

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFAZ DE UN MATERIAL  
COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON FIBRA  
NATURAL OBTENIDO POR MEDIO DE DOS PROCESOS  
DIFERENTES CON EL USO DE MICROSCOPIA**

**COMPONENTE: CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFAZ DE UN  
MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO  
CON FIBRA NATURAL OBTENIDO POR MEDIO DE INFUSIÓN AL  
VACÍO CON EL USO DE MICROSCOPIA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**CADENA PASPUEZÁN DAVID SEBASTIÁN**

**david.cadena01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR, PhD.**

**patricia.rodriguez@epn.edu.ec**

**DMQ, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, DAVID SEBASTIÁN CADENA PASPUEZÁN declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**DAVID SEBASTIÁN CADENA PASPUEZÁN**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID SEBASTIÁN CADENA PASPUEZÁN, bajo mi supervisión.

---

**ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PhD.**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**Ing. Verónica Sotomayor Msc.**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**Ing. Mario Granja MsC.**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DAVID SEBASTIÁN CADENA PASPUEZÁN

ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR PhD.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de integración curricular dedico a dos grandes artífices de toda mi vida, mis padres Jorge (Lucho) y María (Lupe) por nunca rendirse ante el hecho de querer ver en todos sus hijos realizados como profesionales, siendo claro este personaje el último de los tres. Todo el esfuerzo y dedicación que me brindaron, el apoyo y amor recibido es infinito que merecen mucho más que unas líneas. Es importante dedicar a mi hermano mayor Santiago que me inicio en el estudio de la carrera y como no a mi hermana Mirtha quién me apoyo siempre y me demostró siempre su amor, quienes de inicio a fin junto con toda su familia fueron fundamentales para completar toda esta etapa. Además, dedico a toda mi familia Cadena y Paspuezán quién estoy seguro contribuyeron durante toda mi vida en el desarrollo personal y profesional. Además, es importante mencionar y dedicar a toda mi parroquia y su gente que brindan siempre los recursos necesarios para la obtención de un nuevo profesional que sale de allá, la que siempre llamaré mi tierra donde quiera que me encuentre.

Finalmente, y no menos importante dedicarme a mí por no declinar ante nada y sumar un logro más en ese gran camino que es la vida y del cual ya me siento siempre triunfante.

## **AGRADECIMIENTO**

Primero al ser creyente doy gracias a Dios por permitirme desarrollar cada actividad día a día, agradecer a mis papás por el apoyo recibido en todos los aspectos posibles para que esta etapa de mi vida pueda ser alcanzada. A mi hermano por guiarme desde un inicio hasta el final de nuestra carrera. A mi hermana quien me ha demostrado incondicionalidad y amor infinito, quién al final fue muy esencial en el proceso. Agradecer a toda mi familia Cadena y Paspuezán que contribuyeron de muchas maneras para alcanzar mi objetivo. A mi parroquia La Libertad en la provincia del Carchi por los recursos recibidos especial reconocimiento al sector La Rinconada donde nunca terminarán mis sueños. Agradezco a todos los amigos y vecinos que sin notarlo fueron muy importantes en momentos de ocio y distracción por los alrededores de nuestro cantón y nuestros páramos, para continuar con el esfuerzo propio durante la carrera. Incluso agradecimiento a los compañeros de vida los cuales siempre cuidaré con dedicación.

A mis compañeros y amigos en todos los niveles educativos con quién compartimos aulas, conocimiento y experiencias fundamentales en el desarrollo de una persona no solo profesionalmente. Y mencionar mis agradecimientos muy sinceros a todos los profesores y a mi directora Patricia quién demostró paciencia y orientación fundamental en el desarrollo de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivo general.....	1
1.2	Objetivos específicos .....	1
1.3	Alcance .....	1
2	MARCO TEÓRICO.....	2
2.1	Fibras naturales en Ecuador .....	2
2.2	Fibra de cabuya .....	2
2.2.1	Propiedades de la fibra de cabuya .....	3
2.2.2	Aplicaciones de la fibra de cabuya .....	5
2.2.3	Hilos y tejidos de cabuya .....	5
2.3	Materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales.....	8
2.4	Matriz orgánica de materiales compuestos .....	8
2.4.1	Resina poliéster y propiedades .....	8
2.4.2	Interfaz fibra-matriz.....	10
2.4.3	Cantidad y orientación entre fibra-matriz .....	11
2.5	Propiedades mecánicas.....	11
2.5.1	Resistencia a la flexión.....	12
2.5.2	Resistencia al impacto o tenacidad .....	12
2.5.3	Resistencia a la tracción.....	12
2.6	Obtención de materiales compuestos por infusión al vacío.....	13
2.6.1	Variables en el proceso de infusión al vacío.....	13
2.6.2	Curado de la resina poliéster.....	14
2.7	Microscopía en materiales compuestos .....	14
2.8	Maquinado de materiales compuestos.....	15
3	METODOLOGÍA.....	16
3.1	Materiales y equipos .....	16
3.1.1	Materiales.....	16
3.1.2	Equipos .....	24

3.2	Caracterización mecánica del tejido de cabuya .....	29
3.3	Densidad y fracción volumétrica del material compuesto .....	30
3.3.1	Densidad de la matriz .....	30
3.3.2	Densidad del material compuesto.....	31
3.3.3	Densidad del refuerzo .....	32
3.3.4	Condiciones para fracción volumétrica del refuerzo .....	34
3.4	Configuración y armado del sistema para infusión al vacío .....	35
3.4.1	Disposición del refuerzo .....	35
3.4.2	Armado de sistema para infusión al vacío .....	36
3.4.3	Obtención de material compuesto .....	38
3.5	Ensayos para caracterización mecánica del material .....	40
3.5.1	Ensayo de tracción .....	40
3.5.2	Ensayo de flexión .....	42
3.5.3	Ensayo de impacto .....	44
3.6	Microscopia de la interfase .....	46
4	RESULTADOS, DISCUSIÓN CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	47
4.1.1	Caracterización física de elementos del material compuesto.....	47
4.1.2	Caracterización de densidad y fracción volumétrica del material compuesto.....	47
4.1.3	Discusión de densidades y fracción volumétrica.....	47
4.2	Caracterización mecánica del material compuesto .....	48
4.2.1	Resultados del ensayo de tracción .....	48
4.2.1.1	Ensayo de tracción en probetas de infusión al vacío.....	<b>¡Error!</b>
	<b>Marcador no definido.</b>	
4.2.1.2	Ensayo de tracción en probetas de estratificación manual .....	<b>¡Error!</b>
	<b>Marcador no definido.</b>	
4.2.2	Discusión de resultados de ensayo de tracción .....	51
4.2.3	Resultados del ensayo de flexión .....	52

4.2.3.1	Ensayo de flexión de probetas de infusión al vacío	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.3.2	Ensayo de flexión de probetas de estratificación manual .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.4	Discusión de resultados del ensayo de flexión .....	55
4.2.5	Resultados del ensayo de impacto .....	56
4.2.6	Discusión de los resultados del ensayo de impacto.....	58
4.2.7	Resultados de las microscopias .....	59
4.2.7.1	Microscopias en probetas de tracción .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.7.2	Discusión de resultados de macrografías en probetas de tracción	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.7.3	Microscopias en probetas de flexión	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.7.4	Discusión de resultados de macrografías en probetas de flexión	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.7.5	Microscopias en probetas de impacto .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2.7.6	Discusión de resultados de macrografías en probetas de impacto	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.3	Conclusiones .....	61
4.4	Recomendaciones .....	62
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
6	ANEXOS .....	65



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta y fibra de cabuya .....	3
Figura 2. Artículos y aplicaciones de fibra de cabuya.....	5
Figura 3. Diseño de tejido .....	6
Figura 4. Esquema básico de tejido plano .....	7
Figura 5. (a) Configuración tipo Basket, (b) Configuración tipo Oxford, (c) Configuración tipo Leno .....	7
Figura 6. Orientación de fibras: a) unidireccional, b) Bidireccional, c) Multidireccional, d) Fibras largas orientadas al azar, e) Fibras cortas orientadas al azar .....	11
Figura 7. Tejido de fibra de cabuya.....	16
Figura 8. Resina poliéster ortoftálica RD1 33000.....	17
Figura 9. PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona), catalizador .....	17
Figura 10. Octoato de cobalto 12%, acelerador.....	18
Figura 11. Monómero de estireno, reduce la viscosidad de la resina.....	18
Figura 12. Tejido pelable o Peel Ply.....	19
Figura 13. Sangrador o film perforado.....	19
Figura 14. Manta de absorción.....	20
Figura 15. Líneas de conducto.....	20
Figura 16. Conector para distribución.....	21
Figura 17. Manguera de succión.....	21
Figura 18. Válvulas de paso.....	21
Figura 19. Conexiones tipo T.....	22
Figura 20. Bolsa de vacío.....	22
Figura 21. Cinta de butilo.....	23
Figura 22. Spray Silicona desmoldeante.....	23
Figura 23. Malla de reparto.....	24
Figura 24. Bomba de vacío ZENY.....	24
Figura 25. Trampa de resina en varias vistas.....	25
Figura 26. Balanza digital.....	25
Figura 27. Base de vidrio.....	26
Figura 28. Caladora manual.....	26
Figura 29. Lijas.....	26
Figura 30. Tinius Olsen H25KS máquina universal de ensayos .....	27
Figura 31. Adaptación de mordazas cuneiformes y extensómetro.....	27

Figura 32. Ensayo de flexión aplicando método de los 3 puntos .....	28
Figura 33. Equipo de impacto ELCOMETER y dardo con punzón. ....	28
Figura 34. Micrómetro de puntas esféricas. ....	29
Figura 35. Microscopio óptico. ....	29
Figura 36. Envases con mezcla de matriz.....	31
Figura 37. Probetas de matriz sólidas. ....	31
Figura 38. Probetas de material compuesto con 9 capas de refuerzo. ....	32
Figura 39. Orientación a 0° del refuerzo.....	36
Figura 40. Ubicación de la cinta de butilo en un recuadro cerrado sobre la base de vidrio. ....	36
Figura 41. Orden de colocación de materiales para infusión.....	37
Figura 42. Sistema con líneas de conducto y conectores. ....	37
Figura 43. Sistema en funcionamiento. ....	38
Figura 44. Esquema de todo el sistema utilizado en infusión al vacío .....	38
Figura 45. Matriz de material compuesto en estado líquido. ....	39
Figura 46. Conexiones completas en el sistema de infusión al vacío.....	39
Figura 47. Laminados obtenidos luego del proceso de desmoldeo. ....	39
a) Impacto, b) Tracción, c) Flexión.....	39
Figura 48. Probeta para ensayo de tracción. ....	40
Figura 49. Probeta para ensayo de flexión.....	40
Figura 50. Probeta para ensayo de impacto.....	40
Figura 51. Códigos de falla de la norma ASTM D3039 . ....	42
Figura 52. Procedimiento A de la norma ASTM D7264 .....	43
Figura 53. Código de falla de la norma ASTM D7264, Procedimiento A . ....	44
Figura 54. Curva esfuerzo-deformación de material compuesto de probetas de tracción mediante infusión al vacío .....	49
Figura 55. Probetas de tracción mediante infusión al vacío posterior al ensayo de tracción. ....	50
Figura 56. Curva esfuerzo-deformación de material compuesto de probetas de tracción mediante estratificación manual. ....	51
Figura 57. Comparación de resistencia a la tracción con infusión al vacío vs. estratificación manual .....	51
Figura 58. Comparación de módulo de elasticidad con infusión al vacío, estratificación manual y resina. ....	52

Figura 59. Curva Fuerza-Deflexión de material compuesto de probetas de flexión mediante infusión al vacío.....	53
Figura 60. Probetas de flexión obtenidas mediante infusión al vacío posterior al ensayo de flexión.....	54
Figura 61. Curva Fuerza-Deflexión de material compuesto de probetas de flexión mediante estratificación manual.....	55
Figura 62. Comparación de resistencia a la flexión, con infusión al vacío vs. estratificación manual. ....	55
Figura 63. Comparación de módulo elástico a la flexión, con infusión al vacío, estratificación manual y resina. ....	56
Figura 64. Probetas de impacto de material compuesto y resina mediante infusión al vacío posterior al ensayo de impacto. ....	58
Figura 65. Comparación de energía media de falla entre material compuesto y resina (matriz). ....	58
Figura 66. Macrografías con aumento 10x en probetas de tracción. ....	59
Figura 68. Macrografías con aumento 8x en probetas de impacto .....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la fibra de cabuya .	3
Tabla 2. Propiedades mecánicas de fibras naturales y sintéticas	4
Tabla 3. Composición química de algunas fibras naturales	4
Tabla 4. Propiedades mecánicas de resina poliéster .	9
Tabla 5. Caracterización mecánica del tejido de cabuya	30
Tabla 6. Resultados de pesos de la matriz del material compuesto.	31
Tabla 7. Resultados de pesos del material compuesto.	32
Tabla 8. Iteraciones para densidad del refuerzo.	34
Tabla 9. Dimensiones y volúmenes de las probetas de tracción, flexión e impacto.	34
Tabla 10. Densidad y masa de refuerzo de cada probeta normalizada	35
Tabla 11. Parámetros para las probetas en ensayos de tracción, flexión e impacto	35
Tabla 12. Disposición para las probetas en ensayos de tracción, flexión e impacto	35
Tabla 13. Porcentajes de resina poliéster y aditivos	38
Tabla 14. Características y parámetros usados en el ensayo de tracción	41
Tabla 15. Características y parámetros usados en el ensayo de flexión	43
Tabla 16. Características y parámetros usados en el ensayo de flexión	45
Tabla 17. Resumen de resultados de propiedades físicas de matriz y refuerzo	47
Tabla 18. Resumen de resultados de fracción volumétrica de material compuesto	47
Tabla 19. Corrección de espesores en probetas de tracción.	48
Tabla 20. Resultados del ensayo de tracción en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.	49
Tabla 21. Resultados del ensayo de tracción en probetas de material compuesto mediante estratificación manual.	50
Tabla 22. Corrección de espesores en probetas de flexión de infusión al vacío.	52
Tabla 23. Resultados del ensayo de flexión en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.	53
Tabla 24. Resultados del ensayo de flexión en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.	54
Tabla 25. Resultados del ensayo de impacto en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.	57
Tabla 26. Resultado de la energía media de falla	57

## RESUMEN

Este trabajo detalla la obtención de un material compuesto de matriz polimérica a base de resina poliéster, reforzado con tejido de fibra natural de cabuya, mediante el procedimiento de infusión al vacío por medio del cual se fabrican laminados de los que se obtienen diferentes tipos de probetas con la finalidad de ser caracterizadas para determinar las propiedades físicas y mecánicas del material. Los ensayos realizados son los de: tracción de acuerdo con los parámetros establecidos en la norma ASTM D3039/D3039 M-17, flexión según la norma ASTM D7264/D7264 M-15, e impacto que cumple la norma ASTM D7264-96. Posteriormente se realiza un análisis microscópico en la zona de falla de las probetas ensayadas para determinar el estado de la interfase matriz-refuerzo en el material. Finalmente se realiza una comparación de los resultados frente a otro trabajo de integración curricular realizado bajo los mismos parámetros de elaboración para el material (cantidades relativas de matriz, refuerzo y aditivos) pero bajo un diferente proceso de obtención del laminado, para de esta manera determinar que método presenta los mejores resultados. Se pudo concluir que los mejores resultados en cuanto a características físicas y propiedades mecánicas se obtiene con el proceso de infusión al vacío empleado en el presente trabajo.

**PALABRAS CLAVE:** fibra, cabuya, material compuesto, infusión al vacío, norma ASTM, resistencia.

## **ABSTRACT**

This work details the obtaining of a composite material with a polymeric matrix based on polyester resin, reinforced with natural cabuya fiber fabric, through the vacuum infusion procedure through which laminates are manufactured from which different types of test tubes are obtained. To be characterized to determine the physical and mechanical properties of the material. The tests carried out are those of traction according to the parameters established in the ASTM D3039/D3039 M-17 standard, bending according to the ASTM D7264/D7264 M-15 standard, and impact that complies with the ASTM D7264-96 standard. Subsequently, a microscopic analysis is carried out in the failure zone of the tested specimens to determine the state of the matrix-reinforcement interface in the material. Finally, a comparison of the results is made against other curricular integration work carried out under the same elaboration parameters for the material (relative amounts of matrix, reinforcement, and additives) but under a different process for obtaining the laminate, in order to determine Which method gives the best results? It was possible to conclude that the best results in terms of physical characteristics and mechanical properties are obtained with the vacuum infusion process used in this work.

**KEY WORDS:** fiber, cabuya, composite material, vacuum infusion, ASTM standard, resistance.

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Objetivo general**

Caracterizar la interfaz de un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra natural de cabuya obtenida por medio de infusión al vacío con el uso de microscopía.

## **1.2 Objetivos específicos**

Obtener probetas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzada con tejidos de fibra de cabuya mediante infusión al vacío.

Caracterizar el material compuesto mediante ensayos de tracción, impacto y flexión para determinar sus propiedades mecánicas.

Analizar microscópicamente la interfaz del material compuesto.

Comparar los resultados de la caracterización de las probetas obtenidas por medio de infusión al vacío con los resultados obtenidos de las probetas fabricadas por estratificación manual y encontrar su relación con el estado de la interfaz observada en ambos casos.

## **1.3 Alcance**

En el proyecto se detalla la fabricación de laminados de material compuesto con matriz de resina poliéster y reforzado con tejido de fibra natural de cabuya obtenidos por medio del proceso de infusión al vacío. El resultado son varios laminados de diferentes espesores de acuerdo con las respectivas normas en función de los ensayos mecánicos (tracción, flexión e impacto) empleados para su caracterización mecánica. Posteriormente, se realiza un análisis microscópico de la superficie de falla para establecer una relación entre la interface observada en las probetas fabricadas por infusión al vacío comparadas con las fabricadas por estratificación manual y determinar cuál de los dos procesos permite obtener mejores características en el material compuesto.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Fibras naturales en Ecuador**

El cambio climático a nivel nacional y global debido a la contaminación ambiental y el uso general de materiales comunes han llevado a la sensibilización ambiental, generando mayor interés en el uso de nuevas tecnologías y consecuentemente en el desarrollo de nuevos materiales de fabricación y composición más amigables con el ambiente, logrando alcanzar ciertas propiedades en su estructura dependiendo del uso para el que se destinen.

Las fibras naturales poseen propiedades mecánicas que alcanzan niveles comparables con las fibras sintéticas logrando, en las últimas décadas, ser empleadas como refuerzo en materiales compuestos en diversas industrias con ventajas como: bajo costo, biodegradabilidad, baja densidad, afectaciones mínimas en la salud, entre otras [1].

El Ecuador es un país que cuenta con gran diversidad de flora, además, de tener las condiciones óptimas en sus diversos pisos climáticos y calidad de suelos para la producción de especies vegetales en grandes cantidades de manera controlada, evitando la sobreexplotación de la flora silvestre y la extinción de una especie [1]. Actualmente la demanda de fibras naturales a nivel mundial tiene una tendencia creciente, por lo que el Ecuador puede alcanzar una gran oportunidad debido a sus condiciones aptas de producción, pues se estima que existen 25 mil especies de plantas de tipo vascular, logrando ser el país número uno en América Latina con mayor número de plantas que se encuentran por unidad de área [1], de las cuales cabe destacar: fibra de cabuya, fibra de coco, fibra de abacá, algodón, yute, entre otras [2].

### **2.2 Fibra de cabuya**

La planta de cabuya (Figura 1) del género *furcraea* se origina en las laderas y valles de los Andes, y es utilizada para extraer la fibra de cabuya de sus hojas, además se emplea en la elaboración de textiles, alimento para animales, leña, entre otros. La cabuya pertenece a las fibras duras, debido a que sus hojas están conformadas por una cantidad de fibras unidas por una goma (cemento vegetal) formando axones, conocidos como fibras estructurales, proporcionándoles dureza, resistencia, fuerza y rugosidad. Para la extracción de la fibra es indispensable utilizar pencas adultas de alrededor de 3 a 5 años que posean hojas de mayor longitud para ser despencada y obtener mayor cantidad de fibra de cabuya con menos plantas garantizando mayor eficiencia en la producción [1], [3].





Figura 1. Planta y fibra de cabuya [1].

### 2.2.1 Propiedades de la fibra de cabuya

Las propiedades de la fibra extraída de la planta de cabuya conforman un conjunto llamativo para los consumidores que la destinan al mercado artesanal y recursos ornamentales por su agradable aspecto, color, textura y demás características que se pueden observar en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de la fibra de cabuya [1].

Característica	Valor
Longitud	80 a 120 cm
Textura	Dura
Color	Habano
Brillo	Opaco
Punto de fusión	No se funde
Absorción de humedad	Baja
Efectos frente ácidos	Baja
Efecto frente álcalis	Resistente
Efecto de los oxidantes	Variable
Resistencia a la luz del sol	Regular

Esta fibra también se destaca por su peso muy reducido, resistencia al corte y tracción. Además, se ha notado que necesita bajos requerimientos energéticos para ser procesada, lo cual la convierte en una opción fiable para usos industriales llegando a ser una de las fibras más comerciales en Ecuador [1], [2]. Las propiedades mecánicas de las fibras naturales y sintéticas más comunes, junto con la fibra de cabuya se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Propiedades mecánicas de fibras naturales y sintéticas [1].

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación de fractura (%)	Absorción de humedad (%)
Cabuya	1.30	305.15	7.50	4.96	---
Yute	1.30	393.0 – 773.00	26.50	1.50 – 1.80	12.00
Coco	1.20	175.00 – 220.00	4.00 – 6.00	15.00 – 30.00	10.00
Abacá	1.30	400.00 – 1289.00	45.00	2.70	8.00 – 10.00
Sisal	1.50	511.00 – 635.00	9.40 – 22.00	2.00 – 2.50	---
Algodón	1.50	393.00 – 773.00	27.60	7.00 – 8.00	8.00 – 25.00
Ramio	1.50	400.00 – 938.00	61.40 – 128.00	3.60 – 3.80	12.00 – 17.00
Lino	1.50	345.00 – 1035.00	27.60	2.70 – 3.20	7.00
Cáñamo	1.40	690.00	35.00	1.60	8.00
Vidrio – S	2.50	2000.00 – 3500.00	70.00	2.50	---
Vidrio – E	2.50	4570.00	86.00	2.80	---
Aramida	1.40	3000.00 – 3150.00	63.00 – 67.00	3.30 – 3.70	---
Carbono	1.40	4000.00	230.00 – 240.00	1.40 – 1.80	---

Con estos datos se nota que la fibra de cabuya presenta buenos niveles de resistencia a la tracción junto con su excelente composición química (Tabla 3) generando un interés particular.

Tabla 3. Composición química de algunas fibras naturales [1].

Fibra	Celulosa (% en peso)	Hemicelulosa (% en peso)	Lignina (% en peso)	Pentosas (% en peso)
Cabuya	62.70	---	15.50	17.70
Yute	61.00 – 71.00	13.00 – 20.00	8.10 – 13.00	---
Coco	32.00 – 43.00	0.15 – 0.25	40.00-45.00	---
Abacá	63.00 – 70.00	20.00 – 21.00	5.00 – 6.00	---
Sisal	67.00 – 78.00	10.00 – 14.00	18.00-14.00	---
Banana	63.00 – 64.00	10.00	5.00	---
Algodón	82.00 – 93.00	3.00 – 6.00	---	---
Bambú	35.00 – 61.00	15.00	27.00-32.00	---
Kenaf	45.00 – 57.00	21.00	8.00– 32.00	---
Ramio	68.00 – 76.00	13.00 – 16.00	0.60 – 0.70	---
Lino	71.200	18.00 – 20.00	2.20	---
Cáñamo	70.00 – 75.00	17.00 – 22.00	3.70 – 5.70	---

## 2.2.2 Aplicaciones de la fibra de cabuya

La fibra de cabuya por lo general se usa comercialmente en el campo artesanal y ornamental, donde se realizan artículos como: alfombras, tapetes, tapicería, cordeles, colchones, hamacas, mesas, prendas de vestir, entre otros (Figura 2). En el sector de producción industrial se ha empleado en todo tipo de textiles para fabricación de vestimenta, incluso existen tiendas destinadas a la producción de calzado con ciertos tipos de composición de fibra de cabuya que se encuentran en grandes centros comerciales como Carry On o Always Shoes, también se le ha dado cierta utilidad en la fabricación de papel. En los últimos años se ha incursionado en el refuerzo de materiales compuestos con matriz polimérica, especialmente en la industria automotriz [1], [3].



Figura 2. Artículos y aplicaciones de fibra de cabuya.

(Fuente: propia)

## 2.2.3 Hilos y tejidos de cabuya

Los materiales de tipo fibroso corresponden a las mejores opciones para actuar como refuerzo en una matriz polimérica, pues se desea que las fibras sean lo más finas posible para lograr menos defectos en el compuesto reduciendo la probabilidad de fallas futuras. Otro factor importante en el interior de la matriz es la distribución y dirección de las fibras, o en este caso tejido, que se colocan [1]. Los procesos de obtención de la fibra y de hilado tradicional incluso a nivel industrial, presentan pasos similares:

**Extracción de fibra:** la fibra de cabuya se extra de las hojas de la planta de cabuya directamente para ser sometida a procesos de lavado, blanqueo, neutralización, teñido, ablandamiento y secado, obteniendo los primeros resultados de materia prima para un posterior hilado [1].

**Preparación de materia prima:** se debe verificar que el hilo no supere el 15 % de humedad y tenga al menos 1 metro de longitud [1].

**Lubricado:** se vierte un lubricante de características aceitosas con la finalidad de reducir la fricción generada tanto entre fibras como con diferentes componentes [1].

**Agitado:** de manera tradicional con elementos similares a peines y en la industria con máquinas de tambor y aletas, se peina la fibra con la finalidad de eliminar impurezas [1].

**Acordonado:** mediante telares con púas de diferentes distribuciones y grosores, la fibra se estira, peina y reparte obteniendo una cinta paralela con uniformidad en longitud y diámetro [1].

**Hilado y torcido:** mediante una aleta giratoria o de manera manual mediante herramientas tradicionales se hilan de diferentes diámetros y posteriormente es envuelta en carretes. Para elevar el grosor, y con esto aumentar la resistencia del hilo, se unen los dos extremos compartiendo el mismo sentido de torsión y son retorcidos en sentido contrario [1].

**Corte de igualación:** en este paso mediante cuchillas se igualan las fibras que sobresalen y todo tipo de vellosidades presentes en el material [1].

**Enconado, envoltura, pesado y empaçado:** de manera manual o mediante una máquina enconadora se envuelve el hilo de cabuya en ovillos para ser pesados mediante una balanza y empaçados para el comercio [1].

**Tejido de cabuya:** de los hilos que se obtienen como ovillos se puede realizar un entrecruzamiento de distintas configuraciones de los hilos (urdiembre) de manera longitudinal con filamentos horizontales y verticales [1] (Figura 3).



Figura 3. Diseño de tejido [1].

Las maneras de entrecruzar los hilos y las diferentes configuraciones caracterizan el tipo de tejido, logrando generar todo tipo de tejido y telas que se obtengan a base de hilos a partir de fibras. El tejido plano constituye filamentos interpuestos unos sobre otros de manera que los hilos de la trama se ubican por debajo y sobre los hilos de urdiembre, de manera consecutiva,

siendo necesario repetir de manera longitudinal en sentido horizontal y vertical, este tejido presenta mayores entrecruzamientos por unidad de superficie, es simétrico y existen variaciones basadas en este, como: tejido tipo oxford, basket y leno [1] (Figura 4).

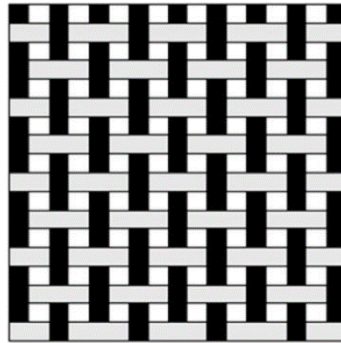


Figura 4. Esquema básico de tejido plano [1].

Otras configuraciones como el tejido Basket se realiza por dos filamentos o más, tanto en la trama como en la urdiembre, de manera simultánea tanto en filas como en columnas. Por otro lado, el tejido Oxford se configura de manera que dos filamentos se encuentran en las columnas y un filamento cruza estos dos en las filas. Finalmente, el tejido Leno presenta la urdiembre con una separación bastante considerable (menor cantidad de filamentos en esta dirección). Estos ejemplos se muestran en la Figura 5, que corresponden a variaciones del tejido plano [1].

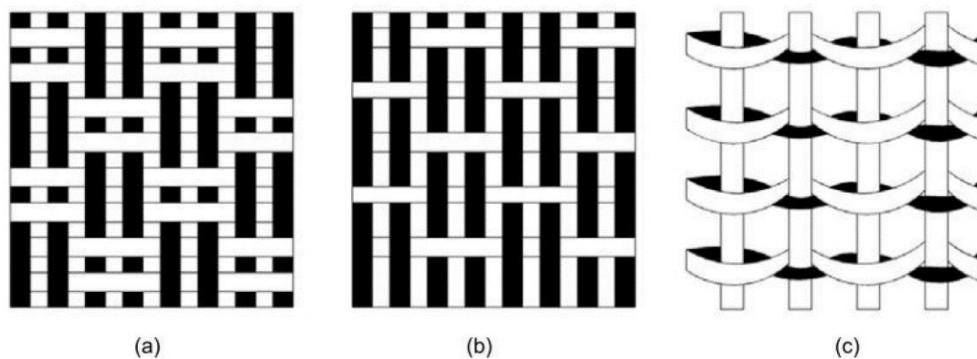


Figura 5. (a) Configuración tipo Basket, (b) Configuración tipo Oxford, (c) Configuración tipo Leno [1].

## **2.3 Materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales**

Los materiales compuestos constan de una matriz y uno o varios tipos de refuerzo que de manera conjunta dan forma a un material diferente con propiedades y características distintas de las que presentan los componentes de forma individual. Los materiales que se caracterizan por contener refuerzo con fibras de diferente naturaleza se clasifican de acuerdo con el tipo de matriz: cerámica, polimérica o metálica. Según la función para la cual se destina el material se elige el tipo de matriz adecuado [1]. Los materiales de matriz polimérica que son reforzados con fibras vegetales lo hacen con la finalidad de cambiar sus propiedades, generalmente para mejorar la resistencia y rigidez, ya que las fibras sirven de soporte para cargas mecánicas [2]. La inclusión de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos lleva aproximadamente dos décadas de estudios y, actualmente, su producción a nivel mundial bordea 30 millones de toneladas para diferentes aplicaciones siendo la más reciente aplicación su uso en la elaboración de materiales compuestos para la fabricación de partes automotrices internas.

## **2.4 Matriz orgánica de materiales compuestos**

Generalmente los compuestos poliméricos tradicionales utilizan matrices termoestables, estas resinas son líquidos viscosos que mediante una reacción de endurecimiento dan formación a una red molecular que se conforma por una serie de enlaces cruzados con cadenas moleculares formando un sólido que no puede ser reprocesado. Las matrices orgánicas o poliméricas también llamada matriz plástica se caracteriza por baja densidad, bajo coste, alta tenacidad, resistencia a la corrosión, rapidez y sencillez en procesos de conformado y maquinado [1]. Las matrices orgánicas o poliméricas pueden ser de varios tipos:

**Termoplásticas**, son usadas en aplicaciones de bajos requerimientos, sin embargo, se han desarrollado en los últimos años termoplásticos avanzados para altas prestaciones [4].

**Duroplásticos o termoestables**, son empleadas en materiales compuestos destinados para altas prestaciones [4].

**Elastómeros**, son matrices con mucha más resistencia elástica generalmente usadas en la elaboración de neumáticos y cintas transportadoras [4].

### **2.4.1 Resina poliéster y propiedades**

La resina poliéster presenta características de aislante térmico y eléctrico, ligero, que mediante una adecuada formulación y selección de otros componentes puede resistir agua intemperie y ataques de algunos agentes químicos. Con esta, se pueden realizar productos

de fácil transporte, mantenimiento y montaje [1]. Entre las principales propiedades mecánicas que presenta esta resina se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Propiedades mecánicas de resina poliéster [1].

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Peso específico (densidad)	1.28 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	110.00 Rockwell M
Resistencia a la tracción	55.00 MPa
Resistencia a la compresión	140.00 MPa
Resistencia al impacto	2.00 kJ/m <sup>2</sup>
Módulo de Young	3.50 GN/m <sup>2</sup>
Elongación a la rotura	2.00%
Conductividad térmica	0.20 W/m°C
Coefficiente de dilatación lineal	100 x 10 <sup>-6</sup> °C
Absorción de agua, 24 horas, 20°C	0.15%

La resina poliéster es un polímero líquido bajo condiciones ambientales normales y de características termo-endurecibles con la adición adecuada de peróxido de metiletilcetona (MEK) (iniciador) y octoato de cobalto (promotor) [1]. El proceso de curado mediante el cual la resina pasa de su estado líquido a un estado sólido dándole la forma final se debe a la acción conjunta del iniciador, acelerador y catalizador, dando paso a la reacción con el paso del tiempo. Los factores directamente influyentes en dicho proceso son: tipo y calidad de la resina, condiciones ambientales, tipo y cantidad de los promotores (iniciador y acelerador), humedad relativa, exposición a rayos solares, espesor o dimensiones de la pieza final [1].

Las resinas poliéster más comunes son:

**Poliéster ortoftálico**, es una resina con posibilidad de ser mezclada con otras resinas de mayor resistencia, para mejorar sus propiedades. Presenta gran resistencia química y mecánica. Las principales aplicaciones son: producción de sillas, autopartes, tejas, bustos artísticos, entre otras [1].

**Poliéster isoftálico**, es una de las resinas que presenta mayor resistencia química siendo especialmente utilizada para elaboración de elementos destinados a usos en contacto directo con agua o que se encuentran a la intemperie [1].

**Poliéster tereftálico**, es una resina con gran resistencia química superando a la ortoftálica, soporta altas temperaturas, capaz de adaptarse fácilmente a una carga mineral y limitada absorción de agua [1].

**Poliéster Iso N.P.G.**, es una resina isoftálica que ha sido modificada agregando Neopentil glicol (N.P.G.), aumentando su resistencia química en cuanto a resistencia al agua, microorganismos y hongos. Sus aplicaciones más comunes son la elaboración de tanques de industria alimentaria, toboganes, tinas y piscinas [1].

**Poliéster bisfenólico y viniléster**, estas resinas presentan gran resistencia contra ataques químicos y gran resistencia a elevadas temperaturas, siendo destinadas para construcción de tuberías, chimeneas, tanques, torres lavadoras y torres de enfriamiento [1].

### **2.4.2 Interfaz fibra-matriz**

La interfaz tiene la finalidad de garantizar una unión adecuada y firme entre los materiales utilizados, generando cierta efectividad en el sistema, con esto se trata de que las cargas aplicadas en el material se transmitan uniformemente de la matriz hacia el refuerzo. Siendo este un rol fundamental en las propiedades mecánicas y físicas que alcanzan los materiales compuestos, debido a que si se habla propiedades elásticas individuales de la fibra y/o matriz presentan características distintas [1].

En los materiales compuestos la adhesión se relaciona directamente con el nivel de facilidad de desprendimiento y separación de las fibras y matriz conforme se va propagando la rotura [1]. Algunos mecanismos de adhesión son:

**Adhesión mecánica:** se presenta con grados altos de mojabilidad y fluidez, alcanzando la difusión de refuerzo y matriz, esto porque las dos superficies son irregulares en el estado viscoelástico. Para mejorar el grado de unión mecánica entre ambas superficies es fundamental la limpieza adecuada de refuerzo y control de condiciones ambientales especialmente la temperatura del polímero [1].

**Atracción electrostática:** son fuerzas que se deben posiblemente a la carga eléctrica presente entre la matriz y el refuerzo. Aquí la densidad de carga iónica es la que establece la fuerza existente en la interfaz. Una atracción electrostática ayuda en el proceso de difusión de las fibras en la matriz [1].

**Interdifusión:** la cantidad numérica de moléculas que intervienen y el grado de entrelazamiento molecular determinará la fuerza existente en la unión entre el polímero y la fibra. Además, puede darse una estimulación mediante agentes disolventes y plastificantes, de acuerdo con la composición de elementos individuales y el grado de difusión de concentración de estos [1].

**Enlace químico:** el tipo y la cantidad de enlaces químicos se relacionan directamente con la fuerza que une la fibra con la matriz. Estos enlaces se forman entre grupos químicos compatibles presentes en la fibra y la matriz [1].



En la mayoría de las ocasiones la interfaz entre el refuerzo y la matriz se afecta debido a que las fibras vegetales contienen grasas, ceras y también por el carácter hidrofílico propio de estas. Con esto los estudios se enfocan en mejorar la unión y relación fibra-matriz, con el objetivo de alcanzar mejor aprovechamiento de los elementos que conforman el material compuesto [1].

### 2.4.3 Cantidad y orientación entre fibra-matriz

La cantidad, orientación y distribución de las fibras influye significativamente en las propiedades de los materiales compuestos. De acuerdo con la fibra existen dos alternativas de alineación: alinear paralelamente con la dirección del eje longitudinal de las fibras y alinear al azar (Figura 6). Además, existen diversas variaciones en la ubicación del refuerzo dependiendo si son tejidos o no tejidos. Cuando existen fibras largas unidireccionales y paralelas a la dirección del refuerzo las propiedades mejoran significativamente frente a otras configuraciones. No obstante, cuando la carga se aplica de manera perpendicular a la dirección de las fibras el material compuesto reduce sus propiedades y resistencia, lo que se conoce como materiales anisotrópicos. Una manera de proveer al material de propiedades similares en cualquier dirección es la orientación de fibras al azar, aun teniendo baja eficiencia se convierte en un material isotrópico y presenta un menor costo de fabricación [1]. En la Figura 6 se esquematiza algunas orientaciones de las fibras:

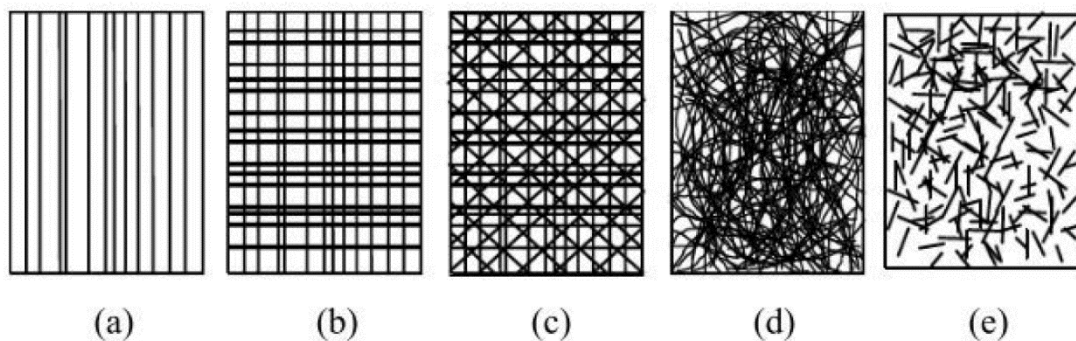


Figura 6. Orientación de fibras: a) unidireccional, b) Bidireccional, c) Multidireccional, d) Fibras largas orientadas al azar, e) Fibras cortas orientadas al azar [1].

## 2.5 Propiedades mecánicas

Conocer las propiedades mecánicas de un material es fundamental para determinar si las solicitaciones a las que estará sometido serán soportadas de acuerdo a las necesidades de diseño, para de esta manera cumplir requerimientos y medidas de seguridad de la pieza o parte realizada. Un empleo adecuado de técnicas para el procesamiento de los materiales depende principalmente del conocimiento de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas entre otras [1].

La gran mayoría de materiales compuestos cuentan con mejoras frente a los componentes individuales de resistencia de la tracción, flexión, impacto, tenacidad, módulo de Young y relación entre resistencia y peso [1].

### **2.5.1 Resistencia a la flexión**

Esta propiedad mide la resistencia que puede soportar un material cuando es sometido a cargas perpendiculares a su eje. La prueba de flexión se realiza aplicando cargas en tres o cuatro puntos de las probetas de prueba. Las fuerzas aplicadas directamente en puntos medios de la probeta soportada en apoyos en sus extremos y puntos establecidos generan un esfuerzo resultante debido a la combinación de esfuerzos de tracción y compresión en diferentes subzonas del material [1].

### **2.5.2 Resistencia al impacto o tenacidad**

La resistencia al impacto o tenacidad cuantifica la cantidad de energía que un material puede absorber antes de producirse la fractura. Existen diferentes métodos para determinar esta propiedad, entre los más sencillos se tiene la prueba de impacto en la que conociendo la altura inicial, final y masa del dardo se puede determinar la diferencia de energía potencial, para determinar la absorción de energía en la muestra durante el ensayo [1].

En los materiales compuestos, existe una relación proporcional entre la energía de impacto y la fracción volumétrica del refuerzo, de modo que, a mayor cantidad de refuerzo más alta será la energía de impacto y viceversa [1].

### **2.5.3 Resistencia a la tracción**

Esta resistencia corresponde al esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación, siendo el resultado de aplicar una carga axial en la muestra alcanzando su resistencia máxima a tracción antes de alcanzar la fractura [1].

Se debe tener en cuenta que la resistencia a la tracción mide la calidad de la interfaz e incluso brinda información de posibles defectos en el material compuesto como resultado del proceso de elaboración. Un claro ejemplo es cuando existen porosidades o inclusiones, donde el valor obtenido de resistencia máxima está por debajo del valor menor correspondiente [1].

Otro factor importante es el módulo de elasticidad o módulo de Young que se relaciona directamente con la fuerza de enlace en los átomos del material, corresponde a la pendiente en la curva esfuerzo-deformación unitaria en la zona elástica. Con esto, a mayor contenido de celulosa en las fibras naturales se obtendrá un módulo de elasticidad más alto [1], [4].

## 2.6 Obtención de materiales compuestos por infusión al vacío

En el proceso de infusión al vacío se hace pasar resina a través de un sistema herméticamente cerrado, que se compone de un molde en el que se colocan las fibras cubiertas con una bolsa de vacío y otras capas de materiales que ayudan a mejorar y controlar el proceso. Se tiene una entrada y salida para insertar el material que formará la matriz del compuesto. El vaciado del aire interno se realiza mediante una bomba de vacío [1].

Debido a que se coloca la bolsa de vacío sobre el molde y las fibras, el control de dimensiones específicamente del espesor y contenido de resina es limitado. La ubicación de los puntos de succión, la relajación de las láminas de fibra, la distribución de la resina sobre el molde y el proceso de desmoldeo incluyen una serie de variables y materiales utilizados, con la finalidad de obtener un laminado de alta calidad [1].

### 2.6.1 Variables en el proceso de infusión al vacío

Con la finalidad de mejorar el proceso de infusión al vacío se utiliza una serie de materiales y equipos como:

**Refuerzo:** tipo de fibra empleado como refuerzo del material, en este caso particular fibras de origen natural tipo cabuya.

**Matriz:** se usa como estructura de soporte en la elaboración del material compuesto, en este caso la matriz es termoestable (resina poliéster).

**Bolsa de vacío:** es una lámina flexible y capaz de soportar presión de vacío al colocarla sobre el molde a fabricar [5].

**Film perforado o sangrador:** se encarga de la distribución y control de resina permitiéndole pasar por pequeñas perforaciones hacia la capa inferior [5].

**Tejido pelable:** es una lámina que actúa como barrera para evitar que se adhieran el laminado realizado con el resto de los materiales empleados en la fabricación [5].

**Cinta sellante:** realiza el sellado completamente hermético entre la bolsa y el molde base [5].

**Manta de absorción:** permite que el aire que se encuentra dentro de la bolsa de vacío salga y garantiza la absorción de los excesos de resina que existan [5].

**Desmoldante:** evita que el laminado final se adhiera al molde posteriormente al curado y existen de tipo cera, aerosol y pasta [5].

**Trampa de resina:** es un tipo de envase que sirve para depositar los excesos de resina que resultan del proceso de succión del sistema de vacío, garantizando que la resina no se introduzca en la bomba de vacío y cause graves daños [5].

**Bomba de vacío:** es un tipo de bomba que aplica presión de vacío en el sistema sellado para producir la succión de la resina y su paso a través del molde [5].

### **2.6.2 Curado de la resina poliéster**

Una vez que las resinas termoestables adquieren su geometría final y son sometidas al proceso de curado mediante reacción química no pueden volver a fundirse pues cuando se aplica calor se degradan o descomponen por completo [1].

El curado se da gracias al desprendimiento de calor interno (reacción exotérmica) o también por calor inducido [2]. Los poliésteres insaturados lineales se enlazan mediante radicales libres y cruzados con moléculas de tipo vinilo o estireno, con el contacto del agente curador. El peróxido de metil-etil-cetona (MEK) se utiliza generalmente para curado de la resina poliéster bajo condiciones de temperatura ambiente. Además, se añade un porcentaje pequeño de octoato de cobalto que acelerará la reacción [1]. Este proceso no es inmediato y dependiendo las cantidades empleadas tomará un tiempo de horas o días.

## **2.7 Microscopía en materiales compuestos**

Para el análisis de la estructura interna de un material puede bastar un simple análisis óptico, pues las propiedades y estructura atómica se reflejan en la morfología de un material. El objetivo de un análisis microscópico es aumentar la precisión en las observaciones que se pueden realizar a simple vista. La información que se produce de análisis microscópicos es variada y permite visualización de tipo de material, tamaño de grano, interfase, relación de las propiedades con estructura interna, incrustaciones, procesos de deformación, homogeneidad en las muestras, entre otros. [6]

La microscopía óptica garantiza una mejor visualización de la microestructura tanto de probetas biológicas como inorgánicas gracias a la interacción de las muestras con un haz de luz (fotones). Dependiendo la necesidad los aumentos vienen dados por el tipo de microscopio y la magnificación de los oculares frente a la de los lentes-objetivos [7].

Las microscopías pueden ser de dos tipos las de análisis profundo en las que se requiere visualización de elementos o componentes con tamaños muy reducidos lo que implica el uso de aumentos superiores a 15x y las de análisis más extenso y visualización de elementos que no son tan reducidos con aumentos por debajo de los 15x [8].

Para la microscopía óptica del material compuesto de matriz polimérica con refuerzo de fibra de cabuya se usó macrografías debido a que el principal interés es visualizar la interfase del material compuesto en la sección transversal en la superficie de falla.

## **2.8 Maquinado de materiales compuestos**

Generalmente se mecaniza materiales compuestos con la finalidad de crear agujeros, ranuras, cortes o formas que no es posible conseguir directamente durante el proceso de fabricación de la pieza. La obtención de tolerancias determinadas del elemento en cuestión se da en función de las especificaciones de diseño cumpliendo normas y requerimientos para posterior evaluación mediante ensayos de las propiedades mecánicas. Los procesos más comunes de mecanizado conllevan cortar, lijar, taladrar, fresar y varias técnicas similares que se realizan en el mecanizado de materiales metálicos [1].

Los inconvenientes más comunes en maquinado de materiales compuestos se deben a que las fibras de refuerzo sufren afectaciones con agentes químicos, humedad y se crean discontinuidades afectando directamente las propiedades iniciales de la fibra y con esto el rendimiento de la pieza, generando resultados limitados sobre los que se desea. Además, al realizar procesos de corte se debe cuidar de no sobrepasar la temperatura que se alcanzó durante la etapa de curado para evitar la desintegración de refuerzo y matriz que conforman los materiales compuestos termoestables [1].

### 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso de fabricación de los laminados mediante el proceso de infusión al vacío y los materiales y equipos empleados. A continuación, se describen los pasos y procedimientos para determinar las densidades de cada componente individual y posteriormente la fracción volumétrica del refuerzo, que también se usa de acuerdo con la bibliografía recomendada. Finalmente, se obtienen los laminados para realizar los ensayos de tracción, flexión e impacto que determinarán las propiedades y proporcionarán los resultados requeridos para la comparación respectiva entre los procesos de fabricación de acuerdo con los objetivos planteados.

#### 3.1 Materiales y equipos

Aquí se detallan los materiales y equipos que se utilizaron durante el proceso de infusión al vacío:

##### 3.1.1 Materiales

**Tejido de fibra de cabuya:** se elabora a partir de la fibra de cabuya con la cual se forma hilos y posteriormente el tejido que es usado como refuerzo del material compuesto en una sola configuración de tejido plano y orientación a 0° (Figura 7).



Figura 7. Tejido de fibra de cabuya.

(Fuente: propia)

**Resina poliéster:** RD1 33000 es una resina poliéster insaturada de base ortoftálica con alto contenido de sólidos (Ficha técnica Anexo II) (Figura 8). Tiene gran resistencia a la intemperie agregando inhibidor UV, cumple con la regulación 21 CFR 177.2420 de la FDA después de formularse y curarse, siendo adecuada para uso repetido en materiales en contacto con alimentos. Generalmente, se usa en embarcaciones de plástico reforzado (FRP) como yates, botes de pesca, botes salvavidas, también en tuberías, tanques y productos plásticos reforzados con fibras sintéticas y naturales, en procesos de bobinado de filamento, laminado natural, pultrusión y rociado. Esta resina tiene que ser empacada en contenedores limpios,

secos, sellados y seguros. Presenta una vida útil de 6 meses por debajo de los 25°C, bien ventilado y evitando la insolación [10]. Para iniciar, acelerar y completar la polimerización de la resina se necesitan algunos aditivos como:



Figura 8. Resina poliéster ortoftálica RD1 33000.

(Fuente: propia)

1. PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona), es un catalizador empleado en resinas de poliéster insaturado y comúnmente utilizado en aplicaciones que se realizan con curado a temperatura ambiente (Ficha técnica Anexo III) (Figura 9). Es fundamental que la resina contenga un acelerador o promotor antes de ser agregado el PEROXICOL 80. Las concentraciones indicadas se encuentran en un rango entre 0,25% a 2,5% con respecto a la resina, de acuerdo con las condiciones requeridas. Requiere la manipulación y almacenaje adecuado y el tiempo de vida útil es de 5 meses [11].



Figura 9. PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona), catalizador

(Fuente: propia)

Octoato de cobalto 12%, es un compuesto que puede descomponer al peróxido orgánico en radicales libres especialmente utilizado en el peróxido de metil-etil cetona (Ficha técnica

2. Anexo IV) (Figura 10), se utiliza en las resinas como acelerador produciendo un adecuado secado en la superficie. Es obtenido a base de sal de cobalto del ácido 2-etil hexoico en disolvente No. 4, siendo su formulación química  $(C_7H_{15}COO)_2Co$  [1].



Figura 10. Octoato de cobalto 12%, acelerador.

(Fuente: propia)

Monómero de estireno, se utiliza para reducir la viscosidad de la resina poliéster haciendo más fácil la integración al refuerzo (Ficha técnica

3. Anexo V) (Figura 11) [1].



Figura 11. Monómero de estireno, reduce la viscosidad de la resina.

(Fuente: propia)



**Peel Ply o tejido pelable:** es un tejido de 100% poliamida resistente a altas temperaturas con la finalidad de adaptar sobre laminados que realizan a partir de resinas termoestables que son reforzadas con fibras sintéticas o naturales, obteniendo superficies curadas y rugosas, cuando se realiza la separación de laminado curado. Cuando se utiliza este tejido como capa final en los laminados se evita la necesidad de lijar la superficie del composite con la finalidad de realizar segundos laminados o llevar a cabo pegados. Las dimensiones comerciales son de 100 [cm] de ancho en el rollo con un gramaje de 80 [g/m<sup>2</sup>] y se puede alcanzar temperaturas máximas de trabajo de hasta 185 °C [12] (Figura 12).



Figura 12. Tejido pelable o Peel Ply.  
(Fuente: propia)

**Sangrador o film perforado:** es una lámina de copolímero color azul con perforaciones en toda su área de tipo P3, se emplea entre el tejido pelable y la manta de absorción en procesos de infusión o compactación al vacío con materiales compuestos reforzados con fibras naturales o sintéticas. Esta lámina permite el paso del aire que está atrapado entre el laminado final y el exceso de resina que finalmente descansa sobre la manta. Presenta características como espesor de 25 micrones, elongación de 400% y temperatura máxima de trabajo de 125 °C, se distribuye por rollos de 1 metro de ancho [12] (Figura 13).



Figura 13. Sangrador o film perforado.

(Fuente: propia)

**Manta de absorción:** es una tela fabricada a base de resinas con gramaje de 120 [g/m<sup>2</sup>] y fibras poliéster, se usa en moldeo de piezas complejas. Permite la absorción de los excesos generados de resina, además, permite mantener una presión de vacío homogénea en toda la superficie del laminado. Generalmente, se coloca sobre el tejido pelable y el sangrador, antes de la bolsa de vacío en proceso de infusión o compactación al vacío para fabricar laminados por diferentes vías como húmeda, con resinas epoxi, viniléster, poliéster y uretano-acrilato. Se distribuye en anchos de 100 [cm] [12] (Figura 14).



Figura 14. Manta de absorción.

(Fuente: propia)

**Líneas de conducto:** es una manguera de plástico de 10,8 [mm] de diámetro externo que tiene cortes en espiral en toda su longitud con la finalidad en principio de extracción de todo el aire contenido el sistema ya sellado con la bolsa de vacío y posterior distribución rápida y con uniformidad de la resina utilizada para fabricar el laminado [12] (Figura 15).



Figura 15. Líneas de conducto.

(Fuente: propia)

**Conector para distribución:** es un conector plástico que permite la conexión entre mangueras de succión y líneas de conducto para la distribución de resina durante el proceso de infusión [12] (Figura 16).



Figura 16. Conector para distribución.  
(Fuente: propia)

**Manguera de succión:** es una manguera plástica de 10 [mm] de diámetro externo que funciona para el ingreso y salida de resina del sistema de infusión, a más de ser la conexión entre la bomba de vacío y la trampa de resina para la extracción de aire dentro de la cámara de vacío hecha con la bolsa [12] (Figura 17).



Figura 17. Manguera de succión.  
(Fuente: propia)

**Válvula de paso:** son válvulas plásticas con conexión de 11 [mm] de diámetro externo con ajuste tipo mariposa con la finalidad de abrir y cerrar el paso de aire por un conducto hacia la bomba de vacío y por otro la entrada y salida de resina ubicadas directamente en las mangueras de succión [12] (Figura 18).



Figura 18. Válvulas de paso.

(Fuente: propia)

**Conexiones tipo T:** son conexiones plásticas de 11 [mm] de diámetro externo de tipo T que permiten conectar las líneas de conducto para la salida de aire con la manguera de succión hacia la bomba para extracción de aire de la cámara de vacío [12] (Figura 19).



Figura 19. Conexiones tipo T.

(Fuente: propia)

**Bolsa de vacío:** es una bolsa con alta elasticidad diseñada para curado de piezas que soporta temperaturas de hasta 120 °C. Se utiliza para realizar el vacío en piezas reforzadas con fibras sintéticas y naturales, se adapta adecuadamente a todo tipo de geometrías complejas y cierra herméticamente en los contornos. En condiciones de baja humedad es más flexible que las bolsas de nylon estándar. Se ubica directamente sobre la bolsa de vacío y los laminados colocados en el interior de acuerdo con las capas necesarias, se distribuye por metros y en un ancho de 1,22 [m] [12] (Figura 20).



Figura 20. Bolsa de vacío.

(Fuente: propia)

**Cinta sellante:** TAKY TAPE es una masilla de butilo, de cierre comúnmente para bolsas de vacío con gran resistencia térmica de hasta 140 °C. Es compatible con la mayoría de las bolsas y film de vacío. Generalmente se usan en todo tipo de moldes y brinda un cierre

hermético entre la superficie y la bolsa de vacío o incluso entre dos bolsas de vacío, se comercializa en rollos de 25 [m] de longitud [12] (Figura 21).

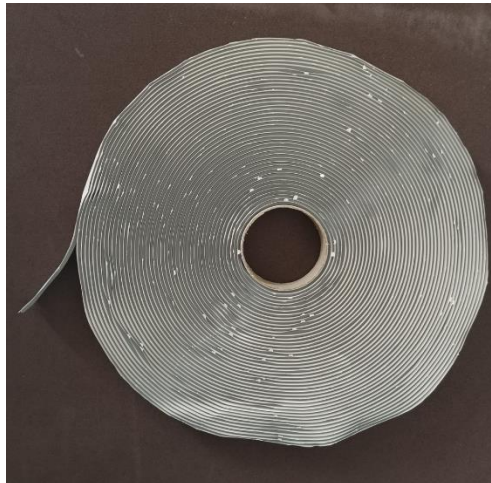


Figura 21. Cinta de butilo.

(Fuente: propia)

**Aerosol desmoldeante:** Spray Silicona WEICON es un antiadherente y lubricante, así como un agente de protección y conservación de plásticos, gomas, metal. Este spray genera una película de separación con gran duración para obtener un buen acabado superficial [12] (Figura 22).



Figura 22. Spray Silicona desmoldeante.

(Fuente: propia)

**Malla de reparto:** es una malla utilizada sobre la manta de absorción para garantizar una correcta distribución de la resina en toda el área que se encuentran los tejidos dentro de la cámara de vacío realizada con la bolsa [12] (Figura 23).



Figura 23. Malla de reparto.  
(Fuente: propia)

### 3.1.2 Equipos

**Bomba de vacío:** bomba de vacío ZENY modelo VP 125+, potencia de 1/4 [HP], carcasa de aluminio y plástico, 1720 RPM, 3,5 CFM de desplazamiento de aire, 110 V, 60 Hz. Puerto de entrada de 5/16 [in] NPT. Capacidad máxima de vacío 5 [Pa]. Incluye una manguera de succión con acople hembra de 5/16 [in] (Figura 24).



Figura 24. Bomba de vacío ZENY.  
(Fuente: propia)

**Trampa de resina:** se utilizó una trampa de resina de tipo casero (Figura 25) construida sobre un recipiente de vidrio de 1000 [ml] con tapa de rosca hermética sobre la cual se realizó las perforaciones necesarias para colocar en la entrada un prensa-estopa PG13.5 Negro de ½ [in] para fijar la manguera que se conecta hacia la cámara de vacío y la otra para colocar un racor hidráulico macho 5/16 [in] que permite la conexión a la manguera de succión de la bomba de vacío. Además, tiene un mano-vacuómetro WINTERS con rango de -1 a 2 [bar]



que permite controlar el vacío en el sistema de vacío. Todas las perforaciones y acoples fueron sellados a la tapa del recipiente con silicona RTV gris (Figura 25).



Figura 25. Trampa de resina en varias vistas.

(Fuente: propia)

**Balanza digital:** tiene la capacidad de cuantificar el peso hasta de 300[g] y con una precisión de 0,01 [g], se utiliza para tomar datos de los pesos correspondientes de la masa empleada de fibra y cantidades de resina con sus aditivos correspondientes (Figura 26).



Figura 26. Balanza digital.

(Fuente: propia)

**Base de vidrio:** lámina de vidrio utilizado como molde inicial sobre la cual se monta todos los artículos que componen la cámara de vacío realizada con la bolsa de vacío, presenta una superficie lisa mejorando el acabado superficial y un fácil desmoldeo (Figura 27).



Figura 27. Base de vidrio.

(Fuente: propia)

**Caladora manual:** herramienta de corte manual con un marco y una hoja con dientes en forma de sierra con la que se obtiene el corte de las probetas en las dimensiones adecuadas para los ensayos bajo las normas requeridas, evitando calor y fricción en demasía que cambien la estructura y propiedades del material que conforman las probetas (Figura 28).



Figura 28. Caladora manual.

(Fuente: propia)

**Lijas:** material abrasivo que se utiliza para eliminar imperfecciones grandes sobre las superficies de las probetas (Figura 29).



Figura 29. Lijas.

(Fuente: propia)



**Equipo para tracción y flexión:** Tinius Olsen H25KS máquina universal de ensayos de capacidad máxima 25 [kN] con una apreciación de 0,01 [N] [1] (Figura 30).



Figura 30. Tinius Olsen H25KS máquina universal de ensayos [1].

Para los ensayos de tracción se adaptaron las mordazas cuneiformes junto con un extensómetro en las probetas antes de empezar a aplicar la carga de tracción del ensayo (Figura 31).



Figura 31. Adaptación de mordazas cuneiformes y extensómetro.

(Fuente: propia)

Para realizar el ensayo de flexión se utilizó el método de tres puntos bajo la norma correspondiente soportando la probeta en dos puntos y aplicando la carga en la sección transversal en el tercer punto (punto medio) (Figura 32).



Figura 32. Ensayo de flexión aplicando método de los 3 puntos [1].

**Equipo para impacto:** verificador para impacto Elcometer 1615 variable, para diagnosticar la resistencia al impacto de probetas, el equipo usa un método de análisis de manera directa que se trata de dejar caer libremente un punzón esférico de 20 [mm] de diámetro y 690 [g] de masa sobre el laminado de material compuesto con dimensiones correspondientes. El punzón se levanta a la altura del ensayo de acuerdo a la norma especificada de donde se libera para producir un impacto directo sobre la probeta [1] (Figura 33).



Figura 33. Equipo de impacto ELCOMETER y dardo con punzón.  
(Fuente: propia)

**Micrómetro de puntas esféricas:** tornillo micrométrico con las puntas del usillo redondas que permite mediciones en todo tipo de superficie con rango de 0-1 [in] y con apreciación de 0,0001 [in] (Figura 34).



Figura 34. Micrómetro de puntas esféricas.

(Fuente: propia)

**Microscopio óptico:** el estereomicroscopio OLYMPUS SZX7 brinda un índice de aumento (zoom) de 7: 1, presenta una protección contra descargas electrostáticas y, también, utiliza un avanzado sistema óptico galileano para adquirir imágenes brillantes y con alta resolución. Entre sus características ergonómicas destacan los controles microscópicos de fácil acceso y los tubos oculares ajustables para una visualización cómoda [13] (Figura 35).



Figura 35. Microscopio óptico.

(Fuente: propia)

### 3.2 Caracterización mecánica del tejido de cabuya

Mediante la caracterización se puede determinar las propiedades y comportamiento mecánico del tejido de cabuya utilizado como refuerzo del material compuesto.

Particularmente para la caracterización mecánica del tejido usado como refuerzo se utiliza la norma ASTM D5034, que describe el procedimiento para determinar propiedades como resistencia a la tracción y obtener porcentajes de elongación, tanto en dirección longitudinal

como transversal, basándose en procedimientos de agarre. En estas pruebas de resistencia y elongación se utiliza la mitad de la muestra de su ancho total mediante una prensa logrando definir resistencia efectiva y elongación, siendo esta la resistencia que presentan los hilos en el ancho definido al ensayo o en su caso al ancho comercial del tejido. Este ensayo fue realizado en el Centro Textil Politécnico y los resultados obtenidos se pueden observar en el INFORME NO. CTP-ITI-2022-12-04 (Anexo I); un resumen de estos resultados se tabula en la Tabla 5:

Tabla 5. Caracterización mecánica del tejido de cabuya

PROPIEDADES DETERMINADAS	NORMA	RESULTADOS
<b>RESISTENCIA A LA TRACCIÓN</b>		
Longitudinal, kgf	ASTM D5034	44,97 (s=6,28)
Transversal, kgf		43,41 (s=7,28)
<b>ELONGACIÓN A LA ROTURA</b>		
Longitudinal, %	ASTM D5034	7%
Transversal, %		4%

(Fuente: propia)

### 3.3 Densidad y fracción volumétrica del material compuesto

Una parte fundamental dentro de los materiales compuestos son las fracciones volumétricas, las propiedades, la composición y cantidades de cada material de forma individual que dan paso a nuevas propiedades en un material compuesto. Para determinar estos parámetros se realiza varias probetas de manera experimental y se parte de la ecuación de la densidad que relaciona la masa con el volumen [1].

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$\rho$  es la densidad,  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ ,  $m$  es la masa,  $[g]$ , y  $v$  es el volumen,  $[cm^3]$ .

#### 3.3.1 Densidad de la matriz

Debido a que la matriz está constituida de resina poliéster RD1 33000 y aditivos no es posible tomar directamente el valor de densidad presente en la ficha técnica que corresponde a  $1,0567 \left[\frac{g}{cm^3}\right]$  (Anexo II). Entonces, para determinar la densidad de la matriz de manera experimental se midieron 25 [ml] en cuatro envases (Figura 36)

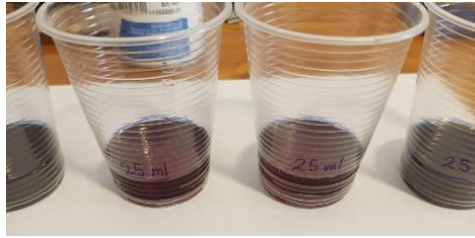


Figura 36. Envases con mezcla de matriz.

(Fuente: propia)

Una vez curadas las muestras (Figura 37) fueron pesadas. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.



Figura 37. Probetas de matriz sólidas.

(Fuente: propia)

Tabla 6. Resultados de pesos de la matriz del material compuesto.

Probeta	Masa [g]
1	31,90
2	36,00
3	33,80
4	33,30
Promedio	33,75

(Fuente: propia)

Para la obtención de la densidad final de la matriz se usó la ecuación (Ec.1) con el volumen predefinido y la masa de 33,75 [g], obteniendo una densidad de la matriz de  $1,35 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ .

### 3.3.2 Densidad del material compuesto

Para obtener la densidad del material compuesto se realizó un proceso similar al realizado para la obtención de la densidad de la matriz, en base a un volumen predefinido de 25 [ml]; en los envases desechables se añadieron nueve capas de refuerzo pesadas, obteniendo el material compuesto (Figura 38).

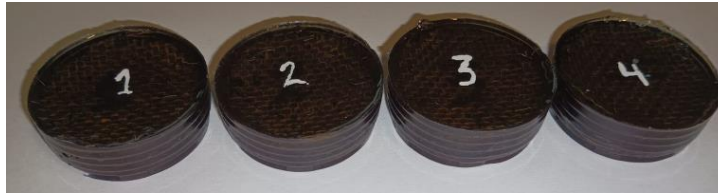


Figura 38. Probetas de material compuesto con 9 capas de refuerzo.

(Fuente: propia)

Las muestras obtenidas fueron pesadas y sus resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de pesos del material compuesto.

Probeta	Masa de refuerzo (9 capas) [g]	Masa [g]
1	4	30,9
2	4,1	32,1
3	4	34,2
4	4,1	30,4
<b>Promedio</b>	4,05	31,9

(Fuente: propia)

Con el valor de masa del material compuesto de 31,9 [g] y el volumen predefinido, mediante la ecuación (Ec.1) se obtiene la densidad de  $1,276 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ .

### 3.3.3 Densidad del refuerzo

Para determinar la densidad del refuerzo es necesario definir que en un material compuesto la fracción volumétrica muestre la cantidad presente de matriz y refuerzo de modo que la suma de estas da como resultado la unidad [1].

$$V_{ref} + V_{mat} = 1 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde  $V$  es la fracción volumétrica, es así como, de manera particular las fracciones volumétricas para el refuerzo y la matriz respectivamente son [1]:

$$V_{ref} = \frac{v_{ref}}{v_{comp}} \quad (\text{Ec.3})$$

$$V_{mat} = \frac{v_{mat}}{v_{comp}} \quad (\text{Ec.4})$$

Mediante el volumen de refuerzo con la ecuación (Ec.1) y reemplazando en la ecuación (Ec.3) se tiene una expresión para la fracción volumétrica del refuerzo [1]:

$$V_{ref} = \frac{m_{ref}}{\rho_{ref} * v_{comp}} \quad (\text{Ec.5})$$

Por lo tanto, para obtener la fracción volumétrica del material compuesto es necesario conocer su masa, densidad y volumen. Planteando las ecuaciones [1]:

$$m_{comp} = m_{mat} + m_{ref} \quad (\text{Ec.6})$$

Despejando la masa de la ecuación (Ec.1) y reemplazando se tiene [1]:

$$\rho_{comp} * v_{comp} = \rho_{mat} * v_{mat} + \rho_{ref} * v_{ref} \quad (\text{Ec.7})$$

Se divide esta ecuación entre  $v_{comp}$  [1]:

$$\rho_{comp} = \frac{\rho_{mat} * v_{mat}}{v_{comp}} + \frac{\rho_{ref} * v_{ref}}{v_{comp}} \quad (\text{Ec.8})$$

Mediante las ecuaciones (Ec.3) y (Ec.4) se obtiene [1]:

$$\rho_{comp} = \rho_{mat} * V_{mat} + \rho_{ref} * V_{ref} \quad (\text{Ec.9})$$

Para finalizar se reemplaza  $V_{mat}$  de la ecuación (Ec.2) en la (Ec.9) de donde se despeja  $\rho_{ref}$  dando como resultado [1]:

$$\rho_{ref} = \frac{\rho_{comp} - \rho_{mat}(1 - V_{ref})}{V_{ref}} \quad (\text{Ec.10})$$

Para obtener la densidad del refuerzo se realizó varias iteraciones partiendo de un valor inicial hasta obtener un valor convergente y similar entre el valor inicial y el calculado. En el proceso se parte de la ecuación (Ec.5) conociendo masa de refuerzo del promedio de las probetas con valor de 4,05 [g] y volumen predefinido de 25 [ml] y se asume un valor de densidad del refuerzo teórico de  $1,30 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ . Con el resultado se reemplaza en la ecuación (Ec.10) conociendo la densidad del compuesto y de la matriz, que se toma como dato inicial para la siguiente iteración (Tabla 8).

Tabla 8. Iteraciones para densidad del refuerzo.

Iteración	$\rho_{ref\ inicial} \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$	$V_{ref}$	$\rho_{ref\ final} \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$
1	1,30	0,12	0,756
2	0,76	0,21	1,005
3	1,00	0,16	0,891
4	0,89	0,18	0,943
5	0,94	0,17	0,919
6	0,92	0,18	0,930
7	0,93	0,17	0,925
8	0,93	0,18	0,927
9	0,93	0,17	0,926
10	0,93	0,17	0,927
11	0,93	0,17	0,927
12	0,93	0,17	0,927
13	0,93	0,17	0,927
14	0,93	0,17	0,927
15	0,93	0,17	0,927

(Fuente: propia)

Luego de 15 iteraciones se obtiene la convergencia deseada para la densidad del refuerzo dando como resultado aproximado  $0,927 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ .

### 3.3.4 Condiciones para fracción volumétrica del refuerzo

La fracción volumétrica del refuerzo en el material compuesto depende del volumen, número de capas y dimensiones que presenta cada probeta de acuerdo a la norma usada para los ensayos (Tabla 9):

Tabla 9. Dimensiones y volúmenes de las probetas de tracción, flexión e impacto

Tipo de probeta	Largo [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
<b>Tracción</b>	25,00	2,50	0,25	15,63
<b>Flexión</b>	16,00	1,30	0,40	8,32
<b>Impacto</b>	6,00	6,00	0,20	7,20

(Fuente: propia)

Teniendo la densidad, se puede determinar la masa de cada capa de refuerzo y consecuentemente la masa total de refuerzo por cada tipo de probeta, y éstas se muestran en la Tabla 10:



Tabla 10. Densidad y masa de refuerzo de cada probeta normalizada

Tipo de probeta	Densidad [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	Número de capas	Masa por capa [g]	Masa total de refuerzo [g]
Tracción	0,927	3	1,80	5,40
Flexión		4	0,70	2,80
Impacto		2	1,00	2,00

(Fuente: propia)

Se puede obtener la fracción volumétrica del refuerzo para cada probeta mediante la (Ec.5) y estos resultados se muestran en la sección 4.1.2 del presente trabajo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### 3.4 Configuración y armado del sistema para infusión al vacío

Los parámetros que se usan en la obtención de los laminados de material compuesto se describen en la Tabla 11:

Tabla 11. Parámetros para las probetas en ensayos de tracción, flexión e impacto [1]

	Probetas		
	Tracción	Flexión	Impacto
Refuerzo	Tejido alternado	Tejido alternado	Tejido alternado
Matriz con aditivos	Sí	Sí	Sí
Tiempo de curado a $T_{amb}$	15 días	15 días	15 días

Estos parámetros se consideran con la finalidad de realizar la comparación de resultados con el proceso de estratificación manual, la matriz con aditivos consta de porcentajes iguales en ambos métodos.

#### 3.4.1 Disposición del refuerzo

La orientación o disposición del refuerzo para la obtención de todos los laminados que conforman las probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto se detallan en la Tabla 12:

Tabla 12. Disposición para las probetas en ensayos de tracción, flexión e impacto

Probetas	Disposición del refuerzo		
	No. capas	Masa por capa [g]	Orientación
Tracción	3	1,80	0°
Flexión	4	0,70	0°
Impacto	2	1,00	0°

(Fuente: propia)

La única configuración a  $0^\circ$  se muestra de tal manera que los hilos del tejido formen  $0^\circ$  respecto a las aristas formadas por la matriz de la probeta tanto en un sentido como en el otro (Figura 39).



Figura 39. Orientación a  $0^\circ$  del refuerzo.

(Fuente: propia)

### 3.4.2 Armado de sistema para infusión al vacío

Para armar el sistema de infusión al vacío se empieza removiendo cualquier impureza de la base de vidrio, teniendo en cuenta que el área de trabajo (cámara de vacío) tenga dimensiones mayores que las longitudes de las probetas. A continuación, se coloca la cinta de butilo formando un recuadro cerrado con dimensiones adecuadas sobrepasando 2 [cm] de separación respecto al área de trabajo y colocación de elementos para la obtención de laminados (Figura 40).



Figura 40. Ubicación de la cinta de butilo en un recuadro cerrado sobre la base de vidrio.

(Fuente: propia)

Con la finalidad de evitar que el laminado se pegue a la base de vidrio se rocía una capa de Spray Silicona evitando los excesos y se espera unos minutos para su secado, otra opción

es colocar una capa de film perforado. Luego se coloca las capas de tejido con orientación de 0° y la cantidad dependiendo del espesor requerido en las probetas; sobre estas capas se ubica el Peel Ply, la manta de absorción y la malla de reparto, sujetos adecuadamente para garantizar uniformidad en la superficie de los laminados, cubriendo al refuerzo con la consideración que 1 [cm] por lado del laminado debe ser cortado por deformidades. Los pasos descritos se muestran en la Figura 41.

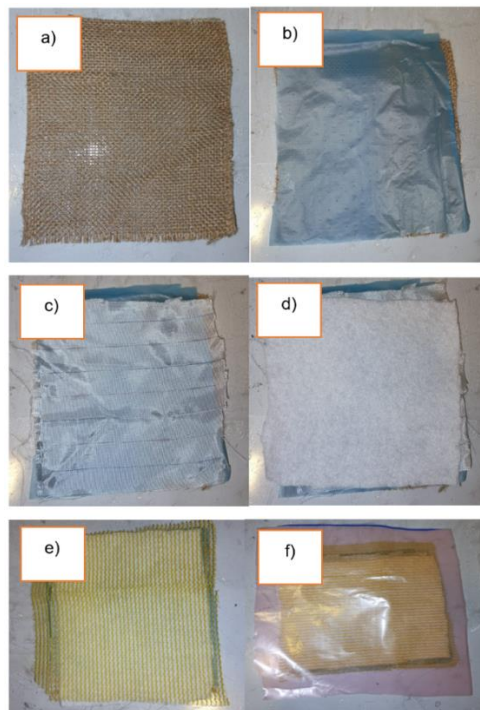


Figura 41. Orden de colocación de materiales para infusión.

(Fuente: propia)

La distribución uniforme de la resina se debe al uso del conector de distribución y la manguera en espiral alrededor del laminado en la entrada de resina, así como a la conexión de la manguera en espiral y el acople en T para la salida (Figura 42).

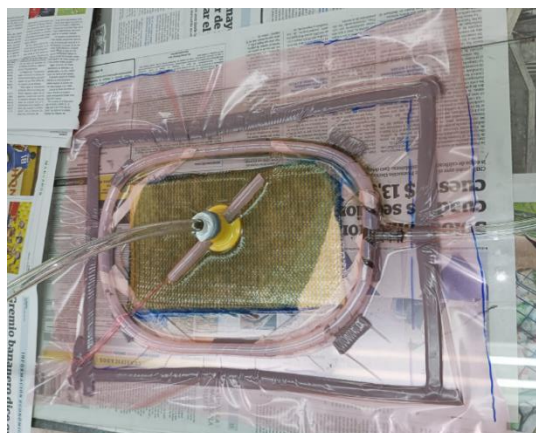


Figura 42. Sistema con líneas de conducto y conectores.

(Fuente: propia)

El cierre hermético del sistema se realiza mediante la bolsa de vacío que se adhiere sobre el recuadro formado por la cinta de butilo sobre el vidrio. Las mangueras externas son conectadas desde el acople T hacia la trampa de resina y bomba de vacío, mientras la ubicada sobre el acople de distribución se conecta directamente al recipiente que contiene la matriz en estado líquido. Antes de finalizar es importante realizar una prueba de hermeticidad esperando 15 a 20 minutos y verificando que se alcance la máxima presión de vacío con la bomba (-5 Pa) para estabilizar todo el sistema (Figura 43).



Figura 43. Sistema en funcionamiento.

(Fuente: propia)

El esquema de la Figura 44 encontrado en la bibliografía muestra un sistema similar.

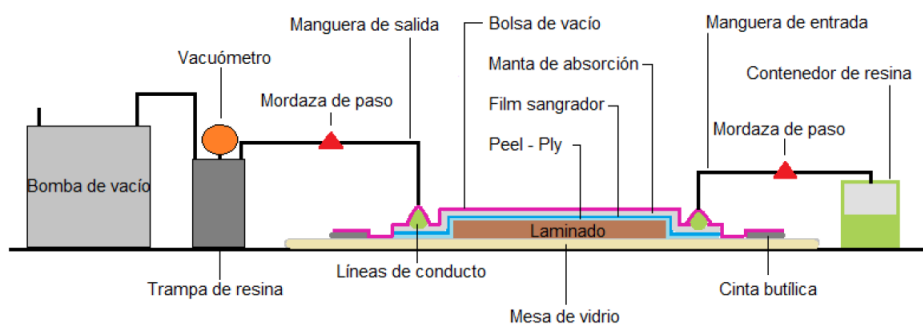


Figura 44. Esquema de todo el sistema utilizado en infusión al vacío [1].

### 3.4.3 Obtención de material compuesto

En la obtención del material compuesto se emplean cantidades determinadas de los elementos descritos en la Tabla 13 en base a la bibliografía revisada:

Tabla 13. Porcentajes de resina poliéster y aditivos [1].

Elemento	Porcentaje [% peso]
Monómero de estireno	10,00
Peróxido de metil-etil cetona	1,00

Es importante destacar que todos los elementos se encuentran en fase líquida y que una vez mezclados se inicia una reacción exotérmica por la que el proceso de curado se lleva a cabo para alcanzar el estado sólido (Figura 45).



Figura 45. Matriz de material compuesto en estado líquido.

(Fuente: propia)

Cuando la resina es mezclada con los tres aditivos se tiene aproximadamente 15 minutos de tiempo de trabajo que garantiza una correcta infusión al vacío bajo condiciones ambientales (aproximadamente 20 °C) [14] (Figura 46).



Figura 46. Conexiones completas en el sistema de infusión al vacío.

(Fuente: propia)

Pasadas 3 horas de realizada la inyección de la resina se procede al desmoldeo (Figura 47).

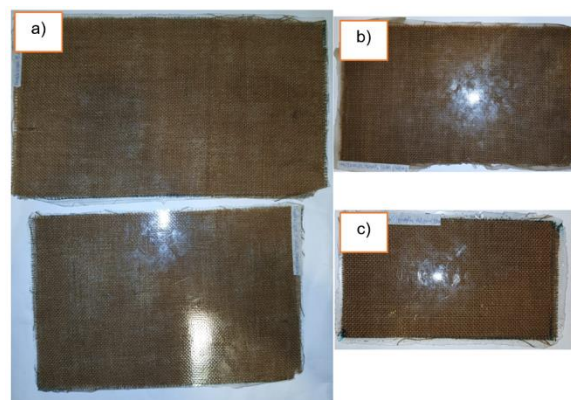


Figura 47. Laminados obtenidos: a) Impacto, b) Tracción, c) Flexión.



(Fuente: propia)

A partir de estos laminados de diferentes espesores se obtienen las probetas mostradas en las siguientes figuras.

Ensayo de tracción, medidas en milímetros, espesor 2,5 [mm] (Figura 48).



Figura 48. Probeta para ensayo de tracción.

(Fuente: propia)

Ensayo de flexión, medidas en milímetros, espesor 4,0 [mm] (Figura 49).



Figura 49. Probeta para ensayo de flexión.

(Fuente: propia)

Ensayo de impacto, medidas en milímetros, espesor 2,0 [mm] (Figura 50).

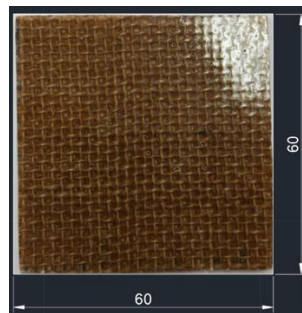


Figura 50. Probeta para ensayo de impacto.

(Fuente: propia)

### **3.5 Ensayos para caracterización mecánica del material**

#### **3.5.1 Ensayo de tracción**

El ensayo de tracción se realizó en base a la norma ASTM D3039/D3039 M-17 siendo recomendable ensayar un mínimo de cinco muestras de cada configuración, para lo cual se utilizó cinco muestras con orientación a 0° y los parámetros que se describen en la

Tabla 14.

Tabla 14. Características y parámetros usados en el ensayo de tracción [15].

Característica y/o parámetro	Valor
Medidas y tolerancias establecidas de las probetas	Ancho: $25 \pm 1\%$ [mm]
	Largo: 250 [mm]
	Espesor: $2,5 \pm 4\%$ [mm]
Distancia establecida para medir deformación	50 [mm]
Velocidad del ensayo	2 [mm/min]

Basándose en la norma establecida con el uso del equipo se obtienen los valores de cargas que mediante las siguientes ecuaciones permiten calcular la resistencia última bajo cargas de tracción:

$$F^{ut} = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{Ec.11})$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (\text{Ec.12})$$

Donde:

$F^{ut}$ : resistencia última a la tracción, [MPa], [psi]

$P_{max}$ : carga máxima antes de fallar, [N], [lbf]

$A$ : área de la sección transversal en promedio, [ $mm^2$ ], [ $in^2$ ]

$\sigma_i$ : esfuerzo por cargas de tracción en un punto  $i$ , [MPa], [psi]

$P_i$ : carga de tracción en un punto  $i$ , [N], [lbf]

Para determinar la deformación producida ante cargas de tracción, se usa la (Ec.13):

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (\text{Ec.13})$$

Donde:

$\varepsilon_i$ : deformación debido a cargas de tracción en un punto  $i$ ,  $\mu_\varepsilon$

$\delta_i$ : desplazamiento generado por el extensómetro en un punto  $i$ , [mm], [in]

$L_g$ : longitud inicial del extensómetro, [mm], [in]

Con esto se procede a la obtención del módulo de elasticidad presente en el material mediante la (Ec.14):

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{Ec.14})$$



Donde:

$E_t$ : módulo de elasticidad bajo cargas de tracción, [MPa], [psi]

$\Delta_\sigma$ : variación de esfuerzos aplicados entre dos puntos de deformación, [MPa], [psi]

$\Delta_\epsilon$ : variación de deformación entre los dos puntos

Para seleccionar y registrar el modo de falla la norma establece una serie de códigos usados tras una inspección visual y comparación como se muestra en la Figura 51:

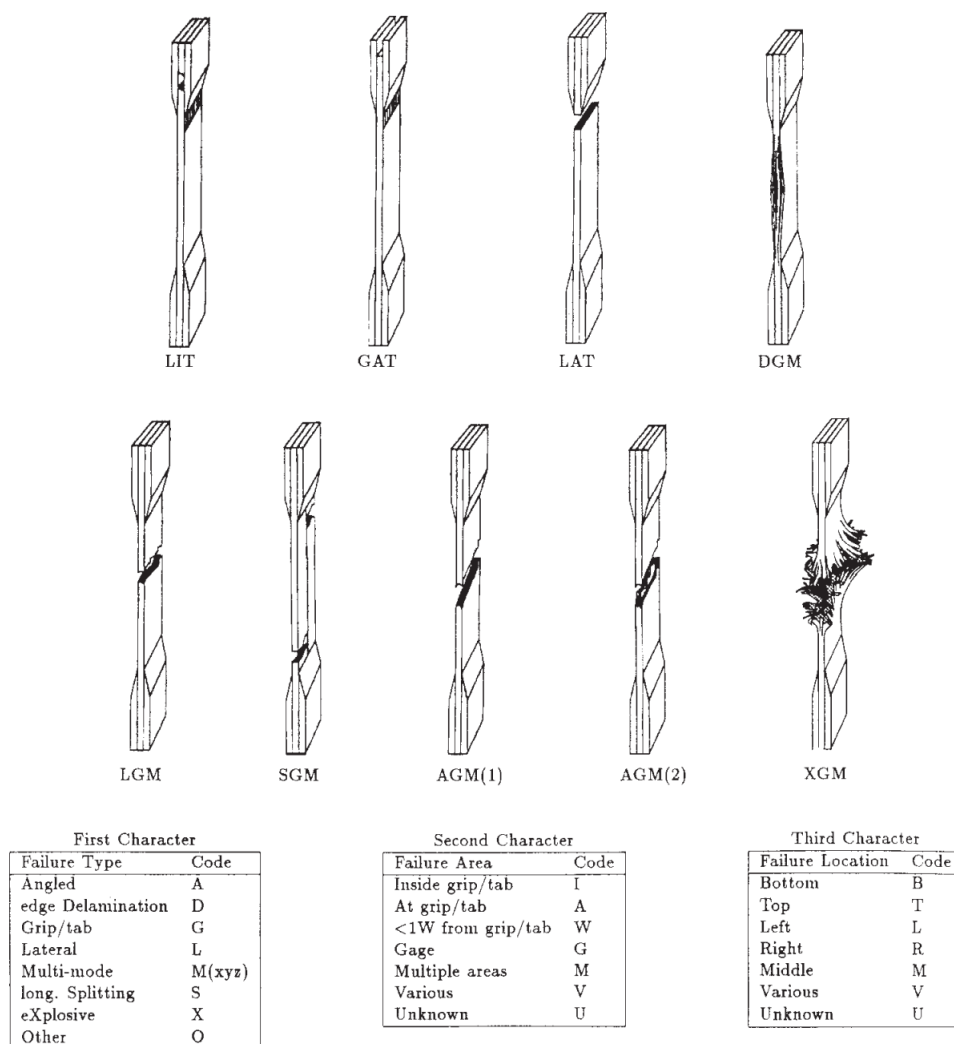


Figura 51. Códigos de falla de la norma ASTM D3039 [15].

### 3.5.2 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó en base a la norma ASTM D7264/D7264 M-15 bajo las especificaciones utilizadas para el procedimiento de tipo A, el cual consta del sistema de flexión en tres puntos Figura 52.

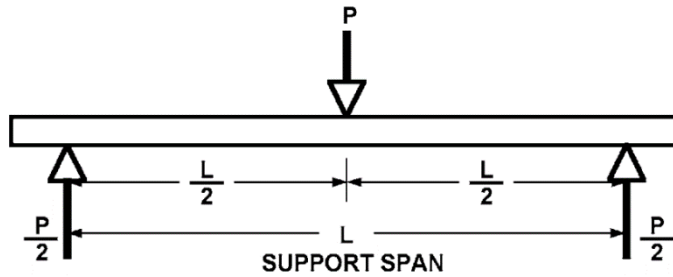


Figura 52. Procedimiento A de la norma ASTM D7264 [16].

Entre los parámetros de la norma establece ensayar 5 muestras como mínimo, con las especificaciones presentes en la Tabla 15.

Tabla 15. Características y parámetros usados en el ensayo de flexión [16].

Característica y/o parámetro	Valor
Medidas y tolerancias establecidas de las probetas	Ancho: 13 [mm]
	Largo: 160 [mm]
	Espesor: 4 [mm]
Procedimiento de tipo A	Flexión mediante tres puntos
Relación espesor-distancia entre apoyos	1.16
Velocidad del ensayo	1,0 [mm/min]

La flexión máxima se presenta en la parte media de la luz que se forma al pandear la superficie inferior y obedece a la ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{Ec.15})$$

Dónde:

$\sigma$ : esfuerzo externo en la sección de carga, [MPa], [psi]

$P$ : carga aplicada en la mitad de la probeta, [N], [lbf]

$L$ : distancia entre los apoyos inferiores, [mm], [in]

$b$ : ancho de la muestra, [mm], [in]

$h$ : espesor de la muestra, [mm], [in]

La deformación máxima ocurre en la sección intermedia de la probeta sobre superficie inferior, y responde a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (\text{Ec.16})$$

Dónde:

Las variables con la misma denominación de la (Ec.15) son idénticos.

$\varepsilon$ : deformación debido a la flexión,  $\mu\varepsilon$

$\delta$ : deflexión en la mitad de la probeta, [mm], [in]

El módulo de elasticidad secante debido a las cargas de flexión es obtenido mediante:

$$E_f^{secante} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (\text{Ec.17})$$

Dónde:

Las variables con la misma denominación de la (Ec.15) y (Ec.16) corresponde a los mismos parámetros.

$E_f^{secante}$ : módulo de elasticidad secante debido a cargas de flexión, [MPa], [psi]

$m$ : pendiente de la secante trazada sobre la curva fuerza-deflexión

La resistencia a la flexión es válida al presentarse en las superficies externas de las probetas. El código de modo de falla de tres puntos registra el modo, la ubicación y el área de la falla (Figura 53).

First Character		Second Character		Third Character	
Failure Mode	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Tension	T	At loading nose	A	Top	T
Compression	C	Between loading noses	B	Bottom	B
Buckling	B	at Support nose	S	Left	L
interlaminar Shear	S	between Load and support nose	L	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Unknown	U	Middle	M
Other	O			Various	V
				Unknown	U

Figura 53. Código de falla de la norma ASTM D7264, Procedimiento A [16].

### 3.5.3 Ensayo de impacto

En el ensayo de impacto se utilizó la norma ASTM D7264-96 para determinar la energía media de falla generada por los impactos con el dardo, usando masa constante y altura variable, para encontrar la altura que genera la energía con el que al menos el 50 % de las muestras presentaran falla. Se recomienda usar al menos 30 muestras con la finalidad que se permita conocer el punto de partida adecuado para la prueba. Las características y parámetros se describen en la Tabla 16.

Tabla 16. Características y parámetros usados en el ensayo de flexión [17].

Característica y/o parámetro	Valor
Medidas y tolerancias establecidas de las probetas	Ancho: $60 \pm 2$ [mm]
	Largo: $60 \pm 2$ [mm]
	Espesor $2 \pm 0,1$ [mm]
Altura para lanzamiento del dardo	45-145 [mm]
Masa de dardo	690 [g]
Punzón de tipo hemisférico	Diámetro de 20 [mm]

Para determinar la altura media de falla se utilizó la masa antes indicada constante y se plantea en la norma la ecuación:

$$h = h_o + d_h \left( \frac{A}{N} \pm 0,5 \right) \quad (\text{Ec.18})$$

Dónde:

$h$ : altura media de falla, [mm]

$d_h$ : incremento de altura para el dardo, [mm]

$N$ : eventos; número completo de fallas o de no fallas

$h_o$ : altura menor en la que ocurre una falla

$A$ :  $\sum_{i=0}^k in_i$

$i$ : 0, 1, 2, 3, ..., k (se empieza a contar desde  $h_o$ )

$n_i$ : número de fallas o no fallas que ocurren en una altura de un punto  $h_i$

$h_i$ :  $h_o + id_h$

Observación: para diferenciar en los eventos entre fallas y no fallas, se utiliza un positivo para no fallas y un negativo para fallas.

Una vez calculada la altura media de falla mediante inspección visual se determina las fallas y no fallas. Con esta altura mediante la (Ec.19) se obtiene energía media de falla:

$$MFE = hwf \quad (\text{Ec.19})$$

Dónde:

$MFE$ : energía media de falla, [J]

$h$ : altura media de falla (altura constante en otro caso), [mm]

$w$ : masa constante (masa media de falla en otro caso), [kg]

$f$ : factor para convertir a Joules ( $f = 9,80665 \times 10^{-3}$ ,  $h$  en [mm] y  $w$  en [kg])

### **3.6 Microscopía de la interfase**

En la realización de las microscopias del material compuesto se preparan las muestras a partir de los fragmentos de probetas obtenidas de los ensayos mecánicos. Con la finalidad de analizar microscópicamente la sección transversal del material en la zona de la fractura para mejorar la visibilidad y analizar posibles causas de fractura. Para la preparación y realización de macrográficas en las probetas de tracción y flexión se realiza los siguientes pasos:

- Ruptura en la sección de falla (si es necesario)
- Corte de probetas de una misma longitud
- Colocar en el microscopio de manera vertical mediante porta-muestras
- Visualización en microscopio

De otro modo, para las probetas de impacto no se requiere preparación de las probetas sino la observación directa sobre la superficie de impacto, que permite examinar la fractura.

## 4 RESULTADOS, DISCUSIÓN CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se detallan, tabulan y grafican los resultados más relevantes que permiten la caracterización de tipo física y mecánica de cada tipo de probeta ensayada para comparar los dos métodos. Además, se analiza la interfase obtenida mediante las microscopias ópticas llegando a resultados y conclusiones finales de dos procesos diferentes de obtención, por infusión al vacío frente a su símil realizado por estratificación manual.

### 4.1.1 Caracterización física de elementos del material compuesto

Las propiedades físicas del material compuesto, matriz y refuerzo obtenidas en las secciones 3.3.1 y 3.3.3 se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Resumen de resultados de propiedades físicas de matriz y refuerzo

Propiedad	Elemento	
	Matriz	Refuerzo
Densidad $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,35	0,927
Color	Transparente	Marrón
Orientación	-	0°

(Fuente: propia)

### 4.1.2 Caracterización de densidad y fracción volumétrica del material compuesto

En base a los cálculos de la sección 3.3.4 se utiliza la (Ec.5) para determinar la fracción volumétrica de cada probeta. Los resultados promedio se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Resumen de resultados de fracción volumétrica de material compuesto

Muestra	$m_{ref}$ [g]	$\rho_{ref}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{comp}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{comp}$ [cm <sup>3</sup> ]	$v_{ref}$
Tracción	5,40			15,63	0,373
Flexión	2,80	0,927	1,276	8,32	0,363
Impacto	2,00			7,20	0,300

(Fuente: propia)

### 4.1.3 Discusión de densidades y fracción volumétrica

Para el cálculo realizado se analizaron pesos de refuerzo y matriz en condiciones normales de presión de las probetas circulares con volúmenes preestablecidos, los datos se aproximan a los teóricos ya que la retención de aire, debido al proceso exotérmico de curado, es mínima en el material compuesto. Sin embargo la presencia de burbujas de aire puede afectar la caracterización mecánica del material, por la que se analiza solamente las probetas

realizadas con el proceso de infusión al vacío ya que este si bien no garantiza la extracción total de aire la disminuye.

Por otro lado, el valor de densidad  $1,276 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$  del material compuesto se encuentra dentro de los límites de sus componentes siendo no mayor a la densidad de la matriz y no menor a la densidad del refuerzo, el cual es corroborado con aproximación cercana a valores de la bibliografía.

## 4.2 Caracterización mecánica del material compuesto

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión y tracción con una corrección en los espesores empleados en los cálculos, al hacer uso del micrómetro dual de puntas esféricas de acuerdo a lo solicitado por la norma empleada.

### 4.2.1 Resultados del ensayo de tracción

Para realizar este ensayo se utilizó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS del laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica, en el cual se realizó las mediciones de espesores mediante un calibrador digital, mediciones que fueron corregidas con uso del micrómetro de puntas esféricas de acuerdo a lo indicado en la norma correspondiente. En la Tabla 19 se muestran las mediciones de las probetas con la corrección de los espesores para las probetas de tracción:

Tabla 19. Corrección de espesores en probetas de tracción

<b>Espesores de probetas</b>					
<b>Mediciones</b>	<b>IT1 [mm]</b>	<b>IT2 [mm]</b>	<b>IT3 [mm]</b>	<b>IT4 [mm]</b>	<b>IT5 [mm]</b>
1	2,217	2,007	2,063	2,248	2,322
2	2,273	2,131	2,167	2,319	2,291
3	2,220	2,059	2,327	2,243	2,291
<b>Promedio</b>	2,237	2,065	2,185	2,269	2,301

(Fuente: propia)

Para realizar el recalcu de los esfuerzos aplicados en el ensayo de tracción, se emplearon los valores de carga aplicados en el ensayo realizado en el LANUM y entregados por medio de INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-015 correspondiente a infusión al vacío (Anexo VI), éstos se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados del ensayo de tracción en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo:IT)									
Muestra No.	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Código de falla	Carga última [N]	Resistencia última [MPa]	Módulo secante de elasticidad [MPa]	Deformación última [%]	Deformación a la rotura [%]
IT-1 MI-23-264	24,38	2,2369	54,54	LGM	1598,27	29,31	6671,81	0,46	0,51
IT-2 MI-23-265	25,38	2,0659	52,43	LWB	1553,33	29,63	5588,4	0,5	
IT-3 MI-23-266	25,01	2,1852	54,65	LWB	1322,19	24,19	6572,51	0,32	
IT-4 MI-23-267	24,78	2,2699	56,25	LWB	1577,29	28,04	5512,24	0,45	
IT-5 MI-23-268	24,78	2,3012	57,02	LWT	1624,19	28,48	6192,86	0,51	
Promedio				$\bar{x}$	1535,05	27,93	6107,56	0,45	
Desviación Estándar				$S_{n-1}$	121,83	1,95	482,86	0,08	
Coeficiente de Variación				CV	7,94	6,98	7,91	16,96	

(Fuente: propia)

Para mejorar la interpretación de los resultados se traza la curva esfuerzo-deformación de las probetas obtenidas por infusión y ensayadas a tracción de manera que se obtiene la Figura 54:

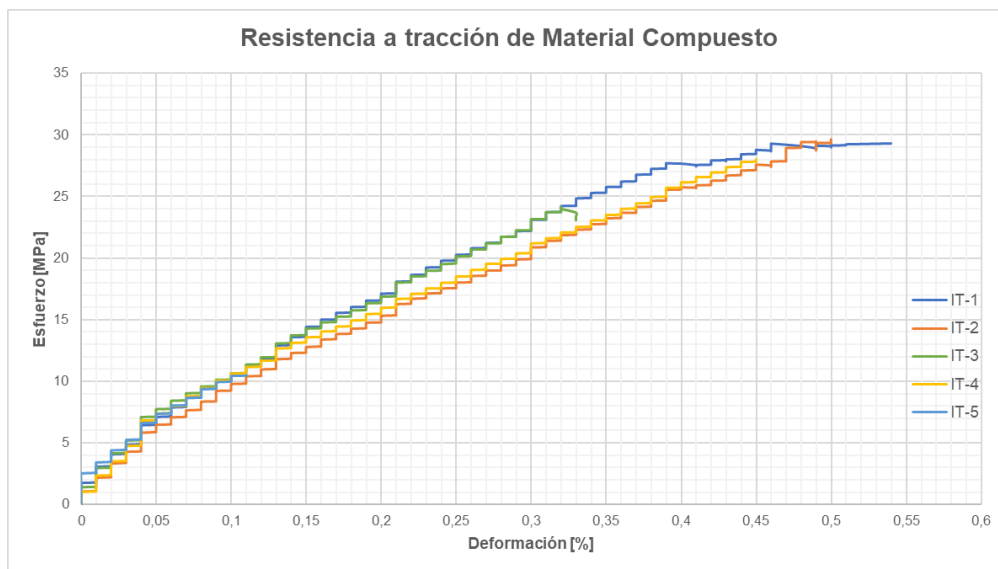


Figura 54. Curva esfuerzo-deformación de material compuesto de probetas de tracción mediante infusión al vacío

(Fuente: Propia)

La Figura 55 muestra una imagen de las probetas ensayadas posteriormente a la realización del ensayo de tracción.





Figura 55. Probetas de tracción mediante infusión al vacío posterior al ensayo de tracción.

(Fuente: Propia)

Los resultados del material compuesto obtenido mediante estratificación manual se detallan en la Tabla 21:

Tabla 21. Resultados del ensayo de tracción en probetas de material compuesto mediante estratificación manual.

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo: PL-TRAC-COMP)									
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Código de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
PL-TRAC-01-COMP (23-27-0006)	24,87	2,60	64,65	AGM	1587,97	24,56	5912,12	0,37	0,39
PL-TRAC-02-COMP (23-27-0007)	25,00	2,57	64,25	LGM	1538,33	23,94	5557,69	0,37	0,37
PL-TRAC-03-COMP (23-27-0008)	25,05	2,52	63,00	AWT	1176,67	18,68	7055,00	0,27	-
PL-TRAC-04-COMP (23-27-0009)	24,32	2,48	60,18	LWB	1404,17	23,33	8266,67	0,27	-
PL-TRAC-05-COMP (23-27-0010)	25,25	2,54	64,14	LWB	1562,60	24,36	5809,09	0,39	-
		Promedio		$\bar{x}$	1453,95	22,97	6520,11	0,33	0,38
		Desviación estándar		$S_{n-1}$	170,48	2,45	1133,36	0,06	0,01
		Coefficiente de variación		CV	11,73	10,65	17,38	17,66	3,72

(Fuente: propia)

Para mejorar la interpretación de los resultados se traza la curva esfuerzo-deformación de las probetas obtenidas mediante estratificación manual y ensayadas a tracción de manera que se obtiene la Figura 56:

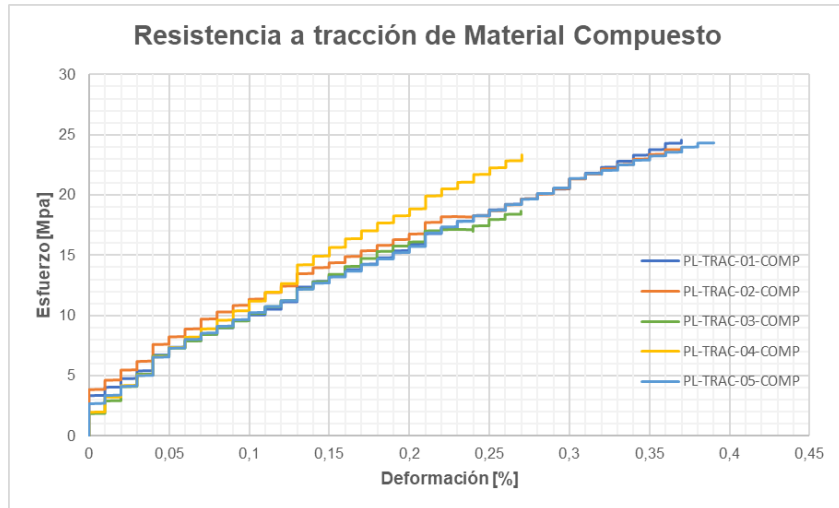


Figura 56. Curva esfuerzo-deformación de material compuesto de probetas de tracción mediante estratificación manual.

(Fuente: propia)

#### 4.2.2 Discusión de resultados de ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción reflejan valores mayores de resistencia para el proceso de obtención de probetas mediante infusión al vacío comparado con el proceso de estratificación siendo en promedio la resistencia última alcanzada de 27,93 [MPa] frente a 22,97 [MPa], respectivamente (Figura 57).

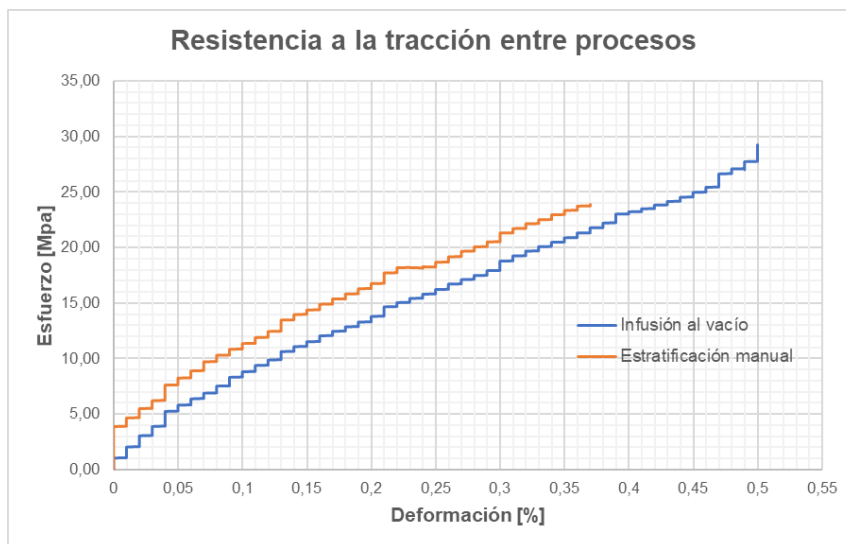


Figura 57. Comparación de resistencia a la tracción con infusión al vacío vs. estratificación manual

(Fuente: propia)

Se puede observar que la resistencia última a la tracción del material obtenido por medio de infusión al vacío es mayor. Sin embargo, el módulo secante de elasticidad de las probetas obtenidas por estratificación manual es ligeramente mayor (Figura 58).

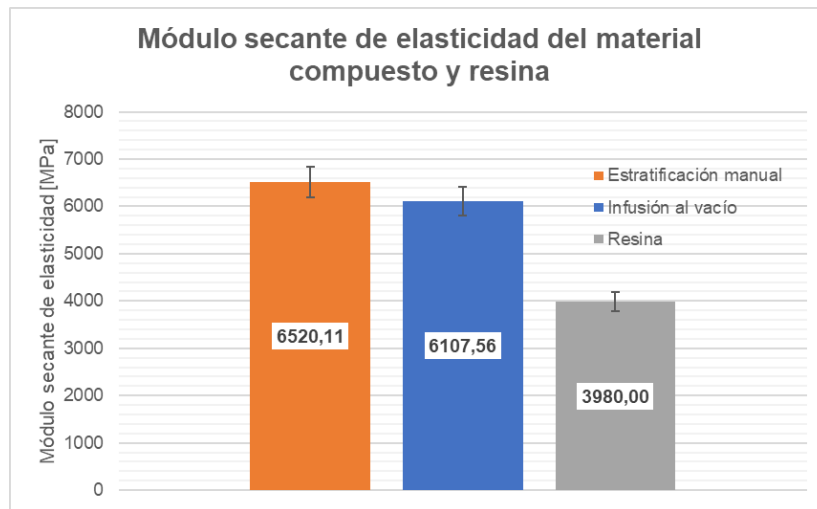


Figura 58. Comparación de módulo de elasticidad con infusión al vacío, estratificación manual y resina.

(Fuente: propia)

#### 4.2.3 Resultados del ensayo de flexión

Se analiza los resultados de los ensayos de flexión realizados a las probetas (obtenidas por infusión al vacío y estratificación manual) en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) con el uso de la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS. Al igual que en el ensayo de tracción, se realiza la corrección de la medición de espesores y los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Corrección de espesores en probetas de flexión de infusión al vacío

Espesores de probetas					
Mediciones	IF-1 [mm]	IF-2 [mm]	IF-3 [mm]	IF-4 [mm]	IF-5 [mm]
1	3,5331	3,2385	3,4925	4,3002	3,9218
2	3,5992	3,8430	3,8176	4,0400	4,0538
3	3,5992	3,8303	3,8151	3,3960	3,4392
<b>Promedio</b>	<b>3,5772</b>	<b>3,6373</b>	<b>3,7084</b>	<b>3,9121</b>	<b>3,8049</b>

(Fuente: propia)

Con estos valores y el uso de las cargas reportadas en el INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-015 correspondiente a infusión al vacío (Anexo VI) se obtiene la

Tabla 23 con los esfuerzos aplicados a las probetas en el ensayo a flexión.

Tabla 23. Resultados del ensayo de flexión en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: IF)										
Muestra No.	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Distancia entre apoyos [mm]	Tipo de falla	Carga última [N]	Resistencia última [MPa]	Módulo elástico a flexión [MPa]	Deformación última [%]	Deformación a la rotura [%]
IF-1 MI-23-269	13,27	3,5772	47,47	62,56	TAM	130,00	71,84	3798,7	2,04	2,04
IF-2 MI-23-270	12,65	3,6373	46,01	66,88	TLM	117,50	70,43	3506,69	2,45	2,45
IF-3 MI-23-271	13,49	3,7084	50,03	65,92	TLM	151,67	80,84	3864,99	2,37	2,37
IF-4 MI-23-272	13,35	3,9121	52,23	69,92	TLM	133,33	68,44	3995,01	1,82	1,82
IF-5 MI-23-273	13,91	3,8049	52,93	66,88	TAM	160,83	80,12	4328,01	2,25	2,25
				Promedio	$\bar{x}$	138,67	74,34	3898,68	2,19	2,19
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	17,41	5,95	0,26	0,26	0,26
				Coefficiente de variación	CV	12,55	9,91	11,73	11,73	11,73

(Fuente: propia)

En la Figura 59 se puede observar las curvas fuerza-deflexión de las probetas ensayadas.

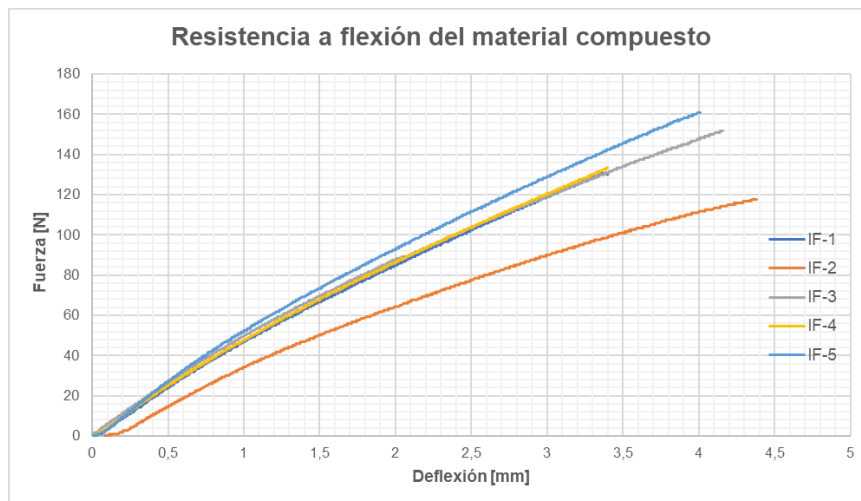


Figura 59. Curva Fuerza-Deflexión de material compuesto de probetas de flexión mediante infusión al vacío.

(Fuente: propia)

La Figura 60 muestra una imagen de las probetas una vez terminado el ensayo de flexión.

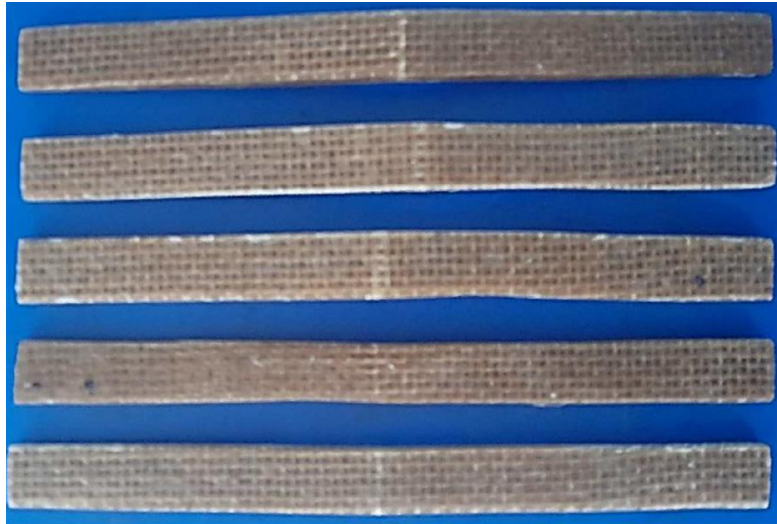


Figura 60. Probetas de flexión obtenidas mediante infusión al vacío posterior al ensayo de flexión.

(Fuente: propia)

La Tabla 24 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de flexión correspondiente a las probetas obtenidas por estratificación manual.

Tabla 24. Resultados del ensayo de flexión en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: PL-FLEX-COMP)										
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
PL-FLEX-01-COMP 23-27-0016	13,46	3,61	48,59	57,76	TAM	96,67	47,75	2677,92	2,24	2,25
PL-FLEX-02-COMP 23-27-0017	13,30	4,13	54,91	66,08	TAM	115,00	50,27	2814,95	2,55	2,63
PL-FLEX-03-COMP 23-27-0018	13,13	4,18	54,86	66,88	TAM	124,17	54,32	2876,66	2,72	2,74
PL-FLEX-04-COMP 23-27-0019	12,84	3,61	46,35	57,76	TAM	82,50	42,72	2894,18	1,92	2,13
PL-FLEX-05-COMP 23-27-0020	12,84	4,18	53,67	66,88	TAM	107,50	48,07	2929,15	2,33	2,56
				Promedio	$\bar{x}$	105,17	48,63	2838,57	2,35	2,46
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	16,20	4,22	98,89	0,31	0,26
				Coficiente de variación	CV	15,40	8,67	3,48	13,01	10,56

(Fuente: propia)

La Figura 61 muestra las curvas fuerza-deflexión de las probetas obtenidas por estratificación manual

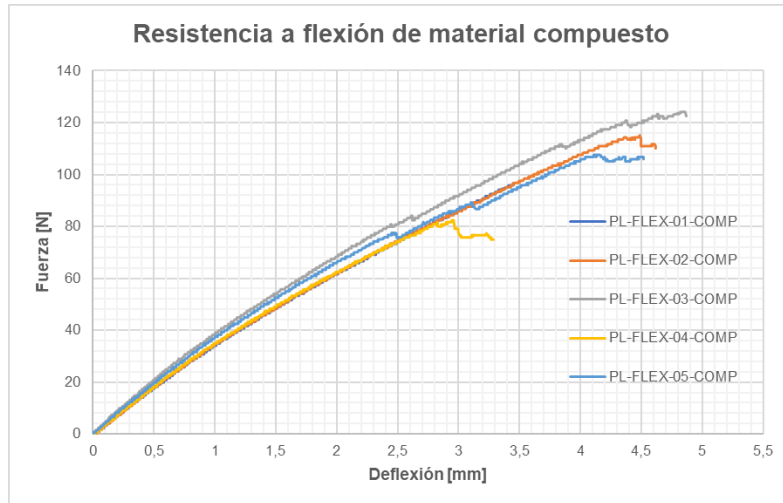


Figura 61. Curva Fuerza-Deflexión de material compuesto de probetas de flexión mediante estratificación manual.

(Fuente: propia)

#### 4.2.4 Discusión de resultados del ensayo de flexión

De acuerdo con los resultados se alcanza mayor resistencia a la flexión en las probetas obtenidas mediante infusión al vacío alcanzando un promedio de resistencia última de 74,34 [MPa] comparada con la resistencia última promedio de 48,63 [MPa] que se registró de las probetas obtenidas mediante estratificación manual. En la Figura 62 se muestra la comparación de la resistencia a la flexión en función de la deflexión producida para los dos procesos y se puede observar que estructuralmente las probeta obtenidas por infusión al vacío presentan mejor comportamiento que las obtenidas por el proceso de estratificación manual.

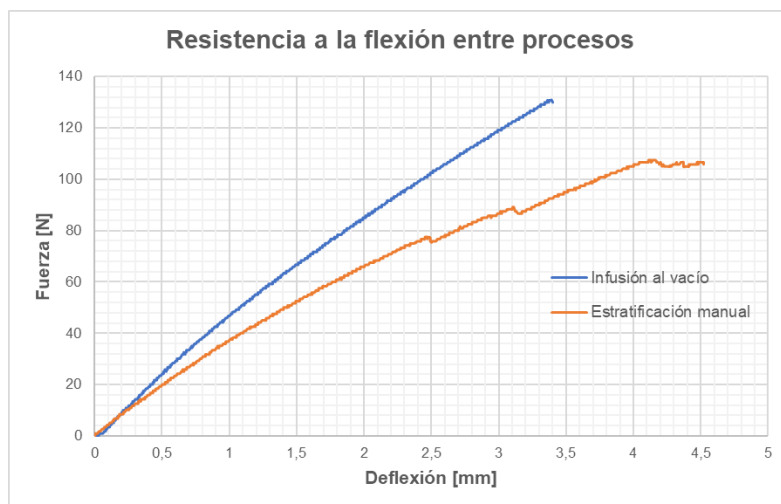


Figura 62. Comparación de resistencia a la flexión, con infusión al vacío vs. estratificación manual.

(Fuente: propia)

Para verificar los resultados se realiza una comparación en los módulos elásticos a flexión del material compuesto de los dos métodos de obtención y una comparación adicional frente a probetas de similares características de resina (matriz), alcanzando mejoras en los dos casos del material compuesto frente a las probetas solamente a base de resina y se verifica el mayor módulo elástico en el material obtenido por infusión al vacío.

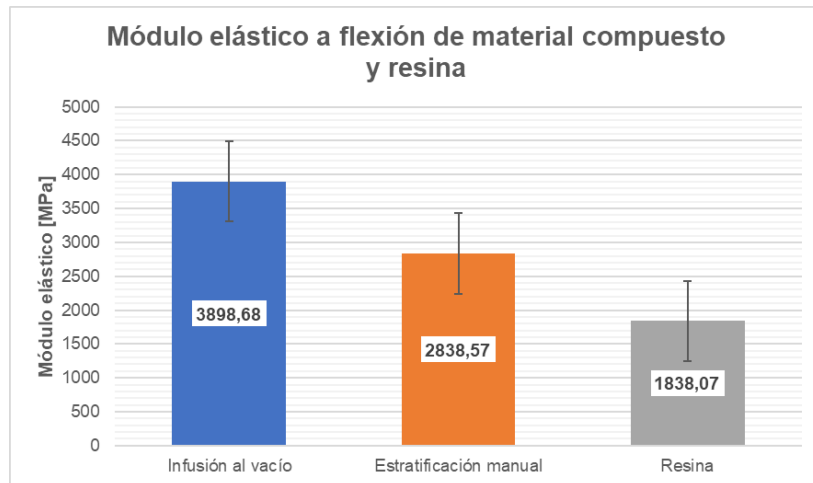


Figura 63. Comparación de módulo elástico a la flexión, con infusión al vacío, estratificación manual y resina.

(Fuente: propia)

#### 4.2.5 Resultados del ensayo de impacto

Los ensayos de impacto fueron realizados con el equipo ELCOMETER 1615 KIT F, bajo los parámetros descritos en la norma ASTM D5628-96, en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, sus resultados se muestran en el INFORME DE RESULTADOS N° OTI0262-2023-B, en tanto que las alturas así como energías medias de falla de las probetas obtenidas por infusión al vacío se muestran en la Tabla 25 y Tabla 26 respectivamente.



Tabla 25. Resultados del ensayo de impacto en probetas de material compuesto mediante infusión al vacío.

<b>RESULTADOS ENSAYO DE IMPACTO EN MATERIAL COMPUESTO</b>			
<b>Altura dardo [mm]</b>	<b>Muestra</b>	<b>Falla/No falla</b>	<b>Observaciones</b>
45	II11	0	Sin defecto
	II12	0	Sin defecto
55	II8	0	Sin defecto
	II9	0	Sin defecto
	II10	0	Sin defecto
	II7	1	Leve fisura
65	II13	1	Leve fisura
	II14	1	Leve fisura
	II15	1	Leve fisura
	II16	1	Leve fisura
75	II17	1	Leve fisura
	II18	1	Leve fisura
85	II6	1	Fisura
	II19	1	Fisura
	II20	1	Fisura
95	II4	1	Fisura
	II5	1	Fisura
	II21	1	Fisura
	II22	1	Fisura
105	II1	1	Fisura notoria
	II2	1	Fisura notoria
	II3	1	Fisura notoria
	II23	1	Fisura notoria
115	II24	1	Salida de fibra
	II25	1	Salida de fibra
125	II26	1	Salida de fibra
	II28	1	Salida de fibra
145	II27	1	Gran deformación
	II29	1	Gran deformación
	II30	1	Gran deformación

Falla=1; No falla=0

(Fuente: propia)

Tabla 26. Resultado de la energía media de falla  
**ENSAYO DE IMPACTO ASTM D5628-96**

<b>Muestras</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Energía media de falla [J]</b>
Infusión (II)	0,30	0,44
Estratificación (EIC)	0,30	0,44
Resina (IR)	0,00	0,13

(Fuente: propia)

La Figura 64 muestra las probetas ensayadas de material compuesto y de resina.

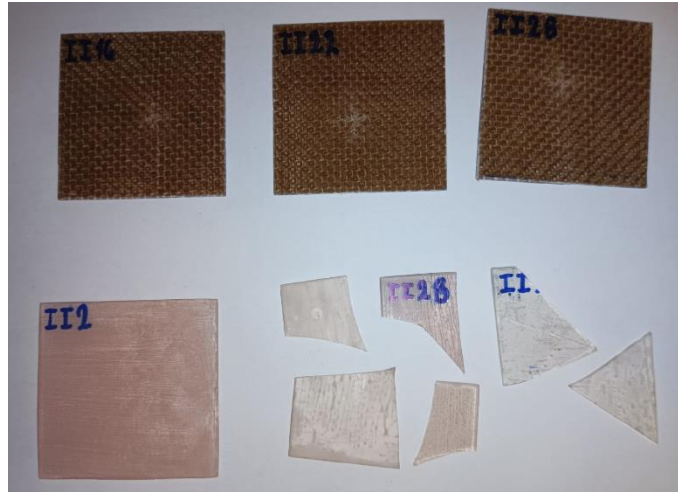


Figura 64. Probetas de impacto de material compuesto y resina mediante infusión al vacío posterior al ensayo de impacto.

(Fuente: propia)

#### 4.2.6 Discusión de los resultados del ensayo de impacto

En el caso de los ensayos realizados tanto a las probetas de material compuesto obtenidas mediante infusión al vacío como a las obtenidas por estratificación manual se obtuvo resultados iguales por lo que se clasifica como muestras de material compuesto frente a las probetas de resina (matriz), en la cual se nota claramente la mejora y aumento en el valor de la energía media de falla, siendo un valor de 0,44 [J] del material compuesto obtenido por los dos métodos mencionados, frente a 0,13 [J] de las probetas de resina (matriz), alcanzando un porcentaje de mejora de 338,46 % esto debido a que las cargas se transmiten hacia las fibras alcanzando mayor resistencia al impacto, como se visualiza de mejor manera en la Figura 65.

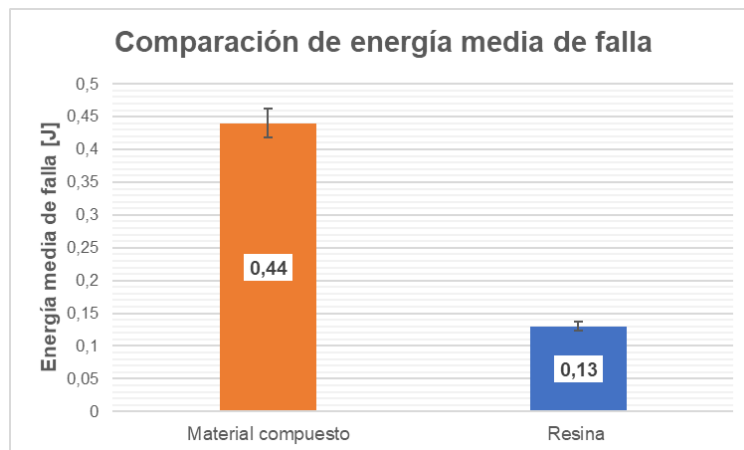


Figura 65. Comparación de energía media de falla entre material compuesto y resina (matriz).

(Fuente: propia)

#### 4.2.7 Resultados de las microscopias

Para el análisis de las microscopias realizadas se seleccionan las que presentan mejor visualización de la sección transversal en el caso de las probetas de tracción y flexión, mientras que para las probetas de impacto se seleccionan las que presentan mayor fractura e incluso desprendimiento de fibra.

En la Figura 66 se muestran las microscopias obtenidas para las probetas de tracción.

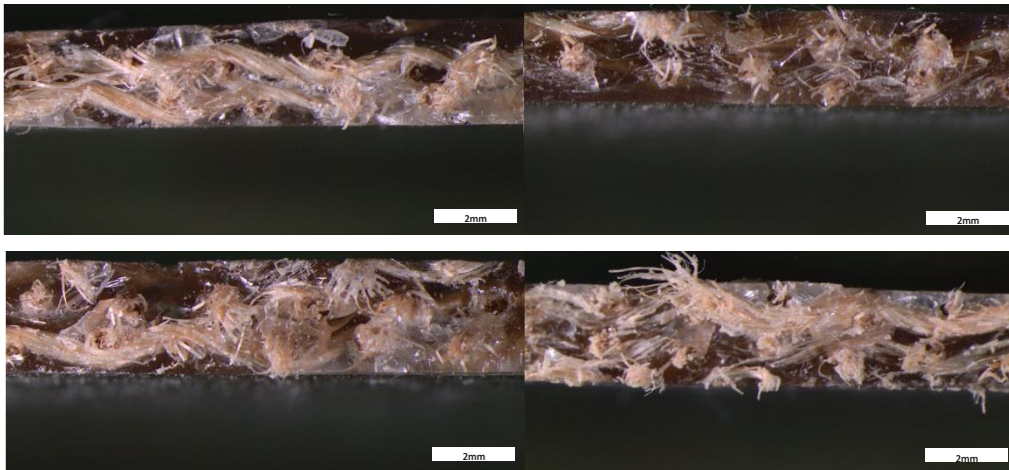


Figura 66. Macrografías con aumento 10x en probetas de tracción.

(Fuente: propia)

Se puede observar que el material obtenido por medio del proceso de infusión al vacío presenta una distribución bastante uniforme a lo largo de la falla que inicia en la matriz y se extiende por ella hasta partir el refuerzo de fibra vegetal. También se observa la rugosidad de la superficie de la muestra que no estaba directamente sobre el vidrio razón por la que la norma pide el uso de un micrómetro de puntas esféricas para las mediciones. Finalmente, se puede observar que la interface matriz-fibra no tiene porosidades visibles causadas por la presencia de aire atrapado en la matriz por efecto de la reacción química que implica su proceso de curado.

La Figura 67 muestra las microscopias obtenidas de la zona de falla de las probetas sometidas a ensayos de flexión.

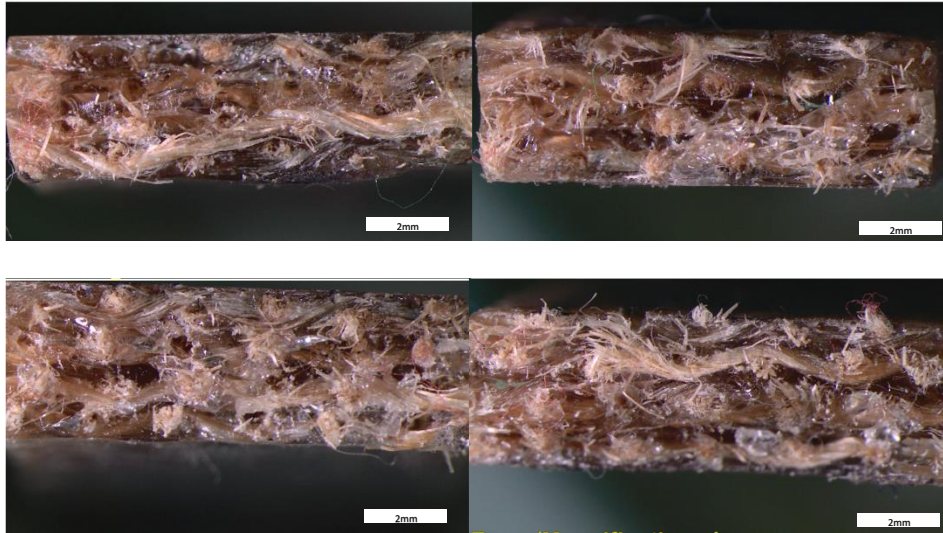


Figura 67. Macrografías con aumento 10x en probetas de flexión.

(Fuente: propia)

Las macrografías de la Figura 67 muestran características similares a las observadas en las macrografías de las muestras ensayadas a tracción, con una compactación ligeramente mayor entre matriz y refuerzo debido a la mayor cantidad de capas de refuerzo. De la misma manera se puede observar que existe poco o nada de aire atrapado en la matriz, lo que contribuye a la obtención de una mejor interface matriz-refuerzo.

La Figura 68 muestra las macrografías de las 3 probetas con fallas más notorias obtenidas en el ensayo de impacto.



Figura 68. Macrografías con aumento 8x en probetas de impacto

(Fuente: propia)

Se puede observar que las macrografías no presentan una falla catastrófica consecuentemente no se puede realizar un análisis del área transversal de la misma, por lo que su análisis necesariamente debe ser superficial. La figura destaca de la fractura es multidireccional alrededor de la zona de impacto, con falla inicial de la matriz del material compuesto e incluso desprendimiento de fibra con alturas superiores, el material no sufre seccionamiento en diferentes partes sino una deformación circular, esto debido a que la fibra absorbe gran cantidad de energía y permite mantener al material en una sola pieza sin

embargo ya se considera falla debido al cambio de geometría y aspecto. La interfase no se puede visualizar directamente, pero si se puede observar que existe cierta cantidad de burbujas de aire en la superficie de algunas probetas que pueden ser en detrimento de resistencia al impacto de estas probetas.

### **4.3 Conclusiones**

Se cumplió con éxito la obtención de diferentes tipos de probetas de material compuesto con refuerzo de cabuya lo que garantiza la funcionalidad del proceso de infusión al vacío.

Las medidas, pesos, volúmenes y dimensiones tanto de componentes de la matriz como de refuerzo se dimensionaron minuciosamente lo que garantiza gran exactitud en los resultados de la caracterización física principalmente de fracciones volumétricas y densidades.

Se cumplió las normas ASTM establecidas para materiales poliméricos y compuestos en la realización de los ensayos de tracción, flexión e impacto lo que garantiza su caracterización mecánica.

La fracción volumétrica depende de la geometría y de las capas de refuerzo existentes en cada tipo de probeta, por esta razón se encuentra diferentes fracciones volumétricas en las probetas para diferente tipo de ensayo.

En infusión al vacío el espesor de cada laminado se rige minuciosamente al número de capas de refuerzo y del espesor aproximado que presente cada capa colocada.

El material compuesto obtenido mediante infusión al vacío presenta mayor resistencia última a la tracción debido al método en particular de obtención, mejorando las condiciones en la interfase con una resistencia de 27,93 [MPa] frente a la resistencia del material obtenido mediante estratificación manual de 22,97 [MPa], con una mejora de 21,59 % de resistencia última a la tracción.

El módulo de elasticidad a la tracción es mayor en el material de estratificación manual con 6520,11 [MPa] frente a 6107,56 [MPa] que presenta el material obtenido mediante infusión al vacío, lo que representa que este alcanza mayores cantidades de deformación antes de la fractura.

El material compuesto que se obtuvo por el proceso de infusión al vacío alcanzó mayor resistencia última a las cargas de flexión con 74,34 [MPa] frente a 48,63 [MPa] que se obtuvo mediante el proceso de estratificación manual, siendo una mejora del 52, 86 % de resistencia última a la flexión.

El módulo elástico a flexión que presento el material bajo cargas de flexión fue mayor para el método de obtención mediante infusión al vacío con 3898,68 [MPa] frente a 2858,37 [MPa]

que se obtuvo mediante estratificación manual, lo que implica que el material soportó mayores cargas y sufrió menor deflexión.

La resistencia al impacto medida en la energía media de falla para el material compuesto debido a la escala de alturas usada se obtuvo un valor similar que se lo ubico como igualitario en los dos procesos de obtención del material compuesto, destacando mayores fracturas en el material obtenido mediante estratificación manual, pero se consideró un valor igual de 0,44 [J] de energía media de falla para los dos procesos.

Para realizar una comparación de resistencia al impacto del material compuesto frente a probetas realizadas a base de resina (matriz) las cuales alcanzaron 0,13 [J] en la energía media de falla siendo 228,46 % más resistentes a cargas de impacto las probetas de material compuesto.

En las macrografías realizadas con aumentos iguales y bajo similar preparación de las muestras se nota igual distribución en los dos procesos, sin embargo, se puede evidenciar una distribución más uniforme del refuerzo sobre la matriz en las probetas obtenidas mediante infusión al vacío.

Finalmente se puede concluir que el proceso de obtención de materiales compuestos mediante infusión al vacío genera un material con mejor resistencia y características mecánicas frente al proceso de estratificación manual. Esto es probablemente porque existe una menor presencia de burbujas de aire en el interior del material y una mejor interface matriz-fibra precisamente por el vacío al que es sometido el material durante su obtención.

#### **4.4 Recomendaciones**

Para la adecuada realización del proceso de infusión al vacío es necesario evitar fugas en la trampa de resina y en los conductos de entrada y salida para garantizar un cierre hermético durante el proceso tanto de inyección como de curado.

Al emplear la bomba de vacío se debe revisar la cantidad de vacío alcanzado por la misma y garantizar la hermeticidad del sistema considerando su correcto mantenimiento y uso de válvulas necesarias para su acoplamiento.

El uso del micrómetro de puntas esféricas es indispensable para realizar una correcta medición en este tipo de materiales por la falta de regularidad de la superficie obtenida. Las variaciones obtenidas con otro tipo de herramientas son fuente de errores marcados en la obtención de los resultados de esfuerzos aplicados.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. T. William Revelo, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON TEJIDOS Y NO TEJIDOS DE FIBRA DE CABUYA MEDIANTE INFUSIÓN AL VACÍO, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2021.
- [2] P. P. A. T. H. V. F. D. S. G. Víctor Guerrero, «Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados,» 2013. [En línea]. Available: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/cienciaytecnologia/article/view/112/110>. [Último acceso: 17 noviembre 2022].
- [3] F. V. F. C. C. P. Luis Pruna, «Elaboración de la fibra de cabuya en tejido plano como matriz de refuerzo para la construcción de un retrovisor,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5055/505563460009/505563460009.pdf>. [Último acceso: 17 noviembre 2022].
- [4] N. Tamayo, OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRA DE CABUYA MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN MANUAL, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [5] J. Arruti R., «La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi.,» Universidad de Carabobo, abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70745478004.pdf>. [Último acceso: 30 noviembre 2022].
- [6] J. M. GAGO, «La microscopía para el estudio de materiales y láminas delgadas.,» ICMM, 02 2009. [En línea]. Available: [https://wp.icmm.csic.es/wp-content/uploads/sites/26/2009/02/gago\\_cap19.pdf](https://wp.icmm.csic.es/wp-content/uploads/sites/26/2009/02/gago_cap19.pdf). [Último acceso: 16 06 2023].
- [7] F. Hierro, «Microscopía óptica,» Universitat de les Illes Balears, mayo 2020. [En línea]. Available: <https://sct.uib.es/Instruments-i-equipis-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-microscopia-optica-i-electronica/Microscopia-optica.cid108042>. [Último acceso: 16 junio 2023].
- [8] L. Chuctaya, «Micrografía y Macrografía,» Instituto de educación superior José Pardo, 16 diciembre 2021. [En línea]. Available:

[https://issuu.com/leny\\_chuctaya/docs/micrograf\\_a\\_y\\_macrograf\\_a-chuctaya\\_autoguardado\\_](https://issuu.com/leny_chuctaya/docs/micrograf_a_y_macrograf_a-chuctaya_autoguardado_). [Último acceso: 21 junio 2023].

- [9] L. Pastuña, «CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFAZ DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON FIBRA NATURAL OBTENIDO POR MEDIO DE ESTRATIFICACIÓN MANUAL CON EL USO DE MICROSCOPIA,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2023.
- [10] Disther, *RESINA POLIÉSTER ORTOFTÁLICA 33000*, Quito: PINTULAC, 2022.
- [11] O. S.A., *PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona)*, Quito: PINTULAC, 2015.
- [12] J. COMPOSITES, *Catálogo de materiales*, Quito: JEV COMPOSITES, 2020.
- [13] EVIDENT, «Sistema de microscopio estereoscópico SZX7,» OLYMPUS, 20 enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/microscope/szx7/>. [Último acceso: 22 06 2023].
- [14] W. Spark, «El clima y el tiempo promedio en todo el año en Quito,» Weather Spark, diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/20030/Clima-promedio-en-Quito-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: 09 diciembre 2022].
- [15] ASTM, «Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,» ASTM, 11 diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://www.astm.org/d3039\\_d3039m-17.html](https://www.astm.org/d3039_d3039m-17.html). [Último acceso: 2023 junio 01].
- [16] ASTM, «Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials1,» Researchgate, 2018. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Yashwant-Munde/post/ASTM-choice-for-Flexural-testing-of-polymer-matrix-composite/attachment/59d6269f6cda7b8083a23684/AS%3A505496109305856%401497531072076/download/ASTM+D7264+++Flexural+Comp.pdf>. [Último acceso: junio 01 2023].
- [17] ASTM, «Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass),» ASTM, 14 junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/d5628-18.html>. [Último acceso: 01 junio 2023].



## 6 ANEXOS

Anexo I. Informe de caracterización del tejido de cabuya.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO**



**INFORME No. CTP-ITI-2022-12-04**

**Página 1 de 2**

### **EMPRESA SOLICITANTE**

PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ  
Escuela Politécnica Nacional (Ingeniería Mecánica)

### **MATERIAL QUE ENTREGA**

Tejido de cabuya artesanal

### **TRABAJO SOLICITADO**

Determinar: Resistencia a la tracción del tejido según norma ASTM D 5034

**FECHA DE RECEPCION ORDEN DE TRABAJO** 2022 / 12 / 21

**FECHA DE REALIZACIÓN DEL INFORME** 2022 / 12 / 21

**NÚMERO DE ORDEN DE TRABAJO** DQ-OTI0019-2022

**Responsable del Centro Textil**

  
Ing. Hilda Trujillo A.



**Director del Centro Textil**

  
Ing. Omar Bonilla H.  
L.P. 17 – 05 – 1024

Los resultados de este informe conciernen exclusivamente a las muestras, productos o materiales entregados al Centro Textil Politécnico y no puede extenderse a lotes de producción o comprados. La reproducción de este informe solo se autoriza si se hace en su totalidad.

Dirección: Andalucía N22-441 y Veintimilla Teléfonos: 2976 300 – 3938 780 Ext. 4305-4306-43-07  
E-mail: [omar.bonilla@epn.edu.ec](mailto:omar.bonilla@epn.edu.ec); [hilda.trujillo@epn.edu.ec](mailto:hilda.trujillo@epn.edu.ec)

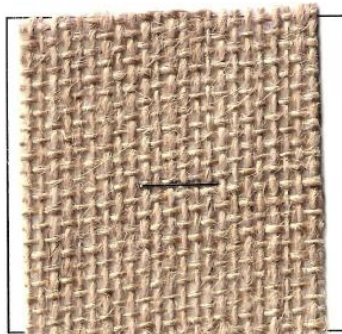


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO**



**INFORME No. CTP-ITI-2022-12-04**

**Página 2 de 2**



**MUESTRA DE TEJIDO DE CABUYA ARTESANAL**

<b><u>PROPIEDADES DETERMINADAS</u></b>	<b><u>NORMA</u></b>	<b><u>RESULTADOS</u></b>
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Longitudinal, kgf Transversal, kgf	ASTM D5034	44,97 (s = 6,28) 43,41 (s = 7,28)
ELONGACIÓN A LA ROTURA Longitudinal, % Transversal, %	ASTM D5034	7% 4%

**Responsable del Centro Textil**

**Ing. Hilda Trujillo A.**



**Director del Centro Textil**

**Ing. Omar Bonilla H.  
L.P. 17 - 05 - 1024**

Los resultados de este informe conciernen exclusivamente a las muestras, productos o materiales entregados al Centro Textil Politécnico y no puede extenderse a lotes de producción o comprados. La reproducción de este informe solo se autoriza si se hace en su totalidad.

Dirección: Andalucía N22-441 y Veintimilla Teléfonos: 2976 300 – 3938 780 Ext. 4305-4306-43-07  
E-mail: [omar.bonilla@epn.edu.ec](mailto:omar.bonilla@epn.edu.ec); [hilda.trujillo@epn.edu.ec](mailto:hilda.trujillo@epn.edu.ec)



## RESINA POLIÉSTER ORTOFTÁLICA

### 33000

Octubre 2022

### CARACTERÍSTICAS

- RD1 33000 es una resina de poliéster insaturado de base ortoftálica con alto contenido de sólidos.
- Resiste a la intemperie, al agregar inhibidor UV.
- Aprobado por Lloyd's Register.
- Cumple con la regulación 21 CFR 177.2420 de la FDA después de formularse y curarse correctamente, es adecuado para uso repetido en materiales en contacto con alimentos.

### USOS

- Embarcaciones en plástico reforzado (FRP), como botes de pesca, yates, botes salvavidas, etc.
- Tanques, tuberías y diversos productos plásticos reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono.
- Adecuado para procesos de bobinado de filamento, pultrusión, rociado y laminado manual.

### PROPIEDADES DE LA RESINA LÍQUIDA

Ítem	Valor
Apariencia	Líquido viscoso amarillo
Viscosidad cPs (25 °C) Brookfield #64@60rpm	1500~2000
Índice de acidez	18~26
Contenido sólidos, %	68~72
Tiempo de gel* @25°C en min.	10~20
Gel a pico en min.	/
Pico Exotérmico, °C	180~220

NOTA: Las características de curado se obtienen utilizando Butanox M-50 al 2,0 % (AKZO Nobel) y NL-49P al 1,5 % (AKZO Nobel) añadidos a la resina.

### PROPIEDADES MECÁNICAS

Ítem	Valor	Método de Prueba
Resistencia a la tracción, MPa	65	ASTM D638
Módulo de tracción, GPa	3.2	
Alargamiento a la tracción, %	2.6	
Resistencia a la flexión, MPa	120	ASTM D790
Módulo de flexión, GPa	3.3	
Distorsión de calor temperatura, °C	70	ASTM D648
Dureza Barcol	40	Barcol 934-1

NOTA: La información proporcionada corresponde a propiedades físicas y no deben ser considerada como especificación del producto.

### RECOMENDACIONES Y ALMACENAMIENTO

- El producto debe empacarse en un contenedor limpio, seco, seguro y sellado, el peso neto de la resina es de 220 Kg/tambor.
- Vida útil: seis meses por debajo de 25 °C, almacenado en un lugar fresco, seco y bien ventilado. Evite la insolación.
- Toda la información en esta ficha es para referencia y se basa en pruebas estándar ASTM.
- Cualquier condición inadecuada de almacenamiento y transporte provocará el acortamiento de la vida útil.
- El fabricante se reserva el derecho de realizar mejoras al producto, por lo cual los datos de prueba actuales pueden cambiar con la mejora tecnológica.

## Anexo III. Ficha técnica de Peróxido de Metil Etil Cetona

<b>BOLETÍN TÉCNICO</b>	BAC 001-02
	Versión 01
	Página 1 de 1



Código N° SC 2840-1

### PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona)

Rótulos:  
NFPA:



UN:



#### DESCRIPCIÓN

Es un peróxido orgánico elaborado por . el cual es un Peróxido de Metil Etil Cetona con un estabilizador especial del oxígeno activo y en Dimetil Ftalato.

**PEROXICOL 80** es un catalizador para resinas de poliéster insaturado y es generalmente usado para aplicaciones que emplean curado a temperatura ambiente. Es necesario que la resina contenga un promotor o acelerante antes de adicionarle el **PEROXICOL 80**.

Las concentraciones indicadas están en el rango de 0.25% al 2.5% con respecto a la resina, dependiendo de las condiciones requeridas.

Evitar contacto directo de acelerantes porque puede ocurrir reacción violenta. El acelerante debe mezclarse muy bien con la resina antes de agregar el **PEROXICOL 80**.

Evitar el contacto con la piel y ojos; si esto llegare a suceder con la piel, lavar prontamente con agua y jabón y en el caso de los ojos lavar con abundante agua e inmediatamente acudir al médico. Prolongado contacto con los ojos puede producir ceguera.

Debe almacenarse en un lugar frío; se recomienda tener existencias en permanente rotación para evitar periodos largos de almacenamiento (mayores de tres meses).

Usar gafas y guantes de seguridad al manejarlos. Evitar estar en contacto con materias orgánicas como aminas, secantes (sales órgano-metálicos). Evitar chispas y exposición directa al sol.

Nunca empacar este Peróxido en envases de vidrio u otros recipientes de construcción rígida con cierres herméticos por el peligro de explosión. Tiene una vida útil de 5 meses.

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PROPIEDADES	ESPECIFICACIONES
Aspecto físico	Líquido semiviscoso transparente blanco a levemente amarillo
% Oxígeno Activo	10.0 ± 0.2
% Metil Etil Cetona Peróxido	53.9 – 56.1
Gravedad Específica (20 / 20°C)	1.000 - 1.080
Compatible con Resina Poliéster	Compatible
Solubilidad en agua	Insoluble

Todos nuestros tipos de Metil Etil Cetona Peróxido se usan para las siguientes aplicaciones:

- Productos en plástico reforzado con fibra de vidrio como botes, cabinas de automóviles, tejas plásticas, etc.
- Láminas y vaciados de poliéster para botones.
- Revestimientos, masillas y selladores de poliéster, etc.

#### ASISTENCIA TÉCNICA

dará el soporte técnico necesario para el uso y aplicación de este producto, así como de todos los productos que manufactura. La responsabilidad de Oxider S.A. se limita a las especificaciones del producto.

ELABORADO POR: <i>Bernardo Marulanda U.</i>	REVISADO POR: <i>Bernardo Glandt J.</i>	APROBADO POR: <i>Bernardo Glandt J.</i>
CARGO: Director Comercial	CARGO: Gerente General	CARGO: Gerente General
FECHA: Julio 13 de 2015	FECHA: Julio 13 de 2015	FECHA: Julio 13 de 2015

Anexo IV. Ficha técnica de Octoato de cobalto

	<b>FICHA TÉCNICA</b>	CODIGO:	VERSION:
		CC.PT. 24-1	8
		PÁGINA:	
	<b>OCTOATO DE COBALTO 12%</b>	1 de 1	

**NOMBRE QUÍMICO:** *OCTOATO DE COBALTO*

**FORMULA QUIMICA:**  $(C_7H_{15}COO)_2Co$

**DESCRIPCION :** *Sal de Cobalto del Acido 2 – Etil hexoico en disolvente No 4.*

**PESO MOLECULAR:** *345.37 g/mol*

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
<b>APARIENCIA</b>	Líquido, sin impurezas.	Visual
<b>COLOR</b>	Violeta o azul violeta	Visual

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Contenido de Cobalto, %	12 +/- 0.1	CC.MA.18*
Densidad a 25 °C , g/ml	1.04 +/- 0.04	CC.MA.35*
Viscosidad Gardner a 25 °C	Máx. N	CC.MA.27*

\* Método de análisis de Producciones Químicas S.A.

	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
<b>PRESENTACIÓN</b>	Tambor metálico por 200 kilos. Garrafa plástica por 20 y 50 kilos. Contenedor plástico por 1000 kilos	Pesaje
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	Etiqueta con datos de Producciones Químicas S.A., nombre del producto, número de lote, peso neto y bruto en kilos, número CAS, códigos de transporte y precauciones, y rombo NFPA.	Visual

<b>DOCUMENTOS ASOCIADOS</b>	
<b>NORMA</b>	No Aplica



## Anexo V. Ficha técnica de Monómero de estireno



### Estirénico de las Américas

24 Waterway Avenue, Suite 1200 The

Woodlands, TX 77380

Número gratuito 888-55-AMSTY (888-552-6789)

PROVEEDOR: AMERICAN STYRENICS

REF: TPE-032-12

## MONÓMERO DE ESTIRENO - COMO

### Especificación de ventas

Propiedad	Unidades	Valor <sup>1</sup>	ASTM Método
Pureza, mínima	Peso %	99,90	D5135
Etilbenceno, máximo	Peso %	0,0085	D5135
Color, máximo	Escala Pt - Co	15	D5386
	- o - Escala Pt - Co	- o - 10	- o - D1209
Polímero, máximo	mg / kg	10	D2121
Inhibidor (t-butil catecol)	mg / kg	10 - 15 <sup>2</sup>	D4590
Aldehídos (como benzaldehído), máximo	Peso %	0.0100	D2119
Peróxidos (como H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ), máximo	mg / kg	50	D2340
Benceno, máximo	mg / kg	1	D5135 (mod)

<sup>1</sup> Sujeto a cambios sin previo aviso.

<sup>2</sup> Se aplica a todos los métodos de envío a menos que se especifique un inhibidor adicional.

### Propiedades típicas

Propiedad	Unidades	Valor <sup>1</sup>	ASTM Método
Pureza	Peso %	99,93	D5135
Etilbencina	Peso %	0,0045	D5135
Color	Escala Pt - Co	8	D5386
Polímero	mg / kg	1	D2121
Inhibidor (t-butil catecol)	mg / kg	13	D4590
Aldehídos (como benzaldehído)	Peso %	0,0020	D2119
Peróxidos (como H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	mg / kg	5	D2340
Benceno	mg / kg	<1	D5135 (mod)
Cloruros	mg / kg	<1	D5808
Azufre	mg / kg	<1	D4045
Punto de inflamación (PMCC)	•C	31	D93

MSDS # AS-00001

Fecha de revisión: octubre de 2008

© Americas Styrenics LLC 2008

Antes de utilizar este producto, se aconseja y se advierte al usuario que haga su propia determinación y evaluación de la seguridad e idoneidad del producto para el uso específico en cuestión y se le aconseja además que no confíe en la información contenida en este documento, ya que puede estar relacionada con cualquier uso o aplicación. Es responsabilidad última del usuario asegurarse de que el producto sea adecuado y que la información sea aplicable a la aplicación específica del usuario. Americas Styrenics LLC no otorga, y rechaza expresamente, todas las garantías, incluidas las garantías de comerciabilidad o idoneidad para un propósito en particular, independientemente de que sea oral o escrito, expreso o implícito, o que supuestamente surja de cualquier uso de cualquier comercio o de cualquier curso de que trata en relación con el uso de la información aquí contenida o el producto en sí. El usuario asume expresamente todo riesgo y responsabilidad, ya sea por contrato, agravio o de otro tipo, en relación con el uso de la información contenida en este documento o del producto en sí. Además, la información contenida en este documento se proporciona sin referencia a ningún problema de propiedad intelectual, así como a las leyes federales, estatales o locales que se puedan encontrar en su uso. Estas preguntas deben ser investigadas por el usuario.

Anexo VI. INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-015 correspondiente a infusión al vacío. Ensayos de tracción y flexión.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-015**

Solicitud de trabajo No. LANUM-2023-ST.013

Quito, 5 de abril de 2023

**DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE**

Solicitado por: Patricia Rodríguez, Ph.D.

Empresa / Institución: EPN-DMT-FIM

Dirección: Isabel la Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño

Teléfono: 2976-300 ext. 3013

E-mail: patricia.rodriguez@epn.edu.ec

Identificación de la(s) muestra(s) (cliente):

5 Probetas "ITR" (Resina Pura)

5 Probetas "IT" (Compuesto)

5 Probetas "IFR" (Resina Pura)

5 Probetas "IF" (Compuesto)

Descripción de la(s) muestra(s):

5 probetas de resina poliéster y 5 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con fibra natural. Las probetas de los grupos "ITR", "IT" se utilizarán para realizar ensayos de tracción, tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17.

5 probetas de resina poliéster y 5 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con fibra natural. Las probetas de los grupos "IFR", "IF" se utilizarán para realizar ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15.

**LABORATORIO**

Fecha de ingreso al Laboratorio: 27/03/2023

Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):

MI-23-254 a MI-23-258 para las probetas del grupo "ITR",

MI-23-264 a MI-23-268 para las probetas del grupo "IT",

MI-23-259 a MI-23-263 para las probetas del grupo "IFR",

MI-23-269 a MI-23-273 para las probetas del grupo "IF"

Fecha en que se realizaron los ensayos: 28/03/2023, 30/03/2023 y 31/03/2023

Área del laboratorio donde se realizó el ensayo: Área de Caracterización Mecánica

*Condiciones ambientales corregidas:* En la tabla 1 se presentan las condiciones ambientales corregidas en las fechas que se ensayaron cada uno de los grupos de probetas.

Anexo VII. INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-015 correspondiente a estratificación manual. Ensayos de tracción y flexión.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-024**

Solicitud de trabajo No. LANUM-2023-ST.027

Quito, 19 de mayo de 2023

**DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE**

Solicitado por: Patricia Rodríguez, Ph.D.  
Empresa / Institución: EPN-DMT-FIM  
Dirección: Isabel la Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño

Teléfono: 2976-300 ext. 3013  
E-mail: patricia.rodriguez@epn.edu.ec

Identificación de la(s) muestra(s) (cliente):

- 5 Probetas "PL-TRAC" (Resina Pura)
- 5 Probetas "PL-TRAC-COMP" (Compuesto)
- 5 Probetas "PL-FLEX" (Resina Pura)
- 5 Probetas "PL-FLEX-COM" (Compuesto)

Descripción de la(s) muestra(s):

5 probetas de resina poliéster y 5 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con fibra natural. Las probetas de los grupos "PL-TRAC", "PL-TRAC-COMP" se utilizarán para realizar ensayos de tracción, tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17.

5 probetas de resina poliéster y 5 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con fibra natural. Las probetas de los grupos "PL-FLEX", "PL-FLEX-COMP" se utilizarán para realizar ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15.

**LABORATORIO**

Fecha de ingreso al Laboratorio: 11/05/2023

Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):

- 23-27-0001 a 23-27-0005 para las probetas del grupo "PL-TRAC",
- 23-27-0006 a 23-27-0010 para las probetas del grupo "PL-TRAC-COMP",
- 23-27-0011 a 23-27-0015 para las probetas del grupo "PL-FLEX",
- 23-27-0016 a 23-27-0020 para las probetas del grupo "PL-FLEX-COMP"



Fecha en que se realizaron los ensayos: 15/05/2023 y 17/05/2023

Área del laboratorio donde se realizó el ensayo: Área de Caracterización Mecánica

*Condiciones ambientales corregidas:* En la tabla 1 se presentan las condiciones ambientales corregidas en las fechas que se ensayaron cada uno de los grupos de probetas.



Anexo VIII. INFORME DE RESULTADOS N.º OTI0208-23-A correspondientes a infusión al vacío. Ensayo de impacto.

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión:	000	
		Fecha:	22/09/2019	
		Página:	Pág. 1 de 3	
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0208-23-A		RT-LMDF-0701	

## INFORME DE RESULTADOS N° N° OTI0208-23-A

### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	David Sebastián Cadena Paspuezán		
<b>Teléfono:</b>	0402092662	<b>E-mail:</b>	david.cadena01@epn.edu.ec
<b>Muestras suministradas por:</b>	David Cadena	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	02-05-2023
<b>Fecha de emisión de Informe:</b>	31-05-2023	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	02-05-2023	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	31-05-2023

### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas, a someterse a ensayos para el desarrollo del trabajo de integración curricular "Caracterización de la interfaz de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra natural obtenido por medio de dos procesos diferentes con el uso de microscopía". Memorando Nro. EPN-DMT-2023-0178-M.

### 2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA


Probetas de material compuesto.

### 3. ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo se realizó en el equipo de impacto, marca ELCOMETER, y se basa en la especificación de la norma ASTM D5628-96. En donde:

- a. La masa aplicada fue de 690 g.
- b. El diámetro del punzón utilizado fue de 20 mm
- c. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Anexo IX. INFORME DE RESULTADOS N.º OTI0208-23-B correspondientes a estratificación manual. Ensayo de impacto.

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión:	000	
		Fecha:	22/09/2019	
	Página:	Pág. 1 de 3		
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0208-23-B		RT-LMDF-0701	

## INFORME DE RESULTADOS N° N° OTI0208-23-B

### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	Luis Alfredo Pastuña Maza		
<b>Teléfono:</b>	0999912935	<b>E-mail:</b>	luis.pastuña@epn.edu.ec
<b>Muestras suministradas por:</b>	Luis Pastuña	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	17-05-2023
<b>Fecha de emisión de Informe:</b>	31-05-2023	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	17-05-2023	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	31-05-2023

### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas, a someterse a ensayos para el desarrollo del trabajo de integración curricular "Caracterización de la interfaz de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra natural obtenido por medio de dos procesos diferentes con el uso de microscopía". Memorando Nro. EPN-DMT-2023-0178-M.

### 2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA



Probetas de material compuesto.

### 3. ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo se realizó en el equipo de impacto, marca ELCOMETER, y se basa en la especificación de la norma ASTM D5628-96. En donde:

- a. La masa aplicada fue de 690 g.
- b. El diámetro del punzón utilizado fue de 20 mm
- c. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Anexo X. INFORME DE RESULTADOS N.º OTI0262-2023-B correspondiente a microscopias en las probetas de infusión al vacío.

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
		Página: Pág. 1 de 2	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
Nº OTI0262-2023-B			

## INFORME DE RESULTADOS N° OTI0262-2023-B

### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	David Sebastián Cadena Paspuezán		
<b>Teléfono:</b>	0402092662	<b>E-mail:</b>	david.cadena01@epn.edu.ec
<b>Muestras suministradas por:</b>	David Cadena	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	14-06-2023
<b>Fecha de emisión de Informe:</b>	16-06-2023	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	14-06-2023	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	14-06-2023

### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas, a someterse a ensayos para el desarrollo del trabajo de integración curricular "Caracterización de la interfaz de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra natural obtenido por medio de dos procesos diferentes con el uso de microscopía". Memorando Nro. EPN-DMT-2023-0707-M.

### 2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Muestras de polímero reforzado.

### 3. RESULTADO DE MACROGRAFÍA

La preparación de las probetas para el ensayo de macrografía, se basa los requerimientos del cliente, el cual realiza ensayos a muestras sometidas a ensayo de tracción, flexión e impacto; a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo realizado: