

Estudio del desempeño mecánico de materiales compuestos basados en telas de fibras de
cáñamo tejidas

Nicolas Becerra Leal

Dilan Stiven Useche Ardila

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Octavio Andrés González Estrada
PhD Ingeniería Mecánica y Materiales

Codirector

Juan Sebastián León Becerra
PhD Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza a lo largo de este camino, por iluminar cada uno de mis pasos y darme la sabiduría necesaria para afrontar los desafíos que se presentaron. Gracias por brindarme paciencia en los momentos difíciles, constancia para no rendirme y la fe para seguir adelante aun cuando el camino parecía incierto. Este logro es posible gracias a sus bendiciones y por permitirme culminar una etapa tan importante en mi vida.

A toda mi familia primos, tíos, abuelos y hermanos, por estar siempre conmigo, por sus consejos y su apoyo incondicional. A Lina Arias, cuyo ánimo y apoyo fueron indispensables para alcanzar este logro; a Santiago Ramírez, un gran amigo con quien recorrí este camino; y a Paola Guerra, quien me acogió en su vida y se convirtió en una persona fundamental en la mía.

A mi abuelo materno, la persona más importante en mi vida y mi mayor motivación, ejemplo de esfuerzo, sabiduría y amor incondicional. Gracias por cada consejo, por tu apoyo constante y por enseñarme el valor de la perseverancia y la humildad. Este logro también es tuyo, porque todo lo que soy hoy lleva una parte de ti.

A mi madre, ejemplo de perseverancia, dedicación y valentía, gracias por su amor incondicional y por estar siempre para mí sin importar la circunstancia.

A mi padre, mi ejemplo a seguir, la persona que más admiro por su entrega, esfuerzo, sacrificio y perseverancia, por enseñarme a afrontar los problemas, por guiarme en cada una de mis etapas, no me queda más si no darle las gracias por que gracias a él hoy soy la persona correcta, integra y dedicada, porque gracias a él hoy soy el ingeniero que siempre soñé ser.

Dilan Stiven Useche Ardila

Dedicatoria

A mis papás, porque siempre estuvieron apoyándome, brindándome los consejos que necesitaba en todo momento, y más que nada el tiempo que invirtieron en este proceso. Gracias a ellos pude estudiar esta carrera, siempre han sido mi ejemplo para seguir y mi impulso para seguir adelante.

A mi hermano, que siempre me ha dado consejos sobre la vida, me ha acompañado en todo momento y ha sido parte clave de mi bienestar y crecimiento, Asimismo a mi mascota Bruno, que siempre ha sido ese compañero fiel, en momentos que necesitaba apoyo incondicional.

A mi novia, por siempre apoyarme y motivarme a seguir adelante con este proceso, por ayudarme a siempre ser una mejor persona, por ayudarme a ver todo lo que Dios tiene planeado para mí y siempre apoyarme en todo.

A mi abuelo, que siempre fue un gran apoyo, me enseñó muchas cosas sobre la vida y sobre el esfuerzo que hay que hacer para construir grandes cosas. A pesar de no acompañarme en este momento sé que está presente en cada paso.

Nicolás Becerra Leal

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la formación académica y humana necesaria para nuestro desarrollo profesional. De manera especial, a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su compromiso con la excelencia educativa y por proporcionarnos los conocimientos, herramientas y espacios que hicieron posible la realización de este proyecto.

Asimismo, extendemos un reconocimiento especial a nuestro director, el profesor Andrés Octavio González Estrada, por su orientación constante, dedicación y acompañamiento a lo largo de este proceso. Su disposición, experiencia y rigor académico fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo de grado. Para nosotros, ha sido un privilegio contar con su guía durante esta etapa de nuestra formación.

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco teórico y estado del arte.....	18
2.1 Materiales compuestos poliméricos.....	18
2.2 Mecánica de materiales compuestos.....	19
2.3 Interfaz fibra–matriz.....	21
2.4 Fibras naturales como refuerzo.....	22
2.5 Fibras de cáñamo.....	23
2.6 Refuerzos textiles.....	25
2.7 Requisitos técnicos de materiales para aplicaciones aeronáuticas no estructurales.....	27
2.8 Síntesis del estado del arte y justificación del enfoque experimental.....	29
3. Materiales y métodos.....	31
3.1 Enfoque y diseño experimental.....	31
3.2 Materiales y equipo.....	32
3.2.1 Fibras de cáñamo tejidas.....	32
3.2.2 Resina epóxica biobasada.....	32
3.2.3 Material compuesto reforzado con fibra de carbono.....	33
3.2.4 Equipos de fabricación.....	34
3.2.5 Equipos de caracterización.....	34

3.3 Fabricación del material compuesto y de las probetas	35
3.3.1 Ensamblaje y laminado.....	35
3.3.2 Consolidación y curado	35
3.3.3 Corte y preparación	36
3.4 Ensayos mecánicos.....	38
3.4.1 Tracción.....	38
3.4.2 Flexión.....	39
3.5 Modelación numérica del material compuesto	39
3.5.1 Determinación de la fracción volumétrica de fibra	40
3.5.2 Determinación de la densidad del material.....	41
3.5.3 Determinación de las propiedades elásticas equivalentes	42
3.5.4 Estimación coeficientes de Poisson y módulos cortantes.....	42
3.5.5 Definición de apilamiento.....	43
3.5.6 Modelación del ensayo a tracción	44
3.5.7 Modelación del ensayo de flexión de 3 puntos	44
3.6 Comparación tipo Ashby entre materiales compuestos	45
3.6.1 Recopilación y tratamiento de la información	45
3.6.2 Cálculo de índices de desempeño.....	46
3.6.3 Construcción de gráficos comparativos y mapas tipo Ashby	47
4. Resultados.....	49
4.1 Ensayo de tracción	49
4.1.1 Matriz biopolimérica	49
4.1.2 Fibras de cáñamo tejidas.....	51

4.1.3 Material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	54
4.1.4 Fibra de carbono.....	57
4.2 Ensayo de flexión	59
4.2.1 Matriz biopolimérica	59
4.2.2 Material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	61
4.2.3 Fbra de carbono.....	62
4.3 Comparación de índices de desempeño específico	64
4.4 Modelación numérica del material compuesto	66
4.4.1 Resultados del modelado numérico a tracción.....	66
4.4.2 Resultados del modelado numérico a flexión	68
4.4.3 Comparación global entre resultados experimentales y numéricos	71
4.5 Gráfico de Ashby	72
4.5.1 Propiedades empleadas en la comparación.....	72
4.5.2 Indicadores de desempeño calculados.....	72
4.5.3 Representación de materiales en gráficos de ASHBY	73
5. Conclusiones	76
Referencias Bibliográficas.....	78
Apéndices	84

Lista de Tablas

Tabla 1 Comparación entre fibras naturales, fibra de vidrio y fibra de carbono	23
Tabla 2 Propiedades materiales compuestos comúnmente utilizados	25
Tabla 3 Propiedades elásticas ortotrópicas equivalentes asignadas al material compuesto de cáñamo en el modelo numérico	43
Tabla 4 Propiedades mecánicas tracción matriz biopolimérica	50
Tabla 5 Propiedades mecánicas tracción fibras de cáñamo tejidas weft y warp	53
Tabla 6 Propiedades mecánicas tracción material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	55
Tabla 7 Propiedades mecánicas flexión matriz biopolimérica	60
Tabla 8 Propiedades mecánicas flexión material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	62
Tabla 9 Propiedades mecánicas flexión fibra de carbono	64
Tabla 10 Indicadores de desempeño específico en tracción de los materiales comparados	65
Tabla 11 Indicadores de desempeño específico en flexión de los materiales comparados	65
Tabla 12 Validación resultados experimentales	71
Tabla 13 Valores de entrada empleados en la comparación tipo Ashby entre el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP	72
Tabla 14 Indicadores de desempeño calculados para la comparación tipo Ashby entre el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP	73

Lista de Figuras

Figura 1 Mecanismos de transferencia de carga y falla en la interfaz fibra–matriz en materiales compuestos	20
Figura 2 Comparación esquemática entre un refuerzo unidireccional y una tela tejida, mostrando la alineación de fibras en el primer caso y la ondulación de fibras (crimp) junto con las direcciones de urdimbre y trama en el segundo	26
Figura 3 Fibra de cáñamo tejida	32
Figura 4 Placa de resina en proceso de curado	33
Figura 5 Resultado placa después de post curado.....	36
Figura 6 Probetas de fibra de carbono, resina biopolimérica y fibra de cáñamo cortadas.....	37
Figura 7 Gráfica esfuerzo-deformación tracción matriz biopolimérica.....	49
Figura 8 Gráfica esfuerzo-deformación tracción tejido warp.....	51
Figura 9 Gráfica esfuerzo-deformación tracción tejido weft	52
Figura 10 Gráfica esfuerzo-deformación tracción material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	54
Figura 11 Deformaciones ε_{yy} utilizando software Ncorr	56
Figura 12 Deformaciones ε_{yy} utilizando software Ncorr.....	57
Figura 13 Gráfica esfuerzo-deformación tracción fibra de carbono	58
Figura 14 Gráfica esfuerzo-deformación flexión matriz biopolimérica	59
Figura 15 Gráfica esfuerzo-deformación flexión material compuesto de fibras de cáñamo tejidas	61
Figura 16 Gráfica esfuerzo-deformación flexión fibras de carbono	63

Figura 17 Desplazamiento total en la probeta sometida a tracción uniaxial en la región lineal del material compuesto	67
Figura 18 Esfuerzo normal longitudinal en la probeta sometida a tracción uniaxial	68
Figura 19 Campo de desplazamiento total en la probeta sometida a flexión en tres puntos.....	69
Figura 20 Campo de esfuerzo direccional vertical en la probeta sometida a flexión en tres puntos	69
Figura 21 Mapa tipo Ashby de resistencia específica a tracción en función de la huella de carbono para el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.....	74
Figura 22 Mapa tipo Ashby de módulo específico en flexión en función de la huella de carbono para el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.....	75
Figura 23 Mezcla 78.6% resina y 21.4% endurecedor	92
Figura 24 Proceso de desgasificación	92
Figura 25 Antes y después del proceso de desgasificación.....	92
Figura 26 Vaciado de la resina en el molde	93
Figura 27 Proceso Hand lay-up	93
Figura 28 Resultado Hand lay-up	94
Figura 29 Patrón speckle	94
Figura 30 Prensa hidráulica	95
Figura 31 Prensa de platos calientes	95
Figura 32 Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS	96

Lista de Apéndices

<i>Apéndice A Lista técnica bio-resina.....</i>	<i>84</i>
<i>Apéndice B Código Python para diagramas de Ashby.....</i>	<i>86</i>
<i>Apéndice C Proceso experimental.....</i>	<i>92</i>
<i>Apéndice D Instrumentos utilizados.....</i>	<i>95</i>

Resumen

Título: Estudio del desempeño mecánico de materiales compuestos basados en telas de fibras de cáñamo tejidas^{1*}

Autor: Nicolas Becerra Leal, Dilan Stiven Useche Ardila^{2**}

Palabras Clave: materiales compuestos, fibras de cáñamo, biocompuestos, caracterización mecánica, ensayo de tracción, ensayo de flexión, índice mecánico-ambiental, aplicaciones aeronáuticas no estructurales

Descripción: Se evaluaron las propiedades mecánicas de un material compuesto polimérico reforzado con telas de fibras de cáñamo tejidas, con el propósito de analizar su pertinencia en aplicaciones aeronáuticas no estructurales. Para ello, se fabricó un biocompuesto a partir de resina epóxica biobasada y un refuerzo de cáñamo en configuración cuasi-isotrópica de cuatro capas, mediante un proceso de laminado manual tipo hand lay-up, seguido de curado bajo presión y postcurado térmico. Adicionalmente, se elaboraron probetas de la matriz sin refuerzo y se emplearon como referencia comparativa compuestos sintéticos de fibra de vidrio y fibra de carbono. La caracterización experimental se realizó mediante ensayos de tracción y flexión conforme a las normas ASTM D3039 y ASTM D7264. El compuesto de cáñamo presentó valores promedio de 54.56 MPa de resistencia y 2577.80 MPa de módulo en tracción, así como 92.92 MPa de resistencia y 4964.51 MPa de módulo en flexión, además de un coeficiente de Poisson aproximado de 0.17. Los resultados evidenciaron una mejora en rigidez frente a la matriz biopolimérica y un comportamiento más favorable en flexión que en tracción. La comparación con compuestos sintéticos mostró un desempeño mecánico absoluto y específico inferior; sin embargo, el material de cáñamo presentó una menor huella de carbono. A su vez se propuso un índice mecánico-ambiental que permitió establecer que la selección de estos materiales debe basarse en el equilibrio entre eficiencia mecánica e impacto ambiental.

|

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada. PhD Ingeniería Mecánica y Materiales. Codirector: Juan Sebastián León Becerra PhD Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Study of the Mechanical Performance of Composite Materials Based on Woven Hemp Fiber Fabrics

Author: Nicolas Becerra Leal, Dilan Stiven Useche Ardila

Key Words: composite materials, hemp fibers, biocomposites, mechanical characterization, tensile testing, flexural testing, mechanical-environmental index, non-structural aeronautical application

Description: The mechanical properties of a polymer composite reinforced with woven hemp fiber fabrics were evaluated to analyze its suitability for non-structural aeronautical applications. For this purpose, a biocomposite was manufactured using a bio-based epoxy resin and a hemp reinforcement arranged in a four-layer quasi-isotropic configuration through a hand lay-up process, followed by curing under pressure and thermal post-curing. In addition, neat resin specimens were produced, and synthetic composites reinforced with glass fiber and carbon fiber were used as comparative reference materials. Experimental characterization was carried out through tensile and flexural tests in accordance with ASTM D3039 and ASTM D7264, respectively. The hemp composite exhibited average tensile strength and modulus values of 54.56 MPa and 2577.80 MPa, respectively, as well as average flexural strength and modulus values of 92.92 MPa and 4964.51 MPa, respectively, in addition to an approximate Poisson's ratio of 0.17. The results showed an improvement in stiffness compared with the biopolymeric matrix and a more favorable behavior under flexural loading than under tensile loading. Comparison with synthetic composites revealed lower absolute and specific mechanical performance; however, the hemp-based material showed a lower carbon footprint. As the main contribution of the study, a mechanical-environmental index was proposed, making it possible to establish that the selection of these materials should be based on the balance between mechanical efficiency and environmental impact.

* Bachelor Thesis

** Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Octavio Andrés González Estrada. PhD in Mechanical and Materials Engineering. Codirector: Juan Sebastián León Becerra PhD in Mechanical Engineering.

Introducción

El uso de fibras naturales, como el cáñamo, en la fabricación de materiales compuestos ha cobrado relevancia en distintas aplicaciones de ingeniería debido a sus ventajas asociadas a la sostenibilidad y a la reducción de la huella de carbono (Elfaleh et al., 2023; Shanbhag et al., 2024). En particular, las telas de fibras de cáñamo tejidas empleadas como refuerzo en matrices poliméricas han sido identificadas como una alternativa con potencial para aplicaciones que demandan combinaciones favorables de ligereza y resistencia mecánica (Alonso-Montemayor et al., 2020).

En la industria aeronáutica, los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio en configuraciones cuasi isotrópicas se utilizan ampliamente en componentes interiores no estructurales, tales como paneles y elementos de aislamiento térmico y acústico, debido a su adecuada resistencia mecánica, baja densidad y comportamiento estable frente a cargas aplicadas en múltiples direcciones (Scarponi, 2015). No obstante, la posible sustitución parcial de la fibra de vidrio por fibras naturales ha sido objeto de interés en la literatura, motivada principalmente por la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado a los materiales compuestos convencionales. En este contexto, el cáñamo, como material renovable y de bajo impacto ambiental, presenta propiedades mecánicas competitivas para aplicaciones similares, aunque su desempeño bajo sollicitaciones mecánicas requiere ser optimizado y caracterizado con mayor profundidad (Alonso-Montemayor et al., 2020).

Desde una perspectiva de ingeniería mecánica, la viabilidad de un material compuesto para aplicaciones aeronáuticas no estructurales depende fundamentalmente de su capacidad para soportar cargas de servicio sin comprometer la rigidez, la resistencia y la estabilidad dimensional del componente. Si bien la fibra de vidrio continúa siendo la opción predominante en aplicaciones

aeronáuticas convencionales, diversos estudios sugieren que el cáñamo puede constituir una alternativa viable para piezas no críticas, especialmente cuando se emplea en configuraciones textiles que favorecen la distribución de esfuerzos y el desempeño mecánico global del material.

En el contexto colombiano, el cultivo de cáñamo ha experimentado un crecimiento significativo a partir del Decreto 613 ley 1787 (Ley 1787 de 2016, 2016), que regula el uso del cannabis para fines médicos y científicos, generando una disponibilidad creciente de biomasa residual susceptible de ser aprovechada en la fabricación de materiales compuestos y en esquemas de economía circular (Ahmed et al., 2022; Amaducci et al., 2015). Sin embargo, para que este potencial pueda materializarse en aplicaciones de ingeniería, resulta indispensable comprender de manera objetiva el comportamiento mecánico de los materiales compuestos reforzados con fibras de cáñamo, particularmente cuando se combinan con matrices poliméricas.

La caracterización mecánica de estos materiales constituye un aspecto clave para su posible implementación en la industria aeronáutica, donde se requieren materiales ligeros, resistentes y duraderos que operen bajo condiciones de carga bien definidas (Alonso-Montemayor et al., 2020; Naik et al., 2021; Samuel et al., 2022). En este sentido, la evaluación experimental del desempeño mecánico permite establecer criterios técnicos que faciliten la comparación con materiales sintéticos tradicionales, como la fibra de vidrio y la fibra de carbono, ampliamente utilizados en revestimientos interiores, asientos, paneles de piso y carcasas de equipos aeronáuticos (Kamarudin et al., 2022; Landolsi et al., 2022).

En este trabajo de grado se aborda la evaluación del desempeño mecánico de materiales compuestos reforzados con telas de fibras de cáñamo tejidas, con el propósito de analizar su viabilidad para aplicaciones aeronáuticas no estructurales. La investigación se enfoca en la caracterización de las propiedades mecánicas relevantes y en la comparación con materiales

compuestos convencionales, contribuyendo a la generación de conocimiento técnico que respalde el uso del cáñamo como alternativa en aplicaciones industriales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos a base de telas de fibras de cáñamo tejidas, para evaluar su idoneidad en aplicaciones aeronáuticas.

1.2 Objetivos Específicos

1. Construir probetas de un material compuesto con refuerzo de fibras naturales de cáñamo tejidas, bajo las normas ASTM D3039 y D7264 para realizar ensayos de tensión y flexión respectivamente.
2. Determinar las propiedades mecánicas en tracción y flexión de materiales compuestos reforzados con telas de fibras de cáñamo tejidas, mediante el ensayo ASTM D3039 evaluar la deformación última a tracción, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Mediante el ensayo ASTM D7264 evaluar el módulo de elasticidad por flexión y la resistencia última a la flexión.
3. Comparar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibra de cáñamo, fibra de vidrio y fibra de carbono mediante la evaluación de su desempeño en tracción y flexión. Se realizará una comparación directa de propiedades como relación resistencia-peso para tracción y rigidez relativa para flexión.
4. Proponer un índice de desempeño para materiales compuestos de fibras naturales de cáñamo y su impacto ambiental.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Materiales compuestos poliméricos

Los materiales compuestos poliméricos son sistemas multifásicos constituidos, de manera general, por una matriz continua y una fase de refuerzo, diseñados para combinar propiedades complementarias dentro de una misma estructura material (Syduzzaman et al., 2020). En ingeniería mecánica, su interés radica en la posibilidad de obtener combinaciones favorables de resistencia, rigidez y bajo peso a partir del diseño de la arquitectura interna del material, en lugar de depender únicamente de las propiedades de un constituyente homogéneo (Rajak et al., 2019; Syduzzaman et al., 2020).

En los compuestos reforzados con fibras, la matriz polimérica constituye la fase encargada de mantener la cohesión del sistema, proteger el refuerzo y transferir las cargas externas hacia las fibras, mientras que las fibras aportan la mayor contribución al desempeño mecánico del sistema, especialmente en términos de rigidez y resistencia (De et al., 2024). Asimismo, variables como la orientación de las fibras, la arquitectura del refuerzo y la fracción de fase reforzante influyen de manera directa en la respuesta global del material, al modificar la eficiencia de la transferencia de carga y la distribución interna de esfuerzos (De et al., 2024; Sharma et al., 2023).

Una característica fundamental de estos materiales es su comportamiento anisotrópico, determinado en gran medida por la orientación y disposición de las fibras. Esta particularidad permite diseñar materiales con propiedades mecánicas adaptadas a sollicitaciones específicas, pero también implica que su respuesta mecánica varía significativamente con la dirección de carga y el tipo de refuerzo empleado. En configuraciones textiles, como las telas tejidas, la interacción entre múltiples direcciones de fibra y la geometría del tejido introduce efectos adicionales que influyen

directamente en el comportamiento del material bajo solicitaciones de tracción y flexión (Chowdhury & Summerscales, 2024).

