 15.

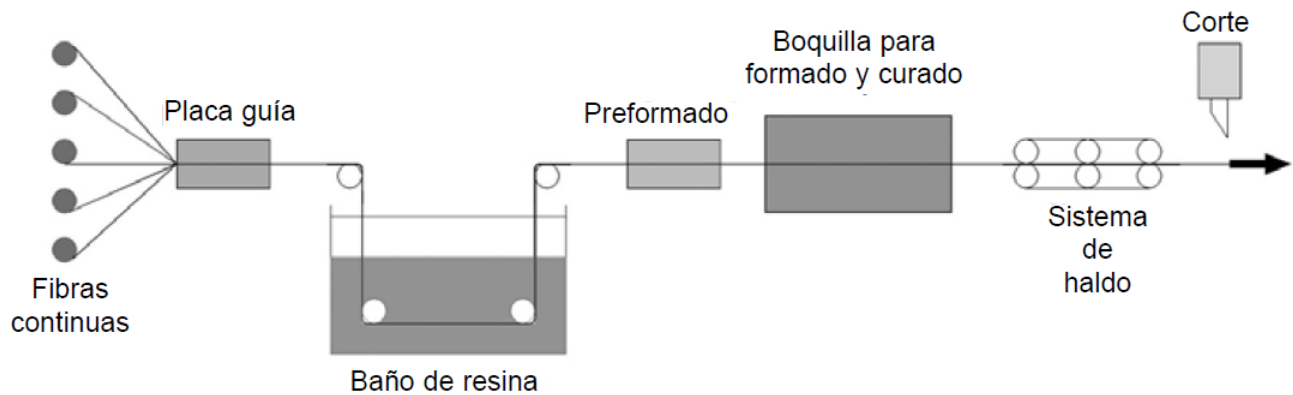


Figura 15. Proceso de conformado por pultrusión [18].

→ Moldeo por compresión, esta técnica de moldeo es utilizada en materiales termoplásticos como termoestables y radica en colocar las fibras y la resina entre dos moldes (macho-hembra) y se aplica una alta presión, y, a veces, calor para darle forma al compuesto (ver Figura 16). A medida que la resina se funde se distribuye a través de las fibras antes de enfriarse y solidificarse. Este método se emplea en la producción de piezas con un diseño simple para que la presión requerida se pueda aplicar fácilmente [18].

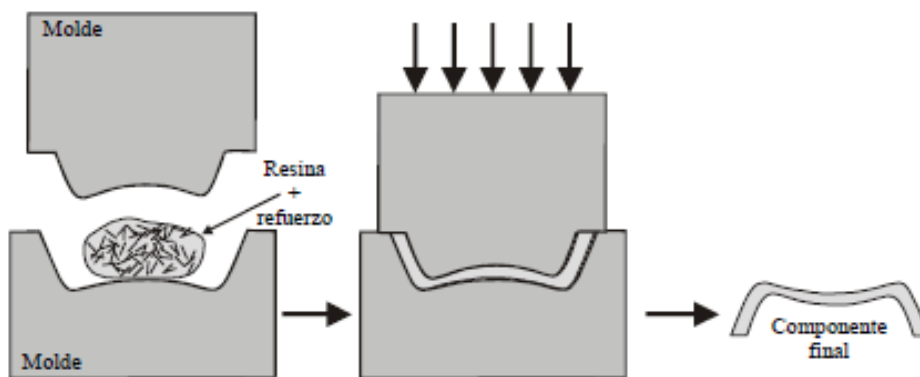


Figura 16. Moldeo por compresión [12].

→ Apilamiento de películas, también llamado “film stacking”, para la fabricación de estos compuestos se determinan parámetros de velocidad de calentamiento, presión, temperatura y tiempo de procesamiento, debido a que las fibras naturales pueden tolerar sin experimentar degradación significativa, aproximadamente a los 180-220°C, en donde empiezan a sufrir descomposición térmica [7].

Para este proceso las láminas constan de fibras impregnadas con una baja cantidad de matriz polimérica que se apilan alternadamente con la película termoplástica como se observa en la Figura 17. Luego, se compactan mediante la aplicación de calor y presión el cual debe ser suficiente para forzar al polímero fundido fluya a través de la estructura de refuerzo [6].

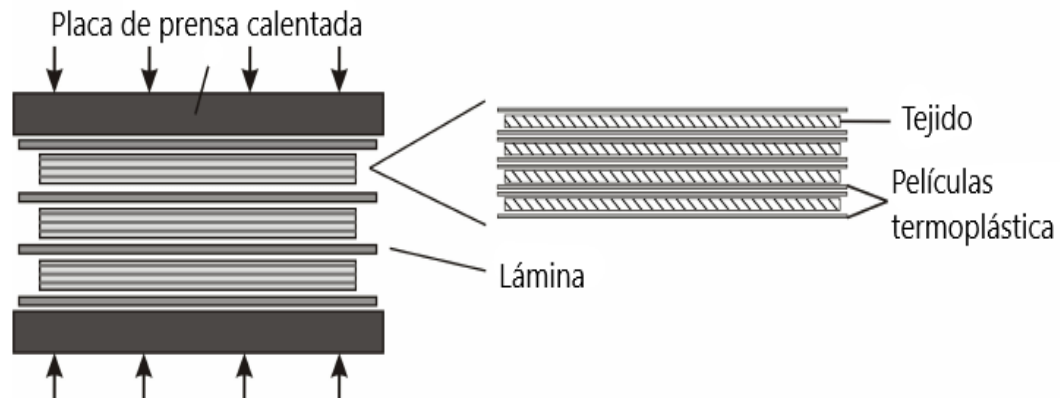


Figura 17. Proceso de apilamiento de películas para laminados compuesto termoplástico [20].

2.4 Intercara en materiales compuestos reforzados de matriz polimérica (PMCs).

La intercara, que corresponde al límite entre la fibra y la matriz (como se ilustra en la Figura 18), desempeña un papel crucial en la unión entre estos dos materiales, lo que, a su vez, garantiza el rendimiento mecánico óptimo del compuesto. Esta interfaz permite la transferencia eficiente de cargas desde la matriz hacia las fibras, donde las fibras asumen la responsabilidad de resistir estas cargas y proporcionar rigidez al material compuesto. Al mismo tiempo, la matriz cumple una función esencial al mantener la integridad estructural del compuesto, asegurando que las fibras se mantengan en la posición y orientación deseada.

En conjunto, la interfaz es un aspecto fundamental en la fabricación de materiales compuestos asegurando que el material compuesto funcione de manera efectiva y cumpla con los requisitos de resistencia y rigidez necesarios para diversas aplicaciones.

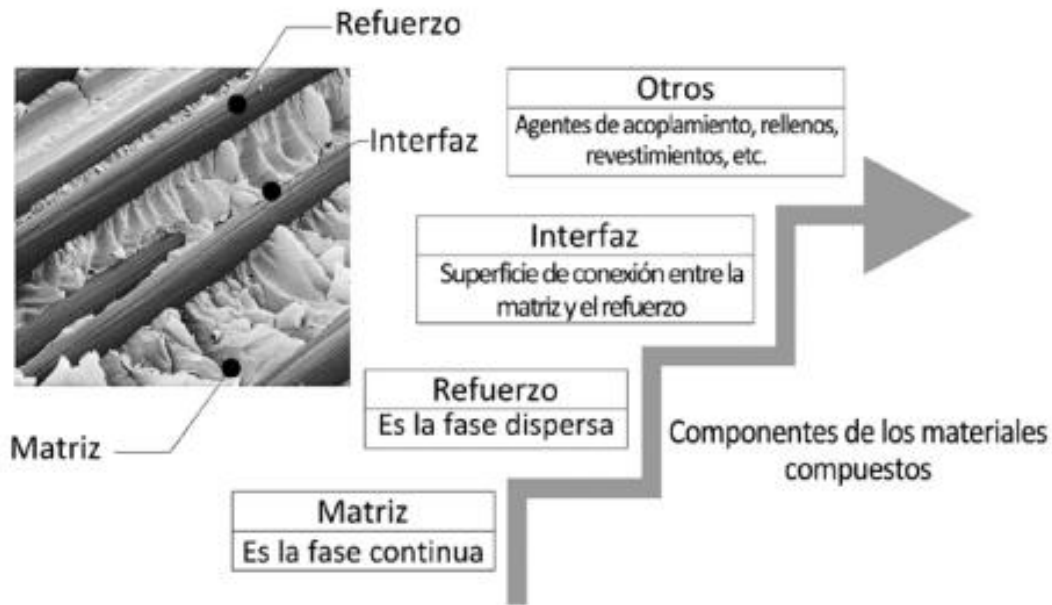


Figura 18. Componentes de los materiales compuestos reforzados con fibra [18]

Hay tres tipos principales de interacciones en la interfaz, 1) fisicoquímicas relacionadas con la humectabilidad y la compatibilidad fibra-matriz, 2) enlaces químicos y 3) enclavamiento mecánico, existen otras interacciones como enlazamiento molecular e interdifusión, entre otras [21].

2.4.1 Interacciones fisicoquímicas

Las interacciones fisicoquímicas en la interfaz de los compuestos se refieren a cómo interactúan las moléculas de la fibra y la matriz en un nivel molecular. Estas interacciones se basan en las propiedades físicas y químicas de las superficies de estos dos materiales. Están relacionadas con la mojabilidad y la compatibilidad entre la fibra y la matriz, así como la adhesión física entre ellas. Esto incluye fenómenos como las fuerzas de van der Waals, interacciones ácido-base y enlace de hidrógeno [21].

El término “mojabilidad” o “humectabilidad”, describe que tan bien se esparce un líquido sobre una superficie sólida y para su cálculo se utiliza una prueba denominada ángulo de contacto “ θ ”, donde se determina el ángulo formado entre la superficie del sólido y una gota líquida. En la

Figura 19 se muestran tres diferentes condiciones: una humectación completa, cuando $\Theta = 0^\circ$, no humectación, es $\Theta = 180^\circ$ y una humectación parcial, donde el líquido no se extenderá hasta que alcance un equilibrio de fuerzas que actúen sobre la superficie [6]. La adhesión física se expresa cuantitativamente utilizando la Ecuación 1, que se hace referencia a la ecuación de Dupré, donde W_a es el trabajo de adhesión termodinámico del líquido al sólido, γ_S es la energía de superficie del sólido, γ_L es la energía de superficie del líquido y γ_{SL} es la energía interfacial; aquí, W_a representa en enlace químico resultante de las fuerzas de dispersión intermoleculares e interacciones polares [21].

$$W_a = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL}$$

Ecuación 1

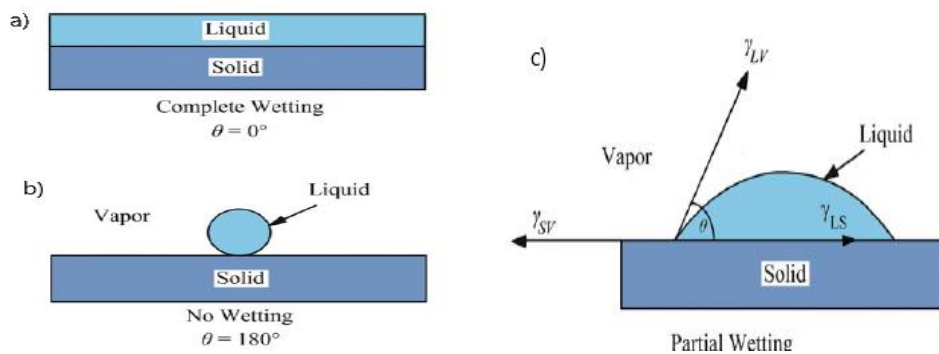


Figura 19. Tres condiciones diferentes de humectación: a) humectación completa, b) no humectación y c) humectación parcial.[6]

La adhesión en la zona interfacial de un material compuesto se puede llevar a cabo mediante pruebas mecánicas que abarcan desde la caracterización de fibras individuales hasta la evaluación de laminados completos. Para analizar la adhesión en fibras individuales, se recurre a pruebas como el ensayo de extracción (pull-out), pruebas de fragmentación simple y pruebas de microindentación. En el caso de laminados unidireccionales, se utilizan ensayos de tracción, pruebas de flexión transversal, ensayos de cortante en vigas cortas y el ensayo de cortante [21]. Estas pruebas mecánicas ofrecen una comprensión integral de la calidad de la adhesión en la zona interfacial, lo que es esencial para evaluar y mejorar el rendimiento de los materiales compuestos en diversas aplicaciones.

2.4.2 Enlace químico

El enlace químico implica la formación de enlaces covalentes entre las moléculas de la superficie de la fibra y la matriz. Estos enlaces son altamente fuertes y contribuyen significativamente a la resistencia en la interfaz. La formación de enlaces químicos depende de la composición química de la superficie de la fibra y la matriz. [21]. Por lo tanto, se pueden promover y predecir mediante tratamientos químicos de ambas fases antes de la unión.

2.4.3 Entrelazamiento mecánico

El entrelazado mecánico se ve beneficiado por la rugosidad de la superficie de las fibras como se muestra en la Figura 20. Si la matriz puede penetrar en las irregularidades de la superficie de la fibra, se crea un efecto de "anclaje" mecánico. Esto aumenta la adhesión al aumentar el área de contacto entre la fibra y la matriz. Sin embargo, si la matriz no puede llenar las irregularidades, el área de contacto se reduce y la adhesión disminuye [21]. La interfaz entre la fibra y la matriz generalmente adquiere la misma rugosidad que la superficie de la fibra en el caso de compuestos con matriz polimérica. Para lograr un contacto cercano, la matriz se recomienda que sea líquida con la capacidad de mojar la superficie de la fibra [6].

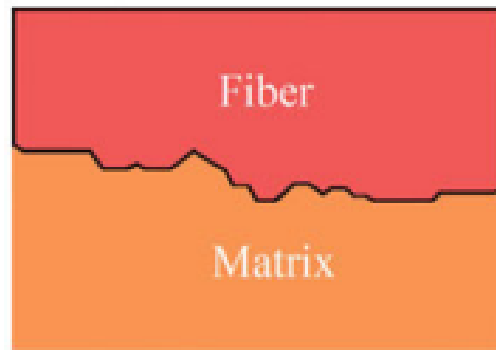


Figura 20. Una forma irregular entre fibra y matriz [6]

El efecto de la rugosidad de la superficie en la mojabilidad puede describirse en términos de la relación "r", que representa la relación entre el área real y el área proyectada de la interfaz. Por lo tanto, la relación se expresa de la siguiente manera:

$$\cos \theta_0 = r \frac{\gamma_{SV} + \gamma_{LS}}{\gamma_{LV}} \quad \text{donde, } r = \frac{A_{real}}{A_{proyectada}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Si el ángulo de contacto (θ_0) es menor que 90° , la rugosidad de la superficie mejora la mojabilidad. Por otro lado, si θ_0 es mayor que 90° , la rugosidad de la superficie reduce la mojabilidad. Si la mojabilidad es deficiente ($\theta_0 > 90^\circ$), la rugosidad superficial puede reducir el área de unión y dar lugar a la formación de huecos y posiblemente concentración de tensiones [6].

3 ESTADO DEL ARTE

En el ámbito de los materiales compuestos, se han realizado diversas investigaciones recientes relacionadas con el recubrimiento de fibras naturales para mejorar su desempeño y combatir algunas de las problemáticas del uso de fibras naturales.

Un estudio realizado en el 2018 por Liu y Tisserat [22], abordaron el problema de la absorción de agua en compuestos con fibras naturales al recubrir las fibras de lino con aceite de soja epoxidado, acrilado y polimerizable con luz ultravioleta. En este trabajo se evidenció que los materiales compuestos podrían disminuir un 30% la capacidad de absorción de agua en comparación con los materiales sin recubrimiento, y en la Figura 21 se muestran los datos de absorción de agua para las muestras no tratadas y si recubiertas con respecto a el tiempo. Adicionalmente, se pudo evaluar las propiedades mecánicas encontrando un incremento en las fibras recubierta, como se muestra en la Tabla 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

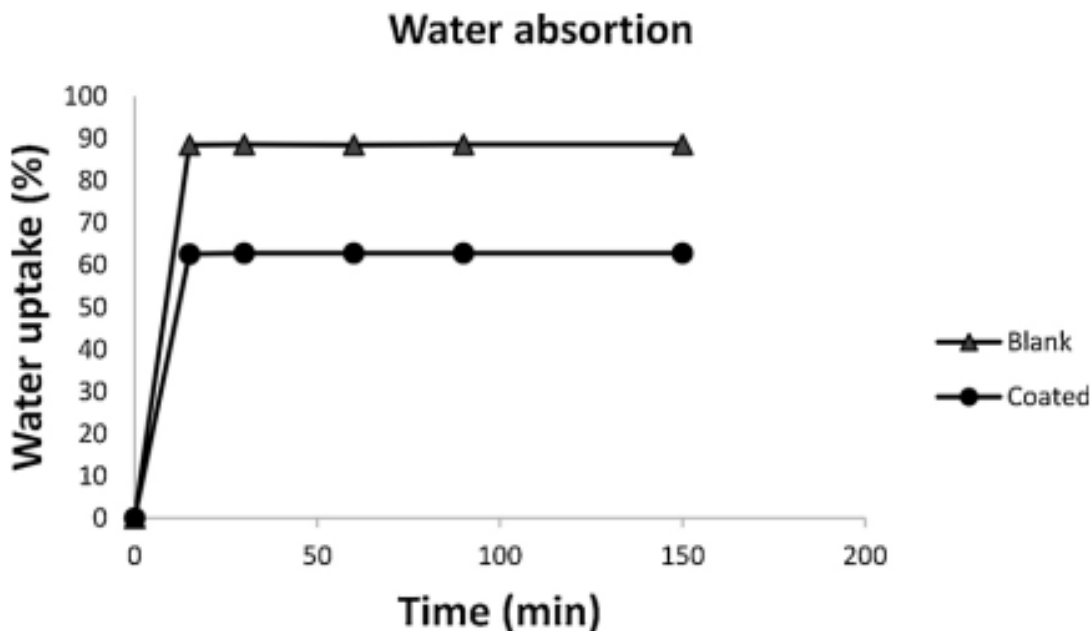


Figura 21. Porcentaje de absorción de agua durante la exposición al agua frente al tiempo para compuestos de compuestos de lino no tratados y recubiertos [22].

Tabla 6. Propiedades mecánicas del compuesto [22]

Composition	Tensile Strength (MPa) ^a	Young's Modulus (MPa)	Elongation (%)
Original Mat	0.2 ± 0.02a	0.9 ± 0.1a	29.1 ± 6.9a
Untreated Mat	12.6 ± 0.08b	274 ± 1b	20.8 ± 3.0a
Coated Mat	12.6 ± 0.11b	285 ± 1b	24.3 ± 1.5a

En otro estudio del 2019 realizado por Sudha y Arun [23], utilizaron "gel coat" aplicado con brocha en materiales compuestos fabricados con fibras de jute y resina epóxica, lo que resultó en mejoras en las propiedades mecánicas de tensión, flexión e impacto, además de mejorar su resistencia a agentes químicos.

El año 2020 Srinivasa et al. [24], expresaron que existen diversas opciones de recubrimiento protectores para los biocompuestos, que incluyen recubrimientos hidrofóbicos, recubrimientos polimerizables con luz ultravioleta, recubrimientos retardantes al fuego, "gel coats" y recubrimientos orgánicos. Adicionalmente, Shadaksharappa y Veerappa [25] indicaron que hay diferentes técnicas para la aplicación de dichos recubrimientos en este caso "gel coats" como inmersión, brocha, rodillo y spray.

Hu et al. [26] realizaron una modificación de fibras de sisal a través de un proceso de alcalinización, seguido de un recubrimiento con alcohol polivinílico (PVA) utilizando una solución al 5% en peso. Este procedimiento incluyó la inmersión de las fibras en la solución durante 30 minutos en un baño ultrasónico, seguido de un secado de las fibras recubiertas a 80°C durante 12 horas. Luego, utilizaron estas fibras recubiertas en la fabricación de materiales compuestos, donde mezclaron las fibras de sisal recubiertas, con una longitud de 6 mm, con una matriz de polietileno de alta densidad utilizando una extrusora de doble husillo para obtener pellets de material compuesto. Las muestras resultantes se inyectaron para crear probetas utilizadas en las pruebas mecánicas. Los compuestos fabricados con estas fibras recubiertas mostraron un aumento del 23% en la resistencia máxima en comparación con los compuestos no recubiertos. La Figura 22 proporciona información sobre cómo el tratamiento de la fibra de sisal y la adición de estas fibras

afectan las propiedades mecánicas del compuesto, incluida la absorción de agua, la resistencia al impacto y la resistencia a la flexión. Además, cualitativamente se observó que las fibras recubiertas mejoraron en la adhesión con la matriz polimérica, evidenciando una menor presencia de vacíos entre la fibra y la matriz, lo que indica una mejora en la adhesión entre los componentes (ver Figura 23), lo que sugiere una mayor unión entre los componentes [26].

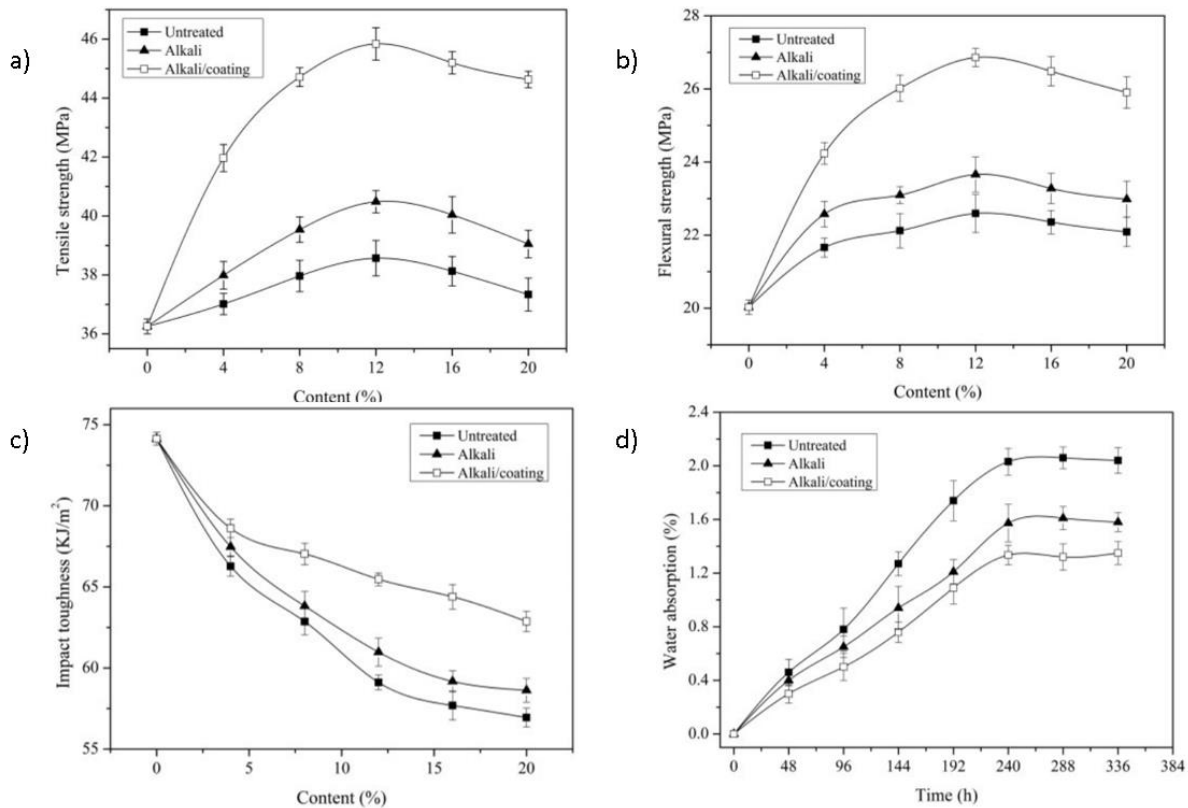


Figura 22. Propiedades mecánicas de compuesto de fibra de sisal modificada por tratamiento de recubrimiento de álcali/PVA, a) resistencia a la tracción, b) resistencia a la flexión, c) resistencia al impacto y d) absorción de agua del compuesto [26].

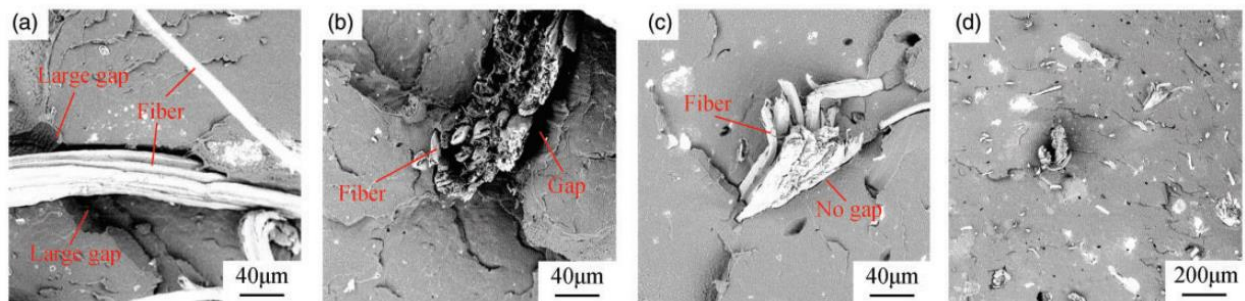


Figura 23. Zona interfacial del material compuesto en la zona de la falla [26].

Por otro lado, el equipo de Ferreira et al. [27] llevaron a cabo un proceso en el que sumergieron diversas fibras naturales en una emulsión de caucho de estireno butadieno carboxilado. La inmersión se realizó durante un período de 50 minutos, seguido de un proceso de secado de las fibras a 36°C durante 24 horas. El propósito de este procedimiento fue mejorar la adhesión entre las fibras naturales y una matriz cementicia. El recubrimiento aplicado (ver Figura 24) condujo a un aumento en la resistencia a la tensión de las fibras individuales. Esto se debió a la polimerización que ocurrió en la superficie de la fibra junto con una reducción en la presencia de poros, lo que resultó en una mayor rigidez estructural de las fibras. La disminución de porosidad también contribuyó a evitar fallos prematuros debido a la concentración de esfuerzos en defectos. Desde la perspectiva del refuerzo, el uso de fibras recubiertas produjo un incremento de aproximadamente un 50% en la resistencia al cortante interfacial. Esto se debió a que el recubrimiento redujo la absorción de agua por parte del material de refuerzo, lo que a su vez contribuyó a minimizar las variaciones dimensionales durante el proceso de curado.

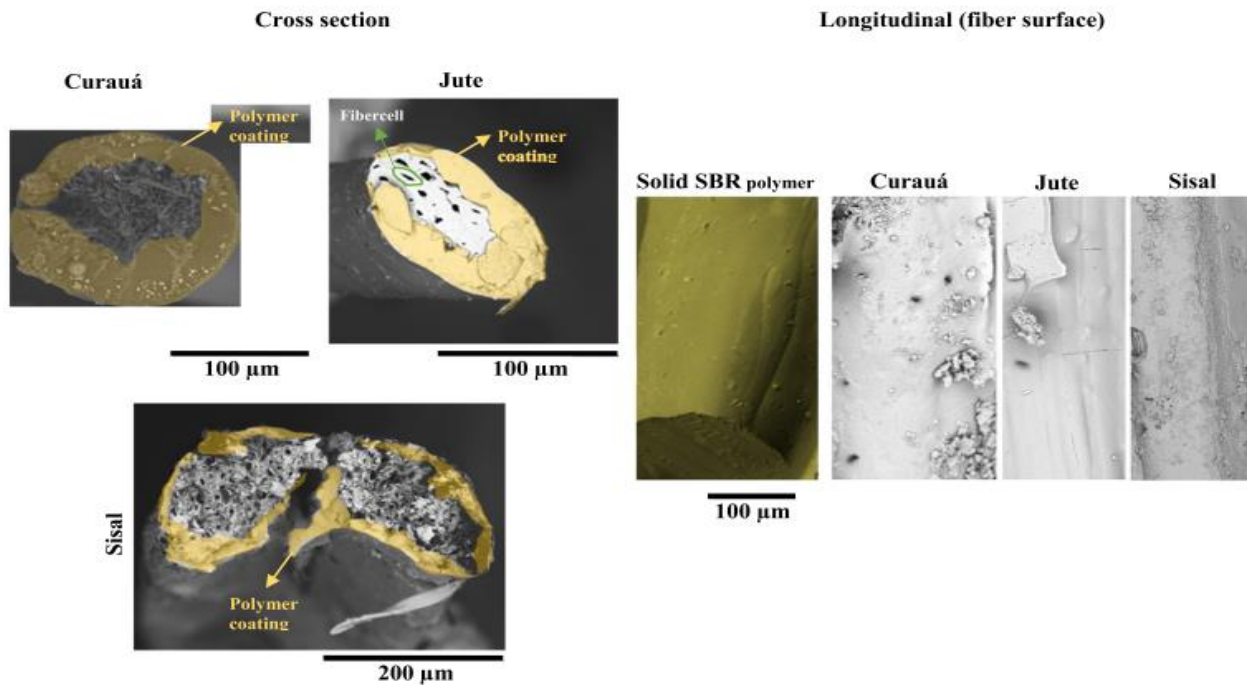


Figura 24. Diferentes fibras con recubrimiento polimérico [27].

En 2021 Sahu y Gupta [28], implementaron un enfoque ecológico al tratar las fibras con bicarbonato de sodio, seguido de un recubrimiento utilizando ácido poliláctico (PLA) diluido sobre fibras de sisal. Este proceso implicó sumergir manualmente las fibras en la solución de PLA y permitir que se secase antes de usarlas como refuerzo en una matriz epóxica. Los resultados

mecánicos demostraron mejoras significativas en la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y la dureza en comparación con los compuestos no tratados y los tratados pero no recubiertos. Además, mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), se observó una mejora cualitativa en la adhesión interfacial entre las fibras recubiertas y la matriz. Esto se debió a que las fibras tratadas tenían una mayor rugosidad superficial en comparación con las no tratadas, como se puede apreciar en la Figura 25.

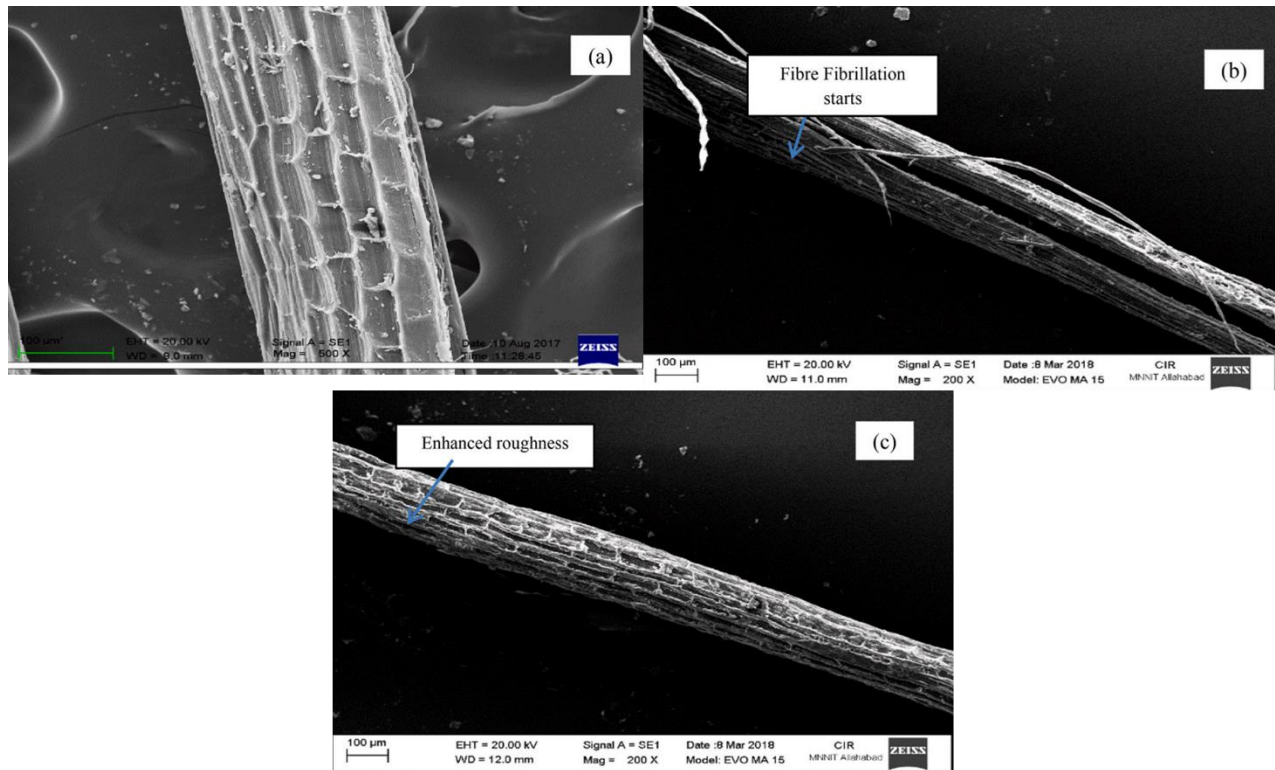


Figura 25. Micrografías SEM de fibras de sisal: a) sin tratar, b) tratadas con NaHCO_3 , y c) tratado y recubierto de PLA [28].

Auernhammer et al.[29] recubrieron fibras naturales LP (fibras de algodón) y EP (fibras de eucalipto al sulfato) con un polímero fluorescente e hidrofóbico (poliestireno-co-4-metacriloxibenzofe no co-1-pirenmetilmetacrilato) P(S-co-MABP-co-PyMA), que es un terpolímero prometedor para mejorar la hidrofobicidad de las fibras, limitando así la absorción de agua evitando la hinchazón y el debilitamiento mecánico de las fibras.

Dou et al. [30], desarrollaron un recubrimiento retardante de llama curado con luz ultravioleta (UV) que contiene Bisfenol A Epoxi Acrilato (BAEA), ácido fosfato de metacrilato de 2-hidroxietilo (PM-2) y acrilato de poliuretano (PUA) en diferentes proporciones para mejorar la

característica de retardantes de llama y las propiedades mecánicas de los compuestos de yute/polipropileno. El recubrimiento mejoró significativamente las propiedades retardantes de llama, reduciendo la velocidad de liberación de calor y la producción total de humo, y aumentando el índice de oxígeno limitante. Además, aumentó la resistencia a la flexión de los compuestos en más del 90%, como se puede ver en la Tabla 7 propiedades como resistencia a la tracción y flexión.

Tabla 7. Propiedades mecánicas de composites recubiertos de curado UV [30].

Samples	Adhesion		Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa
	Coating loss rate/%	Adhesion grade		
J-P	–	–	22.63 ± 1.40	27.43 ± 0.95
E ₁ P ₀ M ₀	92	5	25.93 ± 2.10	60.52 ± 4.00
E ₀ P ₁ M ₀	5	1	22.37 ± 1.53	35.47 ± 1.43
E ₀ P ₀ M ₁	14	2	29.74 ± 0.47	48.51 ± 2.27
E ₅ P ₅ M ₀	30	3	26.11 ± 2.49	53.97 ± 2.58
E ₅ P ₄ M ₁	28	3	27.23 ± 2.74	51.62 ± 3.85
E ₅ P ₃ M ₂	28	3	25.79 ± 2.06	48.80 ± 2.06
E ₅ P ₂ M ₃	14	2	24.00 ± 2.86	52.93 ± 4.67
E ₅ P ₁ M ₄	24	3	25.01 ± 0.64	51.29 ± 2.72
E ₅ P ₀ M ₅	36	4	24.81 ± 1.26	53.60 ± 3.09

A pesar de estos avances, existe una necesidad evidente de estandarizar los procesos de recubrimiento de fibras naturales para aprovechar plenamente su potencial en aplicaciones de materiales compuestos. La investigación en este campo continúa ofreciendo oportunidades para explorar nuevas soluciones y posibilidades de aplicación.

4 METODOLOGÍA

En la Figura 26 se proporciona una visión general y ordenada de la metodología del trabajo, desde la selección del material de recubrimiento hasta las técnicas de caracterización que se emplearon para evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales de las fibras recubiertas y el material compuesto resultante.

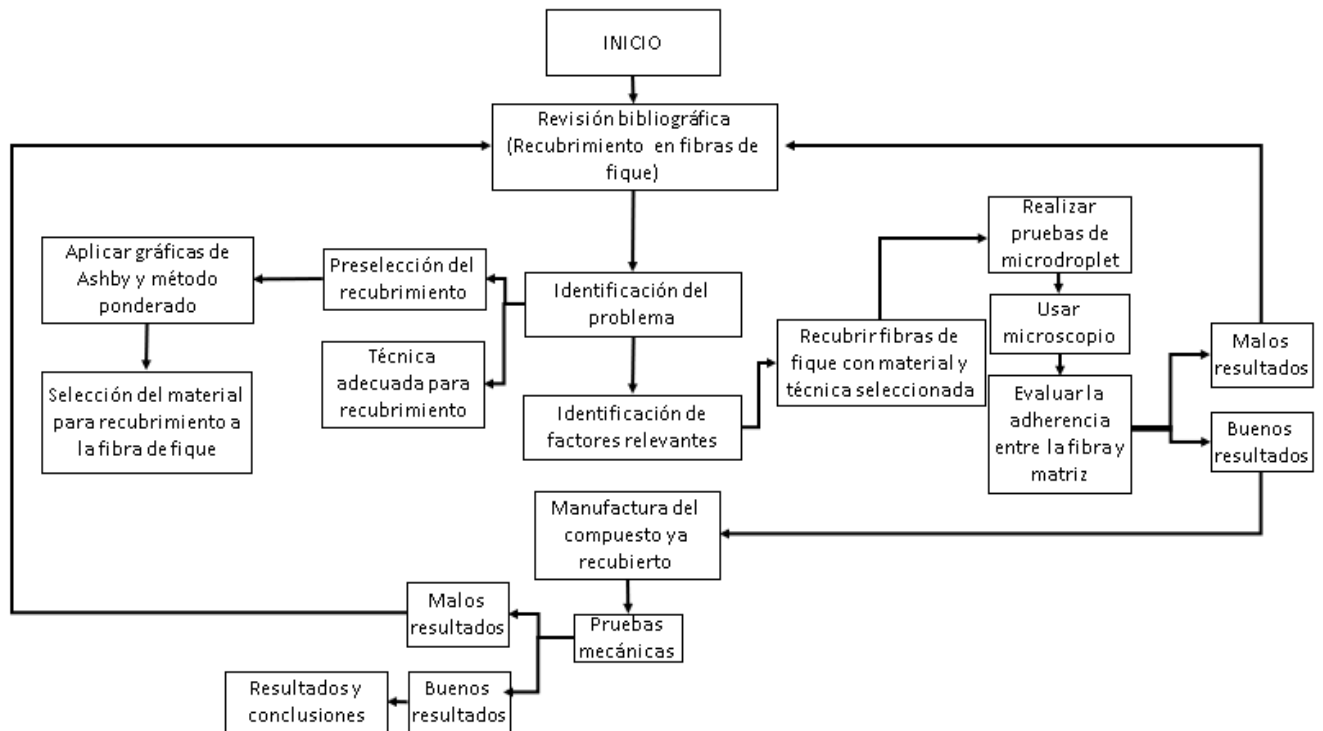


Figura 26. Diagrama metodológico del proceso.

4.1 Selección del recubrimiento

En la selección del material para el recubrimiento se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica, destacando: la alta humectabilidad de las fibras naturales y la escasa adherencia interfacial entre las fibras naturales y la matriz polimérica. Varias investigaciones [7], [15], [20], [22]–[32], han explorado diversos métodos para el recubrimiento de fibras, como el uso de polímeros, resinas, y otros materiales, además, se han utilizado técnicas de inmersión, secado y polimerización, para mejorar la adherencia interfacial y reducir la absorción de agua.

Estos enfoques han demostrado un aumento significativo en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales. La aplicación de recubrimientos poliméricos a las fibras naturales se ha convertido en una estrategia efectiva para superar el desafío de la baja adherencia interfacial en los polímeros reforzados con fibras naturales (NFRP por sus siglas en inglés). Estos recubrimientos, mejoran la interacción entre las fibras y la matriz, lo que, a su vez, resulta en un aumento de las propiedades mecánicas del compuesto debido a una transferencia más eficiente de cargas entre el refuerzo y la matriz.

Luego de llevar a cabo una minuciosa revisión bibliográfica, la búsqueda se centró en identificar el material polimérico para el recubrimiento. Para llevar a cabo este proceso, utilizamos varios métodos, que incluyeron el análisis de gráficas de Ashby con la ayuda del software Cambridge Engineering Selector (CES) Edupack (Figura 27), así como el método de ponderación. Durante la selección, tomamos en consideración múltiples propiedades relevantes para el recubrimiento como la densidad, temperatura de fusión y el Módulo de Young, entre otros.



Figura 27. Softwares utilizados para la selección del recubrimiento. Fuente: internet

4.1.1 Método de Ashby con CES Edupack

El Método de Ashby es una técnica ampliamente utilizada para llevar a cabo una evaluación preliminar de materiales con el propósito de optimizar el proceso de diseño y selección de un material para una aplicación específica. Este método permite establecer límites en las propiedades de los materiales en función de su aplicación.

El método se utiliza para maximizar las funciones de índice del material, esto resulta especialmente útil cuando se busca optimizar las características de los materiales e identificar aquellos materiales que ofrecen el mejor rendimiento en términos de propiedades. Por otro lado, en situaciones en las que existen restricciones en ciertas propiedades, se calculan puntos de referencia críticos para esas propiedades. Estos valores representan el punto en el cual un material ya no es adecuado para la aplicación, debido a que no cumple con los requisitos necesarios. De esta manera, se establecen límites claros más allá de los cuales un material no debe ser considerado [33].

Cuando se emplea la función de índice de material en el método de Ashby, se utiliza un sistema de gráficas de selección para identificar los materiales más adecuados según las propiedades requeridas para una aplicación específica. En estas gráficas (ver Figura 28), cada eje representa una propiedad que se desea evaluar, y las propiedades se encuentran delimitadas por una línea con una pendiente particular utilizando la Ecuación 3. Si el objetivo es maximizar el rendimiento, los materiales con el mejor desempeño en las propiedades requeridas se encuentran por encima de esta línea.

$$y = mx + b$$

Ecuación 3

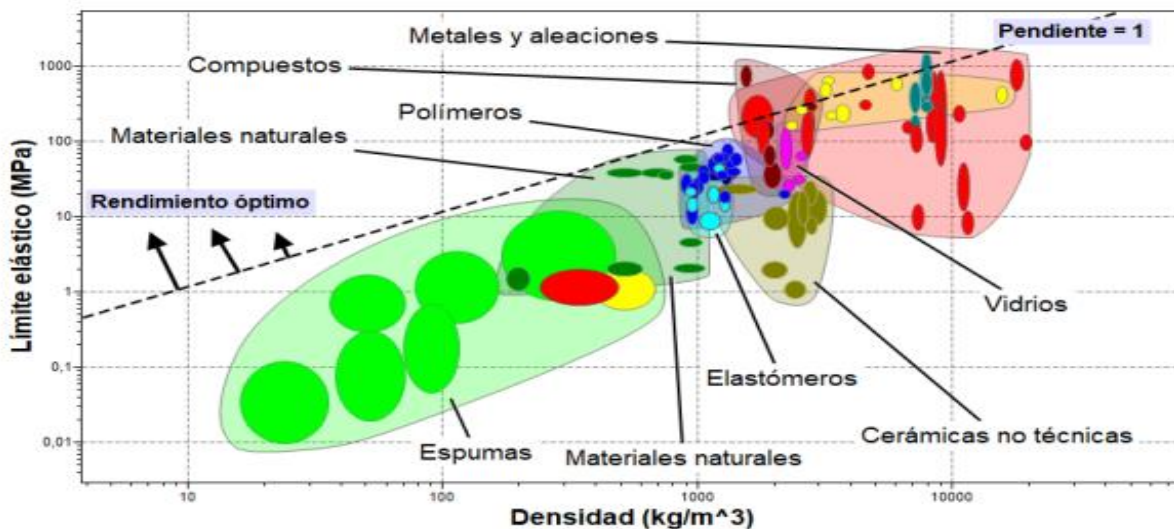


Figura 28. Diagrama de categorías de materiales en CES Edupack con orientación general para optimizar el rendimiento en la selección[33]

Para aplicar esta metodología, se utiliza el software CES Edupack, que cuenta con una extensa base de datos de 3 niveles con más de 3000 materiales ampliamente utilizados y procesos comunes en la industria [34]. El programa cuenta con tres herramientas principales: navegar, buscar y gráfico/seleccionar (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a)** . Las herramientas de navegar y buscar proporcionan acceso a una amplia variedad de materiales clasificados en categorías como cerámicos, metales y polímeros, entre otros.

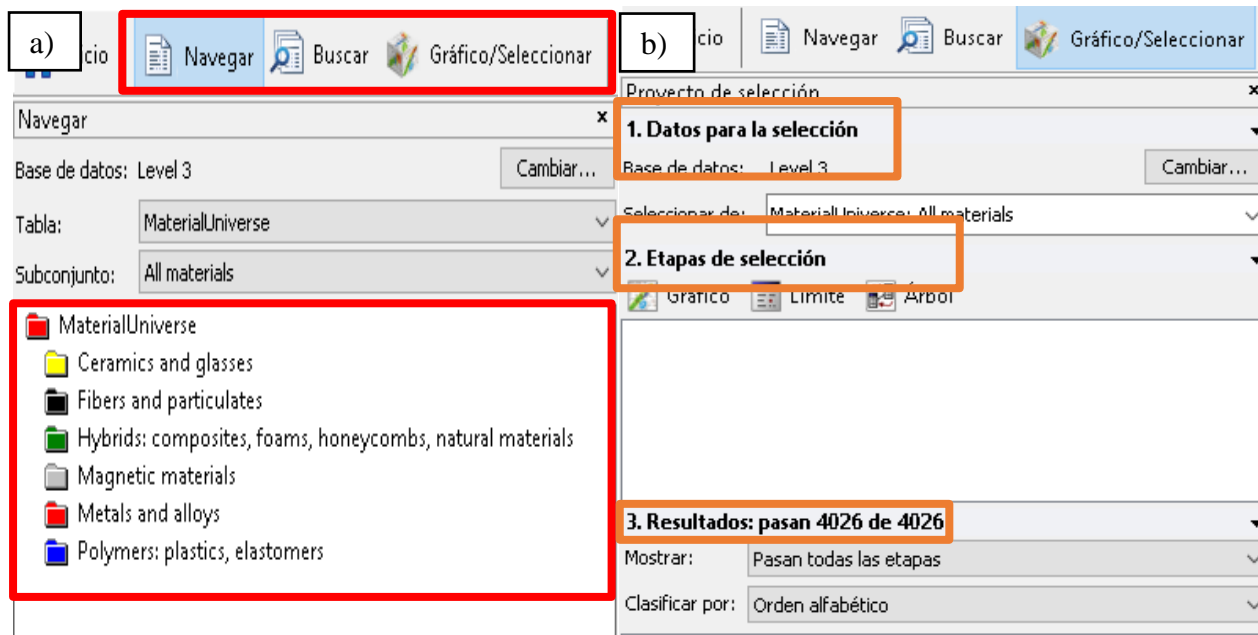


Figura 29. Captura de pantalla: a) opciones de inicio y b) proyecto de selección, de CES Edupack 2019

Por otro lado, la opción: gráfico/seleccionar se utiliza para crear proyectos de selección, donde se definen parámetros y se presenta un gráfico con materiales clasificados, lo que facilita la selección en tres pasos: datos para la selección (base de datos, depende del nivel que se elija si es 1, 2 o 3), etapas de selección (gráfico, límite, árbol); y resultados, como se muestra en la Figura 29b.

En las “etapas de selección”, los materiales se filtran y clasifican. Es aquí donde se determinan las propiedades y se establecen los límites o rangos de análisis para disminuir los resultados. Este proceso facilita la selección de materiales apropiado para el proyecto.

4.1.2 Método ponderado

El método ponderado es una estrategia útil en la selección de materiales, puesto que permite una elección rápida al asignar ponderaciones a diversas propiedades según su importancia. Estas ponderaciones desempeñan un papel fundamental al evaluar y comparar diferentes materiales y determinar cuál es el más adecuado para satisfacer los requisitos del proyecto.

En el proceso de selección de materiales, se identifican las propiedades más relevantes para la aplicación en cuestión. Luego, se asignan ponderaciones a cada una de estas propiedades. Estas ponderaciones se expresan en términos de porcentaje, reflejando su importancia, como se muestra en la **Tabla 8**. Una vez que se han asignado las ponderaciones, se evalúan los diferentes materiales en función de estas propiedades y ponderaciones. El material que obtenga la puntuación más alta se considera la opción óptima para la aplicación, puesto que cumple de manera más efectiva con los requisitos específicos, teniendo en cuenta las ponderaciones asignadas a cada propiedad.

Tabla 8. Selección de material por método de ponderación.

Criterio (Propiedad)	Unidades	Importancia	Peso (%)
Módulo de elasticidad	Pa	5	30
Densidad (ρ)	[kg/m ³]	3	20
Resistencia a la tracción	Pa	1	10
Módulo de cizalladura	Pa	2	15
Temperatura de fusión	°C	4	25

Nota: De 1 a 5 [1 menos importante - 5 más importante]

4.2 Materiales utilizados para el recubrimiento

A continuación, se presentan los materiales que se utilizaron para el recubrimiento de la fibra de fique, donde se tuvieron en consideración su bajo costo, peso y facilidad de manejo.

4.2.1 Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es ampliamente apreciado en la industria debido a su conjunto de propiedades excepcionales, que incluyen su naturaleza semirrígida, translucidez, alta resistencia química, durabilidad, y alta resistencia al estrés por flexión. Además, es un material resistente y duradero que posee un alto punto de ablandamiento, lo que lo hace capaz de soportar elevadas temperaturas de hasta 170°C, exhibe baja absorción de agua, buena conductividad eléctrica, es ligero, dimensionalmente estable y ofrece una notable resistencia al impacto sin ser tóxico [35].

Sin embargo, debido a su naturaleza termoplástica y su temperatura de fusión, a veces puede resultar desafiante recubrir las fibras de fique con polipropileno ya que estas solo pueden tolerar máximo 180°C. Para abordar este desafío, se ha empleado el uso de xilol como disolvente (ver Figura 30) , lo que contribuye a reducir la temperatura de fusión del PP. Es importante destacar que esta modificación puede tener un impacto en algunas de las propiedades del polímero y debe considerarse cuidadosamente al tomar decisiones en el proceso.

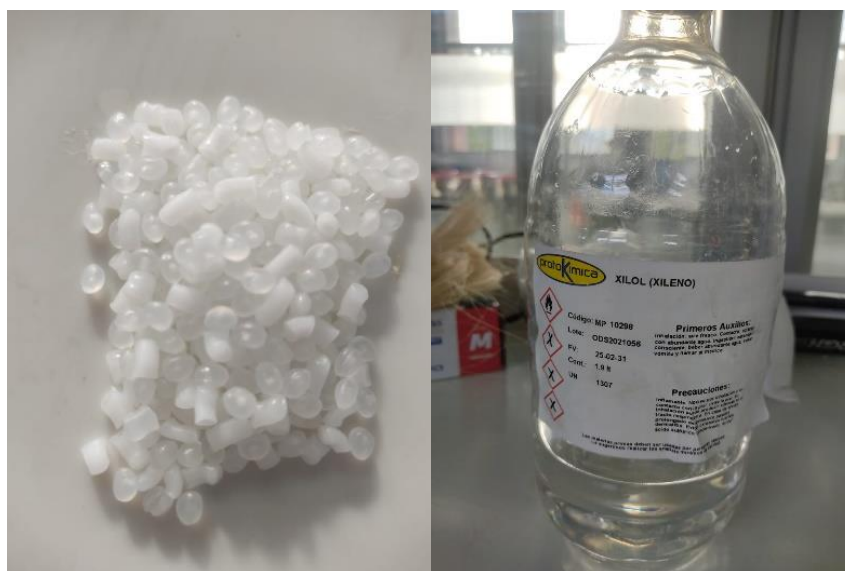


Figura 30. Pellets de polipropileno y Xilol

4.2.2 Alcohol polivinílico (PVA)

El alcohol polivinílico (ver Figura 31) es un polímero soluble en agua que actúa como emulsionante y adhesivo, y es resistente al aceite y a las grasas. Es inodoro, no tóxico y presenta alta resistencia y flexibilidad. Aunque su desempeño puede variar con la humedad, ya que absorbe agua, lo que lo hace menos resistente pero más elástico [36].

Este material es biodegradable y se disuelve rápidamente, su punto de fusión varía según su grado de hidrólisis y se descompone a altas temperaturas [37].



Figura 31.PVA de Sumiglas S.A.

4.3 Procedimiento experimental

Para llevar a cabo el procedimiento se propusieron las siguientes etapas: secado de la fibra, preparación de los polímero y aplicación de la técnica de recubrimiento. Estas etapas se describen a continuación para proporcionar una visión general del proceso.

4.3.1 Secado de la fibra de fique y almacenamiento de la fibra

La etapa inicial de nuestro proceso se centra en el secado de las fibras de fique, esta etapa es fundamental debido a la naturaleza hidrofílica de la fibra. Para llevar a cabo este proceso, las fibras se someten a un proceso de peinado para eliminar impurezas, así como fibras cortas y quebradizas. Luego, se procedió a introducir en los hornos o muflas, donde se elevó la temperatura a 80°C y manteniéndola durante un período de 3 horas. Esta fase garantiza un completo secado de las fibras, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Una vez completado el secado, es necesario almacenar adecuadamente las fibras para evitar la absorción de humedad y para ellos se empleó un disecador que contiene una cantidad de sílica con índice de cobalto, que permite que la fibra se encuentre en un ambiente libre de humedad, y en caso de ser manipulada la sílica absorba la humedad, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Además del disecador, se dispuso de otro recipiente para almacenar las muestras.



Figura 32. Secado de las fibras de fique.



Figura 33. Almacenamiento de las fibras.

4.3.2 Preparación de los polímeros (PP y PVA)

En la segunda parte del procedimiento, se realizó la preparación de los polímeros que se usarán como material de recubrimiento. Dado que el PVA es comprado en estado líquido por el fabricante Sumiglas S.A, nuestro enfoque se centró en la dilución del PP.

En la Figura 34 se muestra el proceso de dilución del PP, donde se usó el Xilol como disolvente con el fin de reducir la temperatura fusión del PP, y lograr la adecuada consistencia para su aplicación sin que afecte térmicamente a la fibra de fique. La proporción utilizada fue de 1 gramo(gr) de PP más 10 mililitros(ml) de Xilol.

Para facilitar la dilución, se empleó un agitador magnético con control de temperatura. El proceso de agitación se llevó a cabo durante un período de tiempo entre 45 minutos(min) a 1 hora(h), manteniendo una temperatura constante de alrededor 120°C con un porcentaje de calentamiento del 40%. Durante el calentamiento, se mantuvo un movimiento constante a una velocidad mínima (agitación magnética). Esta preparación permitió reducir su punto de fusión, lo que fue esencial para el proceso de recubrimiento.

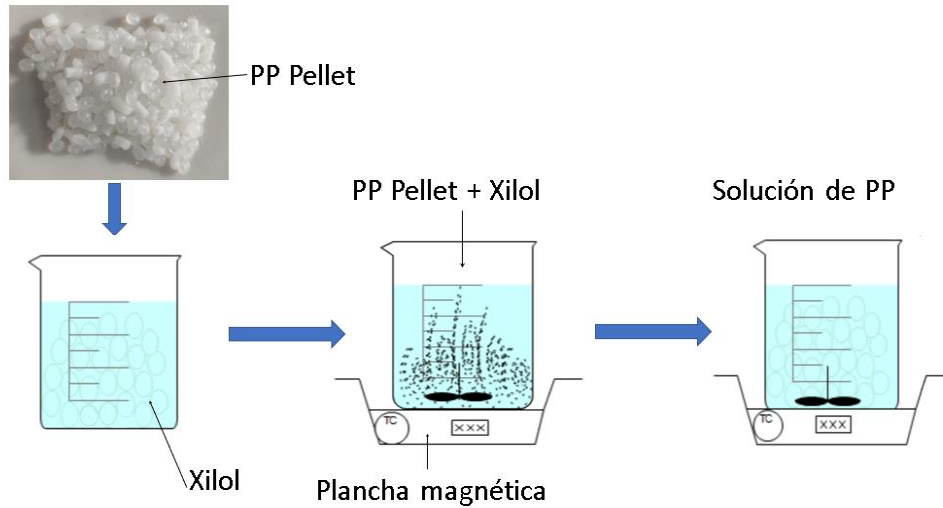


Figura 34. Diagrama de dilución de PP.

4.3.3 Técnica de recubrimiento por inmersión

En la fase final del proceso experimental se centró en la aplicación del recubrimiento sobre la fibra de fique mediante la técnica de inmersión. En este proceso, la fibra se sumergió en la solución de PVA y PP preparadas previamente, donde se empleó el sistema de inmersión (ver

Figura 35) en la Institución Universitaria Pascual Bravo en alianza con la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

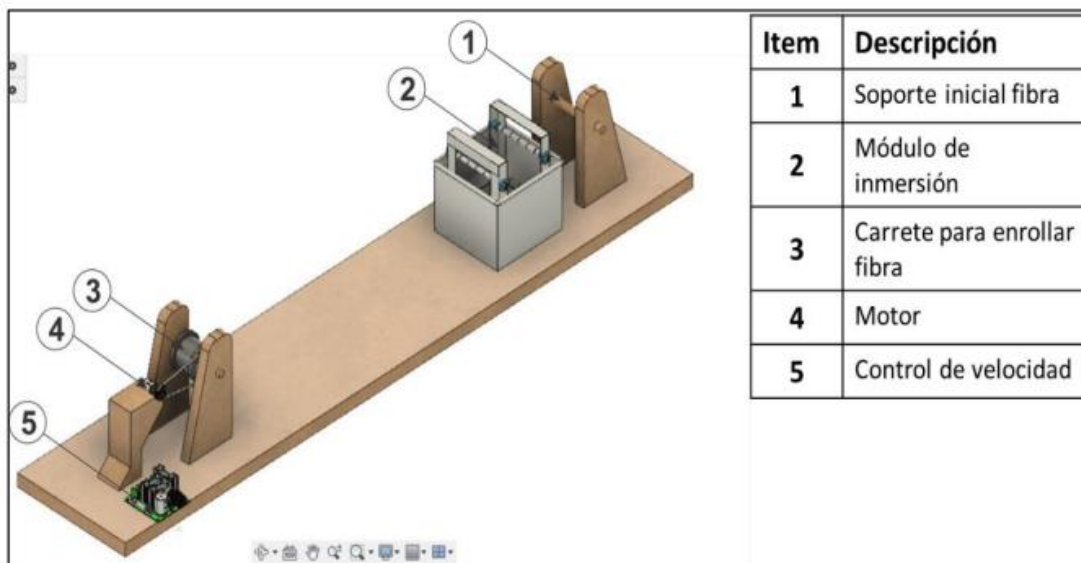


Figura 35. Diseño de sistema para realizar la técnica de inmersión [37].

El sistema de inmersión empleado para este proceso consta de cuatro rodillos con muescas dispuestas de manera estratégica, como se muestra en la Figura 36. Estos rodillos sirven como un mecanismo para que la fibra pase a través de la solución de recubrimiento y, al mismo tiempo, elimina el exceso de la misma. La disposición de estos rodillos permite un control preciso sobre el recubrimiento y es esencial para lograr una aplicación uniforme. Además, durante todo el proceso, se mantuvo un control estricto de dos factores fundamentales: el tiempo y la temperatura de inmersión. Estos dos parámetros son cruciales para asegurar que el recubrimiento sea consistente y cumpla con los estándares de calidad requeridos.

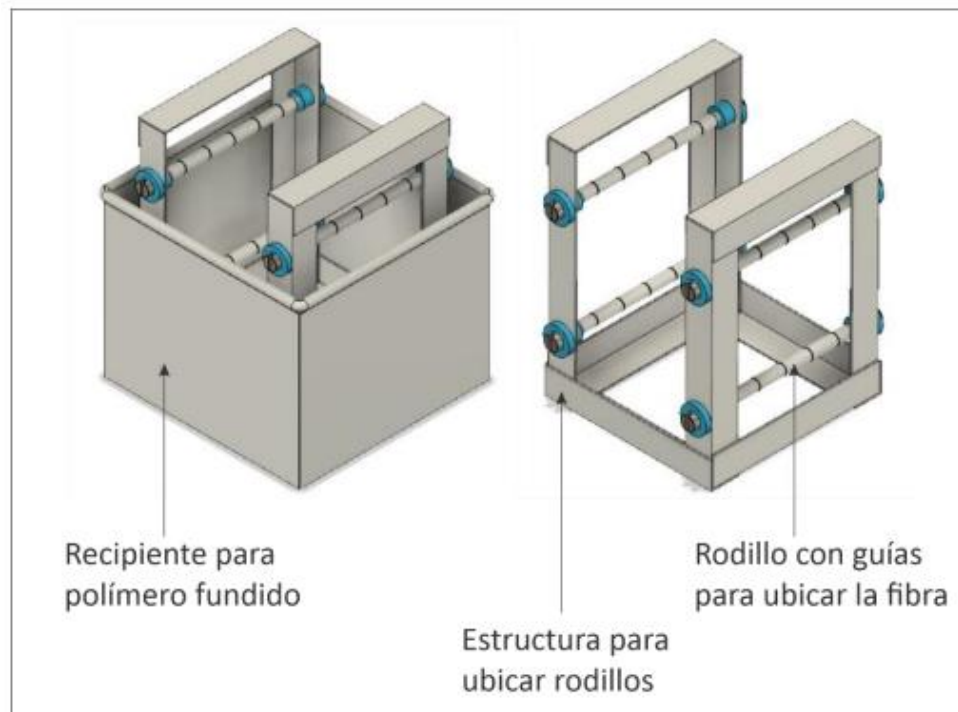


Figura 36. Montaje de sistema de recubrimiento de inmersión [37].

4.4 Caracterización mecánica y microestructural de la fibra recubierta.

En esta sección, se detallan las técnicas y métodos empleados para la caracterización microestructural de las fibras recubiertas. Para esto se usó en microscopio óptico (MO) y el microscopio electrónico de barrido (SEM). Además, se utilizaron métodos específicos, como el proceso de microdroplet, para cuantificar la resistencia al cortante interfacial de cada fibra recubierta. El objetivo es evaluar la estructura y la calidad del recubrimiento a nivel microscópico, así como la resistencia interfacial de la fibra.

4.4.1 Equipos para la caracterización mecánica y microestructural

Para evaluar el recubrimiento de la fibra, se empleó el Microscopio Óptico (MO) Nikon Eclipse LV100 (ver Figura 37), ubicado en el Laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Este equipo se utilizó para tomar medidas, como la longitud embebida de la fibra, tamaño de la fibra transversal y longitudinal, que resultaron fundamentales en el proceso de microdroplet.

Adicionalmente, se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), específicamente el modelo JEOL 5910LV (ver Figura 37), que se encuentra en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Este instrumento permitió una visualización más clara del espesor de la película termoplástica que recubre la fibra.

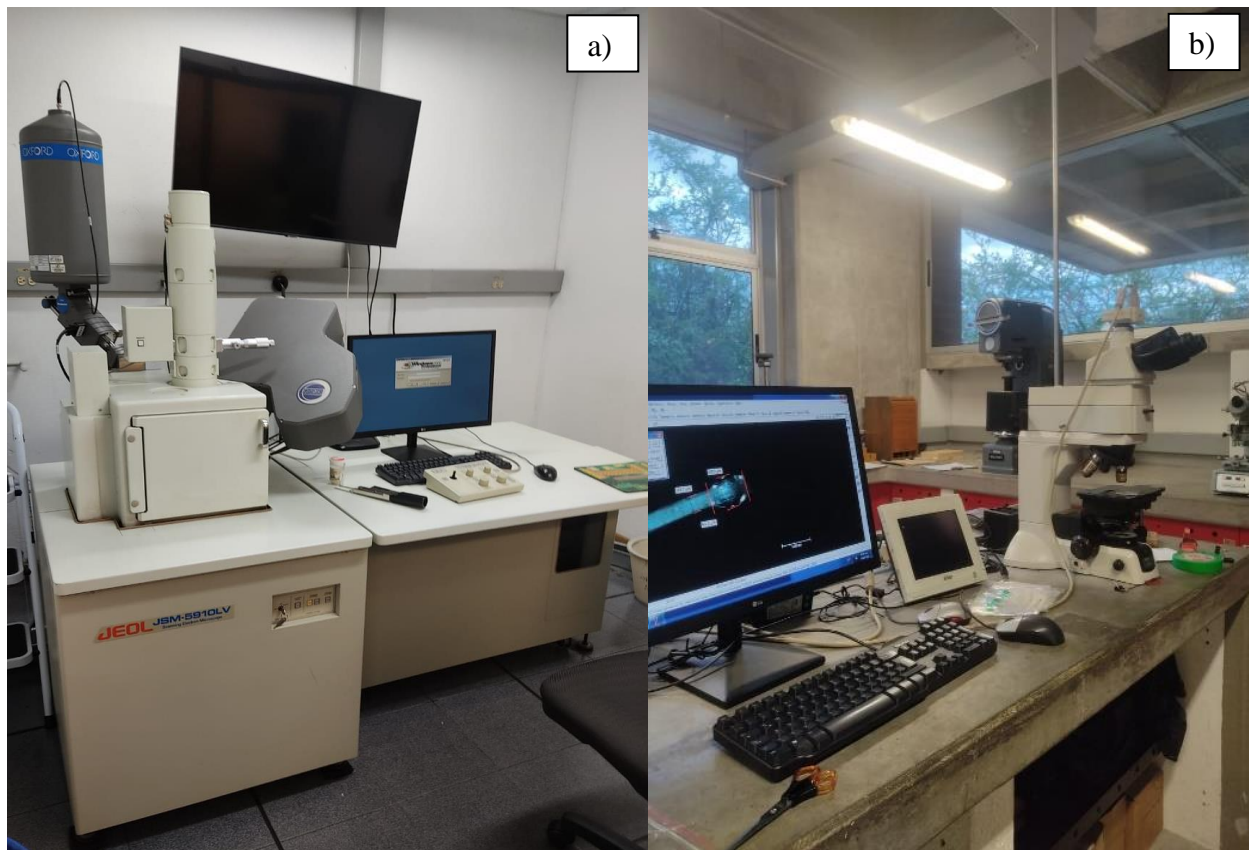


Figura 37. Equipos de microscopía: a) Microscopio electrónico de barrido (SEM), b) Microscopio óptico (MO).

Por otro lado, la caracterización mecánica se lleva a cabo en la máquina universal de ensayos modelo Shimadzu (ver Figura 38), situada en la sede de Medellín de la Universidad Nacional de Colombia. Esta máquina se emplea tanto para el ensayo de microdroplet como para los ensayos de tensión del material compuesto.



Figura 38. Máquina Universal de Ensayos.

4.4.2 Descripción del proceso para la caracterización por medio de microdroplet

La prueba de microdroplet se efectuó con el objetivo de determinar la resistencia al cortante interfacial de cada fibra recubierta, lo que proporciona información sobre la calidad de la adhesión del refuerzo a la matriz. Para llevar a cabo estas pruebas, se realizaron muestras como se observa en la Figura 39a, donde se utilizaron las fibras recubiertas por los polímeros en el sistema de inmersión. Las fibras recubiertas, con una longitud de aproximadamente de 10 a 15 cm, se le proporcionó parcialmente la resina para formar una gota.

En este proceso se usó poliéster preacelerado (ver Figura 39b). Una vez que se formó la gota, se permitió que polimerizara durante un período de 24 horas. Después, como se muestra en la Figura 40, las pruebas se sometieron a un proceso de curado a 80°C durante 3 horas para asegurar una completa polimerización.

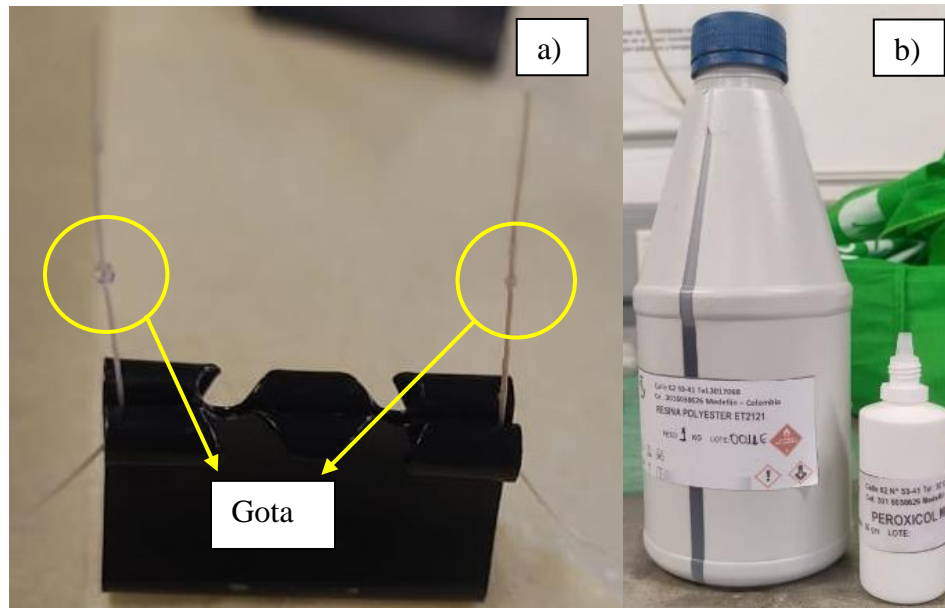


Figura 39. Proceso para aplicación de gotas para la caracterización: a) aplicación de la gota en la fibra recubierta y b) poliéster preacelerado con su respectivo catalizador.



Figura 40. Proceso de curado a la fibra con la gota.

Posteriormente, las probetas fueron examinadas bajo un microscopio óptico para determinar la longitud sumergida de la gota (L_e), así como el ancho y el diámetro aparente de la fibra. Estas mediciones se llevaron a cabo en posición longitudinal, como se ilustra en la Figura 41a, perpendicular al eje del microscopio, utilizando el software Nis Elements.

Adicionalmente, se empleó el software ImageJ para medir el área y el perímetro en la sección transversal de la fibra (P_f), como se muestra en la Figura 41b. Esta aproximación fue esencial debido a que no se pudo asumir que la sección transversal de la fibra era completamente circular, lo cual podría haber conducido a errores significativos en los análisis [38].

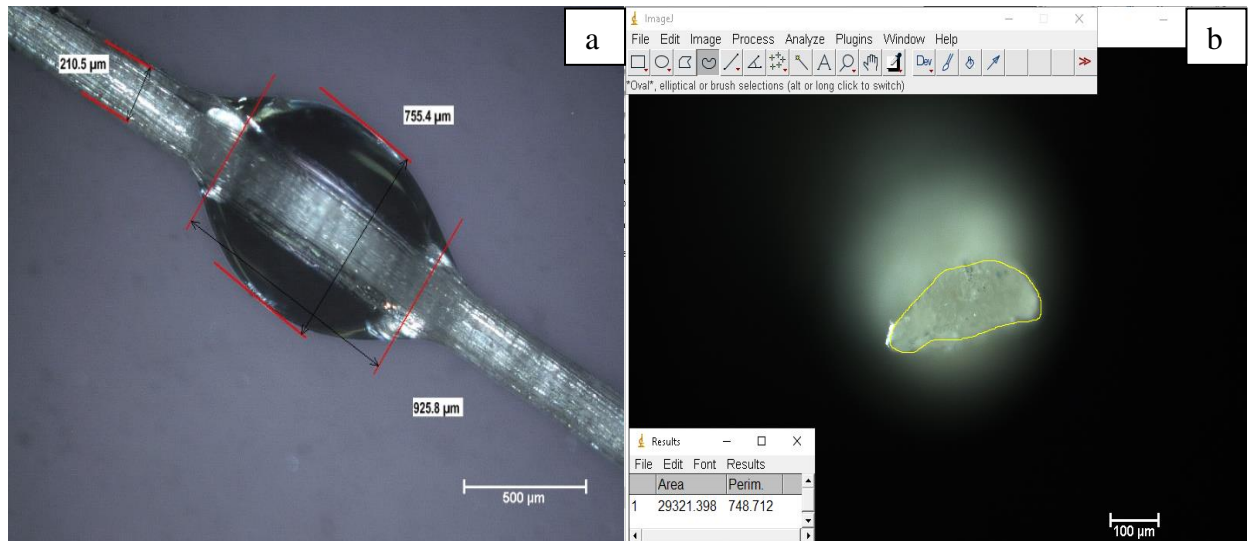


Figura 41. a) Medición del tamaño de la gota y b) medición de la sección transversal de la fibra con ayuda de ImageJ.

Se realizó la prueba de microdroplet o extracción de la fibra utilizando la máquina universal. Esta máquina, equipada con una celda de carga de 100 kN y una resolución de 0.1 N de carga, se realizaron las pruebas a una velocidad constante de 2 mm/min. Se fabricó un dispositivo para facilitar la extracción de la gota sin dañar la fibra, como se ilustra en el esquema de la Figura 42a, donde se incorporaron cuchillas que permiten retirar la gota sin afectar la fibra. Adicional, en la parte superior, se utilizó un elemento de sujeción, como se muestra en la Figura 42b, para que la mordaza pueda sujetar la fibra y se lleve a cabo la prueba de manera exitosa.

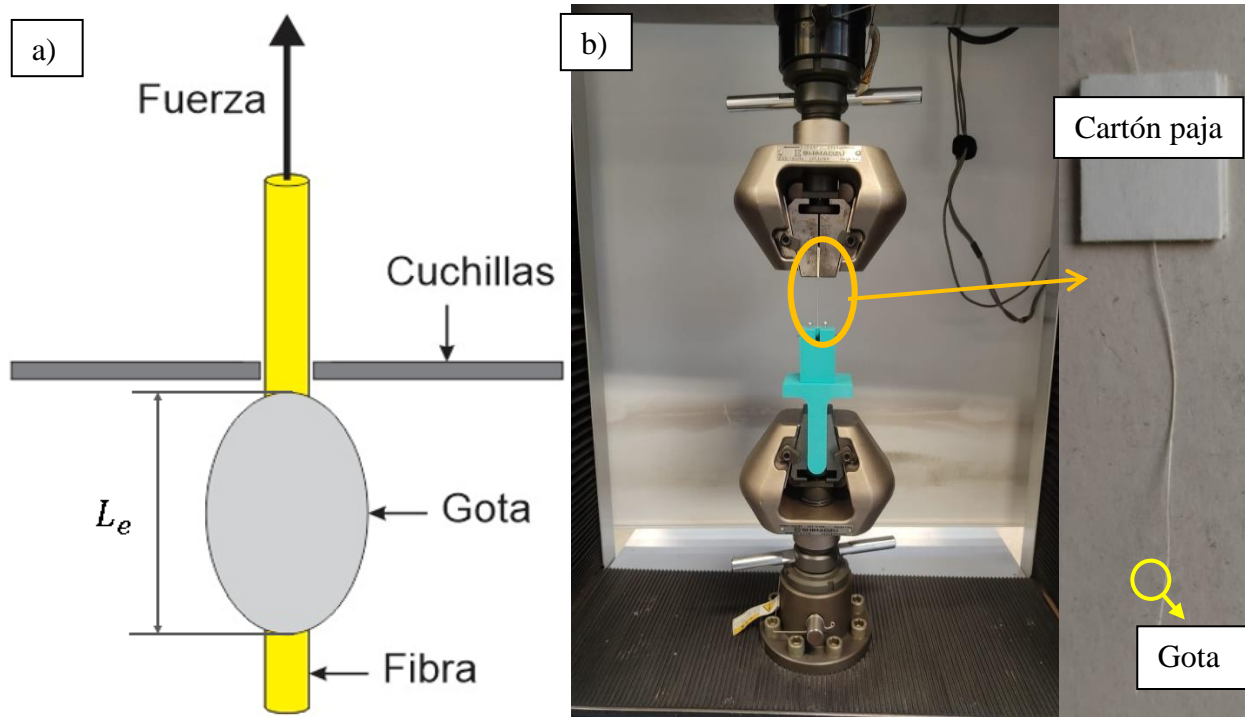


Figura 42: Ensayo de microdroplet: a) esquema; b) montaje.

Se tomaron registros de las curvas de carga-desplazamiento mediante el software Trapezium X, obteniendo así la carga máxima (F_{max}). La resistencia al cortante interfacial se calculó mediante la aplicación de la ecuación 4 [38]:

$$\tau_p = \frac{F_{max}}{P_f L_e} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- F_{max} es la carga máxima.
- P_f es el perímetro de la fibra.
- L_e es la longitud embebida de la fibra (tamaño de la gota)

Para el análisis estadístico, se seleccionaron las fibras en las cuales la extracción de la gota se realizó de manera correcta. Para garantizar una extracción precisa, se verificó en el microscopio óptico la ausencia de la gota en la fibra. Por otro lado, se descartaron las fibras que presentaron fallas, como la ruptura de la fibra, la falta de extracción de la gota o una ubicación incorrecta de esta, dado que no proporcionan datos precisos para el cálculo de la resistencia al cortante interfacial.

4.4.3 Descripción del proceso para el análisis del espesor

En el proceso de análisis del espesor, se empleó el microscopio electrónico de barrido (SEM), mencionado anteriormente, el cual permitió la obtención de imágenes de alta resolución de la sección transversal de las fibras recubiertas, permitiendo una visualización precisa del espesor termoplástico que recubre la fibra. Posteriormente, se realizó la captura de imágenes detalladas de las pruebas utilizando las herramientas y funciones especializadas del software de JEOL Scanning Electron Microscope, asociado al microscopio, seguido de la aplicación de ImageJ para la medición específica del espesor identificadas en las imágenes obtenidas.

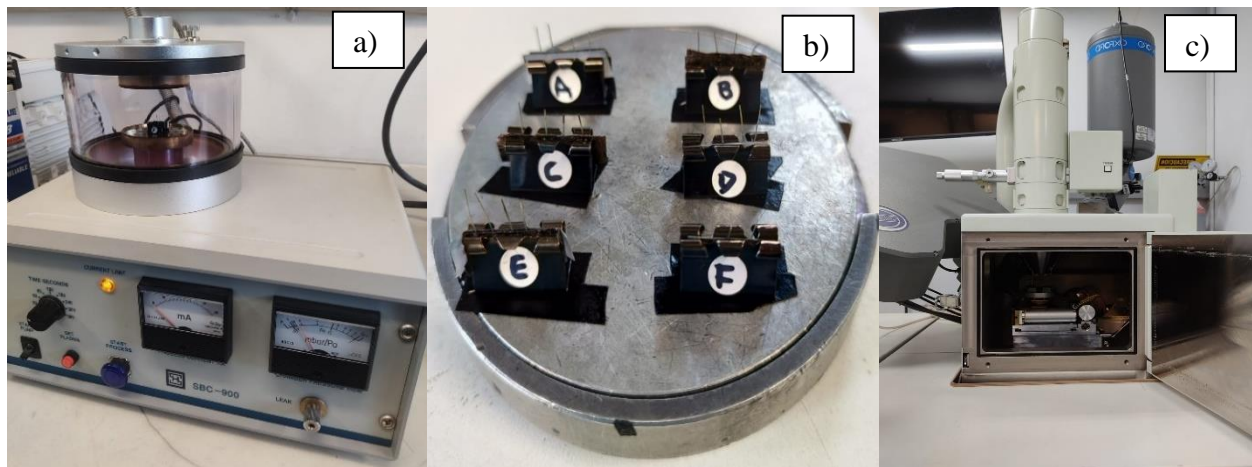


Figura 43. Proceso de preparación de muestras para análisis en SEM: a) equipo para baño de oro, b) ubicación de las muestras y c) montaje en el SEM.

La preparación de las muestras se llevó a cabo un corte criogénico en cada fibra utilizando nitrógeno, lo que aseguró un corte limpio y una superficie óptima para su posterior análisis. Las fibras fueron dispuestas en ganchos lotero, con un máximo de 4 fibras por gancho. Luego, se sometieron a un baño de oro de 10 a 15 segundos como se ilustra en la Figura 43a, esto con el propósito de proporcionar conductividad. Cada gancho con las fibras tratadas se colocó estratégicamente en el plato metálico, garantizando una identificación clara de cada fibra para la toma de fotografías (ver Figura 43b). Para mejorar aún más la conductividad, se utilizó una cinta de carbono. Finalmente, como se muestra en la Figura 43c, las muestras fueron introducidas en el microscopio para llevar a cabo el análisis correspondiente.

Después de capturar las imágenes, se procede a medir el perímetro y el espesor de cada fibra. Esta etapa es crucial, ya que se llevará a cabo un análisis comparativo entre los diferentes espesores y la resistencia interfacial de las fibras recubiertas. La correlación entre estos dos factores se examinará detalladamente para comprender mejor la relación entre la geometría de la fibra y su rendimiento en términos de resistencia. Este enfoque permitirá identificar patrones y tendencias que contribuirán significativamente a la comprensión de la influencia del espesor en la calidad del recubrimiento y, por ende, en la resistencia interfacial de las fibras.

4.5 Fabricación y caracterización mecánica del material compuesto

En este segmento, se realizó la manufactura del material compuesto, dividiendo el procedimiento en dos etapas. La primera parte consistió en la aplicación del método de infusión para recubrir el tejido de fibra de fique con PVA, asegurando una distribución uniforme del material polimérico en el tejido. Por otro lado, la segunda fase se enfocó en la fabricación del laminado para el compuesto, donde se empleó una matriz termoestable, específicamente poliéster, utilizando la técnica de bolsa de vacío, garantizando así la integridad y calidad del producto final. A continuación, se presenta una descripción detallada de las etapas clave involucradas en este proceso de fabricación.

Para recubrir la fibra, inicia con la preparación de la tela, llevando a cabo cortes precisos para obtener tres capas de tela de 30 x 30 cm. Es esencial garantizar la precisión en este proceso y tener en cuenta la orientación de las fibras, dado que se utiliza un tejido plano en el que las fibras están tejidas en dirección longitudinal y transversal. Durante este paso, se ejerce precaución, utilizando trozos de citan para evitar el desplazamiento de las fibras durante la manipulación, tal como se ilustra en la Figura 44a. Posteriormente, las fibras pasan por un proceso de secado en hornos, con el propósito de eliminar la humedad residual (véase la Figura 32).

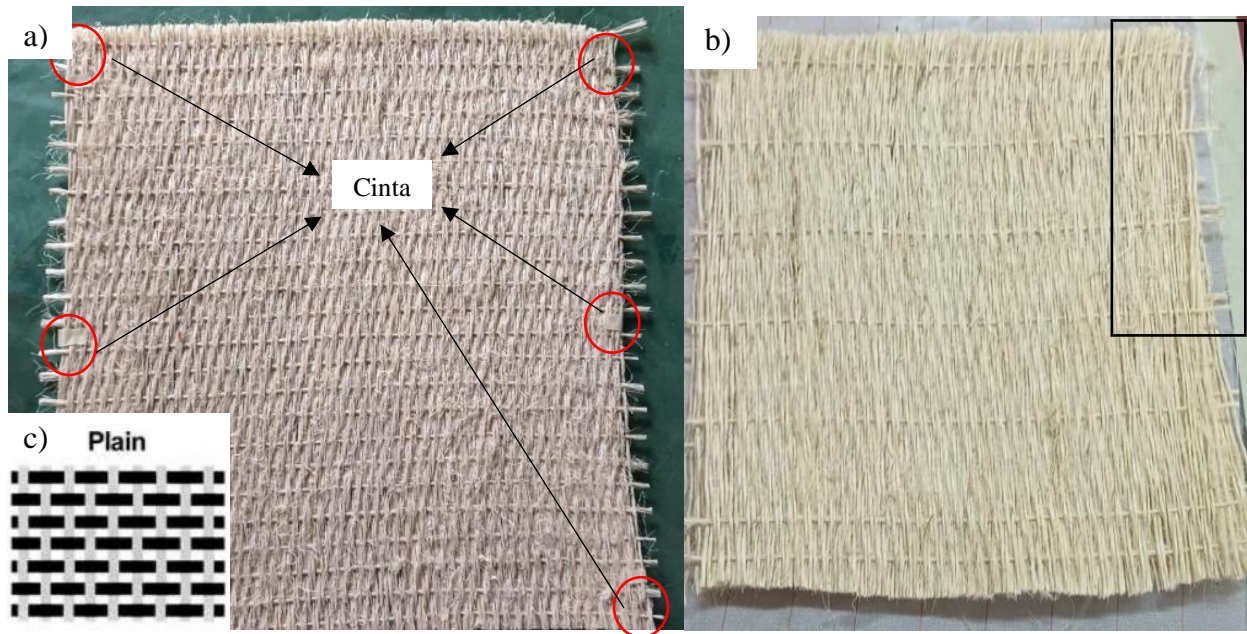


Figura 44. Proceso de preparación de tela para fabricación: a) orientación de las fibras, b) eliminación de fibras transversales y c) tejido plano[10].

Una vez que las telas están completamente secas, se retiraron algunas fibras transversales del tejido, extrayendo de dos fibras por cada una que permanezca en la tela, generando un espacio más amplio entre las fibras, tal como se representa en la Figura 44b. Este proceso se realiza de manera sistemática en las tres capas.

Después, se adecuó el entorno de trabajo, garantizando un espacio limpio y una temperatura ambiente de 25 °C. En el proceso de infusión, se utilizaron diversos materiales, entre ellos malla de distribución, cinta de vacío, bolsa de vacío y una manguera en espiral para la distribución de PVA. También se optó por un vidrio plano como molde, el cual se limpió minuciosamente para prevenir impurezas e incrustaciones en el tejido. La Figura 45 presenta los consumibles empleados, así como la demarcación con la cinta de vacío y la ubicación estratégica de la manguera en espiral.



Figura 45. Materias primas para el proceso de infusión de PVA.

Con la zona demarcada y la manguera de distribución en su lugar, se realizó la disposición de las telas, seguido de la malla de distribución. Es crucial que esta última cubra completamente las capas para lograr una distribución homogénea del polímero. Para sellar el apilado con la bolsa de vacío, se instalaron dos mangueras en ambos extremos: una para el suministro del PVA, dentro de la manguera en espiral, y otra en el extremo opuesto conectada a la bomba de vacío para generar la succión. La comprobación de fugas es crítica para asegurar el vacío, estableciendo una presión de succión de 10 inHg. Tras confirmar la ausencia de fugas, se vertió el PVA mediante un embudo conectado a la manguera de suministro, marcando el inicio del proceso de fusión.

Después de pasados 20 minutos, durante los cuales se asegura la distribución uniforme del PVA en toda la tela y su llegada a la línea de succión, se da por concluido el proceso. Para lograr una polimerización adecuada, es crucial mantener el vacío, por ende, los tejidos se dejan en un entorno plastificado durante 48 horas. Para obtener, Al finalizar este periodo, se obtiene el tejido de fibra de fique recubierto con PVA, tal como se visualiza en la Figura 46.



Figura 46. Proceso de infusión y polimerización del PVA en el tejido de fibra de fique

La manufactura del compuesto se llevó a cabo en condiciones similares al proceso de infusión, requiriendo un entorno limpio y temperatura controlada de 25°C. Se utilizaron consumibles específicos para la técnica de bolsa de vacío, tales como peel ply, bolsa de vacío, bolsa microperforada, breather, cinta de vacío, vidrio plano como molde y cera anti-desmoldeante, detallados en la Figura 47a. Seguidamente, se estableció una proporción de 4:1, indicando que la cantidad de resina sería cuatro veces el peso total de la fibra. La matriz utilizada para el compuesto fue la resina poliéster, la misma que se utilizó para la gota (véase la Figura 39b). En un lapso de aproximadamente 10 minutos, se realizó la pre-impregnación del laminado de las fibras previamente recubiertas con PVA .

Después, se procedió con la disposición ordenada de los consumibles, siguiendo una secuencia específica: peel ply, el laminado de fique recubierto con PVA y pre-impregnado de resina, otra capa de peel ply, bolsa microperforada, breather. La manguera de succión conectada a la bomba de succión se ubicó en un extremo para generar el vacío y, finalmente, se selló de manera hermética la bolsa de vacío alrededor del molde con ayuda de la cinta de vacío, asegurando un sellado eficaz para prevenir posibles fugas. Pasados 10 minutos, se aseguró que no haya excesos de resina, se cerró la manguera con una pinza de presión manteniendo el vacío durante un periodo de 24 horas para garantizar una polimerización adecuada en el compuesto (ver Figura 47b).

Posteriormente, se procedió el desmoldeo y se sometió el compuesto a un poscurado en un horno a 80°C durante 3 horas, dando como resultado el material compuesto visible en la Figura 47c.

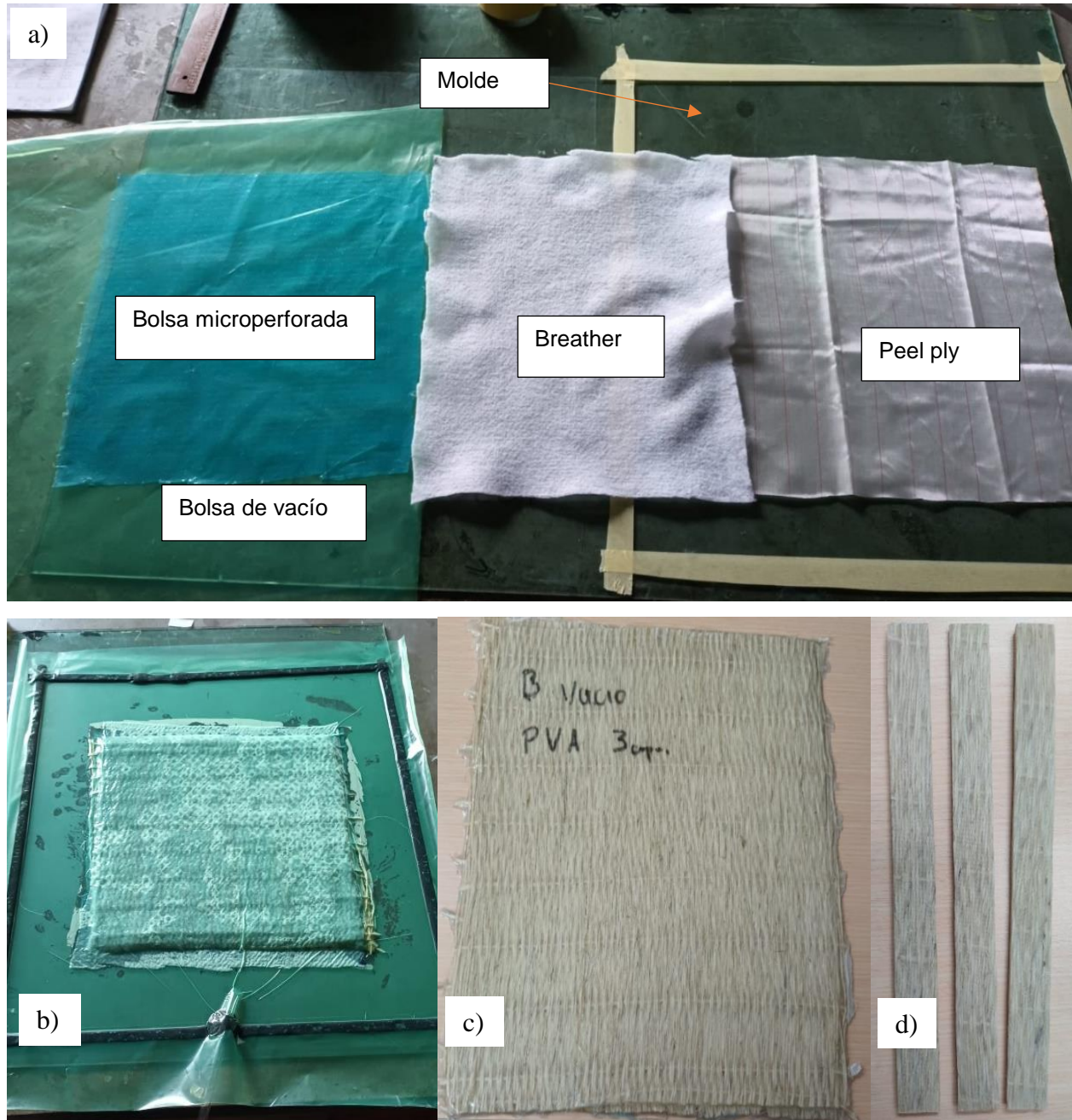


Figura 47. Proceso de fabricación del compuesto: a) materias primas, b) técnica por bolsa de vacío, c) material compuesto final y d) corte de pruebas para ensayos

Para concluir este proceso, se lleva a cabo el corte de piezas de dimensiones 250x25 mm como se muestra en la Figura 47d que serán destinadas a ensayos de tensión utilizando la máquina

universal (ver Figura 48). Estos ensayos permitirán evaluar el comportamiento del material ante cargas de tensión, con el objetivo fundamental de determinar su resistencia mecánica.



Figura 48. Montaje de ensayo de tensión en el compuesto.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se abordarán en detalle los resultados obtenidos a lo largo de los procedimientos experimentales.

5.1 Resultados de selección del material

En esta sección se discutirá la selección del material termoplástico para el recubrimiento mediante gráficas de Ashby y método ponderado.

5.1.1 Gráficas de Ashby

Se realizaron las selecciones basadas en criterios específicos como: un Módulo de Young entre la fibra y la matriz en el rango de 3 a 6 GPa y un punto de fusión máximo de 150 °C, este último es fundamental para no degradar la fibra natural. En la Figura 49, se representan varios materiales en un gráfico bidimensional donde el eje X muestra la densidad y el eje Y muestra el módulo de Young. La selección de materiales se ha limitado a aquellos que cumplen con los criterios establecidos. Esta visualización permite identificar materiales que ofrecen un equilibrio adecuado entre la rigidez y el peso, lo que puede ser crucial en aplicaciones específicas.

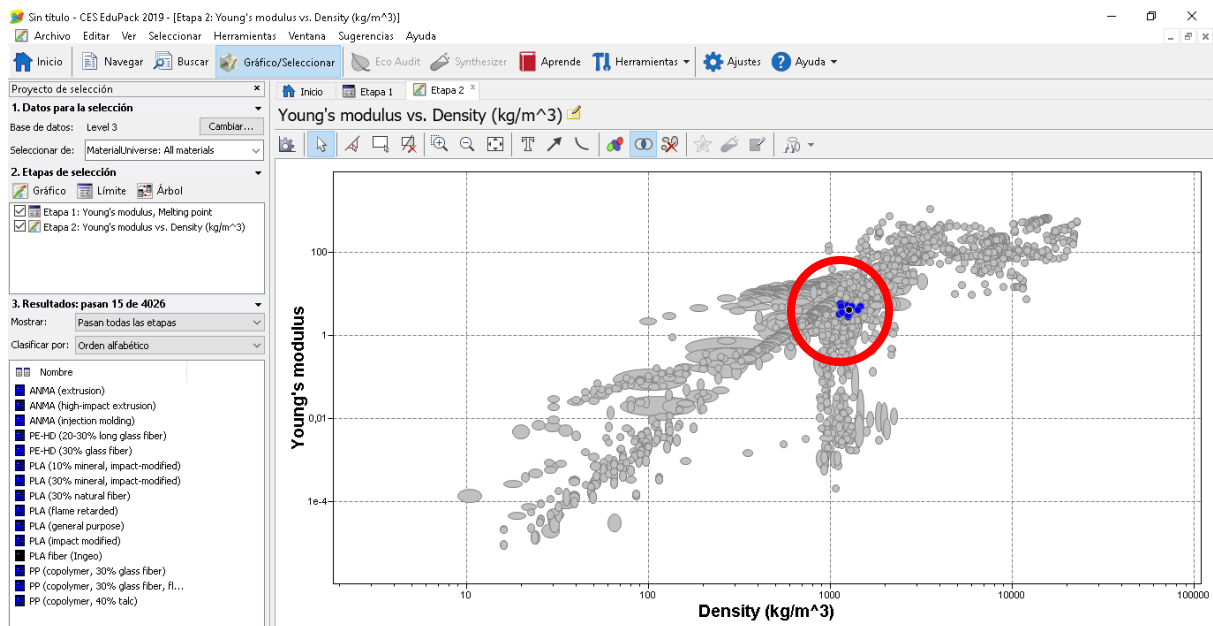


Figura 49. Módulo de Young vs. Densidad, aplicando los límites.

En la Figura 50 se limita la búsqueda al especificar que se desea un material dentro de la categoría de polímeros termoplásticos, entre los materiales previamente identificados en la Figura 49. Esta reducción de la categoría simplifica la elección de materiales e identifica lo que se alinean de manera óptima con los requisitos del proyecto. Entre los materiales seleccionados dentro de esta categoría, destacan el polietileno de alta densidad (PE-HD), el polipropileno (PP) y el acrilonitrilo metil acrilato (ANMA). Estos materiales pueden considerarse opciones prioritarias debido a sus propiedades particulares y su capacidad para cumplir con los criterios establecidos para la aplicación específica.

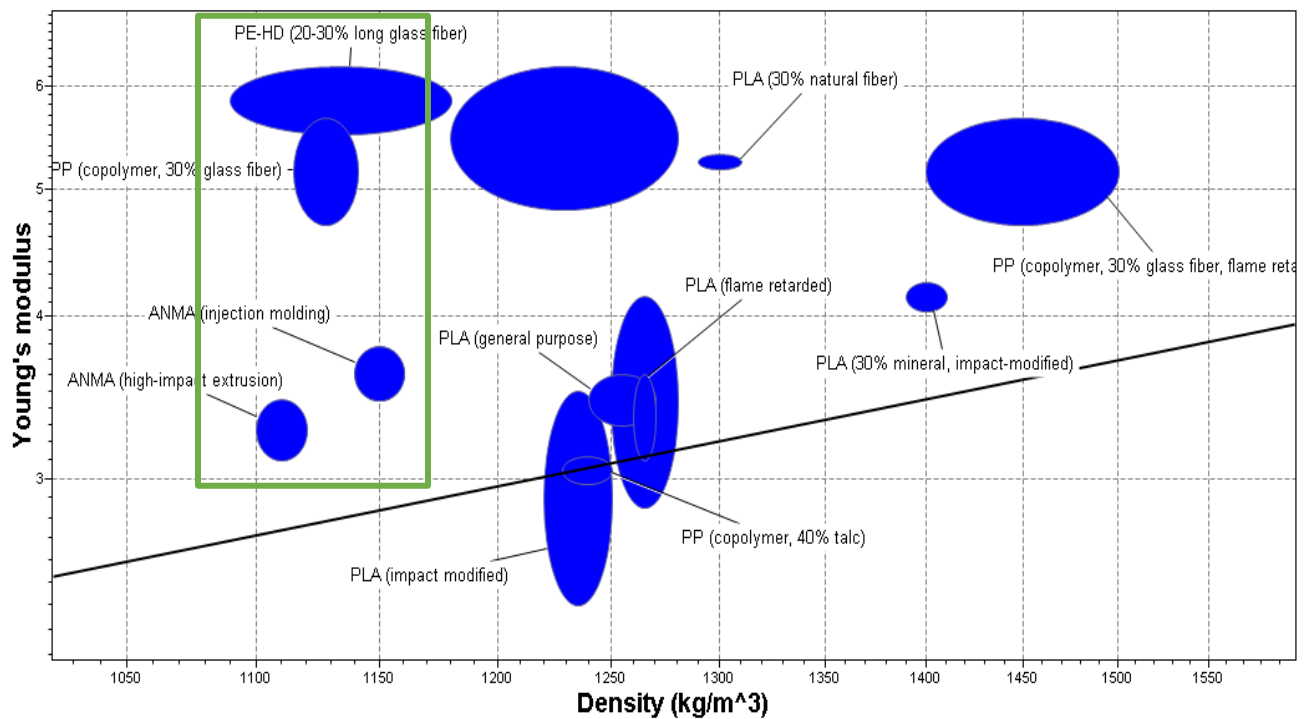


Figura 50. Módulo de Young vs Densidad, materiales seleccionados.

5.1.2 Método ponderado

En la selección de materiales mediante el método ponderado se evaluaron 5 materiales: Polipropileno (PP), Ácido Poliláctico (PLA), Policloruro de vinilo (PVC), Alcohol polivinílico (PVA) y Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Donde se analizaron en función de las propiedades mencionadas en la **Tabla 8**, y las unidades originales se tomaron de fichas técnicas de MatWeb para luego expresarse en una escala estándar para facilitar la comparación. A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos.

La **Tabla 9** proporciona un análisis detallado de cinco materiales considerados para el recubrimiento, evaluando distintas propiedades con sus respectivas ponderaciones. Allí se presenta una interpretación más amplia de los resultados. En términos de rigidez con una importancia del 30%, el material 4, Alcohol polivinílico (PVA), se destaca por el módulo de elasticidad más alto de $3.30E+09$ Pa, indicando una capacidad superior para resistir deformaciones bajo carga. Por otro lado, el Polipropileno (PP) sobresale como el material más ligero en términos de densidad, con un valor de 930 kg/m^3 .

En cuanto a la resistencia a la tracción, muestra que el Alcohol polivinílico (PVA) exhibe la mayor capacidad para resistir fuerzas de tracción ($7.80E+08$ Pa). Esta propiedad, con una ponderación del 10%, se considera crucial en situaciones donde se enfrenta a tensiones considerables. En cuanto al módulo de corte, el PVA nuevamente lidera con un valor de $1.20E+09$ Pa, destacando su aptitud para aplicaciones que requieren esta propiedad específica. La ponderación del 15% refleja la importancia asignada a esta característica. Por último, la estabilidad térmica, el Polipropileno (PP) exhibe la temperatura de fusión de $214 \text{ }^\circ\text{C}$, indicando una mayor resistencia a temperaturas elevadas. Sin embargo, en este caso se requieren temperaturas más bajas para evitar la degradación de la fibra, y el PVA obtiene un valor estándar de 5 con una temperatura de fusión de $145 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 9. Método de ponderación en relación a las propiedades seleccionadas.

Propiedad		Módulo de elasticidad	Densidad	Resistencia a la tracción	Módulo de corte	Temperatura de fusión
Unidades		Pa	kg/m ³	Pa	Pa	°C
Peso (%)		30	20	10	15	25
Material 1: Polipropileno (PP)	Unidades originales	1.67E+09	930	2.93E+08	5.96E+08	214
	Escala estándar	1	5	1.83	1	1
	Ponderación	0.3	1	0.18	0.15	0.25
Material 2: Ácido Poliláctico (PLA)	Unidades originales	2.34E+09	1300	5.95E+08	8.80E+08	182
	Escala estándar	2.64	1	3.79	7.67	2.86
	Ponderación	0.79	0.20	0.38	1.15	0.71
Material 3: Policloruro de vinilo (PVC)	Unidades originales	2.16E+09	1290	1.66E+08	7.83E+08	179
	Escala estándar	2.20	1.11	1	7.44	3.03
	Ponderación	0.66	0.22	0.10	1.12	0.76
Material 4: Alcohol polivinílico (PVA)	Unidades originales	3.30E+09	1230	7.80E+08	1.20E+09	145
	Escala estándar	5	1.76	5	5	5
	Ponderación	1.50	0.35	0.50	0.75	1.25
Material 5: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Unidades originales	2.35E+09	1070	4.07E+08	8.61E+08	163
	Escala estándar	2.67	3.49	2.57	5	3.96
	Ponderación	0.80	0.70	0.26	0.75	0.99

En la **Tabla 10** se presenta el resumen de la evaluación ponderada de los cinco materiales asignados y sus totales, destacando el Alcohol polivinílico (PVA) como la opción más favorable con un puntaje total de 4,35. Este resultado indica que el PVA ofrece un equilibrio óptimo en términos de módulo de elasticidad, densidad, resistencia a la tracción, módulo de corte y temperatura de fusión, considerando las ponderaciones asignadas a cada propiedad.

El Ácido Poliláctico (PLA) sigue con un puntaje total de 3.24, indicando un rendimiento sólido en las propiedades evaluadas. En contraste, el Polipropileno (PP) muestra el puntaje total más bajo de 1.88, sugiriendo que podría ser menos adecuado para la aplicación dada las ponderaciones asignadas a las propiedades clave. El Policloruro de vinilo (PVC) y el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) se sitúan en el rango intermedio, con puntajes totales de 2.86 y 3.49, respectivamente.

Tabla 10. Resultados totales del método de ponderación para la selección de material.

Propiedades	Material 1: Polipropileno (PP)	Material 2: Ácido Poliláctico (PLA)	Material 3: Policloruro de vinilo (PVC)	Material 4: Alcohol polivinílico (PVA)	Material 5: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
Módulo de elasticidad	0.3	0.79	0.66	1.50	0.80
Densidad	1	0.20	0.22	0.35	0.70
Resistencia a la tracción	0.18	0.38	0.10	0.50	0.26
Módulo de corte	0.15	1.15	1.12	0.75	0.75
Temperatura de fusión	0.25	0.71	0.76	1.25	0.99
Total	1.88	3.24	2.86	4.35	3.49

5.2 Caracterización mecánica y microestructural de la fibra recubierta.

En el proceso de evaluación se llevaron a cabo dos ensayos, el primer ensayo se centró en la identificación del recubrimiento en las fibras, por medio de un análisis SEM (Microscopía Electrónica de Barrido) de las fibras recubiertas en Polipropileno (PP) y en Alcohol polivinílico (PVA).

La Figura 51 a.1 y b.1 obtenidas durante el análisis SEM se identifica el recubrimiento en fibras de fique con polipropileno (FFPP), donde se reveló una estructura altamente porosa en la película de PP, sugiriendo que la porosidad podría deberse a la adición del Xilol, lo que podría afectar las propiedades del polímero; adicional en la Figura 51 a.2 y b.2 se observa un aumento a una escala de 50 micras donde se ve una capa considerablemente robusta de la película polimérica.

Por otro lado, en la Figura 52 se observa una imagen más detallada del recubrimiento en fique con Polipropileno (FFPP). Se evidencia una elección de fibra que podría no ser la más adecuada, dado que se identifican divisiones internas que podrían comprometer la integridad de la muestra. Adicional, como se observa en la Figura 52 es evidente que hay deficiencia en la adherencia del recubrimiento, debido a que se aprecian espacios o brechas entre la película de recubrimiento y la propia fibra.

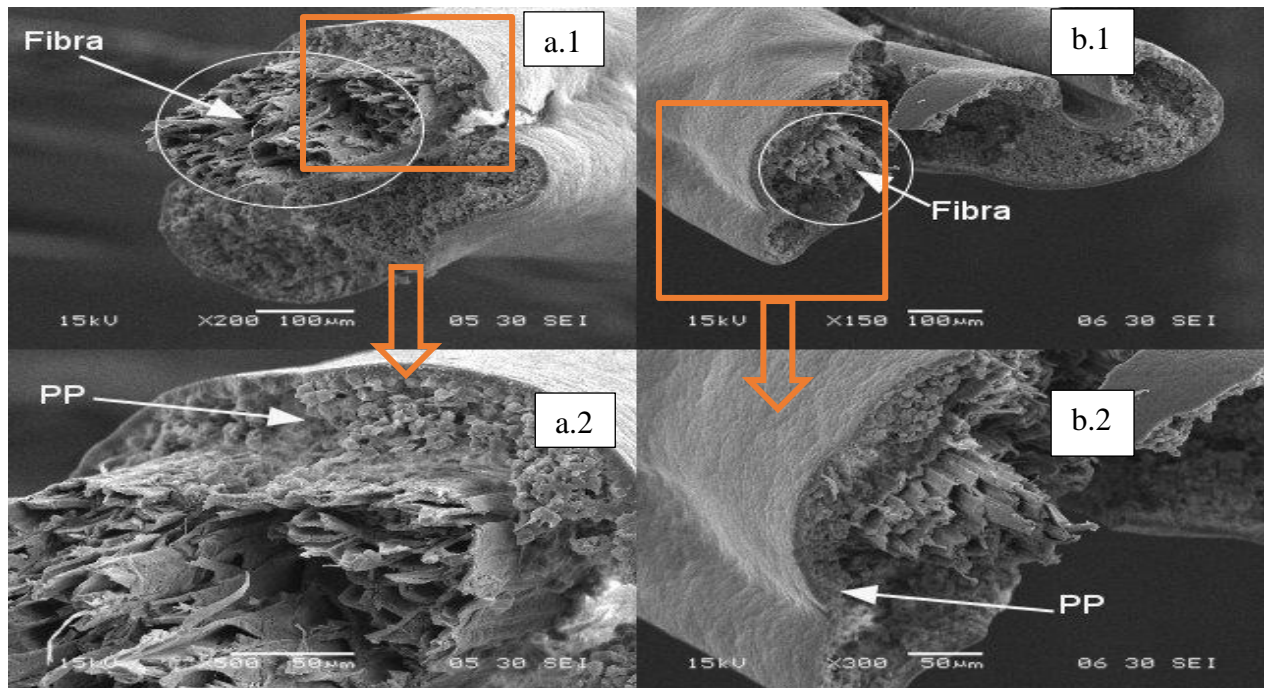


Figura 51. Identificación del recubrimiento en FFPP mediante SEM: a) Fibra 1 y b) Fibra 2.

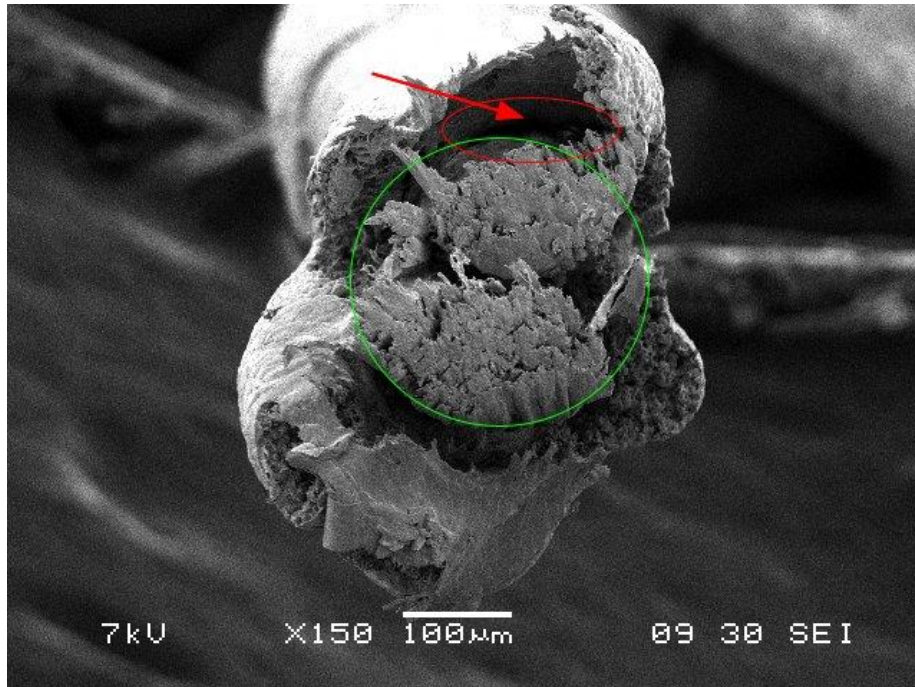


Figura 52. Fractura interna en la fibra recubierta de PP y mala adherencia.

En contraste, la Figura 53 presenta la microestructura de la fibra de fique recubierta por alcohol polivinílico (FFPVA). Donde se visualiza una capa mucho más homogénea y sin poros apreciables, orientado a una mejor adherencia entre el recubrimiento y la fibra en comparación con el recubrimiento de PP. Este resultado puede atribuirse a la complejidad del proceso de preparación del polipropileno (PP), que involucró diversos factores, como la viscosidad, temperatura de fusión y el secado del material.

El hecho de que el recubrimiento de FFPVA muestre una estructura más homogénea y sin porosidades aparentes indica una mejor calidad en la aplicación del recubrimiento de Alcohol polivinílico (PVA). La ausencia de huecos o imperfecciones notables en la interfaz entre la fibra y el recubrimiento sugiere una adherencia más sólida y uniforme. Este resultado respalda la idea de que el PVA se ha aplicado de manera más eficiente, lo que puede traducirse en propiedades mecánicas mejoradas y una mayor integridad estructural en comparación con el recubrimiento de PP.

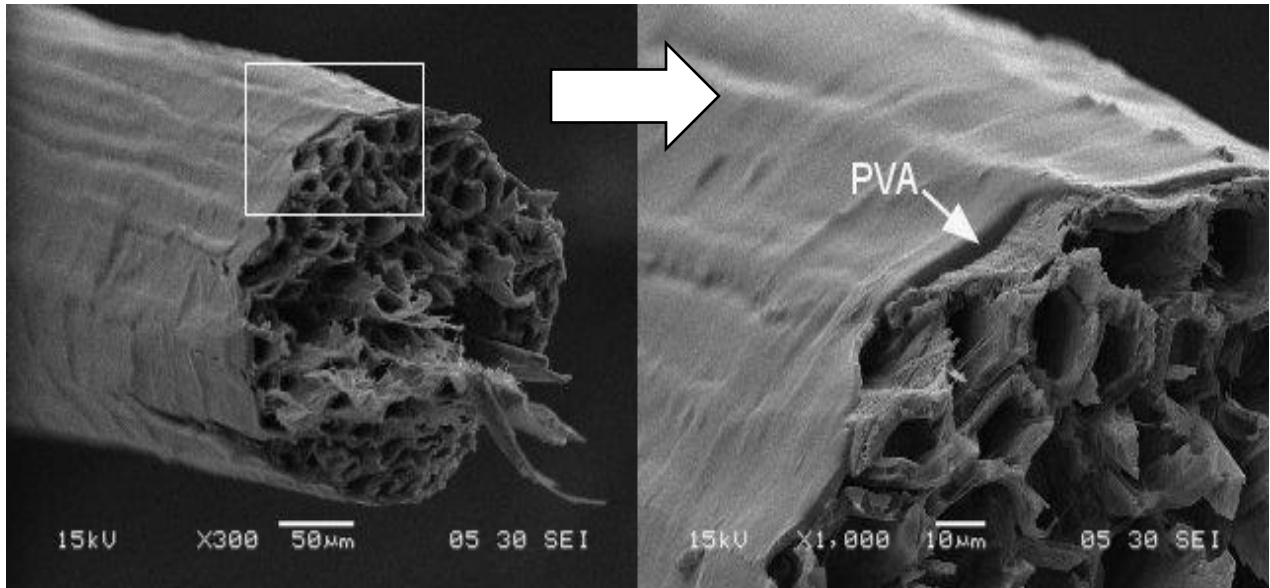


Figura 53. Identificación del recubrimiento en PVA mediante SEM.

En el segundo ensayo se enfocó exclusivamente en el recubrimiento con PVA, motivado por los resultados positivos en la fase anterior. Durante este análisis, se aplicaron recubrieron a un total de 30 muestras utilizando la metodología previamente descrita en la página 49. Es importante recordar que, para garantizar la precisión de los resultados, se descartaron aquellas fibras que presentaron irregularidades para no afectar los resultados al cálculo.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por la máquina universal en términos de carga máxima (F_{max}) para cada fibra, como se muestra la

Figura 54. Estos datos son fundamentales para calcular la resistencia al cortante interfacial (τ) mediante la Ecuación 4. Adicionalmente, permitirán un análisis comparativo entre las fibras recubiertas con diferentes polímeros. Estos resultados se compararán con un proyecto de investigación que se está llevando a cabo simultáneamente en la institución.

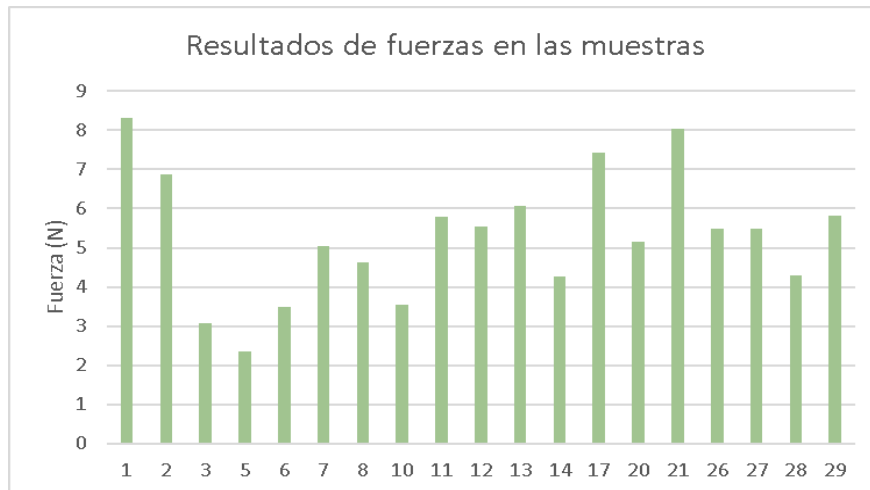


Figura 54. Resultados de carga máxima (F_{max}) en el ensayo de microdroplet con recubrimiento de PVA.

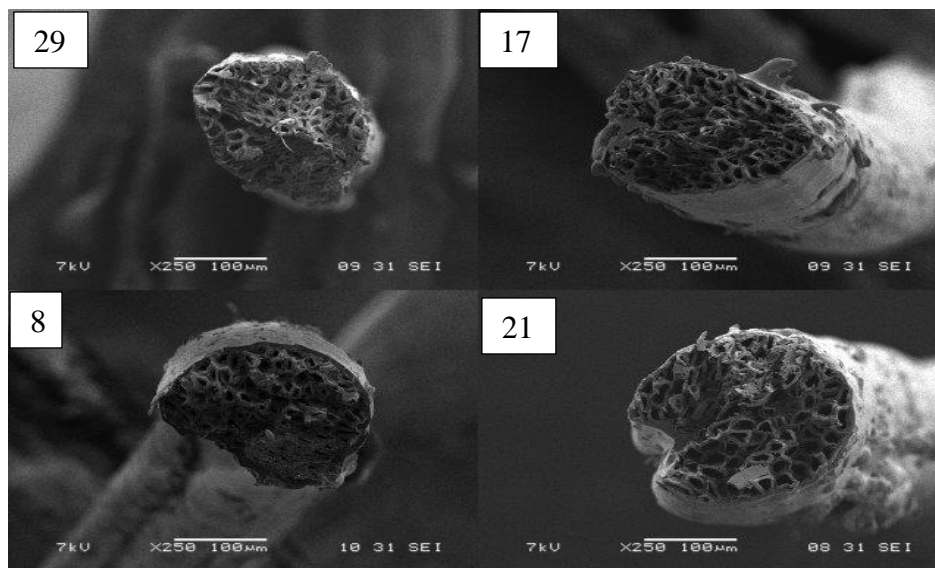


Figura 55. Análisis del recubrimiento y espesor mediante SEM en FFPVA-1

Con el objetivo de una observación más minuciosa del recubrimiento y un análisis del espesor, se empleó el microscopio electrónico de barrido (SEM), siguiendo el mismo enfoque implementado en el ensayo 1. En la Figura 55, se presentan imágenes detalladas de cuatro fibras recubiertas con PVA (FFPVA-1) identificadas con el número asignado para facilitar su seguimiento. En la imagen, se puede apreciar con claridad la microestructura de la fibra y se evidencia el recubrimiento de PVA. Es importante destacar que la calidad del recubrimiento es

comparable a la obtenida en el ensayo FFPVA, lo que sugiere consistencia en la aplicación del PVA y la mejora en la homogeneidad del recubrimiento.

5.2.1 *Análisis del ensayo de microdroplet*

En el análisis de los ensayos de microdroplet, se ha evaluado la resistencia interfacial entre la fibra de fique y los polímeros PP (Polipropileno) y PVA (Alcohol polivinílico). Los resultados reflejados en la Figura 56, muestran una diferencia significativa en la resistencia interfacial entre las muestras FFPP y FFPVA. Donde se evidenció que la muestra FFPVA exhiben una resistencia al cortante interfacial considerablemente mayor en comparación con las muestras de FFPP, indicando una mejor adherencia del recubrimiento de PVA a la fibra de fique en este primer ensayo.

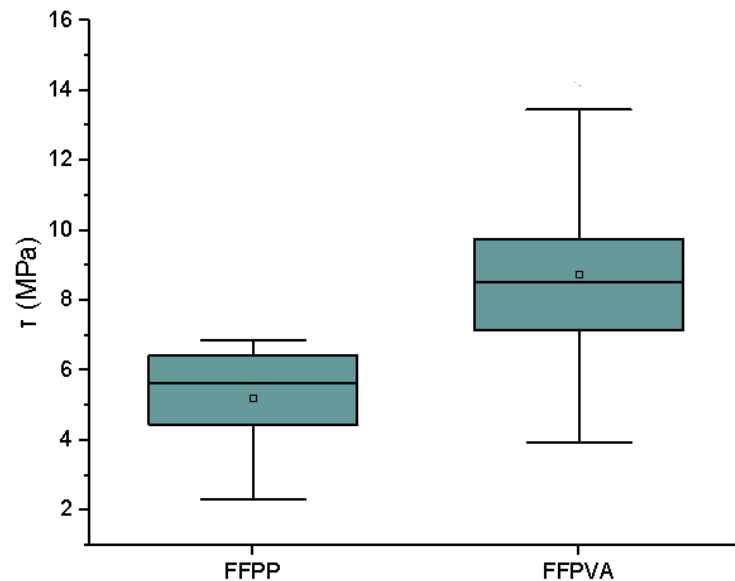


Figura 56. Resultados resistencia al cortante interfacial ensayo1.

En la segunda prueba, se aprecia una mejora notable en la resistencia interfacial, indicando una optimización en la metodología del procedimiento, a continuación, se presenta la Figura 57 de valores de τ (tau) para las muestras FFPP, FFPVA y FFPVA-1.

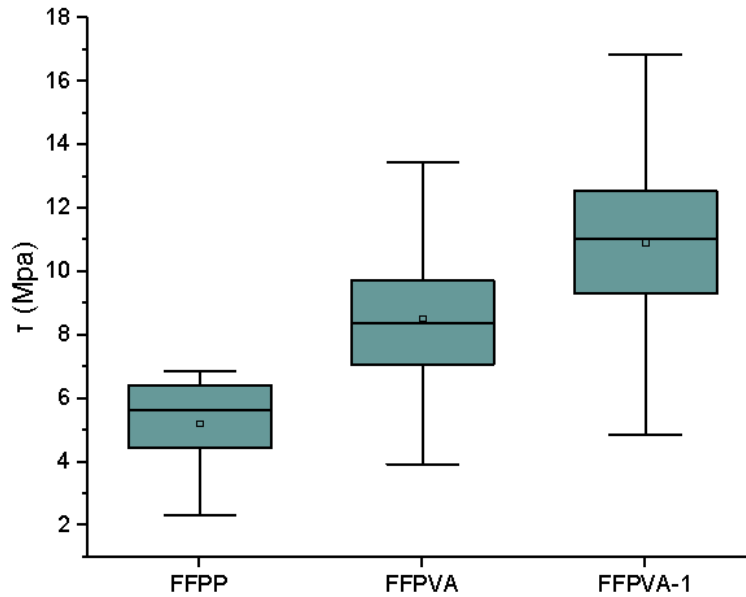


Figura 57. Resultados FFPVA-1 comparado con ensayo 1

La comparación entre FFPVA y FFPVA-1 muestra que la resistencia interfacial en la muestra FFPVA-1 se ha mantenido alta, incluso mejorando en algunos casos en comparación con el primer ensayo. Esto respalda la idea de que la parametrización mejorada de la metodología ha conducido a una mayor coherencia y confiabilidad en los resultados. Estos resultados sugieren una evolución positiva en la comprensión de la resistencia interfacial y respaldan la efectividad del recubrimiento de PVA en mejorar la adhesión entre el polímero y la fibra de fique.

En la Figura 58 se compararon con el proyecto de investigación que se está desarrollando paralelamente en la institución, sobre la resistencia al cortante interfacial de las fibras de fique recubiertas con diferentes polímeros. Se destaca que las fibras con recubrimiento de PP muestra una baja resistencia, indicando una adherencia débil entre la fibra y el polímero. En contraste, se observa una alta resistencia interfacial entre las fibras de fique y la resina epóxica y las fibras recubiertas con PVA.

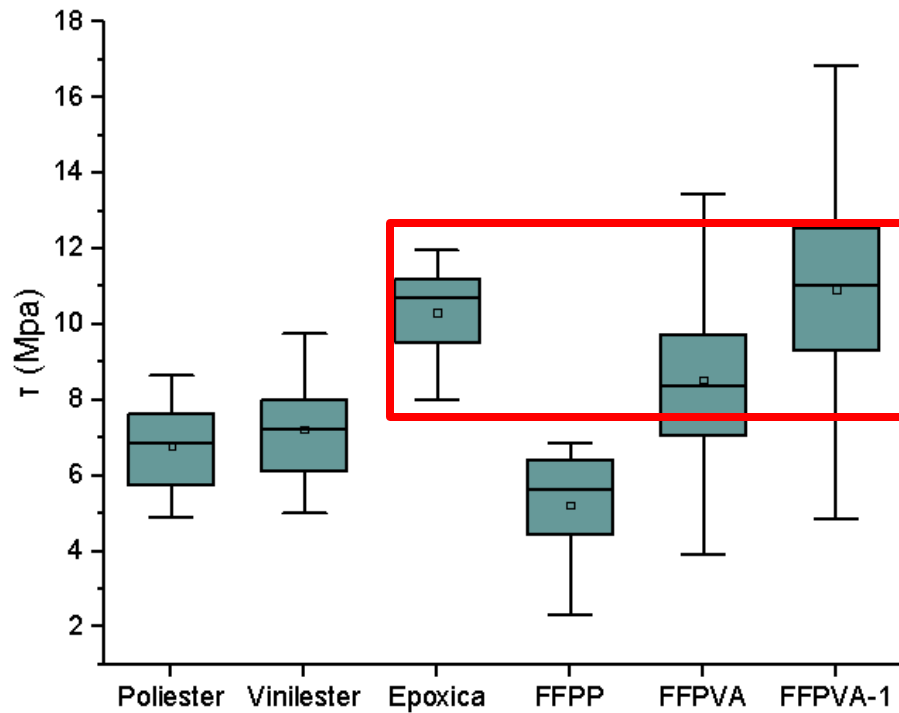


Figura 58. Comparación de resistencia al cortante interfacial (τ) de fibra de fique con otros polímeros.

5.2.2 Análisis de espesor

En el análisis detallado del espesor, surgen diversas consideraciones a partir de las observaciones realizadas. Una de las posibles influencias identificadas es la geometría de la fibra, la cual dar lugar a la acumulación desigual de polímero en algunos puntos, generando variación en el espesor del recubrimiento. Esto se ilustra en la Figura 59, donde se aprecia una distribución irregular. También se atribuye a las condiciones del secado, en el cual el material podría haberse apoyado de manera desigual y generar un espesor no uniforme.

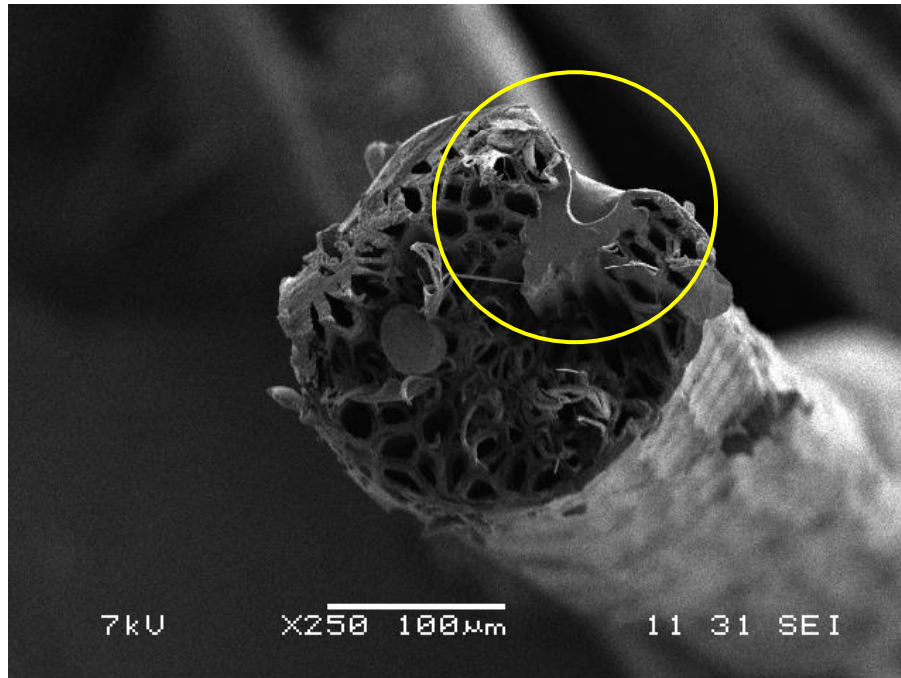


Figura 59. Distribución irregular del recubrimiento.

Además, al examinar las imágenes de las muestras, se destacan dos condiciones en relación con el espesor del recubrimiento. Por un lado, se observan regiones con espesores homogéneos como se muestra en la Figura 60a. Sin embargo, en otras áreas se identifican diferencias significativas en las longitudes de los recubrimientos, como se evidencia en la Figura 60b.

Este análisis reveló que mientras algunas áreas presentan espesores consistentes, en otras se observan fluctuaciones considerables en las longitudes de los recubrimientos. La Figura 60b destaca estas diferencias en los espesores a lo largo de diversas secciones. En particular, se identificó una diferencia significativa entre el punto 3, donde la longitud del recubrimiento es de $8,3 \mu\text{m}$, y el punto 4, que registra un valor de $3 \mu\text{m}$, evidenciando la importancia de abordar de manera específica las variaciones locales, ya que pueden tener un impacto significativo en las propiedades finales del producto.

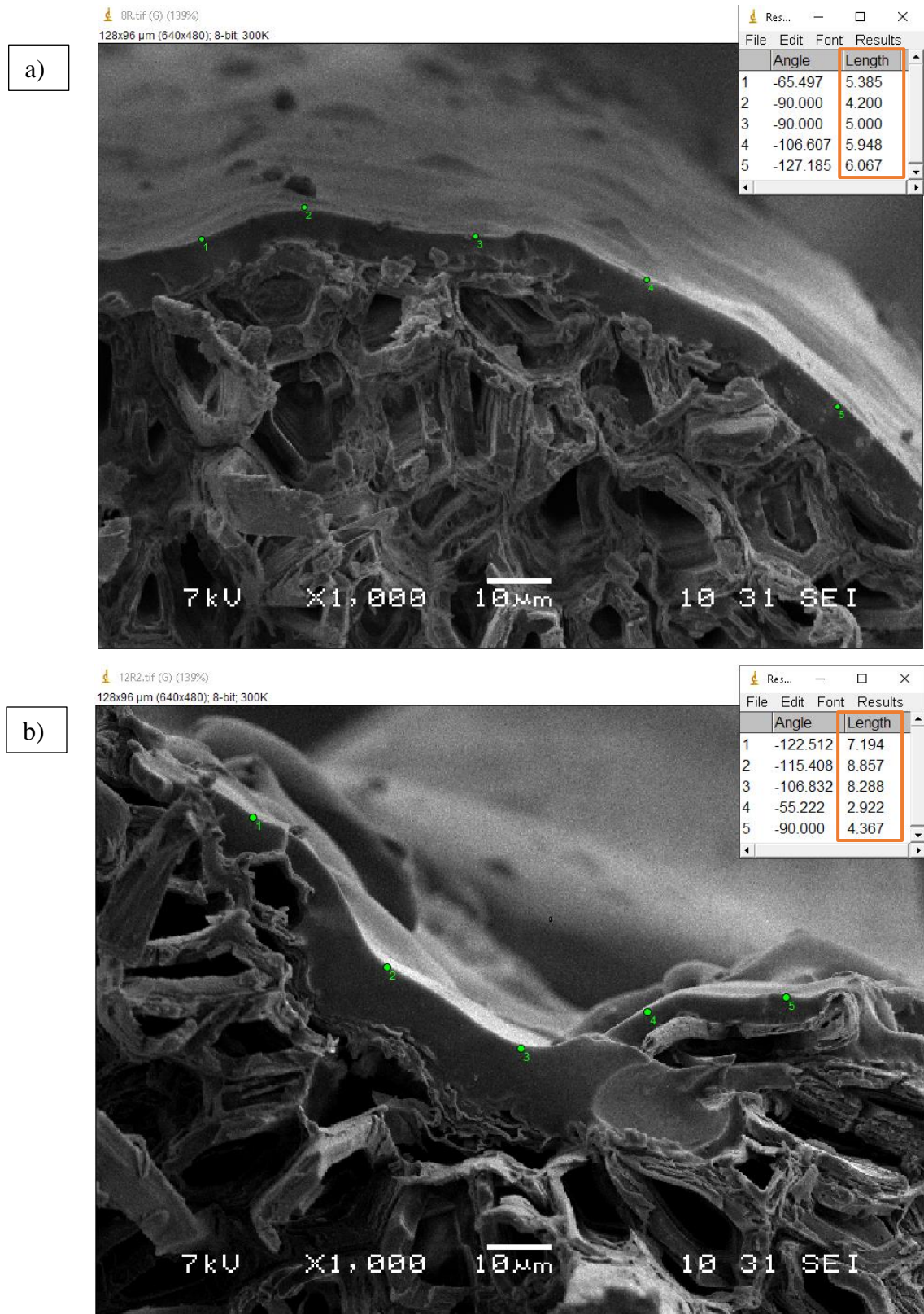


Figura 60. Variabilidad en espesores en 5 puntos: a) sección con espesores homogéneos y b) sección con diferencias en espesor.

Para abordar esta variabilidad, se implementó un muestreo más amplio. Se tomaron medidas en más de 15 puntos diferentes para calcular un promedio del espesor y determinar la desviación estándar asociada a cada muestra. Los resultados se presentan en la siguiente **tabla 11**.

Tabla 11. Resultados del análisis del espesor de las muestras de fibra recubierta.

Muestras	Espesor promedio (μm)	Desviación de la muestra
1	3.552	0.91
2	4.062	1.05
3	1.927	0.49
5	1.343	0.52
6	4.205	0.97
7	8.861	2.04
8	6.428	1.01
10	9.374	1.28
11	0.609	0.17
12	7.105	3.32
13	5.772	1.67
14	3.915	1.34
17	3.476	0.36
20	0.463	0.18
21	5.696	1.36
26	5.696	1.36
27	5.436	1.35
28	3.299	1.37
29	3.611	1.93

En la **Tabla 11**, se resaltan varias observaciones significativas en relación con el espesor de las muestras analizadas. Se destaca una variabilidad considerable en los valores de espesor promedio, que varían desde medidas relativamente bajas, como la Muestra 11 con $0.6 \mu\text{m}$, hasta espesores más sustanciales, como la Muestra 10 con $9 \mu\text{m}$. La presencia de la desviación estándar

asociada a cada muestra proporciona información crucial sobre la dispersión de los valores de espesor y, por ende, sobre la uniformidad del recubrimiento.

Es importante señalar que algunas muestras, como la muestra 20 y 11, exhibe desviaciones estándar relativamente bajas, indicando una uniformidad considerable en el espesor a lo largo de la fibra. En contraste, la muestra 12 presenta una desviación estándar considerablemente alta, señalando variaciones significativas en el espesor a lo largo de la fibra. Esta variabilidad en las desviaciones estándar entre las muestras subraya la importancia de abordar las condiciones específicas de cada una para mejorar la consistencia del espesor del recubrimiento.

Adicional, la Figura 61 proporciona una representación visual de los espesores promedio de cada muestra. Esta representación gráfica simplifica la comparación entre las muestras, permitiendo una visualización más clara de las variaciones en el espesor a lo largo de la fibra.

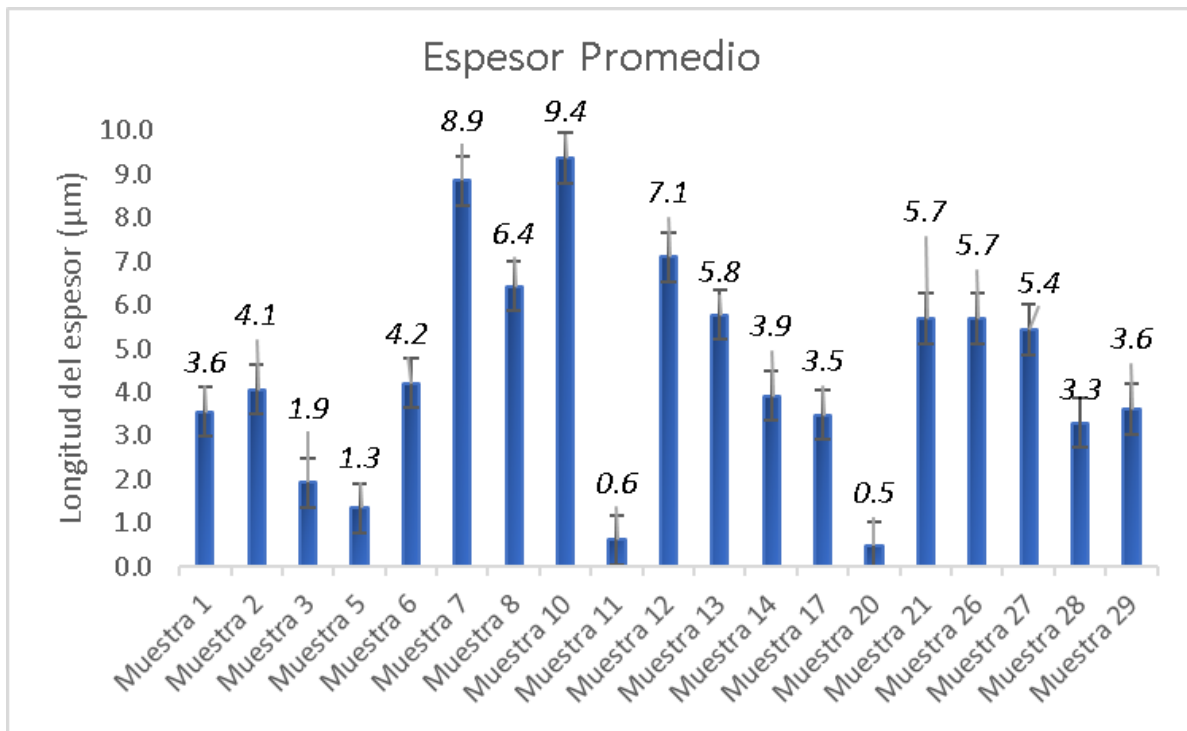


Figura 61. Gráfico de barras: Espesores promedio de las muestras.

5.2.3 Relación entre la resistencia interfacial vs el espesor del recubrimiento

En esta sección del análisis se busca explorar posibles correlaciones entre los resultados del espesor y los valores de resistencia cortante interfacial (τ) obtenidos en el ensayo de microdroplet. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó la herramienta de Microsoft Excel, para calcular el coeficiente de correlación, dando como resultado un coeficiente de 0,2995 que se muestra en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Coeficiente de correlación entre τ y espesor del recubrimiento

Variable	τ vs espesor
Coeficiente de Pearson	0,2995

Un coeficiente cercano a 1 indica una correlación positiva fuerte, cercano a -1 indica una correlación negativa fuerte, y cerca de 0 indica una correlación débil o nula. En este caso, este valor indica una correlación positiva débil entre el espesor del recubrimiento y el esfuerzo de corte en las muestras FFPVA-1.

Sin embargo, es crucial interpretar este resultado en términos prácticos. Aunque la correlación es positiva, la fuerza de esta relación es baja, lo que implica que los cambios en el espesor del recubrimiento no se corresponden fuertemente con los cambios en el esfuerzo de corte. En otras palabras, el espesor del recubrimiento por sí solo no explica completamente las variaciones observadas en el esfuerzo de corte.

Este hallazgo sugiere que, aunque puede haber alguna tendencia, otros factores también podrían estar influyendo en el esfuerzo de corte. Por lo tanto, es crucial considerar otros posibles factores que podrían estar afectando el resultado del ensayo, como la geometría de la fibra o la longitud de la gota. En este punto, la conclusión inicial es que no se encuentra una afectación clara en el τ por el recubrimiento, o al menos no hay suficientes datos para concluir una tendencia definitiva si es que existe. Es recomendable continuar explorando y recopilando datos adicionales para obtener una imagen más completa y precisa de la relación entre el espesor y la resistencia al cortante interfacial.

5.3 Caracterización mecánica del material compuesto

Una vez obtenido el material compuesto, se procedió a su caracterización mediante pruebas de tensión. Este proceso es esencial para comprender cómo el material responde a las cargas aplicadas y proporciona información clave sobre sus propiedades mecánicas. Las pruebas de tensión implicaron someter el material a fuerzas externas crecientes para evaluar cómo responde a la elongación. Los resultados obtenidos en la **Tabla 13** representan la respuesta del material compuesto bajo condiciones de carga gradual hasta el punto de ruptura.

Tabla 13. Resultados de ensayo de tensión en el material compuesto.

Muestra	Esfuerzo máx. (MPa)	Deformación máx. (mm/mm)
P1	46.338	0.129
P2	43.025	0.132
P3	45.480	0.142
P4	47.239	0.131
P5	45.801	0.116

En términos de esfuerzo máximo, la muestra P4 destaca con el valor más alto, indicando una mayor resistencia a la aplicación de carga. Por otro lado, la muestra P2 muestra el esfuerzo máximo más bajo, sugiriendo una menor capacidad de resistencia a la deformación. En cuanto a la deformación máxima, la muestra P3 presenta la mayor capacidad de deformación antes de la falla, mientras que la muestra P5 exhibe la deformación máxima más baja, indicando una menor capacidad de deformación.

En general, estos resultados indican que las muestras del compuesto pueden tener propiedades mecánicas variadas, lo que permite adaptarse a diferentes requisitos de aplicaciones. Además, estos datos son fundamentales para evaluar la idoneidad del compuesto en aplicaciones específicas, como la fabricación de componentes estructurales o productos que requieran ciertos niveles de resistencia y deformabilidad.

6 CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados de los ensayos de microdroplet son reveladores, indicando una mejora sustancial en la resistencia interfacial. Además, la optimización de la metodología sugiere que el recubrimiento de PVA ha contribuido significativamente a mejorar la adherencia entre la fibra y el polímero, como se evidencia en los ensayos FFPVA y FFPVA-1. Estos hallazgos respaldan la efectividad del PVA para cumplir con este propósito específico, subrayando así su papel crucial en fortalecer la conexión entre la fibra y el polímero en este contexto particular.
- ✓ El análisis detallado del espesor muestra una variabilidad significativa entre las muestras. La geometría de la fibra, las condiciones de secado y la metodología de aplicación contribuyen a la distribución irregular del recubrimiento. La variabilidad en los espesores destaca la importancia de abordar las condiciones específicas de cada muestra para mejorar la consistencia del recubrimiento.
- ✓ Se investigó la relación entre el espesor del recubrimiento y la resistencia interfacial, revelando una correlación positiva débil. Aunque se observa que el espesor influye en la resistencia, es importante señalar que otros factores, como el perímetro de la fibra o el tamaño de la gota, podrían estar afectando los resultados del ensayo. Estos aspectos adicionales podrían estar contribuyendo a la variabilidad en la resistencia interfacial, sugiriendo la necesidad de un análisis más detallado para comprender completamente los factores que influyen en esta relación.
- ✓ La caracterización mecánica del material compuesto a través de ensayos de tensión ofrece información fundamental sobre sus propiedades mecánicas. La variabilidad observada en el esfuerzo máximo y la deformación máxima entre las muestras sugiere que el compuesto puede adaptarse a diversos requisitos de aplicaciones, destacando su versatilidad en la fabricación de componentes estructurales. Esta capacidad de adaptación resalta la idoneidad del material compuesto para cumplir con distintas demandas en aplicaciones específicas, proporcionando así una perspectiva prometedora para su implementación en diversas áreas industriales.

7 REFERENCIAS

- [1] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, y M. S. Islam, “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications”, *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015. Hindawi Limited, 2015. doi: 10.1155/2015/243947.
- [2] O. A. Martínez Anguiano, A. S. Galindo, R. I. Narro Céspedes, F. Soriano Corral, y A. O. Castañeda Facio, “Polímeros reforzados con fibras naturales para su aplicación en la industria automotriz”, *Afinidad*, vol. LXXIX, núm. 595, pp. 237–247, 2022.
- [3] A. H. Shah, A. Q. Dayo, R. A. Wagan, A. Sajid, A. Shaikh, y G. Mehdi, “A Short Review: Manufacturing problems and Solutions of Natural Fiber Reinforced Composites”, *Journal of Applied and Emerging Sciences*, vol. 9, núm. 2, pp. 68–77, dic. 2019, doi: 10.36785/buitem.s.jaes.275.
- [4] R. M. Rowell, “Natural fibres: types and properties”, en *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Elsevier Inc., 2008, pp. 3–66. doi: 10.1533/9781845694593.1.3.
- [5] P. Luna y J. M. Lizarazo-Marriaga, “Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica”, *Momento*, vol. 2022, núm. 65, pp. 65–79, 2022, doi: 10.15446/mo.n65.103151.
- [6] K. K. Chawla, *Composite materials: Science and engineering, third edition*. Springer New York, 2012. doi: 10.1007/978-0-387-74365-3.
- [7] M. A. Fuqua, S. Huo, y C. A. Ulven, “Natural fiber reinforced composites”, *Polymer Reviews*, vol. 52, núm. 3–4. pp. 259–320, el 1 de julio de 2012. doi: 10.1080/15583724.2012.705409.
- [8] J. Gassan y A. K. Bledzki, “Thermal Degradation of Flax and Jute Fibers”, 2001.
- [9] S. Kalpakjian y • Steven R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, vol. Quinta edición. México: Pearson Educación, 2008. [En línea]. Disponible en: www.pearsoneducacion.net/kalpakjian
- [10] S. K. Mazumdar, *Composites manufacturing : materials, product, and process engineering*. CRC Press, 2002.
- [11] F. M. Cabrera, “Los materiales compuestos se han impuesto en la industria del automóvil por sus propiedades de resistencia y ligereza”, *Técnica Industrial*, vol. 254, pp. 42–47, 2004.
- [12] “Tecnología de proceso y transformación de materiales”.

- [13] “Natural Fiber Composites”.
- [14] V. H. Guerrero, P. Pontón, A. Tamayo, H. Villacís, F. Delgado, y S. Galeas, “Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas”, *ESPE*, pp. 70–74, 2013.
- [15] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, y F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview”, *Compos B Eng*, vol. 43, núm. 7, pp. 2883–2892, oct. 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [16] S. A. Gómez Suarez y E. Córdoba Tuta, “Composite materials reinforced with fique fibers – a review”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, núm. 1, pp. 163–178, ene. 2022, doi: 10.18273/revuin.v21n1-2022013.
- [17] M. F. Muñoz Velez, M. A. Hidalgo Salazar, y J. H. Mina Hernandez, “Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial”, *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 12, núm. 2, pp. 60–70, 2014.
- [18] I. José Luis Dávila Ing Nelly María Rosas Ing Salomé Galeas Ing Verónica Sotomayor Víctor Hugo Guerrero *et al.*, *NUEVOS MATERIALES: APLICACIONES ESTRUCTURALES E INDUSTRIALES* © Todos los derechos reservados Autores: Quito-Ecuador.
- [19] A. McIlhagger, E. Archer, y R. McIlhagger, “Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications”, en *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 59–81. doi: 10.1016/B978-0-08-102679-3.00003-4.
- [20] W. J. B. Grouve y R. Akkerman, “Consolidation process model for film stacking glass/PPS laminates”, en *Plastics, Rubber and Composites*, jun. 2010, pp. 208–215. doi: 10.1179/174328910X12647080902457.
- [21] L. Tran, C. Fuentes, I. Verpoest, y A. Van Vuure, “Interfacial Compatibility and Adhesion in Natural Fiber Composites”, en *Natural Fiber Composites*, CRC Press, 2015, pp. 127–156. doi: 10.1201/b19062-6.
- [22] Z. Liu y B. H. Tisserat, “Coating applications to natural fiber composites to improve their physical, surface and water absorption characters”, *Ind Crops Prod*, vol. 112, pp. 196–199, feb. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.12.002.

- [23] G. S. Sudha y K. V. Arun, “Mechanical behaviour of gel coated laminated jute-epoxy composites under varied acidic media and loads”, en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 2953–2957. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.838.
- [24] C. V. Srinivasa, A. S. Ani, y B. M. Jyothi Prasad, “Protective Coatings for Bio-Composites - A Review”, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, oct. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/925/1/012048.
- [25] S. G. Shadaksharappa y A. K. Veerappa, “Methods and process parameters of gel coating on laminated composites - A review”, en *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., may 2020. doi: 10.1063/5.0007094.
- [26] C. Hu, Y. Zhou, T. Zhang, T. Jiang, y G. Zeng, “Effect of fiber modified by alkali/polyvinyl alcohol coating treatment on properties of sisal fiber plastic composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 39, núm. 23–24, pp. 880–889, dic. 2020, doi: 10.1177/0731684420934866.
- [27] S. Rocha Ferreira, A. Rodrigues Sena Neto, F. de Andrade Silva, F. Gomes de Souza, y R. Dias Toledo Filho, “The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix”, *Constr Build Mater*, vol. 262, nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120770.
- [28] P. Sahu y M. K. Gupta, “Eco-friendly treatment and coating for improving the performance of sisal composites”, *Polym Test*, vol. 93, ene. 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106923.
- [29] J. Auernhammer *et al.*, “Nanomechanical characterisation of a water-repelling terpolymer coating of cellulosic fibres”, *Cellulose*, vol. 28, núm. 4, pp. 2149–2165, mar. 2021, doi: 10.1007/s10570-020-03675-9.
- [30] Y. Dou, X. Li, K. Zheng, J. Liu, y J. Hou, “Study on curing and flammability properties of UV-curable flame-retardant coating on jute/polypropylene composites surface”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 147, núm. 7, pp. 4597–4610, abr. 2022, doi: 10.1007/s10973-021-10864-6.
- [31] M. A. Hidalgo-Salazar, M. F. Munõz, y J. H. Mina, “Influence of Incorporation of Natural Fibers on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Composites LDPE-Al Reinforced with Figue Fibers”, *Int J Polym Sci*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/386325.

- [32] F. Veloso de Carvalho *et al.*, “Polyaniline and magnetite on curaua fibers for molecular interface improvement with a cement matrix”, *J Mol Struct*, vol. 1233, jun. 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2021.130101.
- [33] “17. Selección de materiales en el diseño del cuadro de una bicicleta”.
- [34] “Primeros pasos en CES”, 2010.
- [35] H. A. Maddah, “Polypropylene as a Promising Plastic: A Review”, *American Journal of Polymer Science*, vol. 6, núm. 1, pp. 1–11, 2016, doi: 10.5923/j.ajps.20160601.01.
- [36] C. Isaza, S. Medina, G. S. Gallego, y J. Meza, “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALCOHOL POLIVINÍLICO REFORZADO CON NANOTUBOS DE CARBONO ORIENTADOS MECANICAMENTE”.
- [37] N. Cataño y C. Isaza, “IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA A NIVEL DE LABORATORIO PARA APLICACIÓN UNIFORME DE UN RECUBRIMIENTO TERMOPLÁSTICO SOBRE LA SUPERFICIE DE FIBRAS DE FIQUE”, 2023. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/2119>
- [38] J. L. Thomason y J. L. Rudeiros-Fernández, “Characterization of interfacial strength in natural fibre–polyolefin composites at different temperatures”, *Compos Interfaces*, vol. 29, núm. 2, pp. 175–196, 2022, doi: 10.1080/09276440.2021.1913901.