2.2 Mecánica de materiales compuestos

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos reforzados con fibras está gobernado por la interacción entre sus fases constituyentes, es decir, fibra, matriz e interfaz, así como por la arquitectura del refuerzo (De et al., 2024; Sharma et al., 2023). A diferencia de los materiales isotrópicos, estos sistemas presentan anisotropía, por lo que sus propiedades dependen de la dirección de carga, de la orientación de las fibras y de su distribución dentro del material.

Desde un enfoque micro mecánico, la respuesta elástica longitudinal del compuesto puede estimarse mediante la regla de mezclas, válida principalmente bajo condiciones ideales de iso-deformación y alineación efectiva del refuerzo (Abdalla, 2025). En esta aproximación, el módulo elástico longitudinal del compuesto puede expresarse como:

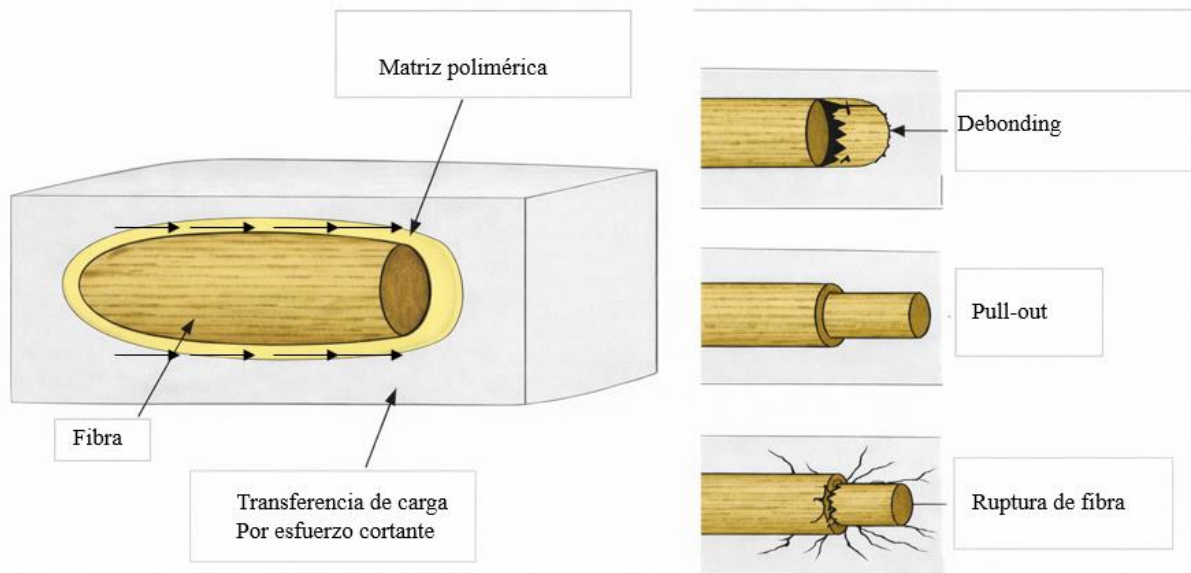
$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m \quad (1)$$

donde V_f y V_m corresponden a las fracciones volumétricas de la fibra y la matriz, respectivamente, y E_f y E_m a sus módulos elásticos.

No obstante, el comportamiento real del compuesto depende en gran medida de la eficiencia en la transferencia de carga entre matriz y fibras, la cual ocurre principalmente mediante esfuerzos cortantes en la interfaz fibra–matriz. Cuando esta interacción es deficiente, pueden generarse mecanismos de falla como deslizamiento interfacial, debonding local, microgrietas o rotura prematura de fibras como se ve en la Figura 1, afectando negativamente la rigidez y la resistencia del sistema (Chowdhury & Summerscales, 2024; Sharma et al., 2023).

Figura 1

Mecanismos de transferencia de carga y falla en la interfaz fibra–matriz en materiales compuestos



Bajo solicitaciones de tracción, la respuesta del material está dominada principalmente por las fibras orientadas en la dirección de carga, mientras que en flexión intervienen simultáneamente zonas sometidas a tracción, compresión y cortante (De et al., 2024; Kamruzzaman & Alam, 2024). Por esta razón, las propiedades obtenidas experimentalmente no dependen únicamente de las propiedades intrínsecas de la fibra y la matriz, sino también de la arquitectura del refuerzo, de la secuencia de apilamiento y de la calidad del proceso de fabricación (Abdalla, 2025; Zhou et al., 2024).

En materiales compuestos reforzados con telas tejidas, la respuesta mecánica resulta más compleja debido a la ondulación de las fibras, a la interacción entre las direcciones principales del tejido y a la variabilidad propia de fibras naturales como el cáñamo (Chowdhury & Summerscales, 2024; Donini & Molari, 2024). En este contexto, la caracterización experimental en tracción y

flexión constituye una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento real del laminado y para interpretar la influencia de la interfaz, la arquitectura textil y el proceso de fabricación sobre sus propiedades mecánicas (Abdalla, 2025; Kamruzzaman & Alam, 2024; Russo et al., 2024).

2.3 Interfaz fibra–matriz

La interfaz fibra–matriz constituye un elemento crítico en el comportamiento mecánico de los materiales compuestos, ya que controla la eficiencia en la transferencia de carga entre ambas fases (De et al., 2024; Sharma et al., 2023). Esta transferencia se produce principalmente mediante esfuerzos cortantes en la región interfacial y depende de la adherencia física, química y mecánica entre los constituyentes del material.

En materiales compuestos reforzados con fibras naturales, como el cáñamo, la interfaz adquiere una relevancia aún mayor debido a la diferencia entre la naturaleza hidrofílica de la fibra lignocelulósica y el carácter hidrofóbico de muchas matrices poliméricas, lo que puede reducir la compatibilidad entre ambas fases y limitar la eficiencia de la transferencia de carga (Shelly et al., 2025). Aunque en la literatura se reportan distintos tratamientos superficiales orientados a mejorar esta interacción, su efectividad depende del sistema fibra–matriz y de las condiciones de procesamiento empleadas (Shelly et al., 2025; Tazwar et al., 2025).

Desde el punto de vista mecánico, una interfaz deficiente puede inducir mecanismos de falla como debonding, pull-out de fibras y propagación de microgrietas, afectando de manera directa la rigidez y la resistencia del material compuesto (Shelly et al., 2025; Tazwar et al., 2025). En este sentido, la calidad interfacial no solo condiciona la respuesta global del compuesto, sino también la dispersión de sus propiedades mecánicas experimentales.

En el contexto de este trabajo, la interfaz fibra–matriz representa un aspecto clave para interpretar el comportamiento del laminado reforzado con telas de cáñamo, ya que la respuesta

mecánica observada en tracción y flexión depende no solo de las propiedades intrínsecas de la fibra y la matriz, sino también de la eficiencia con la que la carga es transferida entre ambas fases.

2.4 Fibras naturales como refuerzo

Las fibras naturales han sido ampliamente estudiadas como refuerzo en materiales compuestos poliméricos debido a su baja densidad, disponibilidad, carácter renovable y menor impacto ambiental relativo, lo que las convierte en una alternativa atractiva para aplicaciones de ingeniería de carga moderada o no estructurales (Ajayi et al., 2025; Kamarudin et al., 2022). Desde el enfoque de la ingeniería mecánica, una de sus principales ventajas radica en la posibilidad de obtener propiedades específicas favorables, particularmente en términos de relación resistencia–peso, frente a materiales tradicionales en determinadas aplicaciones (Ajayi et al., 2025; Kamarudin et al., 2022).

En la Tabla 1 se puede observar que las fibras sintéticas como la fibra de vidrio o la fibra de carbono, las fibras naturales presentan una mayor variabilidad en sus propiedades mecánicas, así como una menor compatibilidad con matrices poliméricas, debido principalmente a su naturaleza lignocelulósica e hidrofílica. Estas diferencias afectan directamente la eficiencia en la transferencia de carga y, en consecuencia, el desempeño mecánico del material compuesto (McKay et al., 2024; Shelly et al., 2025). Mientras que las fibras sintéticas ofrecen un comportamiento más uniforme y predecible, las fibras naturales requieren un mayor control en el diseño del material y en las condiciones de procesamiento para garantizar un desempeño adecuado (Ajayi et al., 2025).

En este contexto, factores como la arquitectura del refuerzo, la orientación de las fibras y la calidad de la interfaz fibra–matriz adquieren un papel determinante en el comportamiento mecánico del material, especialmente bajo solicitaciones de tracción y flexión (Abdalla, 2025;

Shelly et al., 2025). Estas consideraciones resultan fundamentales para evaluar la viabilidad de las fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos y constituyen la base para el análisis específico de compuestos reforzados con fibras de cáñamo desarrollado en este trabajo (Ajayi et al., 2025).

Tabla 1

Comparación entre fibras naturales, fibra de vidrio y fibra de carbono

Propiedad general	Fibras naturales	Fibra de vidrio	Fibra de carbono
Densidad relativa	Menor densidad, favorable para reducción de peso	Mayor densidad que las fibras naturales y de carbono	Menor que la fibra de vidrio, pero mayor que muchas fibras naturales
Desempeño mecánico general	Rigidez y resistencia inferiores en términos generales	Buen equilibrio entre resistencia, rigidez y costo	Desempeño mecánico superior, especialmente en rigidez específica
Uniformidad de propiedades	Mayor dispersión por origen biológico y condiciones de procesamiento	Propiedades más homogéneas	Propiedades más uniformes y predecibles
Interacción con matrices poliméricas	Puede requerir tratamientos superficiales para mejorar adhesión	Compatibilidad ampliamente estudiada y utilizada industrialmente	Buena, aunque depende del sistema matriz–proceso
Impacto ambiental relativo	Más favorable por origen renovable y menor demanda energética	Intermedio	Menos favorable por alto consumo energético en fabricación

2.5 Fibras de cáñamo

Las fibras de cáñamo (*Cannabis sativa* L.) se reconocen como una de las fibras naturales más prometedoras para su uso como refuerzo en materiales compuestos poliméricos, debido a su baja densidad, su amplia disponibilidad y sus propiedades mecánicas específicas favorables

(Shelly et al., 2025). En términos generales, la literatura reporta para la fibra de cáñamo una densidad cercana a 1.4 g/cm^3 , módulos elásticos del orden de 3 a 7 GPa y resistencias a tracción aproximadamente entre 550 y 1110 MPa, lo que respalda su consideración en aplicaciones de ingeniería de carga moderada y en compuestos de carácter no estructural o semi-estructural (Manaia et al., 2019).

Como se observa en la Tabla 2, la fibra de cáñamo en comparación con fibras sintéticas, como la fibra de vidrio y la fibra de carbono, las fibras de cáñamo presentan menores valores absolutos de resistencia y rigidez, pero ofrecen ventajas en términos de peso, costo y sostenibilidad (Ajayi et al., 2025; Manaia et al., 2019). No obstante, su comportamiento mecánico está condicionado por su composición lignocelulósica y su estructura interna, lo que se traduce en una mayor variabilidad de propiedades y en un comportamiento anisotrópico. Estas características influyen directamente en la eficiencia de la transferencia de carga y en la respuesta mecánica del material compuesto (Manaia et al., 2019; Shelly et al., 2025).

En materiales compuestos, el uso de fibras de cáñamo como refuerzo requiere un control adecuado de su integración dentro de la matriz, así como de la arquitectura del refuerzo (Manaia et al., 2019; Shelly et al., 2025). En configuraciones textiles, como telas tejidas, la orientación de las fibras, y la interacción entre direcciones principales (*warp* y *weft*) desempeñan un papel relevante en la distribución de esfuerzos y en el comportamiento bajo solicitaciones de tracción y flexión (Abdalla, 2025). Estas características hacen del cáñamo una alternativa viable para aplicaciones en las que se busca un balance entre desempeño mecánico, bajo peso y sostenibilidad (Ajayi et al., 2025; Manaia et al., 2019).

Tabla 2*Propiedades materiales compuestos comúnmente utilizados*

Material	Densidad [g/cm ³]	Módulo [GPa]	Resistencia [MPa]
Cáñamo	1.4	30–70	300–900
Fibra de vidrio	2.5	70–80	2000–3500
Fibra de carbono	1.8	200–600	3000–6000

En la Tabla 2, se puede observar que, aunque las fibras de cáñamo no alcanzan los valores absolutos de módulo y resistencia característicos de la fibra de vidrio o de la fibra de carbono, sí presentan una ventaja relevante en términos de densidad y sostenibilidad (Manaia et al., 2019; Shelly et al., 2025). Desde una perspectiva de diseño, esto implica que su evaluación no debe hacerse únicamente con base en propiedades absolutas, sino también en indicadores específicos y en el contexto real de aplicación. En componentes no estructurales, donde las exigencias de carga son moderadas y la reducción de peso constituye un criterio importante, el cáñamo puede representar una alternativa técnicamente viable, siempre que se controle adecuadamente la calidad de la interfaz, la arquitectura del refuerzo y la reproducibilidad del proceso de fabricación (Ajayi et al., 2025; McKay et al., 2024; Shelly et al., 2025).

2.6 Refuerzos textiles

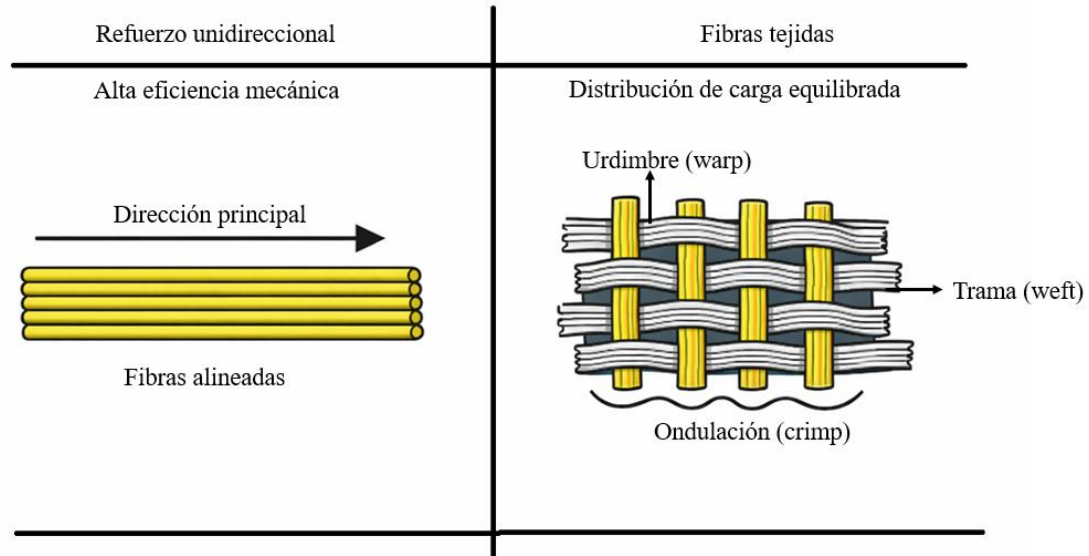
Las telas tejidas constituyen una arquitectura de refuerzo ampliamente utilizada en materiales compuestos debido a su estabilidad dimensional y capacidad para distribuir cargas en múltiples direcciones (Abdalla, 2025). Estas estructuras están formadas por fibras organizadas en direcciones principales conocidas como warp (urdimbre) y weft (trama).

A diferencia de los refuerzos unidireccionales, las telas tejidas presentan ondulación en las fibras (crimp), lo que genera desviaciones locales respecto a la dirección de carga (Abdalla, 2025). Este fenómeno reduce la eficiencia del refuerzo, ya que parte de la deformación inicial del sistema se asocia con la reorientación progresiva de las fibras antes de que la carga sea transmitida de manera más efectiva en su dirección principal.

Como consecuencia, los materiales compuestos reforzados con telas tejidas suelen presentar menores valores de módulo de elasticidad y resistencia que sistemas unidireccionales equivalentes, debido principalmente al efecto de la ondulación de las fibras (crimp), observado en la Figura 2, y a la trayectoria no rectilínea del refuerzo dentro del laminado (Abdalla, 2025). Sin embargo, estas arquitecturas ofrecen un comportamiento más equilibrado en el plano y una distribución más uniforme de propiedades en múltiples direcciones, lo que resulta ventajoso en aplicaciones sometidas a cargas multiaxiales o no perfectamente alineadas.

Figura 2

Comparación esquemática entre un refuerzo unidireccional y una tela tejida, mostrando la alineación de fibras en el primer caso y la ondulación de fibras (crimp) junto con las direcciones de urdimbre y trama en el segundo



La relevancia mecánica de esta arquitectura radica en que la respuesta del laminado no depende únicamente de las propiedades intrínsecas de la fibra, sino también de la forma en que el tejido redistribuye los esfuerzos entre urdimbre y trama (Abdalla, 2025). En consecuencia, diferencias locales en alineación, ondulación e impregnación pueden traducirse en variaciones apreciables de rigidez y resistencia. Este aspecto resulta especialmente importante en la interpretación de los resultados experimentales del presente estudio, ya que el comportamiento a tracción y flexión del material compuesto estará condicionado por la interacción entre la arquitectura textil y la secuencia de apilamiento adoptada (Abdalla, 2025; Parveez et al., 2022).

2.7 Requisitos técnicos de materiales para aplicaciones aeronáuticas no estructurales

Los materiales destinados a aplicaciones aeronáuticas no estructurales deben satisfacer simultáneamente requisitos de bajo peso, rigidez, resistencia y estabilidad dimensional, ya que la selección de materiales en aeronáutica está fuertemente condicionada por la reducción de masa, el desempeño mecánico en servicio y la confiabilidad operacional (Parveez et al., 2022; U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration & Federal Aviation Administration, 2012). Aunque estos componentes no forman parte de la estructura primaria de la

aeronave, sí deben conservar su integridad funcional durante la operación y frente a solicitudes de servicio asociadas a vibraciones, manipulación, mantenimiento y cargas locales, de modo que no comprometan la seguridad, la durabilidad ni la mantenibilidad del sistema.

En elementos como paneles interiores, recubrimientos, carcasas, divisores y soportes secundarios, propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción, la resistencia a flexión y la rigidez específica constituyen parámetros particularmente relevantes (Bouhamed et al., 2025; Parveez et al., 2022). Desde el enfoque de la ingeniería mecánica, la selección de material en estas aplicaciones no depende únicamente del valor máximo de resistencia, sino del balance entre capacidad mecánica, densidad, uniformidad del comportamiento y factibilidad de fabricación (Parveez et al., 2022; U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration & Federal Aviation Administration, 2012).

Los compuestos reforzados con fibra de vidrio se han consolidado como material de referencia en este tipo de aplicaciones debido a su combinación de resistencia, rigidez, costo relativamente accesible y estabilidad de procesamiento (Bouhamed et al., 2025; Parveez et al., 2022). En contraste, los compuestos reforzados con fibras naturales presentan ventajas asociadas a sostenibilidad, menor densidad y potencial reducción del impacto ambiental, pero también enfrentan limitaciones derivadas de la variabilidad del refuerzo, la sensibilidad a la humedad y la menor consistencia interfacial (Ajayi et al., 2025; McKay et al., 2024).

Por ello, la viabilidad de un material compuesto reforzado con fibras de cáñamo para aplicaciones aeronáuticas no estructurales debe evaluarse con base en criterios comparativos claros:

- Capacidad mecánica suficiente en tracción y flexión,
- Relación propiedad–peso favorable,
- Respuesta razonablemente uniforme en el plano del laminado y

- Posibilidad de fabricación reproducible con bajo contenido de defectos.

Bajo esta lógica, la comparación con materiales compuestos convencionales no debe entenderse como una sustitución directa en aplicaciones estructurales críticas, sino como una evaluación de desempeño para usos donde el compromiso entre funcionalidad mecánica y sostenibilidad resulte técnicamente justificable.

En este sentido, la caracterización experimental mediante ensayos normalizados proporciona una base objetiva para analizar si el material desarrollado puede satisfacer exigencias propias de aplicaciones no estructurales (Bouhamed et al., 2025; Parveez et al., 2022). Asimismo, permite identificar hasta qué punto variables como la arquitectura del tejido, la secuencia de apilamiento y la eficiencia de la interfaz fibra–matriz condicionan su respuesta frente a materiales compuestos tradicionales (Bitencourt et al., 2026; Shelly et al., 2025).

2.8 Síntesis del estado del arte y justificación del enfoque experimental

La revisión desarrollada permite establecer que los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han ganado relevancia como alternativa a los refuerzos sintéticos en aplicaciones no estructurales, principalmente por su baja densidad y su menor impacto ambiental relativo (Ajayi et al., 2025; McKay et al., 2024). Dentro de este grupo, el cáñamo destaca por presentar propiedades mecánicas favorables frente a otras fibras naturales de uso común, lo que ha motivado su estudio en sistemas compuestos poliméricos (Ajayi et al., 2025; Shelly et al., 2025). Sin embargo, la literatura también evidencia que estas propiedades presentan una dispersión considerable, asociada al origen de la fibra, al método de extracción, al contenido de humedad, al tratamiento superficial y al proceso de fabricación del laminado (Ajayi et al., 2025; McKay et al., 2024; Shelly et al., 2025).

De forma paralela, los estudios revisados coinciden en que la respuesta mecánica del compuesto no depende únicamente de la fibra como materia prima, sino también de la interacción entre la arquitectura del refuerzo, la calidad de la interfaz fibra–matriz y la secuencia de apilamiento (Abdalla, 2025; Shelly et al., 2025). En particular, cuando se emplean telas tejidas, la ondulación de las fibras y la interacción entre urdimbre y trama modifican la trayectoria de esfuerzos y reducen la eficiencia mecánica respecto a configuraciones unidireccionales (Abdalla, 2025). Esto implica que extrapolar resultados obtenidos para fibras individuales o refuerzos discontinuos hacia laminados tejidos puede conducir a interpretaciones incompletas.

Asimismo, aunque diversos trabajos reportan mejoras mecánicas tras la aplicación de tratamientos superficiales o cambios en el proceso de fabricación, los resultados no siempre son directamente comparables entre sí (Ajayi et al., 2025; Shelly et al., 2025). Una razón importante es la falta de uniformidad en variables como el tipo de matriz, la arquitectura del tejido, la fracción de fibra, el método de consolidación y el procedimiento de ensayo. En consecuencia, persiste una dificultad metodológica relevante: la literatura ofrece tendencias generales útiles, pero todavía no proporciona un marco suficientemente homogéneo para establecer comparaciones directas y concluyentes sobre el desempeño de compuestos laminados reforzados con telas de cáñamo (McKay et al., 2024).

A partir de lo anterior, la brecha principal identificada en este trabajo se centra en la caracterización mecánica sistemática de materiales compuestos reforzados con telas tejidas de cáñamo, fabricados bajo condiciones controladas y evaluados mediante normas estandarizadas, así como en su comparación con materiales compuestos convencionales de referencia (Shelly et al., 2025). Esta brecha es especialmente relevante si se pretende discutir su posible uso en aplicaciones aeronáuticas no estructurales, donde el criterio de selección no depende solo de la sostenibilidad

del material, sino de la relación entre capacidad mecánica, peso y consistencia del comportamiento (Bouhamed et al., 2025; Parveez et al., 2022).

En este contexto, el enfoque experimental adoptado en esta investigación se justifica porque permite evaluar directamente las propiedades mecánicas más pertinentes para el problema planteado: módulo elástico, resistencia a tracción, resistencia a flexión y métricas específicas de desempeño, bajo procedimientos comparables y reproducibles (Bouhamed et al., 2025; Parveez et al., 2022). Además, al emplear una configuración de laminado cuasi-isotrópica, el estudio incorpora una condición de diseño más cercana a aplicaciones reales en las que las cargas no actúan exclusivamente en una sola dirección (Bitencourt et al., 2026; Liang et al., 2026; Wei & Rong, 2025).

3. Materiales y métodos

3.1 Enfoque y diseño experimental

El presente trabajo se desarrolla bajo un enfoque experimental y cuantitativo, orientado a la caracterización mecánica de materiales compuestos biopoliméricos reforzados con telas de fibras de cáñamo tejidas. El estudio tiene un carácter comparativo, ya que los resultados obtenidos se analizan frente a propiedades reportadas para materiales compuestos tradicionales empleados en aplicaciones aeronáuticas no estructurales.

El alcance del estudio se centra en la evaluación del comportamiento mecánico bajo ensayos de tracción y flexión, considerados representativos de las solicitaciones a las que están sometidos componentes no estructurales en el sector aeronáutico. No se contemplan en este trabajo análisis de fatiga, impacto ni comportamiento a largo plazo, por lo que las conclusiones se limitan a condiciones de carga cuasiestáticas.

3.2 Materiales y equipo

3.2.1 Fibras de cáñamo tejidas

Se utilizó tela de cáñamo referencia LSK con un peso de 305g/m² (Hemperator: Medellín, Colombia). De acuerdo con la arquitectura del tejido, las fibras se organizan en dos direcciones principales conocidas como warp y weft. En la Figura 3 se ilustra la identificación de la dirección de la fibra con una cinta de enmascarar

Figura 3

Fibra de cáñamo tejida



3.2.2 Resina epóxica biobasada

Se empleó una resina epóxica biobasada referencia BIOinfusion (Entropy Resins: San Leandro, EEUU), con un contenido 32 % biobasado (Apéndice A). Para su preparación, se utilizó una proporción correspondiente al 78.6% en peso de resina y 21.4% en peso de endurecedor.

Posteriormente, ambos componentes fueron mezclados de manera uniforme durante 2 minutos, obteniendo una mezcla homogénea; sin embargo, se evidenció la presencia de una alta cantidad de burbujas, lo cual podría afectar la integridad estructural de la placa.

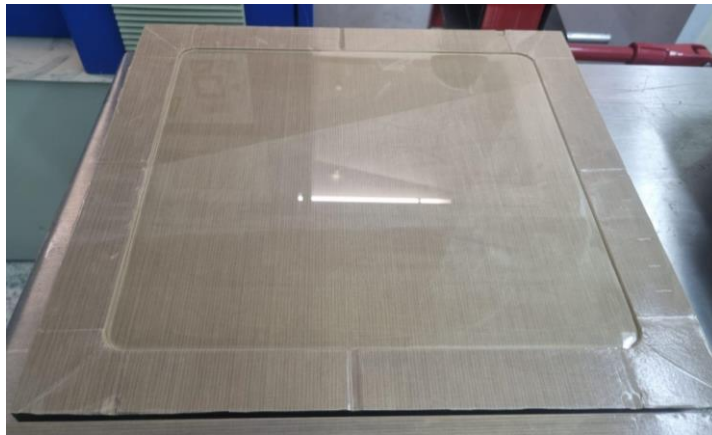
Con el fin de eliminar el aire atrapado, la mezcla fue sometida a un proceso de desgasificación en cámara de vacío durante un tiempo total de 15 minutos, dividido en intervalos

de 10 y 5 minutos. En la se observa la salida de burbujas de aire a la superficie. Finalmente, se presenta una comparación entre la resina antes y después del proceso de desgasificación (Apéndice C).

Una vez preparada la mezcla, se dispuso de un tiempo de trabajo aproximado de una hora para su vertido en el molde. La resina fue colocada hasta llenar completamente la cavidad, procurando mantener el sistema sobre una superficie nivelada con el fin de garantizar un espesor uniforme. No se aplicó presión adicional durante esta etapa, con el objetivo de evitar el desplazamiento del material fuera del molde y la posible generación de defectos internos asociados a una mala distribución de la resina. se presenta el proceso de vertido, mientras que en la Figura 4 se muestra la cavidad completamente llena, previo al curado inicial de 24 horas y 8 horas de post curado en la prensa de platos calientes durante 8 horas a 82°C (Apéndice C).

Figura 4

Placa de resina en proceso de curado



3.2.3 Material compuesto reforzado con fibra de carbono

Se empleó un material compuesto reforzado de tejido plano de fibra de carbón 3K, el cual se caracteriza por un entrelazado 1×1, donde cada hilo pasa alternamente por encima y por debajo, garantizando excelente distribución de carga. El material tiene una densidad de 200 g/m²

3.2.4 Equipos de fabricación

Para la fabricación de las probetas se utilizó una cámara de vacío o desgasificadora de vacío máximo de 0.02 mbar (Dosivac DVR II 3A, Dosivac), la cual permite la eliminación de aire atrapado en mezclas de resina mediante la aplicación de presión reducida, contribuyendo a la obtención de materiales con menor contenido de vacíos, (Apéndice C).

Asimismo, se empleó un molde de teflón para la conformación de las placas, seleccionado por sus propiedades antiadherentes y estabilidad térmica, lo que facilita el desmoldeo y la obtención de superficies uniformes. Para la aplicación de presión durante el proceso de consolidación, se utilizó una prensa hidráulica de 12 toneladas, la cual permite ejercer cargas controladas sobre el material, favoreciendo la compactación del sistema fibra-matriz (Apéndice D).

Adicionalmente, se utilizó una prensa de platos calientes con una capacidad máxima de 5000 kN, y una temperatura máxima de 300 °C (LabPro, Fontijne Presses), equipo que permite aplicar temperatura de manera uniforme sobre el material durante el post curado, garantizando condiciones térmicas controladas. Finalmente, el corte de las probetas se realizó mediante un sistema de corte por chorro de agua, herramienta que permite obtener geometrías precisas sin inducir daños térmicos en el material.

3.2.5 Equipos de caracterización

Previo a la realización de los ensayos, se determinaron las dimensiones de cada probeta mediante un calibrador mecánico (pie de rey), y su masa fue medida utilizando una balanza de precisión, con una resolución de 0.1 mg y un error de ± 0.1 mg, con el fin de garantizar la exactitud de los parámetros geométricos requeridos para el cálculo de las propiedades mecánicas.

Los ensayos de tracción y flexión fueron realizados en una máquina universal de ensayos H25KS (Tinius Olsen, Pennsylvania), con una capacidad máxima de 25 kN. Este equipo fue utilizado para evaluar el comportamiento mecánico en tracción de las fibras en direcciones warp y weft, así como del material compuesto de cáñamo, fibras de carbono y la matriz biopolimérica. De igual manera, se empleó para los ensayos de flexión correspondientes al material compuesto de cáñamo, la matriz y el material de fibra de carbono.

3.3 Fabricación del material compuesto y de las probetas

3.3.1 Ensamblaje y laminado

El material compuesto fue fabricado mediante la disposición de capas de tela de cáñamo previamente tratadas dentro de un molde recubierto con teflón de 25 cm x 25 cm. La matriz epóxica biobasada, previamente preparada y desgasificada, fue aplicada mediante un proceso manual tipo hand lay-up, con el objetivo de asegurar la adecuada impregnación de las fibras.

Primero se impregno el molde con una pequeña capa de resina y se colocó una lámina de tela. Luego se cubrió la superficie con más resina, ayudando a esparcirla mediante una herramienta, repitiendo este proceso hasta colocar 4 capas de tela, las cuales fueron organizadas siguiendo una configuración cuasi-isotrópica, con orientaciones de 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° siguiendo el proceso Hand lay-up, lo que permite una distribución más uniforme de las cargas en el plano del material. Para finalizar, se vertió una capa de resina en la superficie, procurando que la matriz se incorporara de manera uniforme al material (Apéndice C).

3.3.2 Consolidación y curado

Una vez completado el ensamblaje del laminado, el molde fue cerrado y sometido a un proceso de consolidación mediante la aplicación de presión controlada utilizando una prensa

hidráulica. Este procedimiento permite mejorar la compactación del material, reducir la presencia de vacíos y favorecer la adhesión entre la matriz y el refuerzo.

El curado inicial del material se llevó a cabo durante un periodo de 24 horas bajo un rango de presión de 2.5 y 3.5 toneladas métricas. Posteriormente, se realizó un proceso de post curado en prensa de platos calientes, en el cual se aplicó una temperatura controlada de 82 °C durante 8 horas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la resina. Este tratamiento térmico permite completar la polimerización de la matriz y estabilizar las propiedades mecánicas del material compuesto (Apéndice D).

Finalmente, una vez finalizado el proceso térmico, como se ve en la Figura 5 las placas fueron enfriadas a temperatura ambiente y desmoldadas para su posterior mecanizado.

Figura 5

Resultado placa después de post curado



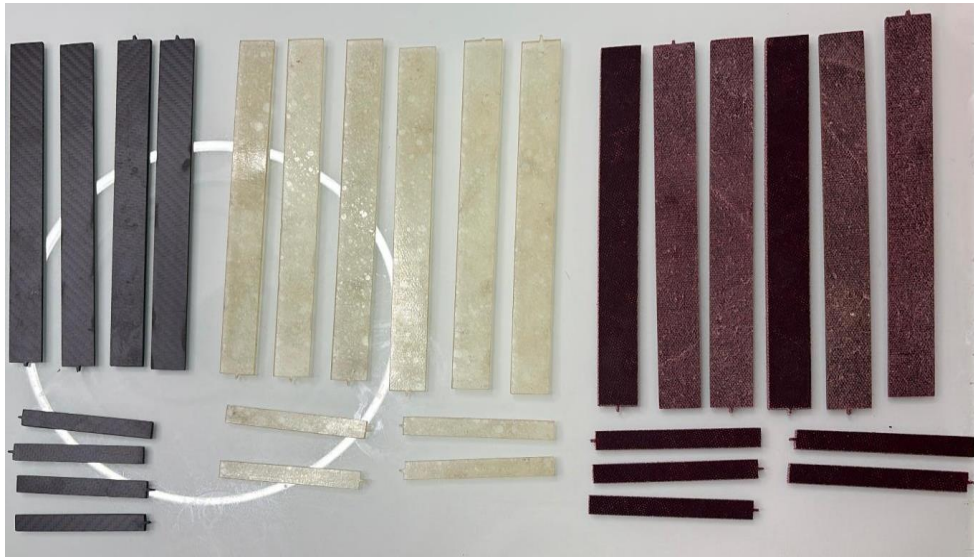
3.3.3 Corte y preparación

Las probetas fueron obtenidas de acuerdo con las dimensiones establecidas en las normas ASTM D3039 para ensayos de tracción y ASTM D7264 para ensayos de flexión, donde se presenta el plano de corte. El proceso de corte se realizó mediante una máquina de corte por chorro de agua a alta presión, lo cual permite evitar alteraciones térmicas en el material y preservar sus propiedades mecánicas. Para los ensayos de tracción, se cortaron las probetas de 240 mm de largo

y 25 mm de ancho, para los ensayos de flexión se cortaron de 100 mm de largo y 13 mm de ancho, tal como se ve en la Figura 6.

Figura 6

Probetas de fibra de carbono, resina biopolimérica y fibra de cáñamo cortadas



Previo a la realización de los ensayos mecánicos, se determinaron las dimensiones de cada probeta utilizando un calibrador mecánico, mientras que la masa fue medida mediante una balanza de precisión, Con el fin de garantizar la confiabilidad de las mediciones, cada probeta fue pesada en tres ocasiones, empleando el valor promedio para los cálculos posteriores.

Adicionalmente, en algunas probetas destinadas a ensayos de tracción se aplicó un patrón de speckle superficial, con el objetivo de implementar técnicas de correlación digital de imágenes (DIC) utilizando el software Ncorr. Este procedimiento permite registrar los campos de desplazamiento y deformación del material durante el ensayo, facilitando el análisis del módulo de Poisson (Apéndice C).

3.4 Ensayos mecánicos

La caracterización mecánica de los materiales compuestos evaluados en este estudio se llevó a cabo mediante ensayos de tracción y flexión, seleccionados por su representatividad frente a las sollicitaciones mecánicas típicas de aplicaciones aeronáuticas no estructurales.

Con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados y su comparabilidad con datos reportados en la literatura, los ensayos se realizaron siguiendo normas técnicas internacionalmente reconocidas. La aplicación de procedimientos normalizados asegura condiciones de ensayo controladas y criterios consistentes para la evaluación del desempeño mecánico de los materiales compuestos analizados.

3.4.1 Tracción

El comportamiento mecánico a tracción fue evaluado mediante ensayos realizados conforme a la norma ASTM D3039, empleada para la determinación de propiedades de materiales compuestos reforzados con fibras. Esta metodología se aplicó al material compuesto de fibras de cáñamo, a la matriz biopolimérica y al material compuesto de fibra de carbono.

Las probetas fueron dimensionadas de acuerdo con la norma, con un ancho de 25 mm y una longitud total de 240 mm, estableciendo una longitud entre mordazas de 150 mm. Para cada material se ensayaron cinco probetas. Los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min, garantizando tiempos de fractura dentro del rango recomendado.

El comportamiento mecánico de las telas de fibra de cáñamo fue evaluado mediante ensayos de tracción conforme a la norma ASTM D5035-11, la cual establece el método para la caracterización de materiales textiles. Este procedimiento se aplicó con el fin de determinar las propiedades mecánicas del refuerzo en estado seco, considerando dos direcciones principales del tejido: warp y weft, analizando 5 probetas de cada tipo.

Las probetas fueron preparadas con dimensiones de 25 mm de ancho y 100 mm de longitud, estableciendo una longitud entre mordazas de 75 mm. Los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento constante de 30 mm/min.

Durante cada ensayo, las probetas fueron sometidas a carga axial creciente hasta su falla, registrando la respuesta esfuerzo–deformación. A partir de estos datos se determinaron propiedades mecánicas como el módulo elástico, la resistencia última a tracción y la deformación a la falla.

3.4.2 Flexión

El comportamiento a flexión fue evaluado mediante ensayos realizados conforme a la norma ASTM D7264, empleando una configuración de flexión en tres puntos. Este procedimiento se aplicó al material compuesto de cáñamo, a la matriz biopolimérica y al material de fibra de carbono, ensayando un total de cinco probetas por cada material.

Las probetas fueron preparadas con dimensiones de 12.5 mm de ancho y 100 mm de longitud, estableciendo una distancia entre apoyos de 80 mm. Los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento constante de 5 mm/min.

Durante cada ensayo, las probetas fueron sometidas a carga hasta su falla, registrando la respuesta carga–deflexión. A partir de estos datos se determinaron propiedades como el módulo flexional y la resistencia a flexión.

3.5 Modelación numérica del material compuesto

Con el fin de complementar la caracterización experimental, se desarrolló un modelo numérico del laminado en ANSYS Workbench 2026 R1 (ANSYS, 2026). La geometría de las probetas se definió en el módulo de modelado y, posteriormente, en ACP (Pre) se configuró el laminado mediante la asignación del material equivalente, el espesor de capa, la orientación de las

láminas y la secuencia de apilamiento. El modelo se planteó para representar la respuesta elástica global inicial del material compuesto y contrastarla con los resultados experimentales, sin pretender describir de manera explícita la microestructura del tejido ni los mecanismos de daño o falla del laminado.

Dado que la licencia académica utilizada no dispone de herramientas avanzadas de micromecánica automática para la combinación directa fibra–matriz, el material fue representado mediante un material ortotrópico equivalente, cuyas propiedades fueron determinadas a partir de los resultados experimentales obtenidos para la matriz biopolimérica, la tela tejida de cáñamo y el material compuesto final. De esta manera, el modelo numérico no se planteó como una representación micromecánica detallada de cada constituyente, sino como una aproximación equivalente orientada a reproducir la respuesta global del laminado.

3.5.1 Determinación de la fracción volumétrica de fibra

Como parámetro inicial para la definición del material equivalente, se determinó la fracción volumétrica de fibra a partir de las masas medidas experimentalmente de la placa de biocompuesto y de la tela de cáñamo empleada en su fabricación. La masa total de la placa de biocompuesto fue de $W_c=276.05$ g, mientras que la masa de la tela de cáñamo fue de $W_f=144.95$ g. Por diferencia, la masa correspondiente a la matriz biopolimérica se obtuvo como:

$$W_m = W_c - W_f = 131.10 \text{ g}$$

Posteriormente, utilizando una densidad de 1.49 g/cm^3 para la fibra de cáñamo y de 1.14 g/cm^3 para la matriz biopolimérica, se determinaron los volúmenes absolutos de cada fase mediante la relación masa sobre densidad:

$$V_f^{abs} = \frac{W_f}{\rho_f} = 97.28 \text{ cm}^3$$

$$V_m^{abs} = \frac{W_m}{\rho_m} = 115.00 \text{ cm}^3$$

El volumen total del biocompuesto se calculó como la suma de ambos aportes:

$$V_c = V_f^{abs} + V_m^{abs} = 212.28 \text{ cm}^3$$

Por tanto:

$$V_f = \frac{V_f^{abs}}{V_c} = 0.4582 \quad ; \quad V_m = \frac{V_m^{abs}}{V_c} = 0.5418 \quad (2)$$

En consecuencia, el material compuesto presentó una fracción volumétrica de fibra de 45.82 % y una fracción volumétrica de matriz de 54.18 %. Estos valores se utilizaron posteriormente como referencia para la determinación de la densidad equivalente y para la definición de las propiedades globales del material en la modelación numérica.

3.5.2 *Determinación de la densidad del material*

A partir de las fracciones volumétricas estimadas para la fibra y la matriz, se calculó la densidad equivalente del biocompuesto mediante la regla de mezclas:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3)$$

Donde ρ_f y ρ_m corresponden a las densidades de la fibra de cáñamo y de la matriz biopolimérica, respectivamente, mientras que V_f y V_m representan sus fracciones volumétricas. Sustituyendo los valores obtenidos previamente, se determinó una densidad equivalente del material compuesto de:

$$\rho_c = 1300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Este valor se utilizó como propiedad global de entrada para la definición del material equivalente en la modelación numérica.

3.5.3 *Determinación de las propiedades elásticas equivalentes*

Las propiedades mecánicas del material compuesto utilizadas en la modelación numérica se basaron en los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de tracción y flexión. En tracción, el material compuesto presentó un módulo de elasticidad promedio de:

$$E_x = 2577.80 \text{ MPa} = 2.58 \text{ GPa}$$

Mientras que la matriz biopolimérica presentó un módulo promedio de:

$$E_m = 1721.46 \text{ MPa}$$

Con el fin de estimar las propiedades transversales del material ortotrópico equivalente, primero se calculó un módulo efectivo del refuerzo a partir de la regla de mezclas longitudinal:

$$E_x = E_f V_f + E_m V_m \quad \rightarrow \quad E_f = \frac{E_x - E_m V_m}{V_f} = 3590.2 \text{ MPa}$$

Con el propósito de estimar el comportamiento transversal del material ortotrópico equivalente, se calculó primero un módulo efectivo del refuerzo a partir de la regla de mezclas longitudinal y, posteriormente, se empleó la relación inversa para obtener el módulo transversal equivalente. Mediante este procedimiento se obtuvo:

$$E_y = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f} = E_z \quad (4)$$

3.5.4 *Estimación coeficientes de Poisson y módulos cortantes*

Para completar la definición del material ortotrópico equivalente en ACP, se utilizó el coeficiente de Poisson medido experimentalmente en la dirección xy del biocompuesto. Dado que no se contó con una determinación experimental independiente en las direcciones yz y xz , se optó por adoptar ese mismo valor como aproximación para completar la matriz de propiedades del material equivalente. En este trabajo se empleó:

$$v_{xy} = v_{yz} = v_{xz} = 0.16$$

A partir de estos valores y de los módulos de elasticidad equivalentes previamente determinados, los módulos cortantes fueron estimados usando la relación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

En consecuencia, las propiedades ortotrópicas equivalentes definidas en ANSYS fueron las presentes en la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades elásticas ortotrópicas equivalentes asignadas al material compuesto de cáñamo en el modelo numérico.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Módulo elástico longitudinal	E_x	2.58	GPa
Módulo elástico transversal en plano	E_y	2.26	GPa
Módulo elástico fuera del plano	E_z	2.26	GPa
Coefficiente de Poisson longitudinal-transversal	ν_x	0.17	
Coefficiente de Poisson transversal-fuera del plano	ν_y	0.17	
Coefficiente de Poisson longitudinal-fuera del plano	ν_z	0.17	
Módulo cortante en plano	G_{xy}	1.103	GPa
Módulo cortante transversal	G_{yz}	0.966	GPa
Módulo cortante longitudinal-fuera del plano	G_{xz}	0.966	GPa

3.5.5 Definición de apilamiento

El laminado fue definido en ACP (Pre) a partir de un material tipo fabric asociado al material ortotrópico equivalente al material compuesto. A cada capa se le asignó un espesor de 0.75 mm, de manera que el laminado completo alcanzara un espesor total de 3 mm.

Posteriormente, mediante la herramienta de stackup, se implementó el apilamiento del material sobre la geometría de la probeta a través de cuatro láminas consecutivas, cada una asociada al mismo fabric y orientada de acuerdo con la secuencia $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$. Esta configuración permitió representar en el modelo numérico la disposición cuasi-isotrópica adoptada experimentalmente para el biocompuesto.

3.5.6 Modelación del ensayo a tracción

Para la simulación del ensayo a tracción se empleó la geometría de la probeta utilizada experimentalmente. En static structural, se aplicó un fixed support en uno de los extremos de la probeta, con el fin de restringir completamente su movimiento en dicha zona de sujeción. En el extremo opuesto se definió un remote displacement, imponiendo un desplazamiento controlado de 1.5 mm en la dirección longitudinal x , mientras que los desplazamientos en las direcciones y y z se fijaron en 0 mm. Asimismo, las rotaciones se restringieron para evitar movimientos rígidos adicionales del modelo.

La carga se aplicó de manera gradual mediante una condición ramped, con el propósito de obtener la respuesta elástica del laminado bajo sollicitación uniaxial. A partir de esta configuración se evaluaron la deformación total, la distribución de esfuerzo normal longitudinal y la reacción global del modelo, con el fin de contrastar la respuesta numérica con los resultados experimentales del biocompuesto.

3.5.7 Modelación del ensayo de flexión de 3 puntos

La simulación del ensayo de flexión en tres puntos se realizó en static structural a partir de la geometría de la probeta empleada experimentalmente. Para representar de forma simplificada el sistema de apoyos, se definieron dos restricciones en los bordes inferiores de la probeta. En uno de los extremos se impuso un desplazamiento nulo en las direcciones x , y y z , mientras que en el

apoyo opuesto se restringieron únicamente los desplazamientos en y y z , dejando libre el desplazamiento en x . Esta configuración permitió reproducir un apoyo fijo y un apoyo móvil, evitando la sobre-restricción del modelo durante la flexión.

La carga se aplicó en la región central de la probeta mediante un desplazamiento impuesto en la dirección vertical, con un valor de 12 mm en el eje y , mientras que los desplazamientos en x y z se mantuvieron libres. La condición se aplicó de manera gradual para obtener la respuesta global del laminado bajo flexión.

A partir de esta configuración se evaluaron la deformación total, la deformación direccional y la reacción global del modelo, con el fin de comparar la respuesta numérica con los resultados experimentales del ensayo de flexión.

3.6 Comparación tipo Ashby entre materiales compuestos

3.6.1 Recopilación y tratamiento de la información

Con el propósito de comparar el desempeño del compuesto de cáñamo desarrollado en esta investigación frente a materiales compuestos de uso convencional, se planteó una comparación simplificada basada en la metodología de selección de materiales tipo Ashby. Para ello, se consideraron tres materiales: el compuesto de cáñamo fabricado y caracterizado experimentalmente en este trabajo, un compuesto reforzado con fibra de vidrio (GFRP) y un compuesto reforzado con fibra de carbono (CFRP).

La información correspondiente al compuesto de cáñamo se obtuvo a partir de los resultados experimentales de tracción y flexión desarrollados en esta investigación, adoptando valores promedio representativos del laminado para fines comparativos. En el caso de los materiales de referencia GFRP y CFRP, se seleccionaron laminados comerciales reportados en la base de datos MatWeb (Li et al., 2012; Matweb, 2015), procurando mantener la mayor

equivalencia posible con el material estudiado, particularmente en lo relativo al uso de refuerzos continuos y matrices de naturaleza polimérica. Para cada material se recopilaron las propiedades mecánicas consideradas relevantes para el análisis, a saber: resistencia última a tracción, módulo de flexión y densidad. La organización, sistematización y cálculo preliminar de la información se llevó a cabo en Microsoft Excel.

Como variable ambiental se empleó la huella de carbono cradle-to-gate, expresada en kg CO₂e/kg de material. Dado que el presente análisis no tuvo como objetivo la realización de un análisis de ciclo de vida completo, sino una comparación simplificada orientada a la selección preliminar de materiales, la huella de carbono de cada compuesto se estimó mediante una regla de mezcla basada en fracciones másicas de fibra y matriz, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Cf_{comp} = w_f Cf_f + w_m Cf_m \quad (6)$$

Donde Cf_{comp} representa la huella de carbono del compuesto, w_f y w_m corresponden a las fracciones másicas de fibra y matriz, respectivamente, y Cf_f y Cf_m representan las huellas de carbono asociadas a dichos constituyentes. En el caso del compuesto de cáñamo, las fracciones másicas se determinaron a partir de las masas reales de refuerzo y matriz empleadas durante la fabricación del laminado; para los materiales GFRP y CFRP, en cambio, se adoptaron valores representativos a partir de la información disponible en las referencias seleccionadas.

3.6.2 Cálculo de índices de desempeño

Con el fin de comparar materiales de distinta densidad sobre una base homogénea, se emplearon propiedades mecánicas específicas. Para el análisis a tracción se utilizó la relación resistencia-peso, definida mediante la relación entre la resistencia última a tracción y la densidad del material:

$$I_t = \frac{\sigma_t}{\rho} \quad (7)$$

Donde I_t corresponde a la resistencia específica, σ_t a la resistencia última a tracción y ρ a la densidad del material.

De manera análoga, para el análisis en flexión se empleó el módulo específico en flexión, calculado como la relación entre el módulo de flexión y la densidad:

$$I_f = \frac{E_{flex}}{\rho} \quad (8)$$

Donde I_f corresponde a la resistencia específica, E_f a la resistencia última a tracción y ρ a la densidad del material.

Adicionalmente, con el propósito de integrar en un mismo criterio comparativo la dimensión mecánica y la dimensión ambiental, se calcularon índices mecánico-ambientales para tracción y flexión, definidos como:

$$I_{t,CO2} = \frac{I_t}{Cf_{comp}} \quad (9)$$

$$I_{f,CO2} = \frac{I_f}{Cf_{comp}} \quad (10)$$

Estos índices permitieron estimar el desempeño mecánico específico suministrado por cada material en relación con su huella de carbono incorporada, lo cual facilitó una comparación simplificada entre las alternativas evaluadas.

3.6.3 Construcción de gráficos comparativos y mapas tipo Ashby

A partir de los indicadores previamente definidos, se construyeron, en primera instancia, gráficos comparativos directos entre los tres materiales, utilizando como variables la resistencia específica frente a la huella de carbono y el módulo específico en flexión frente a la huella de carbono. Dichas representaciones permitieron visualizar de manera directa la posición relativa del

compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP en términos de desempeño mecánico e impacto ambiental simplificado.

Posteriormente, se elaboraron mapas tipo Ashby con el fin de contextualizar la posición de los tres materiales analizados dentro de un marco comparativo más amplio de familias de materiales de ingeniería. Para ello, los puntos correspondientes al compuesto de cáñamo, al GFRP y al CFRP se ubicaron a partir de los valores calculados en este trabajo, mientras que las regiones asociadas a distintas familias de materiales se representaron mediante envolventes aproximadas de referencia. La construcción de estos mapas se realizó mediante programación en Python, buscando definir los ejes en escala logarítmica, representar las regiones de referencia y superponer los materiales evaluados. Tales regiones no corresponden a límites absolutos ni a valores únicos, sino a intervalos típicos empleados con fines comparativos y de contextualización visual, en concordancia con la lógica general de los mapas de selección de materiales. En este sentido, los mapas elaborados constituyen una representación de apoyo para interpretar la posición relativa de los materiales estudiados, sin reemplazar los resultados cuantitativos específicos obtenidos para cada uno de ellos.

Este enfoque permite evaluar el desempeño relativo de los materiales en aplicaciones donde el peso es un factor crítico, como en estructuras aeronáuticas.

4. Resultados

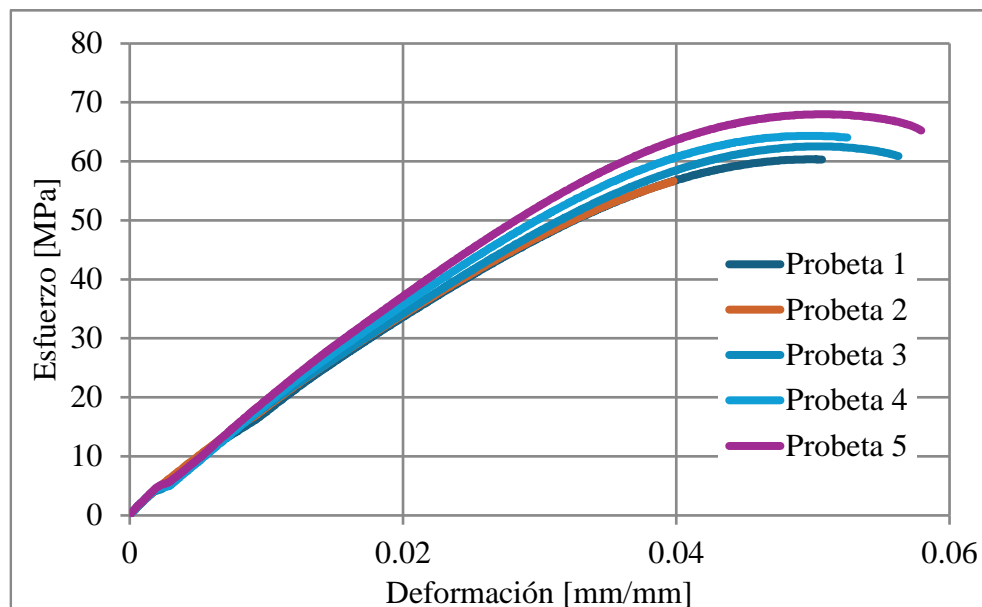
4.1 Ensayo de tracción

4.1.1 Matriz biopolimérica

En la Figura 7 se presentan las curvas esfuerzo–deformaciones obtenidas para las probetas de la matriz biopolimérica. Se observa un comportamiento no lineal desde etapas tempranas de la carga, característico de materiales poliméricos, asociado a procesos de reorganización molecular y acomodación interna. La presencia de una región cuasi-lineal de corta extensión evidencia una baja rigidez inicial del material, así como la ausencia de un límite elástico claramente definido. La reducida dispersión entre las curvas, con una desviación estándar máxima de 4.351 MPa, indica una adecuada repetibilidad experimental y consistencia en el proceso de fabricación del material.

Figura 7

Gráfica esfuerzo-deformación tracción matriz biopolimérica



A partir de los datos experimentales mostrados en la Figura 7, se determinaron el esfuerzo máximo, la deformación máxima y el módulo de elasticidad del material, conforme a la norma

ASTM 3039, presentados en la Tabla 4. Los resultados evidencian valores bajos de módulo elástico y resistencia última a la tracción, coherentes con el comportamiento típico de matrices poliméricas. En particular, el módulo de elasticidad refleja una baja rigidez del material, indicando una alta capacidad de deformación ante la aplicación de carga, mientras que la resistencia máxima confirma una capacidad moderada de soportar esfuerzos antes de la falla. Por su parte, la deformación máxima alcanzada, del orden de 0.04–0.05 mm/mm, sugiere un comportamiento semi-dúctil, en el cual el material presenta cierta capacidad de deformación antes de fracturarse, sin llegar a comportarse como un polímero altamente dúctil. En conjunto, estos resultados indican que la matriz no es adecuada para aplicaciones estructurales por sí sola, sino que su función principal dentro del material compuesto es la transferencia de carga y la cohesión entre las fibras de refuerzo.

Tabla 4

Propiedades mecánicas tracción matriz biopolimérica

Probeta	% ϵ_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	E [MPa]
1	0.05	60.37	1958.27
2	0.04	56.66	1996.01
3	0.05	62.51	1617.27
4	0.05	64.33	1373.92
5	0.05	68.00	1661.82
Promedio	0.05 ± 0.004	62.37 ± 4.25	1721.46 ± 258.19

El comportamiento de las curvas esfuerzo–deformación es coherente con los parámetros mecánicos obtenidos. La baja pendiente inicial confirma el reducido módulo de elasticidad y, por tanto, la baja rigidez del material, mientras que la similitud en la deformación máxima refleja una respuesta consistente antes de la falla. Asimismo, las variaciones en el esfuerzo máximo

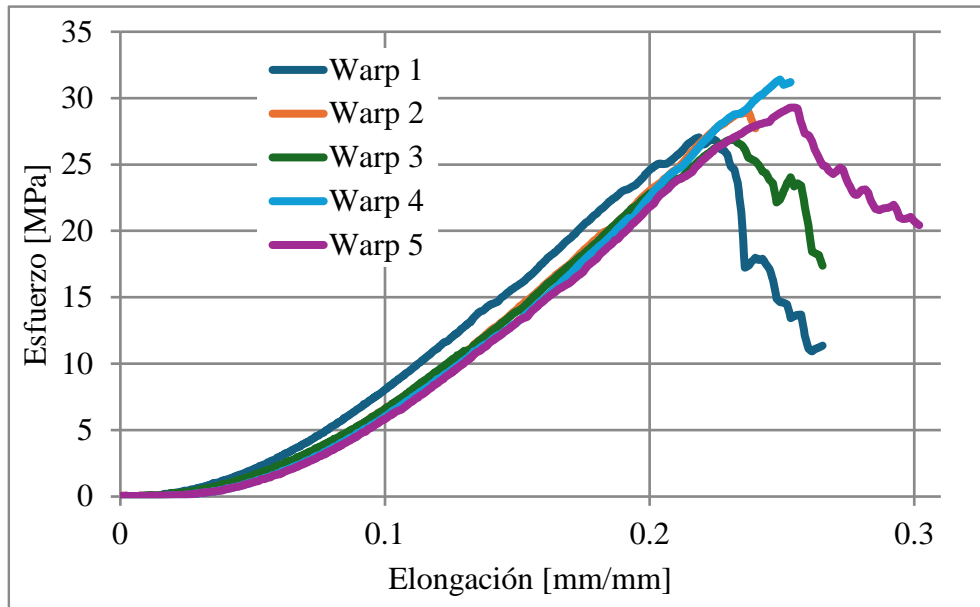
corresponden con la dispersión observada en la resistencia última. En conjunto, estos resultados confirman que la matriz biopolimérica presenta un comportamiento típico de materiales poliméricos, caracterizado por baja rigidez, resistencia moderada y una capacidad de deformación limitada pero consistente.

4.1.2 Fibras de cáñamo tejidas

En la Figura 8 y la Figura 9 se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación de las probetas de fibras de cáñamo tejidas en las direcciones warp y weft, respectivamente. En ambos casos se observa una respuesta no lineal desde las primeras etapas de carga, con un incremento progresivo del esfuerzo que describe una tendencia cóncava hacia arriba, característica de materiales textiles donde inicialmente ocurre el reacomodo y alineación de las fibras. Durante los ensayos se evidenció deslizamiento interno del tejido, lo cual se traduce en una capacidad de redistribución de carga y un comportamiento pseudo-dúctil. Asimismo, la presencia de una caída progresiva posterior al esfuerzo máximo indica que la falla no es abrupta, sino que ocurre de manera gradual mediante la rotura secuencial de fibras y mecanismos internos de deformación. Estos resultados permiten evidenciar que el comportamiento mecánico del tejido está fuertemente influenciado por su arquitectura interna, ya que las fibras warp presentan mayor deformación y resistencia a la tracción. A partir de estas curvas, se determinaron los valores de deformación última y esfuerzo máximo de tracción, los cuales se resumen en la Tabla 5.

Figura 8

Gráfica esfuerzo-deformación tracción tejido warp

**Figura 9**

Gráfica esfuerzo-deformación tracción tejido weft

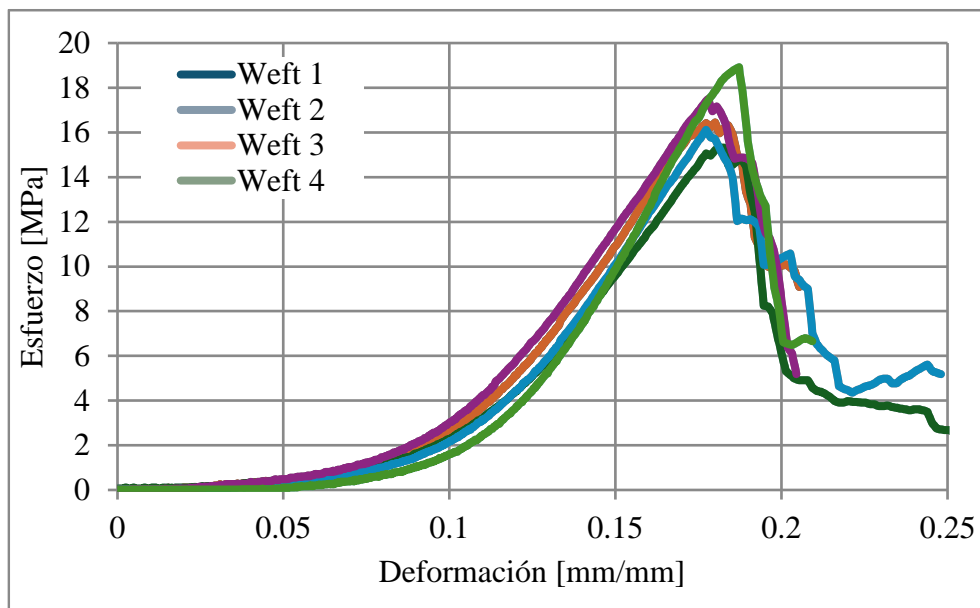


Tabla 5*Propiedades mecánicas tracción fibras de cáñamo tejidas weft y warp*

Weft			Warp		
Probeta	% ε_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	Probeta	% ε_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]
1	0.18	16.45	1	0.22	27.05
2	0.18	15.31	2	0.24	29.01
3	0.18	16.12	3	0.23	26.89
4	0.18	17.49	4	0.25	31.41
5	0.19	18.92	5	0.25	29.29
Promedio	0.18 ± 0.004	16.86 ± 1.3914	Promedio	0.24 ± 0.014	28.73 ± 1.855

De acuerdo con la Tabla 5, la orientación warp presenta una resistencia última a la tracción aproximadamente 1.7 veces mayor que la orientación weft, así como una deformación máxima cercana a 1.3 veces superior. Esta diferencia se atribuye principalmente al proceso de fabricación del tejido, en el cual las fibras en dirección warp se encuentran bajo mayor pretensión y presentan una menor ondulación (crimp), favoreciendo una mayor alineación con la dirección de carga aplicada. En consecuencia, estas fibras pueden soportar esfuerzos de manera más eficiente desde etapas tempranas del ensayo, reduciendo pérdidas asociadas al enderezamiento inicial del material. Por el contrario, en la dirección weft, la mayor ondulación genera una menor eficiencia mecánica, ya que parte de la deformación se consume en la reorientación de las fibras antes de contribuir significativamente a la resistencia del material.

Las diferencias observadas entre las direcciones warp y weft evidencian el carácter anisotrópico del tejido de fibras de cáñamo, donde las propiedades mecánicas dependen directamente de la orientación de las fibras. Si bien la dirección warp presenta una mayor capacidad para soportar carga, la contribución de la dirección weft resulta fundamental para la estabilidad transversal y la integridad del material. En este contexto, la combinación de

orientaciones en configuraciones de 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° se vuelve necesaria en materiales compuestos, con el fin de lograr una distribución más uniforme de esfuerzos, reducir los efectos de deslizamiento interno y aproximar un comportamiento cuasi-isotrópico. Esta estrategia permite aprovechar las ventajas mecánicas de cada orientación, optimizando el desempeño global del material en aplicaciones donde las cargas pueden actuar en múltiples direcciones.

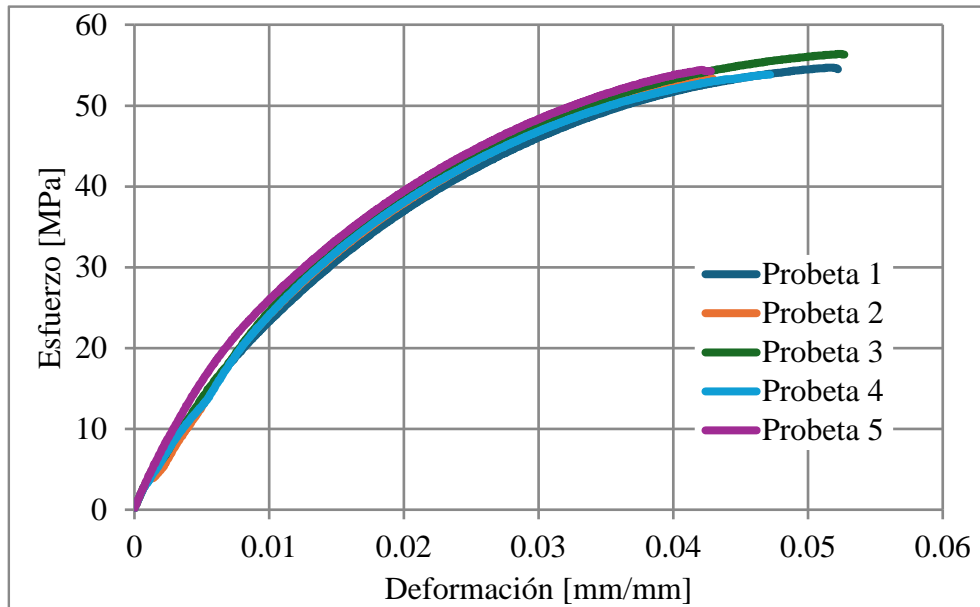
4.1.3 Material compuesto de fibras de cáñamo tejidas

En la Figura 10 se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación del material compuesto reforzado con fibras de cáñamo. Se observa una respuesta no lineal desde las primeras etapas de carga, con un incremento progresivo del esfuerzo y una pendiente inicial mayor en comparación con la matriz biopolimérica, lo que evidencia un incremento en la rigidez del material debido a la incorporación de las fibras. Las curvas presentan una tendencia similar entre probetas, alcanzando valores máximos de esfuerzo en un rango estrecho de deformación, seguido de una ligera estabilización sin una caída abrupta, lo que sugiere un comportamiento dominado por la interacción entre la matriz y el refuerzo. Este comportamiento es característico de materiales compuestos, donde la carga es transferida progresivamente desde la matriz hacia las fibras.

Haciendo uso de la Figura 10, se obtuvo la Tabla 6, la cual resume los datos obtenidos de cada probeta de máxima deformación, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad.

Figura 10

Gráfica esfuerzo-deformación tracción material compuesto de fibras de cáñamo tejidas



A partir de los datos obtenidos en la Tabla 6, se determinó que el material compuesto presenta un módulo de elasticidad promedio de 2577.80 MPa, superior al de la matriz biopolimérica, lo que confirma un aumento en la rigidez del sistema debido a la contribución de las fibras de cáñamo. Sin embargo, la resistencia última a la tracción, con un valor promedio de 54.56 MPa, no muestra un incremento significativo respecto a la matriz, lo que sugiere una eficiencia limitada del refuerzo en términos de capacidad de carga máxima. Este comportamiento puede estar asociado a factores como la ondulación del tejido o la calidad de la adhesión fibra–matriz. Por su parte, la deformación máxima se mantiene en un rango similar al de la matriz, indicando que el comportamiento a la falla continúa estando influenciado principalmente por la fase polimérica.

Tabla 6

Propiedades mecánicas tracción material compuesto de fibras de cáñamo tejidas

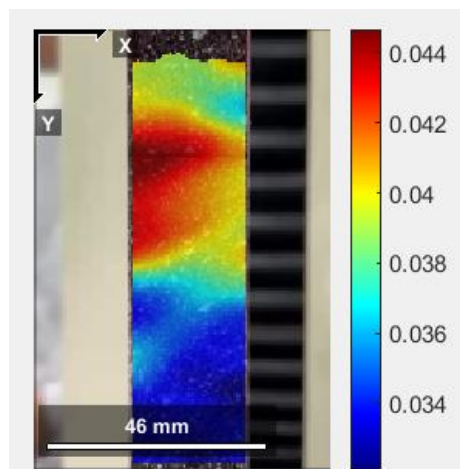
Probeta	% ε_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	E [MPa]
1	0.05	54.69	2414.58
2	0.04	53.43	2008.03

3	0.05	56.39	2596.53
4	0.05	53.85	2645.67
5	0.04	54.44	3224.21
Promedio	0.05 ± 0.004	54.56 ± 1.138	2577.8 ± 439.9

Las distribuciones de deformación obtenidas mediante Ncorr en la componente longitudinal (ϵ_{yy}) presente en la Figura 11, describen una concentración de deformación en la zona superior de la probeta, representada por las regiones de mayor intensidad (rojo), lo cual es consistente con el estado de máxima sollicitación bajo carga de tracción y coincide con la zona donde se esperaría la iniciación de la falla. Se observa una deformación longitudinal máxima de 0.0445, valor que presenta una buena concordancia con la deformación máxima obtenida experimentalmente (≈ 0.05 mm/mm), con un error relativo cercano al 11%. Esta diferencia se considera aceptable dentro de este tipo de mediciones, lo que permite validar la confiabilidad del análisis realizado en Ncorr para la obtención de deformaciones.

Figura 11

Deformaciones ϵ_{yy} utilizando software Ncorr



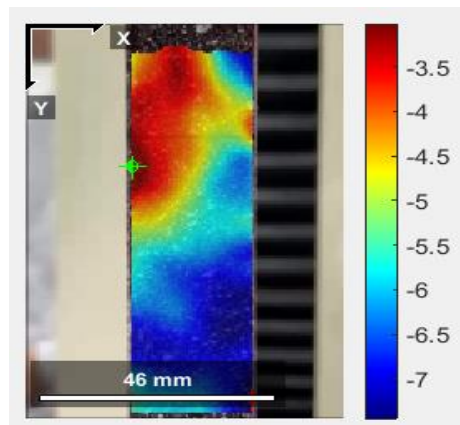
Por otro lado, la componente transversal (ϵ_{xx}) presente en la Figura 12 muestra valores negativos de deformación, indicando una contracción lateral del material, Se observa como en la

zona central la deformación es mayor, concorde a la zona de falla. Se observa una deformación transversal máxima de -0.0075 , confirmando la contracción lateral del material bajo carga de tracción, comportamiento característico de materiales sólidos.

Con estos datos de ε_{xx} y ε_{yy} obtenidos, se determinó el coeficiente de Poisson del material, obteniendo un valor aproximado de $\nu \approx 0.17$, este valor es inferior al de materiales poliméricos convencionales, lo cual se atribuye a la presencia de refuerzos fibrosos y orientación de las fibras restringiendo la deformación lateral, comportamiento consistente con materiales compuestos

Figura 12

Deformaciones ε_{xx} utilizando software Ncorr



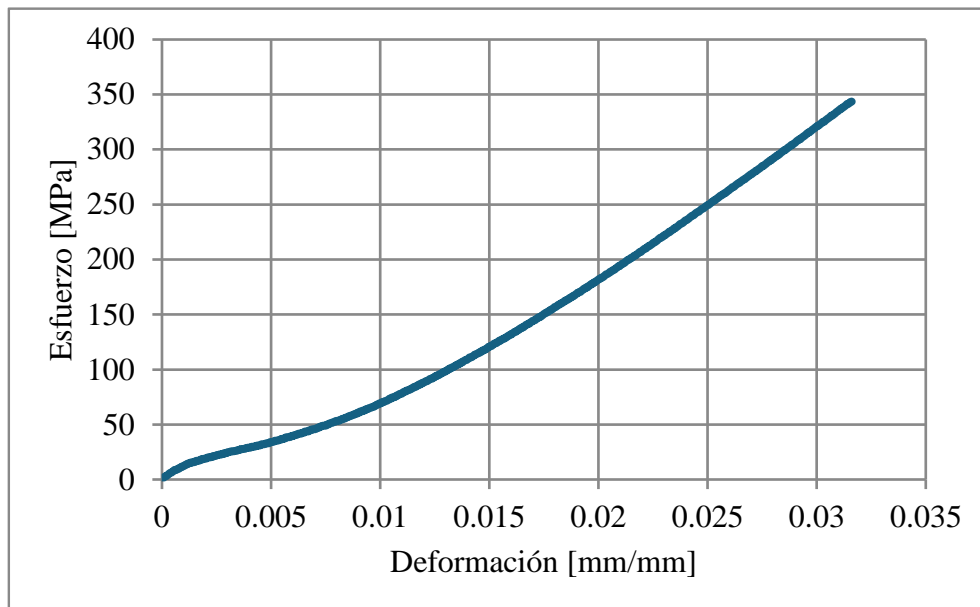
4.1.4 Fibra de carbono

En la Figura 13 se presenta la curva esfuerzo–deformación correspondiente al material de fibra de carbono. A diferencia de los materiales previamente analizados, se observa un comportamiento predominantemente lineal a lo largo de todo el rango evaluado, característico de materiales altamente rígidos y con respuesta elástica dominante. Durante el ensayo no se alcanzó la falla del material, ya que la capacidad de carga de la máquina disponible no fue suficiente para provocar la ruptura de las probetas. En consecuencia, no se evidencia un punto máximo de esfuerzo

ni una caída posterior en la curva, lo cual limita la caracterización completa del comportamiento mecánico experimental del material.

Figura 13

Gráfica esfuerzo-deformación tracción fibra de carbono



A partir de la pendiente de la curva, se estimó un módulo de elasticidad de 6133 MPa, valor significativamente superior al de la matriz biopolimérica y al material compuesto reforzado con fibras de cáñamo, lo que confirma la alta rigidez característica de la fibra de carbono. Sin embargo, debido a la imposibilidad de alcanzar la falla experimental, no fue posible determinar directamente la resistencia última ni la deformación máxima del material. Por esta razón, dichas propiedades fueron obtenidas a partir de datos reportados en la literatura, práctica común en el análisis de materiales de alto desempeño cuando existen limitaciones experimentales.

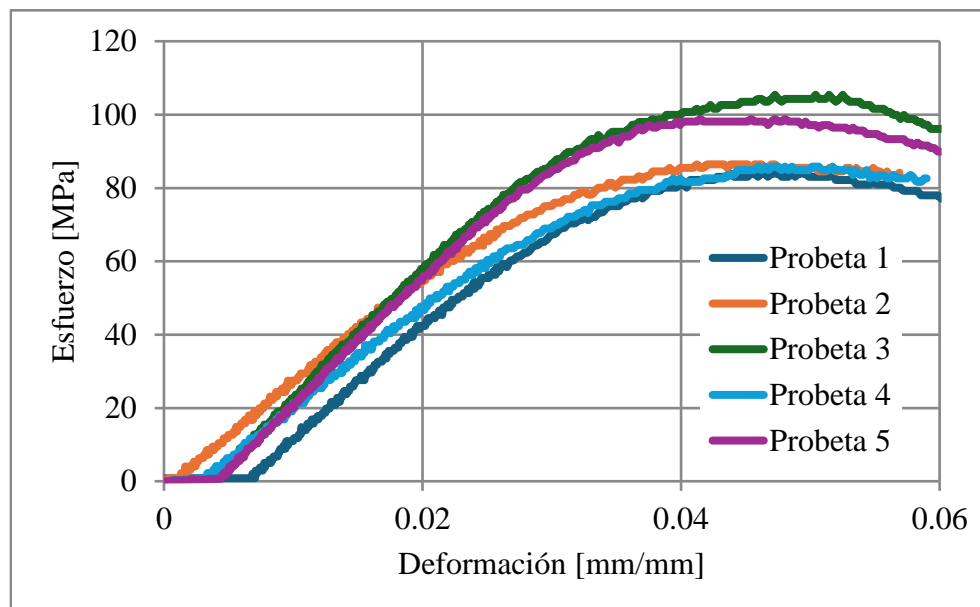
4.2 Ensayo de flexión

4.2.1 Matriz biopolimérica

En la Figura 14 se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación en flexión de la matriz biopolimérica. Se observa una respuesta no lineal desde las primeras etapas de carga, con un incremento progresivo del esfuerzo hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una ligera disminución, lo que sugiere un proceso de daño progresivo previo a la falla. Este comportamiento es característico de materiales poliméricos sometidos a flexión, donde la respuesta está influenciada por la combinación de esfuerzos de tracción y compresión a través de la sección. La similitud general entre las curvas indica una respuesta consistente del material, aunque con cierta dispersión atribuible a variaciones en la microestructura o defectos internos.

Figura 14

Gráfica esfuerzo-deformación flexión matriz biopolimérica



A partir de los datos registrados se obtuvo la Tabla 7, donde se determinó que la matriz biopolimérica presenta un módulo de elasticidad en flexión promedio de 3053.19 MPa, superior

al obtenido en tracción, lo que indica una mayor rigidez aparente bajo este tipo de sollicitación. Asimismo, la resistencia máxima en flexión alcanza un valor promedio de 92.08 MPa, significativamente mayor que en tracción, lo cual se asocia a la distribución no uniforme de esfuerzos en el ensayo, donde solo una porción del material experimenta la máxima tensión. Por su parte, la deformación máxima se mantiene en un rango similar al observado en tracción (0.04–0.05 mm/mm), lo que sugiere que la capacidad de deformación del material está gobernada principalmente por su naturaleza polimérica. La dispersión observada en los valores de resistencia y módulo puede atribuirse a la presencia de defectos superficiales o variaciones en la fabricación, los cuales afectan significativamente el comportamiento en flexión.

Tabla 7

Propiedades mecánicas flexión matriz biopolimérica

Probeta	% ε_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	E [MPa]
1	0.04	83.95	2443.29
2	0.04	86.42	3128.89
3	0.05	105.38	3700.81
4	0.05	85.80	2617.48
5	0.04	98.84	3375.48
Promedio	0.04 ± 0.003	92.08 ± 9.489	3053.19 ± 522.217

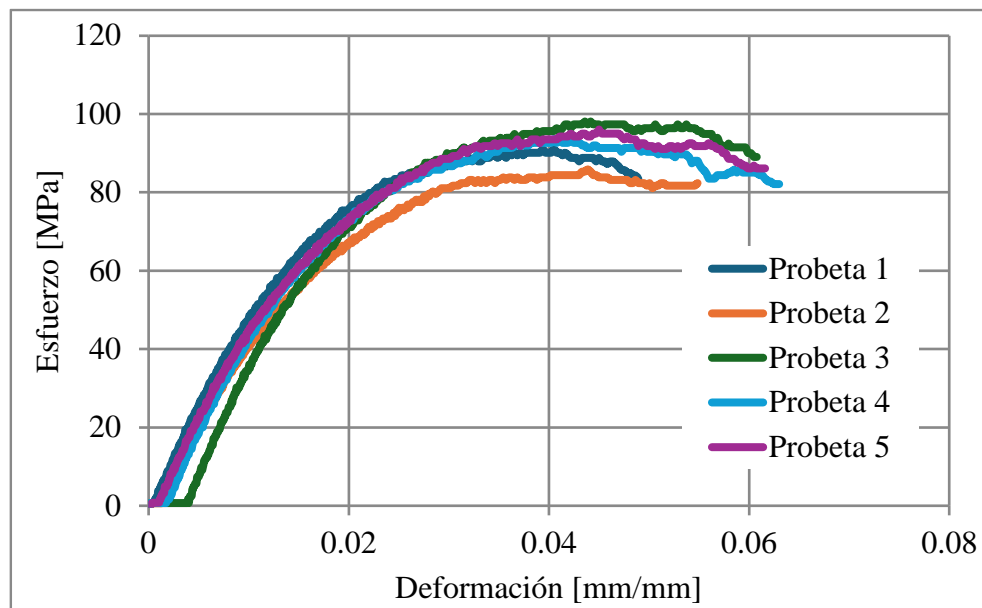
Se puede observar que los resultados evidencian que la matriz biopolimérica presenta un mejor desempeño mecánico en flexión que en tracción, debido a la naturaleza del ensayo de flexión, donde los esfuerzos se distribuyen en la sección transversal, permitiendo que el material soporte mayores esfuerzos antes de la falla. Sin embargo, los resultados son comunes en una matriz polimérica de baja rigidez, lo cual sugiere la incorporación de fibras para reforzar la matriz.

4.2.2 *Material compuesto de fibras de cáñamo tejidas*

En la Figura 15 se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación en flexión del material compuesto reforzado con fibras de cáñamo. Se observa una zona elástica más pronunciada que en los ensayos de tracción, seguida de una respuesta no lineal y un incremento progresivo del esfuerzo hasta alcanzar una región cercana al máximo, donde las curvas presentan una ligera estabilización antes de una disminución gradual. Este comportamiento indica un proceso de daño progresivo, característico de materiales compuestos, donde la interacción entre la matriz y las fibras permite redistribuir la carga. A diferencia de la matriz biopolimérica, las curvas muestran una mayor pendiente inicial, una resistencia a la flexión mayor y una mayor estabilidad, evidenciando la contribución del refuerzo fibroso en la respuesta mecánica del material bajo flexión.

Figura 15

Gráfica esfuerzo-deformación flexión material compuesto de fibras de cáñamo tejidas



A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 8, se determinó que el material compuesto presenta un módulo de elasticidad en flexión promedio de 4964 MPa, lo que representa un incremento significativo respecto a la matriz biopolimérica y confirma una mejora sustancial en la rigidez del sistema debido a la incorporación de las fibras de cáñamo. Este incremento puede atribuirse a un mejor aprovechamiento de las distintas direcciones del tejido bajo sollicitaciones de flexión. Por su parte, la resistencia máxima alcanza un valor promedio de 92.92 MPa, evidenciando un aumento moderado en comparación con la matriz. Este comportamiento sugiere que, aunque las fibras contribuyen eficazmente a la rigidez, su aporte a la resistencia última es más limitado, posiblemente debido a la eficiencia de la adhesión fibra–matriz. Finalmente, la deformación máxima se mantiene en un rango similar al de la matriz, indicando que el comportamiento a la falla continúa estando gobernado principalmente por la fase polimérica.

Tabla 8

Propiedades mecánicas flexión material compuesto de fibras de cáñamo tejidas

Probeta	% ε_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	E [MPa]
1	0.04	91.02	4558.95
2	0.04	85.89	4270.53
3	0.04	98.10	5813.16
4	0.04	93.58	5122.93
5	0.05	96.00	5057.00
Promedio	0.04 ± 0.002	92.92 ± 4.736	4964.51 ± 591.594

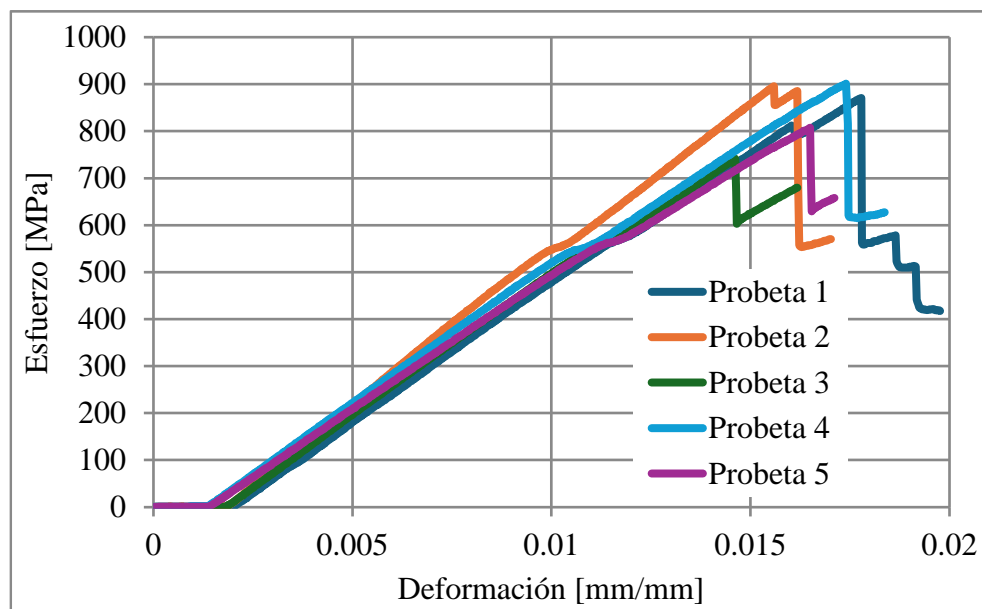
4.2.3 Fbra de carbono

En la Figura 16 se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación en flexión de las probetas de fibra de carbono. Se observa una respuesta predominantemente lineal a lo largo de la mayor parte del ensayo, lo que evidencia un comportamiento elástico dominante y una alta rigidez del material. A diferencia de los materiales previamente analizados, las curvas alcanzan elevados

niveles de esfuerzo con bajas deformaciones, seguidas de una caída abrupta posterior al máximo, en algunos casos de forma escalonada, lo que indica un proceso de fractura progresiva de las fibras. Este tipo de respuesta es característico de materiales compuestos de alto desempeño, donde la falla ocurre de manera frágil, con limitada capacidad de redistribución de carga una vez iniciada la fractura.

Figura 16

Gráfica esfuerzo-deformación flexión fibras de carbono



De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 9, la fibra de carbono presenta un módulo de elasticidad en flexión promedio de 44658.99 MPa, valor significativamente superior al de la matriz biopolimérica y al material compuesto reforzado con fibras de cáñamo, confirmando su alta rigidez estructural. Asimismo, la resistencia máxima alcanza un valor promedio de 843.26 MPa, evidenciando una capacidad de carga considerablemente mayor en comparación con los otros materiales evaluados. Por otro lado, la deformación máxima se sitúa alrededor de 0.02 mm/mm, lo que indica una baja capacidad de deformación antes de la falla. Este comportamiento

refleja la naturaleza frágil de la fibra de carbono, donde el material es capaz de soportar altos esfuerzos, pero con una limitada tolerancia a deformaciones.

Tabla 9

Propiedades mecánicas flexión fibra de carbono

Probeta	% ϵ_{max} [mm/mm]	σ_{max} [MPa]	E [MPa]
1	0.02	870.77	35324.39
2	0.02	895.63	45710.29
3	0.01	741.31	41301.37
4	0.02	900.87	51799.76
5	0.02	807.74	49159.11
Promedio	0.02 ± 0.001	843.26 ± 67.958	44658.99 ± 6533.669

4.3 Comparación de índices de desempeño específico

Con el fin de realizar una comparación directa entre el material compuesto reforzado con fibras de cáñamo y los materiales compuestos sintéticos de referencia, se seleccionaron como propiedades base la resistencia última a tracción (σ_t), el módulo de elasticidad en flexión (E_f) y la densidad (ρ). A partir de estas variables se calcularon dos indicadores de desempeño específico: la relación resistencia-peso en tracción (I_t) y el módulo específico en flexión (I_f).

En el caso del compuesto de fibras de cáñamo, los valores de resistencia a tracción y módulo en flexión fueron obtenidos experimentalmente a partir de los ensayos desarrollados en este trabajo, mientras que la densidad se determinó a partir de las mediciones geométricas y de masa efectuadas sobre las probetas. Por tanto, los indicadores asociados a este material fueron calculados con base en resultados propios del programa experimental.

Para el material compuesto reforzado con fibra de vidrio, se emplearon valores reportados en la base de datos MatWeb, específicamente de la ficha técnica del material *G-10* Fiberglass

Epoxy Laminate Sheet (Li et al., 2012), del cual se adoptaron la resistencia a tracción, el módulo en flexión y la densidad. La selección de este material se justifica porque constituye una referencia ampliamente utilizada entre los compuestos epóxicos reforzados con fibra de vidrio, con propiedades mecánicas documentadas y ampliamente usadas en el ámbito ingenieril. De manera análoga, para el material compuesto reforzado con fibra de carbono se emplearon valores bibliográficos tomados de la ficha técnica Solvay CYCOM® 934 Epoxy-Carbon Fiber Reinforced 8 Harness Satin Fabric Laminate (Matweb, 2015), seleccionado por corresponder a un compuesto laminado de alto desempeño con matriz epóxica y arquitectura textil, lo que permite establecer una comparación referencial con un material sintético avanzado dentro de la misma familia general de compuestos poliméricos reforzados con fibra.

Con base en estas propiedades se construyeron la Tabla 10 y la Tabla 11, presentadas a continuación, las cuales permiten evaluar el comportamiento relativo de los materiales en términos de eficiencia mecánica específica, se desarrollaron utilizando las ecuaciones (8) y (9). Este enfoque resulta pertinente, ya que permite comparar materiales con densidades diferentes bajo un criterio más representativo que el uso exclusivo de propiedades absolutas.

Tabla 10

Indicadores de desempeño específico en tracción de los materiales comparados.

Material	σ_t [MPa]	ρ [kg/m ³]	I_t [J/kg]
Cáñamo	54.55	1301	4.19E+04
GFRP	286	1800	159E+05
CFRP	655	1520	4.31E+05

Tabla 11

Indicadores de desempeño específico en flexión de los materiales comparados.

Material	E_f [MPa]	ρ [kg/m ³]	I_f [J/kg]
Cáñamo	4964	1301	3.81E+06

GFRP	17550	1800	9.75E+06
CFRP	65550	1520	4.31E+07

Los resultados evidencian una clara diferencia en el desempeño específico entre los materiales evaluados, donde los compuestos tradicionales reforzados con fibras sintéticas superan significativamente al material basado en fibras de cáñamo. Este comportamiento se explica por la naturaleza intrínseca de las fibras de refuerzo: mientras que las fibras de carbono y vidrio presentan una mayor rigidez y resistencia debido a su estructura cristalina y elevada calidad interfacial con la matriz, el cáñamo, al ser una fibra natural, presenta mayor variabilidad, menor alineación efectiva y limitaciones en la transferencia de carga. No obstante, al analizar las propiedades en términos específicos, es decir, considerando la densidad, se evidencia que el material de cáñamo mantiene una relación desempeño–peso competitiva dentro de su categoría, lo cual resalta su potencial en aplicaciones donde la reducción de masa es un criterio relevante. En este sentido, aunque los materiales sintéticos continúan dominando en términos absolutos, el cáñamo representa una alternativa viable en aplicaciones no estructurales, donde se busca un equilibrio entre desempeño mecánico, peso y sostenibilidad.

4.4 Modelación numérica del material compuesto

4.4.1 Resultados del modelado numérico a tracción

Con el fin de evaluar la capacidad del modelo para reproducir la respuesta inicial del material compuesto, se realizó un modelado numérico a tracción aplicando un desplazamiento axial de 1.5 mm, equivalente a una deformación nominal de:

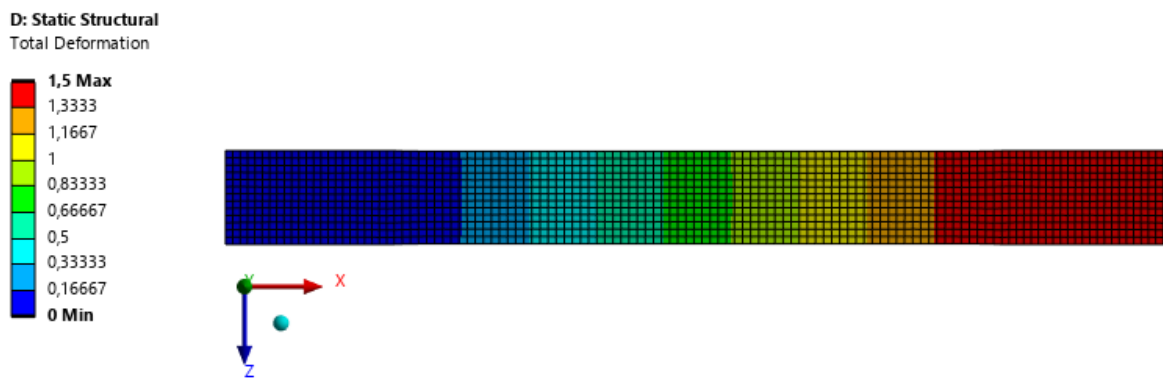
$$\varepsilon_{num} = \frac{1.5 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} = 0.01$$

La Figura 17 muestra el campo de desplazamiento total obtenido en la probeta. Se observa una distribución progresiva del desplazamiento a lo largo del tramo útil y una respuesta

predominantemente axial, coherente con el estado de carga impuesto en la simulación. Este comportamiento indica que la configuración numérica reproduce de manera razonable la deformación global esperada para una sollicitación uniaxial en el rango elástico inicial.

Figura 17

Desplazamiento total en la probeta sometida a tracción uniaxial en la región lineal del material compuesto



A partir de la reacción total, obtenida en el modelo (1841.3 N) y del área transversal de la probeta (75 mm^2), el esfuerzo nominal numérico se calculó como:

$$\sigma_{nom,num} = \frac{1841.3}{75} = 24.55 \text{ MPa}$$

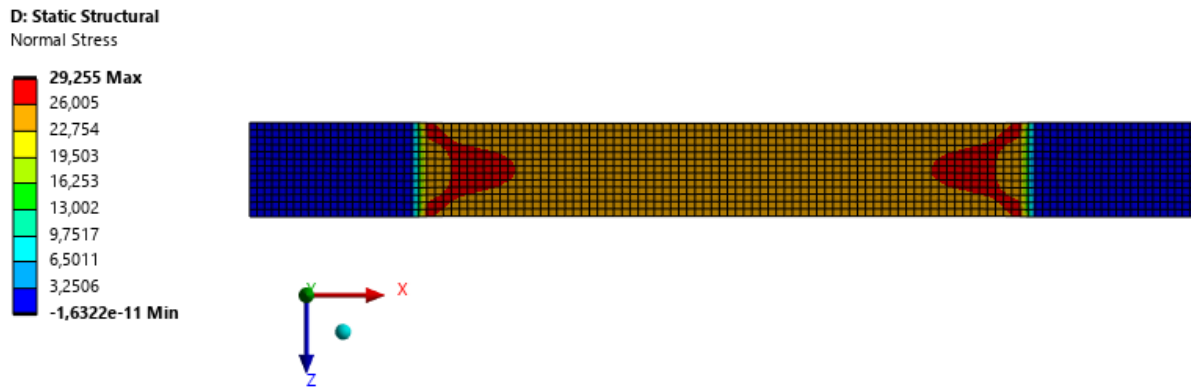
Por su parte, el módulo numérico en este punto fue:

$$E_{num} = \frac{24.55}{0.01} = 2455 \text{ MPa}$$

Por su parte, la Figura 18 presenta el campo de esfuerzo normal longitudinal en la probeta. La distribución obtenida evidencia que la mayor contribución de carga se desarrolla en la dirección principal del ensayo, en concordancia con el comportamiento esperado de un laminado sometido a tracción uniaxial. En este sentido, el resultado permite identificar una respuesta mecánica consistente con la idealización ortotrópica equivalente adoptada en el modelo.

Figura 18

Esfuerzo normal longitudinal en la probeta sometida a tracción uniaxial



De la misma forma el módulo experimental equivalente en ese punto fue de:

$$E_{exp} = \frac{25.5}{0.01} = 2550 \text{ MPa}$$

Estos resultados evidencian una buena concordancia entre la simulación numérica y la respuesta experimental en la región aproximadamente lineal del ensayo, indicando que el modelo lineal equivalente reproduce adecuadamente la rigidez inicial y el nivel de esfuerzo del laminado en tracción.

4.4.2 Resultados del modelado numérico a flexión

El modelado numérico del ensayo de flexión en tres puntos se realizó sobre una probeta con dimensiones de 100 mm de longitud total, 13 de ancho y 3 mm de espesor, considerando una distancia entre apoyos de 80 mm, en concordancia con el montaje experimental. Con el fin de representar una condición de deformación más cercana al comportamiento observado en el ensayo, se aplicó un desplazamiento vertical de 12 mm en la línea central de carga.

La Figura 19 presenta el campo de desplazamiento total obtenido en el modelo, donde se observa una deformada global coherente con el comportamiento esperado de un laminado

sometido a flexión en tres puntos. Por su parte, la Figura 19 permite visualizar la respuesta direccional vertical del sistema, evidenciando la curvatura de la probeta y la concentración de la deformación en la región central asociada a la aplicación de la carga. Estos resultados indican que la configuración numérica reproduce de manera razonable la respuesta estructural global del laminado bajo flexión.

Figura 19

Campo de desplazamiento total en la probeta sometida a flexión en tres puntos

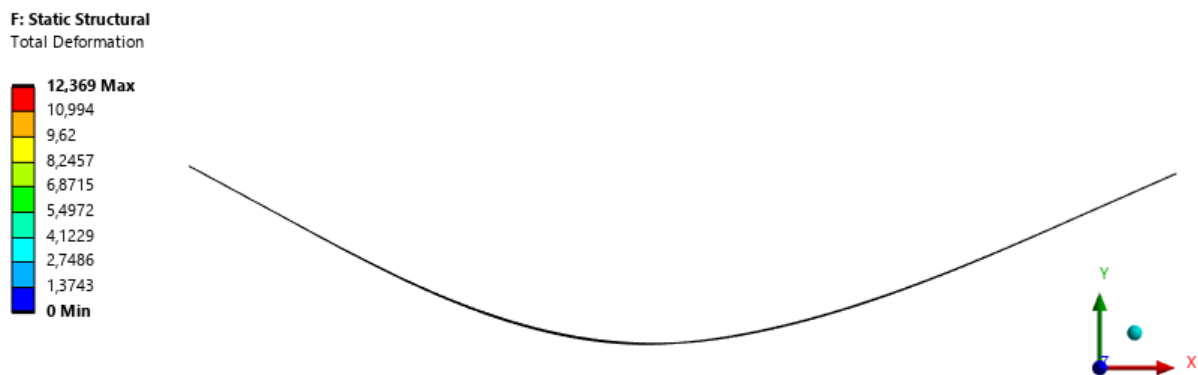
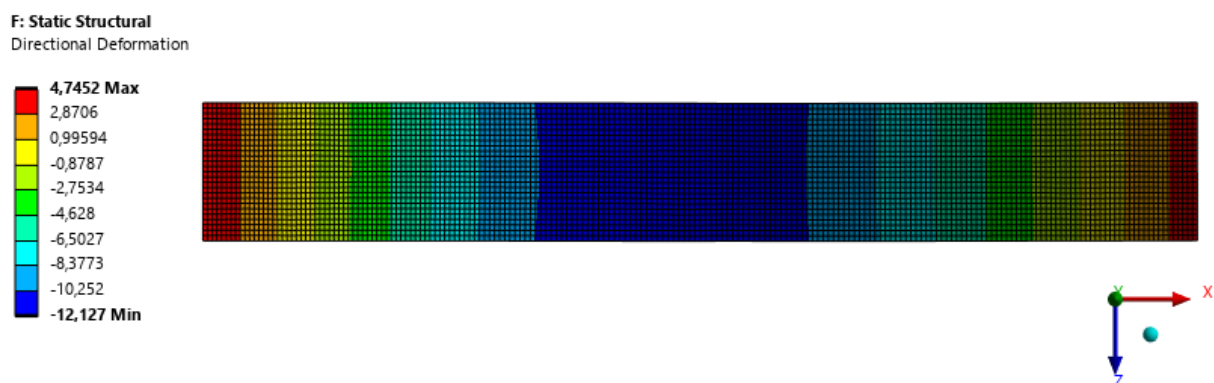


Figura 20

Campo de esfuerzo direccional vertical en la probeta sometida a flexión en tres puntos



A partir de la reacción total obtenida en el modelo (95.346 N), vista en la Figura 20, el esfuerzo de flexión se calculó mediante la expresión:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (11)$$

considerando $L=80$ mm, $b=13$ mm y $h=3$ mm, obteniéndose:

$$\sigma_{f,num} = 97.79 \text{ MPa}$$

Al comparar este valor con el esfuerzo experimental promedio del material compuesto (97.79 MPa), se obtuvo un error relativo de: lo cual indica una buena concordancia entre el resultado numérico y el valor experimental en términos del nivel de esfuerzo alcanzado.

El módulo de flexión numérico se determinó a partir de la pendiente de la región lineal de la curva carga–deflexión obtenida del modelo, empleando la expresión de flexión en tres puntos:

La diferencia observada en el módulo de flexión indica que el modelo subestima la rigidez flexional global del laminado respecto al comportamiento experimental. Esta discrepancia puede atribuirse a la naturaleza simplificada del modelo numérico empleado, en el cual el sistema de apoyo y carga fue representado mediante líneas de aplicación en lugar de contactos completos con rodillos, así como al carácter lineal elástico de la formulación utilizada. En consecuencia, aunque el modelo reproduce de manera adecuada el nivel de esfuerzo alcanzado bajo una deflexión representativa, no captura con la misma precisión la pendiente global carga-deflexión observada experimentalmente.

En términos generales, los resultados muestran que el modelo numérico desarrollado permite representar de forma razonable la tendencia del comportamiento del material compuesto bajo flexión, especialmente en lo relacionado con la distribución de deformaciones y el nivel de esfuerzo alcanzado, aunque todavía presenta limitaciones para reproducir con exactitud la rigidez flexional del laminado

4.4.3 Comparación global entre resultados experimentales y numéricos

Los resultados globales presentes en la Tabla 12 muestran que el modelo numérico presentó un buen ajuste en tracción dentro de la región lineal del material, obteniéndose errores de 2.98% tanto en esfuerzo como en módulo. Esto indica que la formulación lineal equivalente adoptada representa adecuadamente la rigidez inicial del laminado y la respuesta axial global del material compuesto bajo pequeñas deformaciones.

Tabla 12

Validación resultados experimentales

Ensayo	Parámetro	Dato experimental	Dato ANSYS	Error [%]
Tracción	σ_{max} [MPa]	25.5	24.74	3.72
Tracción	E [MPa]	2550	2473.9	3.72
Flexión	σ_{fmax} [MPa]	92.92	97.79	5.24
Flexión	E_f [MPa]	4964	3146.14	36.62

En flexión, el modelo también logró una buena aproximación en términos del esfuerzo alcanzado, con un error relativo de 3.72%, lo cual evidencia que la simulación reproduce razonablemente el nivel de carga soportado por la probeta bajo una deflexión representativa. Sin embargo, el error asociado al módulo de flexión fue considerablemente mayor (36.62%), mostrando que la rigidez flexional numérica fue inferior a la experimental.

Esta diferencia entre tracción y flexión sugiere que el modelo es más preciso para representar la respuesta axial inicial del laminado que su comportamiento bajo flexión. Lo anterior puede atribuirse a que, en el caso de la flexión, la respuesta del material depende no solo de las propiedades globales del laminado, sino también de la idealización del sistema de apoyo y carga, del estado tensional no uniforme a través del espesor y de la simplificación geométrica adoptada

en el modelo numérico. En consecuencia, el modelo desarrollado permite reproducir adecuadamente la tendencia general del comportamiento mecánico del compuesto, aunque presenta mayor limitación para representar con precisión la rigidez flexional global.

4.5 Gráfico de Ashby

4.5.1 Propiedades empleadas en la comparación

En la Tabla 13 se presentan los valores de entrada utilizados para la comparación entre los tres materiales analizados. En el caso del compuesto de cáñamo, los valores corresponden a resultados experimentales promedios obtenidos en esta investigación, mientras que para el GFRP y el CFRP se emplearon datos tomados de las referencias seleccionadas en MatWeb. La variable ambiental Cf_{comp} fue estimada mediante la regla de mezcla descrita en la metodología.

Tabla 13

Valores de entrada empleados en la comparación tipo Ashby entre el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.

Material	σ_t [MPa]	E_f [MPa]	ρ [kg/m ³]	Cf_{comp}
Cáñamo	54.55	4964	1301	2.92
GFRP	286	17550	1800	3.18
CFRP	655	65550	1520	17.87

4.5.2 Indicadores de desempeño calculados

A partir de los valores de entrada presentados previamente, se calcularon los indicadores de desempeño empleados en la comparación tipo Ashby. La Tabla 14 resume los valores obtenidos para I_t , I_f , $I_{t,CO2}$ e $I_{f,CO2}$ para cada uno de los materiales considerados.

Tabla 14

Indicadores de desempeño calculados para la comparación tipo Ashby entre el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.

Material	I_t [J/kg]	I_f [J/kg]	I_t / Cf	I_f / Cf
Cáñamo	4.19E+04	3.81E+06	1.44E+04	1.3E+06
GFRP	1.59E+05	9.75E+06	5.00E+04	3.07E+06
CFRP	4.31E+05	4.31E+07	2.41E+04	2.41E+06

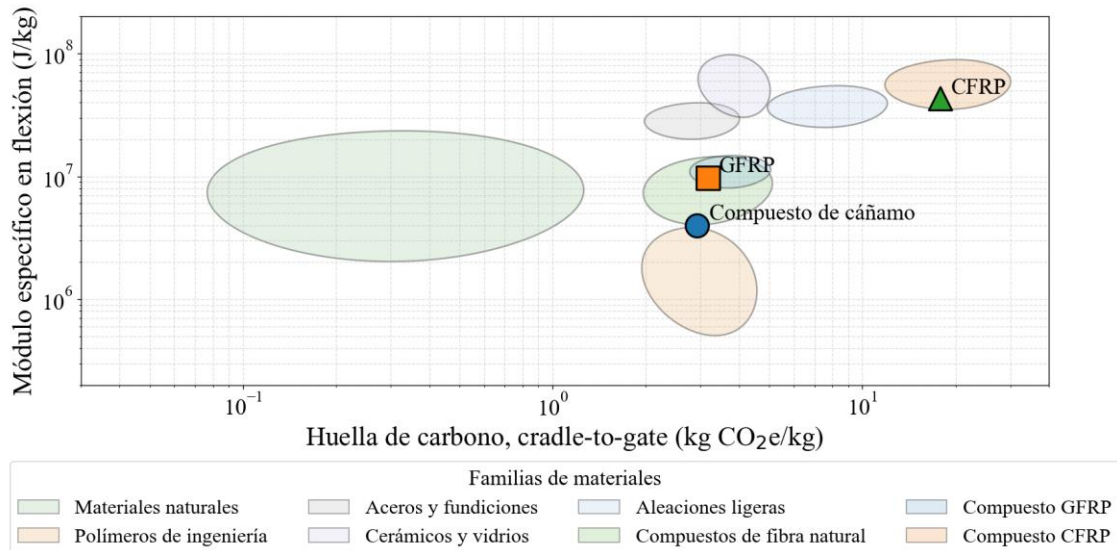
4.5.3 Representación de materiales en gráficos de ASHBY

Con el fin de contextualizar la posición relativa del compuesto de cáñamo frente a materiales compuestos convencionales y otras familias de materiales de ingeniería, se elaboraron mapas tipo Ashby a partir de la huella de carbono y de los indicadores de desempeño específico calculados. En estas representaciones, los puntos correspondientes al compuesto de cáñamo, al GFRP y al CFRP fueron obtenidos a partir de los valores adoptados en esta investigación, mientras que las regiones asociadas a las distintas familias de materiales corresponden a envolventes aproximadas de referencia empleadas con fines comparativos y de contextualización visual.

La Figura 21 muestra que el CFRP presenta la mayor resistencia específica a tracción entre los materiales evaluados, ubicándose en la zona de desempeño mecánico más alto. Sin embargo, esta ventaja se encuentra asociada a la mayor huella de carbono del conjunto, lo que evidencia un compromiso desfavorable desde el punto de vista ambiental. En contraste, el GFRP se posiciona en una zona intermedia, con una resistencia específica claramente superior a la del compuesto de cáñamo, pero con una huella de carbono considerablemente menor que la del CFRP, lo que le otorga una relación más equilibrada entre desempeño estructural e impacto ambiental.

Figura 21

Mapa tipo Ashby de resistencia específica a tracción en función de la huella de carbono para el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.



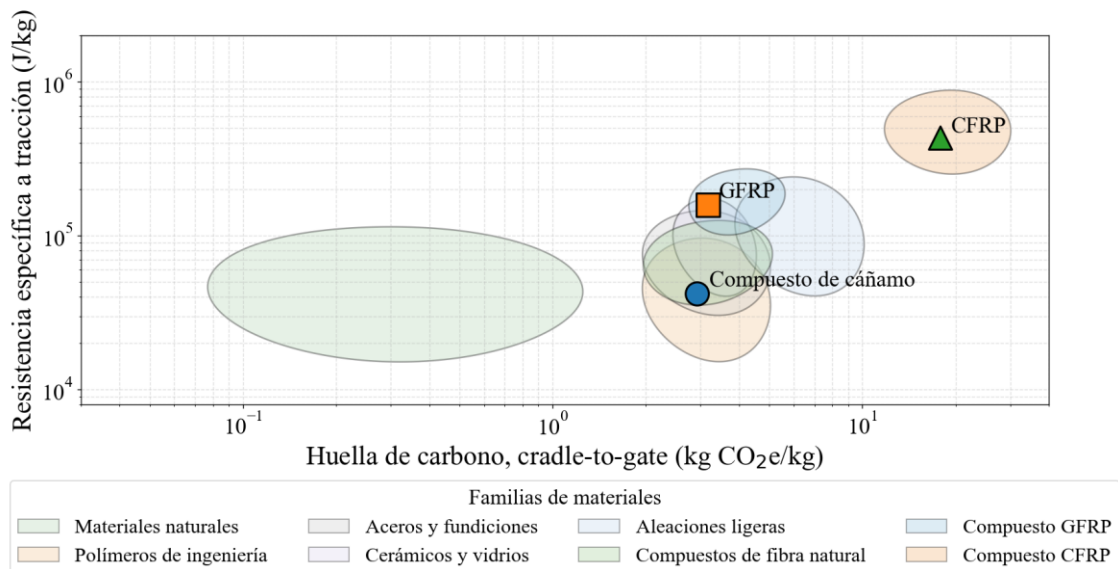
Por su parte, el compuesto de cáñamo se ubica en la región de menor resistencia específica dentro de los tres materiales comparados, aunque con una huella de carbono relativamente baja. Su localización resulta coherente con la región asociada a los compuestos de fibra natural, lo que confirma la consistencia del posicionamiento obtenido. En conjunto, esta figura indica que, para sollicitaciones dominadas por tracción, el CFRP constituye la alternativa de mayor eficiencia mecánica específica, el GFRP representa la opción de mejor balance global, y el compuesto de cáñamo aparece como una alternativa ambientalmente favorable, pero con limitaciones estructurales frente a los compuestos sintéticos.

La Figura 22 evidencia nuevamente una jerarquía clara entre los materiales analizados. El CFRP alcanza el mayor módulo específico en flexión, ubicándose en la región de máxima rigidez específica, aunque acompañado de la mayor huella de carbono. Esto confirma que su ventaja

mecánica se obtiene a expensas de un impacto ambiental significativamente superior. El GFRP ocupa una posición intermedia, con una rigidez específica notablemente mayor que la del compuesto de cáñamo y menor que la del CFRP, manteniendo además una huella de carbono moderada, lo que refuerza su condición de alternativa balanceada.

Figura 22

Mapa tipo Ashby de módulo específico en flexión en función de la huella de carbono para el compuesto de cáñamo, el GFRP y el CFRP.



El compuesto de cáñamo presenta el menor módulo específico en flexión de los tres materiales, ubicándose dentro de la zona correspondiente a los compuestos de fibra natural. Esta posición es consistente con el comportamiento esperado para materiales bio-basados reforzados con fibras vegetales, en los cuales la ventaja ambiental no se traduce necesariamente en un desempeño equivalente al de los compuestos sintéticos de alto desempeño. Por tanto, para aplicaciones donde la rigidez específica en flexión sea el criterio dominante, el CFRP ofrece la mejor respuesta mecánica, el GFRP mantiene el mejor compromiso entre desempeño e impacto

ambiental, y el compuesto de cáñamo se perfila como una opción viable en escenarios de menor exigencia estructural y mayor prioridad ambiental.

5. Conclusiones

Se logró fabricar satisfactoriamente un material compuesto reforzado con telas de fibras de cáñamo tejidas mediante un proceso de laminado manual tipo hand lay-up, empleando una matriz epóxica biobasada y una configuración cuasi-isotrópica de cuatro capas con orientaciones 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° . Asimismo, fue posible obtener probetas para ensayos de tracción y flexión de acuerdo con los lineamientos dimensionales de las normas ASTM D3039 y ASTM D7264, respectivamente, mediante corte por chorro de agua y control geométrico y másico previo al ensayo. En consecuencia, se considera que el primer objetivo específico fue cumplido, al establecerse un procedimiento de fabricación y preparación de especímenes adecuado para la caracterización mecánica del material desarrollado.

La caracterización mecánica del compuesto de cáñamo evidenció una mejora clara en rigidez respecto a la matriz biopolimérica, con módulos promedio de 2577.80 MPa en tracción y 4964.51 MPa en flexión. En términos de resistencia, el material alcanzó valores promedio de 54.56 MPa en tracción y 92.92 MPa en flexión, mostrando un desempeño más favorable bajo sollicitaciones de flexión que de tracción. No obstante, el incremento en resistencia a tracción fue limitado, lo que sugiere que la contribución del refuerzo fibroso fue más efectiva para aumentar la rigidez que para elevar la capacidad de carga última del sistema. En consecuencia, el segundo objetivo específico se considera cumplido.

La comparación de desempeño específico evidenció que el compuesto de cáñamo presenta una eficiencia mecánica inferior a la del GFRP y el CFRP, tanto en tracción como en flexión. En tracción, la relación resistencia-peso del cáñamo fue de 4.19×10^4 J/kg, mientras que el GFRP y el

CFRP alcanzaron 1.59×10^5 J/kg y 4.31×10^5 J/kg, respectivamente. De manera similar, en flexión el módulo específico del cáñamo fue de 3.81×10^6 J/kg, por debajo del GFRP (9.75×10^6 J/kg) y del CFRP (4.31×10^7 J/kg). En consecuencia, aunque el material desarrollado presenta interés como alternativa de menor densidad, su desempeño específico aún es limitado frente a los compuestos sintéticos de referencia.

Se propusieron índices mecánico-ambientales en tracción y flexión, definidos como la relación entre el desempeño mecánico específico y la huella de carbono del material. A partir de este criterio, el compuesto de cáñamo presentó valores de 1.44×10^4 J/kg CO₂e en tracción y 1.3×10^6 J/kg CO₂e en flexión, inferiores a los del GFRP (5.00×10^4 J/kg CO₂e y 3.07×10^6 J/kg CO₂e) y del CFRP (2.41×10^4 J/kg CO₂e y 2.41×10^6 J/kg CO₂e), respectivamente. Estos resultados indican que, aunque el material de cáñamo ofrece una ventaja ambiental asociada a su menor huella de carbono, su balance mecánico-ambiental aún es inferior al de los compuestos sintéticos evaluados. Por tanto, el índice propuesto permitió demostrar que la selección del material no debe basarse únicamente en sostenibilidad, sino en el equilibrio entre impacto ambiental y eficiencia mecánica.

A partir de la caracterización mecánica realizada, se concluye que el material compuesto reforzado con telas de fibras de cáñamo tejidas presenta una mejora en rigidez frente a la matriz biopolimérica y un comportamiento más favorable en flexión que en tracción. Sin embargo, al compararlo con compuestos sintéticos de referencia, su desempeño mecánico absoluto y específico resultó inferior. En este sentido, su idoneidad para aplicaciones aeronáuticas no puede plantearse como sustituto directo de materiales compuestos convencionales, sino como una alternativa potencial para usos no estructurales donde el requerimiento mecánico sea moderado.

Referencias Bibliográficas

- Abdalla, H. M. A. (2025). Review of rules of mixture for effective elastic properties in fibrous and particulate composite materials. *Composite Structures*, 367(March). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119216>
- Ahmed, A. T. M. F., Islam, M. Z., Mahmud, M. S., Sarker, M. E., & Islam, M. R. (2022). Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon*, 8(1), e08753. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08753>
- Ajayi, N. E., Rusnakova, S., Ajayi, A. E., Ogunleye, R. O., Agu, S. O., & Amenaghawon, A. N. (2025). A comprehensive review of natural fiber reinforced Polymer composites as emerging materials for sustainable applications. *Applied Materials Today*, 43(March). <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102666>
- Alonso-Montemayor, F. J., Tarrés, Q., Oliver-Ortega, H., Espinach, F. X., Narro-Céspedes, R. I., Castañeda-Facio, A. O., & Delgado-Aguilar, M. (2020). Enhancing the Mechanical Performance of Bleached Hemp Fibers Reinforced Polyamide 6 Composites: A Competitive Alternative to Commodity Composites. *Polymers*, 12(5), 1041. <https://doi.org/10.3390/polym12051041>
- Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, 68, 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- ANSYS. (2026). *ANSYS Workbench (2026 R1)*. <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
- Bitencourt, A. H. da S., Ribeiro, M. M., Silva, D. S., Junio, R. F. P., Monteiro, S. N., & Rodrigues, J. da S. (2026). Structural Analysis and Mechanical Performance of Industrial Conveyor

- Flight Bars Manufactured with Epoxy Matrix Composites Reinforced by Glass, Carbon, and Kevlar Fibers. *Polymers*, 18(4), 1–36. <https://doi.org/10.3390/polym18040433>
- Bouhamed, A., chaari, R., Aloulou, J., Attaoui, A., Scholze, M., Wöpke, C., Richter, P., Dehnert, M., Khlif, M., Tegenkamp, C., Wagner, M. F. X., & Kanoun, O. (2025). Sustainable high-performance natural fiber composites with integrated strain sensing for aeronautics and automotive applications. *Surfaces and Interfaces*, 75(November). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107740>
- Chowdhury, I. R., & Summerscales, J. (2024). Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. *Journal of Composites Science*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/jcs8070280>
- De, B., Bera, M., Bhattacharjee, D., Ray, B. C., & Mukherjee, S. (2024). A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management. *Progress in Materials Science*, 146(February), 101326. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101326>
- Donini, G., & Molari, L. (2024). Experimental Characterization of Hemp Woven Fabric Reinforced Epoxy Resin Composites Produced Without Heat Treatment. *Composites Theory and Practice*, 2024(3), 171–180. <https://doi.org/10.62753/ctp.2024.02.3.3>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites

- (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers*, 14(17), 1–36.
<https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Kamruzzaman, M., & Alam, S. (2024). Influence of stacking sequence on the mechanical properties of banana-glass fiber hybrid laminates for automotive shells. *Heliyon*, 10(21), e40130. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40130>
- Landolsi, I., Rjiba, N., Hamdaoui, M., Harzallah, O. A., & Boudokhane, C. (2022). Optimization of Cellulose Extraction and TCF Bleaching from Olive Tree Pruning Residues by Box–Behnken Design. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8765–8777.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1967830>
- Ley 1787 de 2016, 2020 1 (2016).
- Li, J. F., Agyakwa, P. a., Johnson, C. M., Smith, D. R., Madeni, J. C., Specification, S., American, A., Standard, N., Belyakov, S. A., Gourlay, C. M., Koca, M., Ozdes Koca, N., Koç, R., Che, F. X., Pang, J. H. L., Chen, S., Lee, W., Hsu, C., Yang, C., ... Zhang, Z. F. (2012). MatWeb, Your Source for Materials Information - WWW.MATWEB.COM / Page 1 / 1. *Acta Materialia*, 59(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.053>
- Liang, C., Chen, J., Gu, J., Luo, X., & Evsyukov, S. A. (2026). State-of-the-art review on the flexural behavior of carbon fiber-reinforced aluminum laminates (CARALL). *Composites Part B: Engineering*, 315(November 2025), 113444.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2026.113444>
- Manaia, J. P., Manaia, A. T., & Rodrigues, L. (2019). Industrial hemp fibers: An overview. *Fibers*, 7(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/fib7120106>
- Matweb. (2015). MatWeb, Your Source for Materials Information. *MatWeb*, 1–2.
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b>

29693

- McKay, I., Vargas, J., Yang, L., & Felfel, R. M. (2024). A Review of Natural Fibres and Biopolymer Composites: Progress, Limitations, and Enhancement Strategies. *Materials*, *17*(19). <https://doi.org/10.3390/ma17194878>
- Naik, V., Kumar, M., & Kaup, V. (2021). A Review on Natural Fiber Composite Material in Automotive Applications. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es8d589>
- Parveez, B., Kittur, M. I., Badruddin, I. A., Kamangar, S., Hussien, M., & Umarfarooq, M. A. (2022). Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. *Polymers*, *14*(22), 5007. <https://doi.org/10.3390/polym14225007>
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- Russo, P., Passaro, J., Dib, A., Fabbrocino, F., & Fantuzzi, N. (2024). Effect of processing conditions on the tensile properties of PLA/Jute fabric laminates: Experimental and numerical analysis. *Composites Part C: Open Access*, *15*(August), 100511. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100511>
- Samuel, B. O., Sumaila, M., & Dan-Asabe, B. (2022). Physical and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites With Potentials for Wind Turbine Blade Applications: a Review. *Jurnal Mekanikal*, *45*, 1–14. <https://doi.org/10.11113/jm.v45.450>
- Scarponi, C. (2015). Hemp fiber composites for the design of a Naca cowling for ultra-light aviation. *Composites Part B: Engineering*, *81*, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.001>
- Shanbhag, S. S., Dixit, M. K., & Sideris, P. (2024). Examining the global warming potential of

hemcrete in the United States: A cradle-to-gate life cycle assessment. *Developments in the Built Environment*, 20, 100572. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100572>

Sharma, H., Kumar, A., Rana, S., Sahoo, N. G., Jamil, M., Kumar, R., Sharma, S., Li, C., Kumar, A., Eldin, S. M., & Abbas, M. (2023). Critical review on advancements on the fiber-reinforced composites: Role of fiber/matrix modification on the performance of the fibrous composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 2975–3002. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.036>

Shelly, D., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2025). Hemp fiber and its bio-composites: a comprehensive review part I—characteristics and processing. In *Advanced Composites and Hybrid Materials* (Vol. 8, Issue 3). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01314-0>

Syduzzaman, M., Faruque, M. A. Al, Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Plant-based natural fibre reinforced composites: A review on fabrication, properties and applications. *Coatings*, 10(10), 1–34. <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>

Tazwar, H. T., Antora, M. F., & Rahman, M. Z. (2025). Functionalization strategies for sustainable plant fiber composites: A comprehensive review of techniques, performance and future directions. *Journal of Materials Research and Technology*, 38(July), 1083–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.237>

U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, & Federal Aviation Administration. (2012). Advisory Circular Advisory Circular. *Aviation*, 1(AC 25.1529-1A), 1–2. http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25-1529-1A.pdf http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/media/150-5345-51A/150_5345_51a.doc

- Wei, Z., & Rong, J. (2025). Dynamic Response and Damage Mechanism of CFRP Composite Laminates Subjected to Underwater Impulsive Loading. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(20). <https://doi.org/10.3390/app152010888>
- Zhou, D., Tong, X., Liu, H., Lv, S., Srivatsan, T. S., & Gao, X. (2024). A modified Halpin-Tsai model for predicting the elastic modulus of composite materials. *AIP Advances*, *14*(1). <https://doi.org/10.1063/5.0160256>

Apéndices

Apéndice A

Lista técnica bio-resina



BINF-UV is a biobased, high-performance epoxy system with enhanced air release and very low viscosity. It ensures excellent surface quality and rapid saturation of laminates in resin infusion and VARTM processes. The system offers room-temperature curing, excellent temperature stability, and UV resistance for clear carbon parts, providing gloss retention and protection against yellowing.

BIOinfusion Resin is a USDA Certified BioPreferred® Product with 32% bio-content.

Medium cure speed hardener provides 4-4.5 hours of infusion time at 72°F (22°C) in a typical ¼ inch thick laminate if resin feed pot stays under 100°F (38°C). Vacuum off time at 72°F (22°C) is 11 hours in a typical laminate.

entropyresins.com
310-882-2120

ISO9001:2015 Certified

Version 1 / September 2024

Gougeon Brothers, Inc.
P.O. Box 908
Bay City, MI 48707

©2024 Gougeon Brothers, Inc.



BIOinfusion™

UV Resin + Medium Hardener

Handling Properties

Property	Standard	Units	72°F (22°C)	77°F (25°C)	90°F (32°C)
150g Pot Life	GRI Method ¹	minutes	114-126	93-103	46-51
500g Pot Life	GRI Method ¹	minutes	76-84	67-75	43-47
Viscosity Mixed	ASTM D2196 ²	cP	320	270	188
Viscosity (resin)	ASTM D2196 ²	cP	1284	–	–
Viscosity (hardener)	ASTM D2196 ²	cP	16	–	–

1. Measured at 5x initial viscosity.
ER-BINF-UV - Brookfield RVDV2T spindle #21, 20 rpm.
EH-BINFM - Brookfield LVDV2T Spindle #00, 20 rpm.
2. Measured on RVDV2T with spindle #27, 20 rpm.

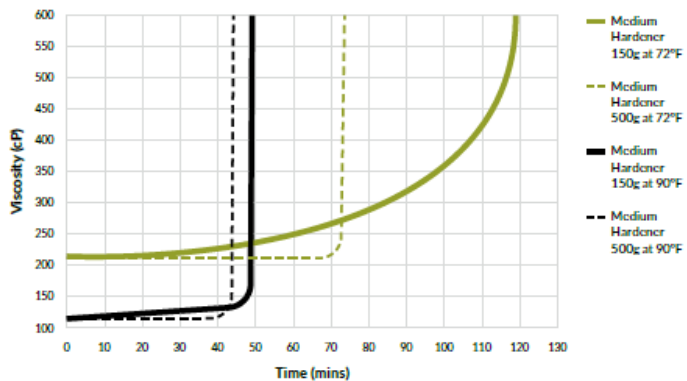
Mix Ratio

Method	Resin:Hardener	Resin:Hardener
Weight	3.65:1	100:27.4
Weight Range	3.85: 1-3.53:1	100:26.0-100:28.4
Volume	3.00:1	100:33.3
Volume Range	3.17:1-2.90: 1	100:31.5-100:34.4

Density

State	Units	72°F (22°C)
Cured	lb/gal (g/cc)	9.5 (1.14)
Resin	lb/gal (g/cc)	9.5 (1.14)
Hardener	lb/gal (g/cc)	7.8 (0.94)

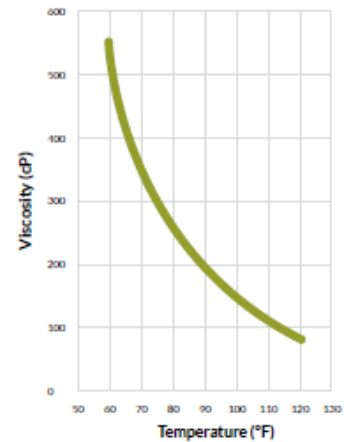
Pot Life



Mechanical Properties

Property	Standard	Units	72°F (22°C) x 4 wk	72°F (22°C) x 24 hrs + 140°F (60°C) x 8 hrs	72°F (22°C) x 24 hrs + 180°F (82°C) x 8 hrs	72°F (22°C) x 24 hrs + 180°F (82°C) x 12 hrs
Hardness	ASTM D2240	Type D	84	86	86	86
Compression Yield	ASTM D695	psi (MPa)	13,500 (93)	13,500 (93)	13,500 (93)	13,500 (93)
Tensile Strength	ASTM D638	psi (MPa)	9,300 (64)	11,200 (77)	11,200 (77)	11,200 (77)
Tensile Elongation at Break	ASTM D638	%	2.5	6.0	6.0	6.0
Tensile Modulus	ASTM D639	psi (GPa)	5.00E+05 (3.45)	4.74E+05 (3.27)	4.53E+05 (3.12)	4.50E+05 (3.10)
Flexural Strength	ASTM D790	psi (MPa)	14,400 (99)	15,000 (103)	16,900 (116)	16,900 (116)
Flexural Modulus	ASTM D790	psi (GPa)	4.37E+05 (3.01)	3.99E+05 (2.75)	3.69E+05 (2.54)	3.50E+05 (2.41)

Viscosity vs Temperature

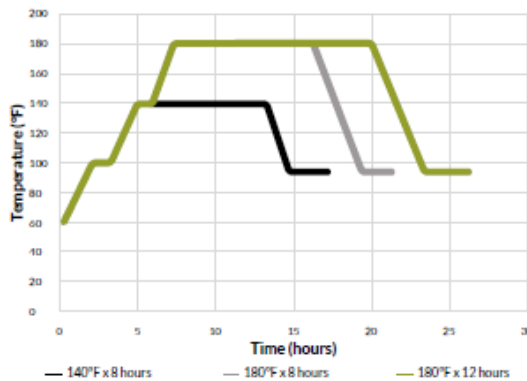


Thermal Properties

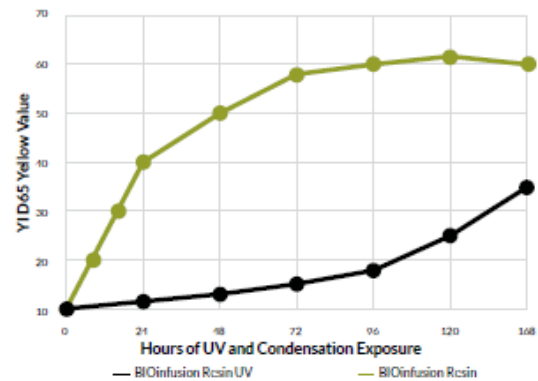
Property	Standard	Units	72°F (22°C) x 4 wk	72°F (22°C) x 24 hrs + 140°F (60°C) x 8 hrs	72°F (22°C) x 24 hrs + 180°F (82°C) x 8 hrs	72°F (22°C) x 24 hrs + 180°F (82°C) x 12 hrs
T _g DMA Peak Tan Delta	ASTM E1640 ¹	°F (°C)	143 (62)	173 (78)	187 (86)	187 (86)
T _g DMA Storage Modulus	ASTM E1640 ¹	°F (°C)	129 (54)	156 (69)	169 (76)	170 (77)
T _g DSC Midpoint (1st Heat)	ASTM E1356 ²	°F (°C)	136 (58)	163 (73)	181 (83)	182 (84)

- 1 Hz, 5°C per minute.
- 10°C per minute.

Post-Cure Schedule



Yellow Index (YI) ASTM E313-98 (D65)



Post-Cure Notes: Increase the temperature from room temperature at a rate of 15°-20°F (8°-11°C) per hour. At every 40°F (22°C) increase in temperature, hold that temperature for an extra hour to allow internal laminate temperature to equalize. Resume the temperature increase of 15°-20°F (8°-11°C) per hour. Continue this cycle until the post-cure temperature is reached. Hold the temperature as indicated on the resin/hardener data sheet. Decrease the temperature at a rate of 20°F (11°C) per hour. Hold at 95°F (35°C) for two hours to allow for normalization. Turn off heat and allow to cool to room temperature. This schedule is recommended when curing a lighter laminate. The temperature ramp speed should be decreased for molds, plugs and heavy laminates. We recommend building test panels of the finished laminate schedule to determine the ideal post-cure cycle. Thermocouple wires embedded in the test laminate will measure the temperature lag during the post-cure.

Store Entropy Resins® Epoxy resins and hardeners at room temperature in sealed containers until shortly before use. As with many high-performance epoxy resins, repeated exposure to low temperatures during storage may cause the resin to crystallize. If this occurs, warm the resin to 125° F and stir to dissolve crystals. Hardeners may form carbamation when exposed to CO₂ and moisture in the atmosphere for extended periods of time. Prevent carbamation by protecting hardeners from exposure until immediately prior to processing.

Test specimens were neat epoxy (without fiber reinforcement). Typical values, not to be construed as specification.

Apéndice A

Código Python para diagramas de Ashby

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Patch

# =====
# CONFIGURACIÓN GLOBAL DE FUENTE
# =====
plt.rcParams["font.family"] = "Times New Roman"
plt.rcParams["font.size"] = 22
plt.rcParams["axes.labelsize"] = 24
plt.rcParams["xtick.labelsize"] = 20
plt.rcParams["ytick.labelsize"] = 20
plt.rcParams["legend.fontsize"] = 18
plt.rcParams["legend.title_fontsize"] = 19

# =====
# DATOS REALES DEL ESTUDIO
# =====
materiales = {
    "Compuesto de cáñamo": {
        "carbono": 2.92,
        "resistencia_especifica": 4.19e4,
        "modulo_especifico_flexion": 3.98e6,
        "marcador": "o",
        "color": "#1f77b4"
    },
    "GFRP": {
        "carbono": 3.18,
        "resistencia_especifica": 1.59e5,
        "modulo_especifico_flexion": 9.75e6,
        "marcador": "s",
        "color": "#ff7f0e"
    },
    "CFRP": {
        "carbono": 17.87,
        "resistencia_especifica": 4.31e5,
        "modulo_especifico_flexion": 4.31e7,
        "marcador": "^",
        "color": "#2ca02c"
    }
}
```

```

}

# =====
# FAMILIAS DEFINIDAS POR RANGOS
# =====
familias_resistencia = [
    {"nombre": "Materiales naturales", "xmin": 0.08, "xmax": 1.2, "ymin": 1.5e4,
"ymax": 1.2e5, "angulo": -8, "color": "#b8d8b8"},
    {"nombre": "Polímeros de ingeniería", "xmin": 2.0, "xmax": 5.0, "ymin":
1.5e4, "ymax": 1.0e5, "angulo": 8, "color": "#f3c99c"},
    {"nombre": "Aceros y fundiciones", "xmin": 2.0, "xmax": 5.0, "ymin": 3.0e4,
"ymax": 1.5e5, "angulo": 10, "color": "#d0d0d0"},
    {"nombre": "Cerámicos y vidrios", "xmin": 2.5, "xmax": 4.5, "ymin": 4.0e4,
"ymax": 1.8e5, "angulo": 8, "color": "#ddd8f0"},
    {"nombre": "Aleaciones ligeras", "xmin": 4.0, "xmax": 10.0, "ymin": 4.0e4,
"ymax": 2.5e5, "angulo": 10, "color": "#c7dbef"},
    {"nombre": "Compuestos de fibra natural", "xmin": 2.0, "xmax": 5.0, "ymin":
3.5e4, "ymax": 1.3e5, "angulo": -8, "color": "#a9d39e"},
    {"nombre": "Compuesto GFRP", "xmin": 2.8, "xmax": 5.5, "ymin": 1.0e5, "ymax":
2.8e5, "angulo": -10, "color": "#9ecae1"},
    {"nombre": "Compuesto CFRP", "xmin": 12.0, "xmax": 30.0, "ymin": 2.5e5,
"ymax": 9.0e5, "angulo": 8, "color": "#f2b880"},
]

familias_modulo = [
    {"nombre": "Materiales naturales", "xmin": 0.08, "xmax": 1.2, "ymin": 2.0e6,
"ymax": 2.5e7, "angulo": -8, "color": "#b8d8b8"},
    {"nombre": "Polímeros de ingeniería", "xmin": 2.0, "xmax": 4.5, "ymin":
5.0e5, "ymax": 4.0e6, "angulo": 8, "color": "#f3c99c"},
    {"nombre": "Aceros y fundiciones", "xmin": 2.0, "xmax": 4.0, "ymin": 2.0e7,
"ymax": 4.0e7, "angulo": 8, "color": "#d0d0d0"},
    {"nombre": "Cerámicos y vidrios", "xmin": 3.0, "xmax": 5.0, "ymin": 3.0e7,
"ymax": 1.0e8, "angulo": 8, "color": "#ddd8f0"},
    {"nombre": "Aleaciones ligeras", "xmin": 5.0, "xmax": 12.0, "ymin": 2.5e7,
"ymax": 5.5e7, "angulo": 8, "color": "#c7dbef"},
    {"nombre": "Compuestos de fibra natural", "xmin": 2.0, "xmax": 5.0, "ymin":
4.0e6, "ymax": 1.5e7, "angulo": -8, "color": "#a9d39e"},
    {"nombre": "Compuesto GFRP", "xmin": 2.8, "xmax": 5.0, "ymin": 8.0e6, "ymax":
1.5e7, "angulo": -8, "color": "#9ecae1"},
    {"nombre": "Compuesto CFRP", "xmin": 12.0, "xmax": 30.0, "ymin": 3.5e7,
"ymax": 9.0e7, "angulo": 8, "color": "#f2b880"},
]

# =====
# UTILIDADES

```

```

# =====
def rango_a_parametros_elipse(xmin, xmax, ymin, ymax):
    x_centro = np.sqrt(xmin * xmax)
    y_centro = np.sqrt(ymin * ymax)
    ancho_dec = np.log10(xmax) - np.log10(xmin)
    alto_dec = np.log10(ymax) - np.log10(ymin)
    return x_centro, y_centro, ancho_dec, alto_dec

def agregar_region_log(ax, xmin, xmax, ymin, ymax, angulo=0,
                       color_relleno="lightgray", color_borde="black",
                       alpha=0.35, grosor=1.4, n=500, irregularidad=0.04):
    x_centro, y_centro, ancho_dec, alto_dec = rango_a_parametros_elipse(xmin,
                                                                           xmax,
                                                                           ymin,
                                                                           ymax)

    t = np.linspace(0, 2 * np.pi, n)

    xc = np.log10(x_centro)
    yc = np.log10(y_centro)

    a = ancho_dec / 2.0
    b = alto_dec / 2.0
    theta = np.deg2rad(angulo)

    r = 1 + irregularidad * np.sin(2 * t + 0.7) + 0.02 * np.sin(3 * t - 0.4)

    x = a * r * np.cos(t)
    y = b * r * np.sin(t)

    xr = x * np.cos(theta) - y * np.sin(theta)
    yr = x * np.sin(theta) + y * np.cos(theta)

    X = 10 ** (xc + xr)
    Y = 10 ** (yc + yr)

    ax.fill(
        X, Y,
        facecolor=color_relleno,
        edgecolor=color_borde,
        alpha=alpha,
        linewidth=grosor,
        zorder=1
    )

def graficar_materiales(ax, materiales, clave_y):
    offsets = {

```

```

    "Compuesto de cáñamo": (1.10, 1.12),
    "GFRP": (1.08, 1.10),
    "CFRP": (1.08, 1.08),
}

for nombre, vals in materiales.items():
    ax.scatter(
        vals["carbono"],
        vals[clave_y],
        s=420,
        marker=vals["marcador"],
        c=vals["color"],
        edgecolor="black",
        linewidth=1.8,
        zorder=5
    )

    dx, dy = offsets[nombre]
    ax.text(
        vals["carbono"] * dx,
        vals[clave_y] * dy,
        nombre,
        fontsize=20,
        zorder=6
    )

def construir_leyenda_familias(familias):
    return [
        Patch(
            facecolor=fam["color"],
            edgecolor="black",
            alpha=0.35,
            label=fam["nombre"]
        )
        for fam in familias
    ]

def graficar_mapa_ashby(familias, materiales, clave_y, etiqueta_y, xlim, ylim,
nombre_archivo):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(20, 12))

    for fam in familias:
        agregar_region_log(
            ax=ax,
            xmin=fam["xmin"], xmax=fam["xmax"],

```

```

        ymin=fam["ymin"], ymax=fam["ymax"],
        angulo=fam["angulo"],
        color_relleno=fam["color"],
        color_borde="black",
        alpha=0.35,
        grosor=1.4,
        irregularidad=0.04
    )

graficar_materiales(ax, materiales, clave_y)

ax.set_xscale("log")
ax.set_yscale("log")
ax.set_xlim(xlim)
ax.set_ylim(ylim)

ax.set_xlabel("Huella de carbono, cradle-to-gate (kg CO2e/kg)",
fontsize=24)
ax.set_ylabel(etiqueta_y, fontsize=24)

ax.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.8, alpha=0.4)

manejadores_leyenda = construir_leyenda_familias(familias)
ax.legend(
    handles=manejadores_leyenda,
    title="Familias de materiales",
    loc="upper center",
    bbox_to_anchor=(0.5, -0.18),
    ncol=4,
    frameon=True,
    fontsize=18,
    title_fontsize=19
)

plt.subplots_adjust(bottom=0.28)
plt.savefig(nombre_archivo, dpi=700, bbox_inches="tight")
plt.show()

# =====
# MAPA 1
# =====
graficar_mapa_ashby(
    familias=familias_resistencia,
    materiales=materiales,
    clave_y="resistencia_especifica",

```

```
etiqueta_y="Resistencia específica a tracción (J/kg)",
xlim=(0.03, 40),
ylim=(8e3, 2e6),
nombre_archivo="mapa_ashby_resistencia_vs_carbono.png"
)

# =====
# MAPA 2
# =====
graficar_mapa_ashby(
    familias=familias_modulo,
    materiales=materiales,
    clave_y="modulo_especifico_flexion",
    etiqueta_y="Módulo específico en flexión (J/kg)",
    xlim=(0.03, 40),
    ylim=(2e5, 2e8),
    nombre_archivo="mapa_ashby_modulo_vs_carbono.png"
)
```

Apéndice B Proceso experimental

Figura 23

Mezcla 78.6% resina y 21.4% endurecedor



Figura 24

Proceso de desgasificación

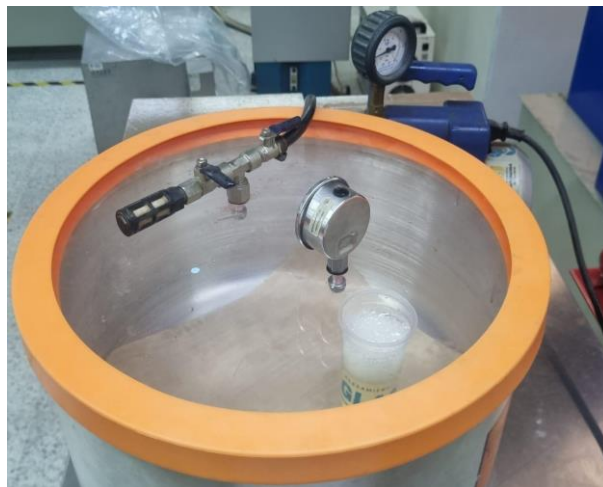


Figura 25

Antes y después del proceso de desgasificación

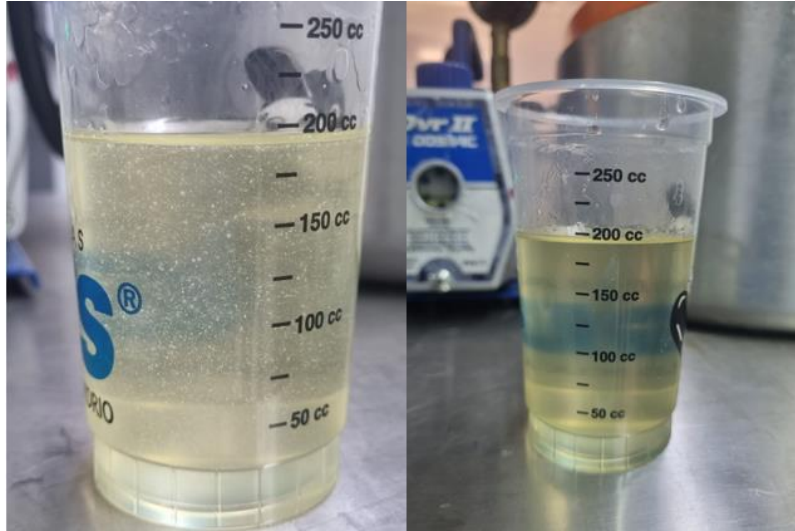


Figura 26

Vaciado de la resina en el molde

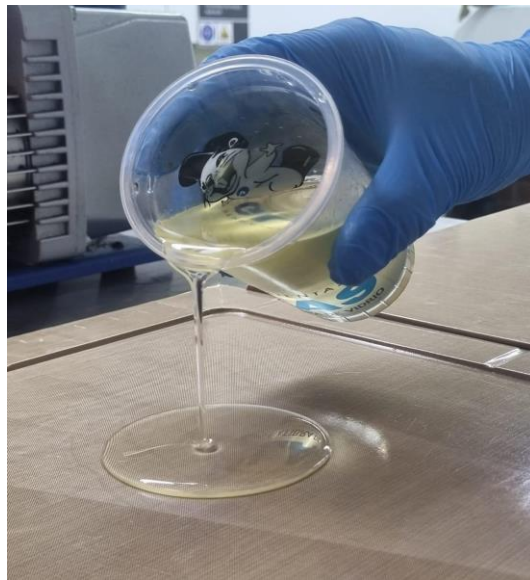


Figura 27

Proceso Hand lay-up

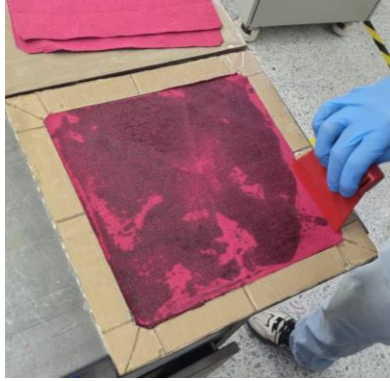


Figura 28

Resultado Hand lay-up

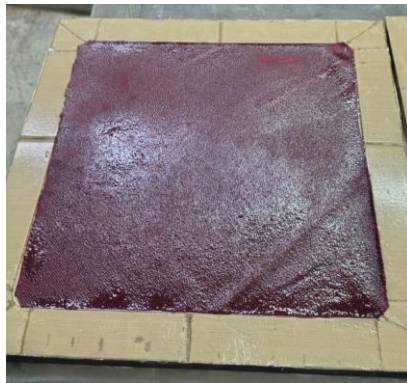
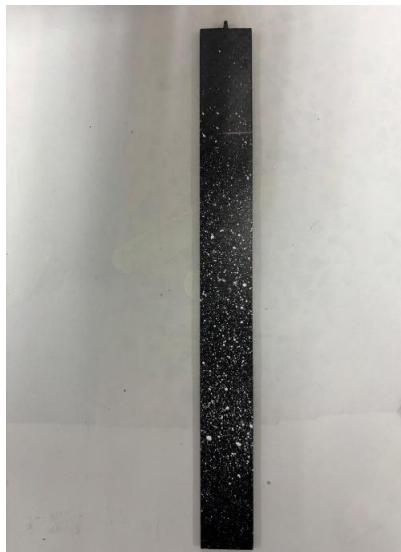


Figura 29

Patrón speckle



Apéndice C

Instrumentos utilizados

Figura 30

Prensa hidráulica



Figura 31

Prensa de platos calientes

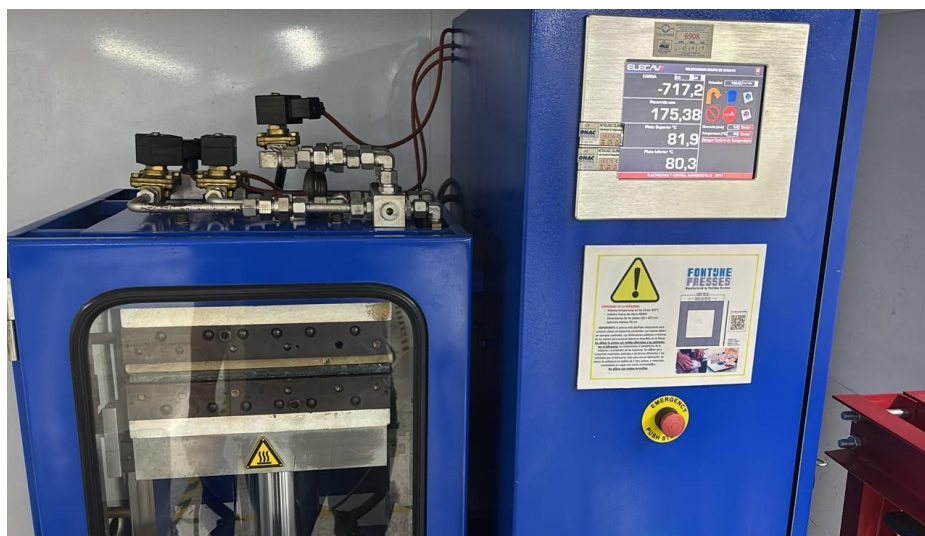


Figura 32

Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS

