



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON TEJIDOS Y NO TEJIDOS DE FIBRA DE CABUYA MEDIANTE INFUSIÓN AL VACÍO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

REVELO ZAVALA WILLIAM DARÍO  
william.revelo@epn.edu.ec

TAPIA MORALES JORGE LUIS  
jorge.tapia01@epn.edu.ec

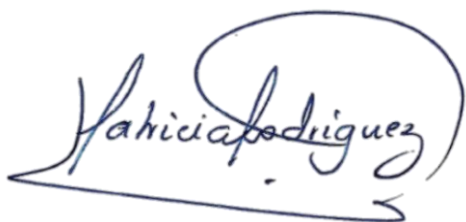
DIRECTOR: ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR, Ph.D.  
patricia.rodriguez@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE, M.Sc.  
carlos.diaz@epn.edu.ec

QUITO, mayo 2021

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **WILLIAM DARÍO REVELO ZAVALA** y **JORGE LUIS TAPIA MORALES**, bajo nuestra supervisión.



---

Ing. Patricia Rodríguez Salazar, Ph.D.

**DIRECTOR DE PROYECTO**



---

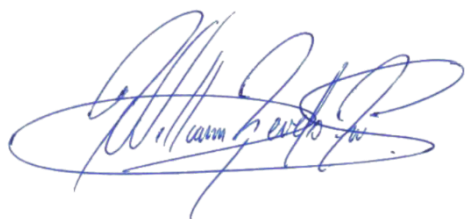
Ing. Carlos Wime Díaz, M.Sc.

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

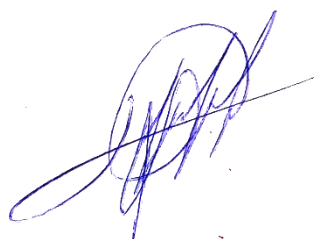
Nosotros, **WILLIAM DARÍO REVELO ZAVALA** y **JORGE LUIS TAPIA MORALES**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

William Darío Revelo Zavala



---

Jorge Luis Tapia Morales

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a mis papás que con gran sabiduría han sabido educarme, guiarme y apoyarme incondicionalmente en cada actividad que he desempeñado en el transcurso de toda mi vida. Su amor y confianza han hecho de mí la persona que soy hoy en día, una persona con ganas de superarse y salir adelante aun cuando existan adversidades. A mi hermana, por haber creído en mí y encontrarse cursando el mismo camino; pronto, a nuestros papás, les daremos la tranquilidad que se merecen. Y a Andrea, por acompañarme prácticamente desde el comienzo de esta historia.

**William**

El presente trabajo lo dedico a mis padres por forjarme valores en el transcurso de mi formación profesional tanto como en la vida diaria, haciéndome una persona capaz de superar de la mejor manera cualquier obstáculo que se presente. Su confianza, apoyo, motivación y paciencia me han hecho salir adelante con la fuerza y ganas suficientes para alcanzar cualquier objetivo que me proponga. Y a mi hermana que estuvo conmigo apoyándome todo el transcurso de mi vida.

**Jorge**



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis papás Jorge y Eugenia, y mi hermana Beatriz por su apoyo permanente y la confianza depositada en mí durante todos estos años. Con gran alegría y orgullo puedo decirles que se hizo realidad un sueño que tuve tiempo atrás como resultado de la perseverancia y dedicación que he aprendido de ustedes.

A Andrea por caminar junto a mí por este largo, pero grato camino. Estos últimos años serán inolvidables gracias a que siempre me diste todo tu amor y apoyo. Tú formas parte de este logro.

A mis amigos, a quienes guardo un gran aprecio a pesar de la distancia.

A mis tutores Carlos y Patricia por orientarnos y estar prestos a ayudarnos en cualquier momento en que lo necesitábamos mientras desarrollábamos este trabajo.

**William**

Doy gracias a mis padres Jorge y María tanto como a mi hermana Anita por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas. Sus consejos, constancia y sacrificio me ayudaron a cumplir este importante objetivo de vida.

A mis amigos, quienes han estado conmigo deseándome el bien, dándome ánimos en el transcurso de la carrera.

A Carlos y Patricia por sus consejos, colaboración y por estar prestos a aclarar cualquier duda en el desarrollo del presente trabajo.

**Jorge**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
Alcance 2	
1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1. Fibras naturales .....	3
1.2. Fibras naturales de origen vegetal en Ecuador .....	3
1.2.1. Fibra de cabuya .....	3
1.2.1.1. Propiedades y aplicaciones de la fibra de cabuya .....	4
1.2.1.2. Hilo, tejido y no tejido de cabuya .....	6
1.3. Materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras vegetales .....	8
1.3.1. Resina poliéster .....	9
1.3.2. Interfaz fibra - matriz .....	10
1.3.3. Orientación y cantidad fibra - matriz .....	11
1.4. Propiedades mecánicas .....	12
1.4.1. Resistencia a la tracción .....	12
1.4.2. Módulo de elasticidad .....	12
1.4.3. Resistencia a la flexión.....	13
1.4.4. Tenacidad .....	13
1.5. Obtención de materiales compuestos mediante infusión al vacío.....	13
1.5.1. Variables del proceso de infusión al vacío.....	13
1.5.2. Curado de resinas termoestables.....	14
1.5.3. Maquinado de materiales compuestos .....	15
1.6. Estudio de caso.....	15
2. METODOLOGÍA .....	17
2.1. Materiales y equipos .....	17
2.1.1. Materiales usados para la infusión .....	17
2.1.2. Equipos .....	23
2.2. Caracterización mecánica del tejido y no tejido de cabuya.....	28
2.2.1. No tejido.....	28
2.2.2. Tejido .....	28
2.3. Armado del sistema para infusión al vacío .....	29
2.3.1. Configuración del refuerzo .....	29
2.3.2. Armado del sistema de infusión de resina .....	30
2.3.3. Obtención de los laminados .....	33

2.4.	Densidad y fracción volumétrica de materiales compuestos .....	36
2.4.1.	Densidad de resina poliéster .....	37
2.4.2.	Densidad del refuerzo en un material compuesto.....	38
2.4.2.1.	Densidad del tejido de cabuya .....	39
2.4.2.2.	Densidad del no tejido de cabuya .....	40
2.4.3.	Fracción volumétrica de refuerzo .....	41
2.5.	Caracterización mecánica de las probetas .....	42
2.5.1.	Ensayo de tracción.....	42
2.5.2.	Ensayo de flexión.....	44
2.5.3.	Ensayo de impacto.....	46
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.1.	Caracterización de componentes del material compuesto.....	49
3.1.1.	Densidad del tejido de cabuya .....	49
3.1.2.	Densidad del no tejido de cabuya .....	49
3.1.3.	Fracción volumétrica de refuerzo tejido.....	50
3.1.4.	Fracción volumétrica de refuerzo no tejido .....	50
3.1.5.	Discusión .....	50
3.2.	Ensayos de tracción.....	51
3.2.1.	Resultados .....	51
3.2.2.	Discusión .....	53
3.3.	Ensayos de flexión .....	60
3.3.1.	Resultados matriz – compuesto no tejido.....	60
3.3.2.	Resultados matriz – compuesto tejido.....	61
3.3.3.	Discusión .....	62
3.4.	Ensayos de impacto.....	70
3.4.1.	Resultados .....	70
3.4.2.	Discusión .....	70
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
4.1.	Conclusiones .....	72
4.2.	Recomendaciones .....	73
	Referencias Bibliográficas .....	75
	Anexo I. Caracterización del tejido y no tejido de fibra de cabuya.....	78
	Anexo II. Ficha técnica resina.....	81
	Anexo III. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de tornillo micrométrico de bola con precisión de 0,0025 [mm] (0,0001 [in]) para medición de las dimensiones de probetas.....	84
	Anexo IV. Resultados del ensayo de impacto.....	91

Anexo V. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de calibrador vernier para medición de dimensiones de las probetas (Primer informe).....	93
Anexo VI. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de calibrador vernier para medición de dimensiones de las probetas (Segundo informe). ....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planta y fibra de cabuya.....	4
Figura 1.2. Diferentes aplicaciones de la fibra de cabuya. ....	6
Figura 1.3. Diseño esquemático de un tejido. ....	7
Figura 1.4. Estructura básica de un tejido plano. ....	8
Figura 1.5. (a) Tejido tipo basket, (b) Tejido tipo oxford, (c) Tejido tipo leno. ....	8
Figura 1.6. Orientación de las fibras: a) Unidireccional; b) Tejido bidireccional; d) Tejido multidireccional; e) Fibras cortas orientadas al azar. ....	12
Figura 2.1. Fibra de cabuya: a) Tejido, b) No tejido.....	17
Figura 2.2. a) Resina, b) Peróxido de metil-etil cetona, c) Octoato de cobalto. ....	18
Figura 2.3. Monómero de estireno. ....	19
Figura 2.4. Peel Ply – tejido pelable.....	19
Figura 2.5. Film sangrador.....	20
Figura 2.6. Manta de absorción. ....	20
Figura 2.7. Líneas de conducto.....	21
Figura 2.8. Conectores para infusión de resina.....	21
Figura 2.9. Manguera de succión.....	21
Figura 2.10. Mordazas de paso. ....	22
Figura 2.11. Bolsa de vacío. ....	22
Figura 2.12. Cinta de butilo. ....	22
Figura 2.13. Spray desmoldeante. ....	23
Figura 2.14. Bomba de vacío HYVAC 7.....	24
Figura 2.15. Trampa de resina: a) Vista frontal, b) Vista superior.....	24
Figura 2.16. Balanza electrónica digital.....	25
Figura 2.17. Mesa de vidrio templado. ....	25
Figura 2.18. Caladora manual y lija, izquierda y derecha respectivamente. ....	25
Figura 2.19. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS. ....	26
Figura 2.20. Mordazas cuneiformes y extensómetro.....	26
Figura 2.21. Procedimiento de tres puntos.....	27
Figura 2.22. a) Equipo Elcometer 1615, b) Dardo. ....	27
Figura 2.23. Orientación a 0° y 45° en la izquierda y derecha, respectivamente. ....	30
Figura 2.24. Colocación de la cinta butílica alrededor del área del laminado. ....	30
Figura 2.25. Orden de colocación de los materiales: a) Capas de refuerzo, b) Peel Ply, c) Film sangrador, d) Manta de absorción.....	31
Figura 2.26. Líneas de conducto y conectores.....	32

Figura 2.27. a) Bolsa de vacío y mangueras de succión, b) Sistema de infusión al vacío.....	32
Figura 2.28. Sistema de infusión al vacío.....	33
Figura 2.29. Matriz poliéster en estado líquido.....	33
Figura 2.30. Conexiones del sistema de infusión al vacío.....	34
Figura 2.31. a) Inicio de infusión de la resina, b) Fin de infusión.....	34
Figura 2.32. Molde de material compuesto con refuerzo tejido: a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	35
Figura 2.33. Moldes: a) Impacto, b) Tracción tejido, c) Tracción no tejido, d) Flexión tejido, e) Flexión no tejido.....	35
Figura 2.34. Dimensiones de probetas para ensayos de: a) Tracción, b) Flexión, c) Impacto.....	36
Figura 2.35. Probeta cilíndrica de resina.....	38
Figura 2.36. Probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo tejido.....	39
Figura 2.37. Probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo no tejido.....	41
Figura 2.38. Código de falla de tres partes para ensayo de tracción.....	44
Figura 2.39. Diagrama de cargas - procedimiento A.....	45
Figura 2.40. Código de falla de tres partes para ensayo de flexión.....	46
Figura 3.1. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación. ....	54
Figura 3.2. Comparación del módulo secante de elasticidad.....	55
Figura 3.3. Probetas de resina previo al ensayo de tracción.....	56
Figura 3.4. Probetas de resina después del ensayo de tracción.....	57
Figura 3.5. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido previo al ensayo de tracción.....	57
Figura 3.6. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de tracción.....	58
Figura 3.7. Probetas de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de tracción.....	58
Figura 3.8. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de tracción.....	59
Figura 3.9. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación. ....	62
Figura 3.10. Comparación del módulo secante a flexión.....	63
Figura 3.11. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación. ...	63
Figura 3.12. Comparación del módulo secante a flexión.....	64
Figura 3.13. Probetas de resina (FR) previo al ensayo de flexión.....	65
Figura 3.14. Probetas de resina (FR) después del ensayo de flexión.....	66

Figura 3.15. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido previo al ensayo de flexión. ....	66
Figura 3.16. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de flexión. Desde arriba (FNT-1) hasta abajo (FNT-5).....	67
Figura 3.17. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de flexión. Vista lateral, desde arriba (FNT-1) hasta abajo (FNT-5). ....	67
Figura 3.18. Probetas de resina (FR2) después del ensayo de flexión. ....	68
Figura 3.19. Probetas de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de flexión. ....	68
Figura 3.20. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de flexión. Vista posterior, desde arriba (FT-1) hasta abajo (FT-5). ....	69
Figura 3.21. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de flexión. Vista lateral, desde arriba (FT-1) hasta abajo (FT-5).....	69
Figura 3.22. Comparación de la energía media de falla. ....	71
Figura 3.23. Probeta de resina previo al ensayo de impacto. Probeta ensayada vista frontal y vista posterior. ....	71
Figura 3.24. Probeta de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de impacto. Probeta ensayada vista frontal y vista posterior.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características físicas de la fibra de cabuya. ....	4
Tabla 1.2. Características mecánicas de algunas fibras naturales y sintéticas.....	5
Tabla 1.3. Composición química de fibras naturales. ....	5
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de la resina poliéster. ....	9
Tabla 1.5. Resumen de resultados del ensayo de tracción por estratificación.....	16
Tabla 1.6. Resumen de resultados del ensayo de flexión por estratificación.....	16
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la fibra de cabuya. ....	28
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del tejido de cabuya.....	28
Tabla 2.3. Configuraciones de las probetas para el ensayo de tracción, flexión e impacto. ....	29
Tabla 2.4 Configuración del refuerzo usado para las diferentes probetas de ensayo..	29
Tabla 2.5. Configuración para la elaboración de la matriz de resina poliéster.....	33
Tabla 2.6. Dimensiones de los moldes para los ensayos de tracción, flexión e impacto.....	35
Tabla 2.7. Dimensiones de probeta cilíndrica de resina. ....	38
Tabla 2.8. Dimensiones de probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo tejido.....	40
Tabla 2.9. Dimensiones de probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo no tejido.....	41
Tabla 2.10. Dimensiones y volumen de probetas de tracción, flexión e impacto.....	42
Tabla 2.11. Parámetros empleados en el ensayo de tracción.....	42
Tabla 2.12. Parámetros empleados en el ensayo de flexión. ....	45
Tabla 2.13. Parámetros empleados en el ensayo de impacto. ....	47
Tabla 3.1. Resultados del proceso iterativo, densidad del refuerzo tejido. ....	49
Tabla 3.2. Resultados del proceso iterativo, densidad del refuerzo no tejido. ....	49
Tabla 3.3. Fracción volumétrica de refuerzo tejido. ....	50
Tabla 3.4. Fracción volumétrica de refuerzo no tejido.....	50
Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción - resina.....	52
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de tracción - compuesto con no tejido. ....	52
Tabla 3.7. Resultados del ensayo de tracción - compuesto con tejido. ....	53
Tabla 3.8. Resumen de resultados del ensayo de tracción por infusión al vacío.....	55
Tabla 3.9. Modos de falla de probetas ensayadas a tracción.....	59
Tabla 3.10. Resultados del ensayo de flexión - resina. ....	60
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de flexión - compuesto con no tejido.....	61
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de flexión – resina. ....	61



Tabla 3.13. Resultados del ensayo de flexión - compuesto con tejido. ....	62
Tabla 3.14. Resumen de resultados del ensayo de flexión por infusión al vacío. ....	64
Tabla 3.15. Modos de falla de probetas ensayadas a flexión. ....	70
Tabla 3.16. Resultados del ensayo de impacto. ....	70

## RESUMEN

El presente trabajo detalla el procedimiento para la obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido y no tejido de fibra de cabuya mediante infusión al vacío y la comparación de resultados con los provenientes de un estudio pasado que empleó estratificación. Se elaboraron probetas con las dimensiones especificadas en las normas para los ensayos de tracción (ASTM D3093/D3039M - 17), flexión (ASTM D7264/D7264M – 15) e impacto (ASTM D5628). En los compuestos se usaron proporciones de aditivos para la preparación de resina y configuraciones de refuerzo que garantizaron propiedades mecánicas óptimas. Obtenidas todas las probetas y posterior a su curado se procedió a su caracterización. Considerando los resultados del ensayo de tracción, se encontró que el compuesto reforzado con no tejido con fracción volumétrica de 0,438 presentó las mejores propiedades mecánicas en comparación a la resina y la configuración con tejido, logrando incrementos del 179,58% y 146,70% de resistencia y módulo, respectivamente. Para el ensayo de flexión, el compuesto con no tejido de fracción volumétrica de 0,423 destaca con incrementos del 87,65% en la resistencia y 283,02% en el módulo. En el ensayo de impacto, la configuración de refuerzo tejido con fracción volumétrica de 0,23 y energía media de falla de 0,67 [J], alcanzó una mejora del 891,14%. Finalmente, empleando el proceso de infusión al vacío se determinó que la ausencia de aire en el sistema permite incorporar mayor cantidad de refuerzo por lo que aumentan la fracción volumétrica de los compuestos y sus propiedades mecánicas.

**Palabras clave:** Infusión al vacío, material compuesto, matriz polimérica, propiedades mecánicas, refuerzo natural.

## ABSTRACT

The present work details the procedure for obtaining and characterizing of polyester-matrix composites reinforced with woven and non-woven cabuya fiber by vacuum infusion and the comparison of the results with those from a past study that used stratification. Specimens were prepared with the dimensions specified in the standards for tensile (ASTM D3093/D3039M - 17), flexure (ASTM D7264/D7264M - 15) and impact (ASTM D5628) tests. Resin preparation admixture ratios and reinforcement configurations were used in the composites to ensure optimum mechanical properties. Once all the specimens were obtained and after curing, they were characterized. Considering the results of the tensile test, it was found that the composite reinforced with nonwoven with a volume fraction of 0.438 presented the best mechanical properties compared to the resin and woven configuration, achieving increases of 179.58% and 146.70% in strength and modulus, respectively. For the flexural test, the 0.423 volume fraction nonwoven composite stood out with increases of 87.65% in strength and 283.02% in modulus. In the impact test, the woven reinforcement configuration with volume fraction of 0.23 and mean failure energy of 0.67 [J], achieved an improvement of 891.14%. Finally, using the vacuum infusion process, it was determined that the absence of air in the system allows the incorporation of a greater amount of reinforcement, thus increasing the volume fraction of the composites and their mechanical properties.

**Keywords:** Composite material, mechanical properties, natural reinforcement, polymeric matrix, vacuum infusion.

# **OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON TEJIDOS Y NO TEJIDOS DE FIBRA DE CABUYA MEDIANTE INFUSIÓN AL VACÍO**

## **INTRODUCCIÓN**

Los avances en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica incentivan a usar refuerzos de fibra natural por ser un recurso renovable con resistencia específica relativamente alta, bajo costo y densidad. No obstante, aunque dichas fibras tienen características comparables con las sintéticas empleados en la actualidad, sus propiedades mecánicas son inferiores [1]. Debido a esto y con el propósito de obtener un material compuesto con propiedades mecánicas superiores a sus componentes se utiliza para su obtención infusión al vacío, método proveniente de la constante innovación tecnológica.

Los materiales fibrosos son considerados como una alternativa prometedora para cumplir la función de refuerzo en matrices poliméricas. Si la fibra de refuerzo posee diámetro pequeño, se tendrán menos irregularidades y, consecuentemente, menor probabilidad de fallo.

Las configuraciones de tejido y no tejido de la fibra de cabuya que se caracteriza por ser liviana, resistente a la tracción y al corte [2], son las que determinan las características y propiedades finales del material compuesto.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos dependen de la calidad de la interfaz existente entre la matriz y el refuerzo, siendo aún más importante cuando se utilizan fibras como refuerzo. Al garantizar una adecuada unión, las cargas aplicadas sobre el compuesto serán transmitidas desde la matriz hacia el refuerzo. Por otro lado, si la unión es pobre, el refuerzo no cumpliría su propósito [2]. Además, la interfaz genera un aumento o disminución de las propiedades del material en función del grado de impregnabilidad o mojado que es la capacidad de la matriz en estado líquido para extenderse sobre el refuerzo [2], [3]. Por esta razón, para tener propiedades mecánicas superiores en el laminado se recurre al proceso de fabricación por infusión al vacío, el cual garantiza una interfaz idónea fibra-matriz debido a la reducción de la cantidad de aire atrapado dentro del compuesto.

El diseño del molde y armado del sistema de infusión se adecúa a la geometría y las variaciones en las dimensiones de las distintas probetas, por esta razón, se puede colocar el refuerzo de una manera adecuada. El laminado se compacta cuando se produce vacío logrando mejorar la interfaz del compuesto.

Los materiales compuestos obtenidos se caracterizaron mediante los ensayos de tracción, flexión e impacto bajo las normas ASTM correspondientes para poder cuantificar sus propiedades mecánicas. Así, fue posible comparar los resultados de los compuestos con los de la matriz.

## **Objetivo general**

Obtener y caracterizar materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido y no tejidos de fibra de cabuya mediante infusión al vacío.

## **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un sistema de infusión al vacío para la elaboración de materiales compuestos.
- Obtener probetas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con tejidos y no tejidos de fibra de cabuya.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.
- Comparar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos obtenidos mediante infusión al vacío con las de materiales compuestos provenientes del proceso de estratificación.

## **Alcance**

En el presente proyecto se obtuvieron materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra tejida y no tejida de cabuya mediante el proceso de infusión al vacío. Se armó un sistema de vacío que garantizó la consecución de probetas que cumplan las dimensiones especificadas en las normas para los ensayos de tracción, flexión e impacto para su correspondiente caracterización.

Se analizó los resultados obtenidos para determinar si se logró mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos frente a la resina. Por último, se comparó los resultados de los materiales compuestos obtenidos mediante infusión al vacío con sus similares de estratificación.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Fibras naturales**

La contaminación ambiental debido al uso de combustibles fósiles, el incremento de regulaciones y la sensibilización ambiental han despertado un mayor interés por el uso de materiales amigables con el medio ambiente [1]. Las fibras naturales son consideradas un material ecológico con propiedades mecánicas comparables a las fibras sintéticas, por lo que han captado la atención de investigadores e inversionistas para ser utilizadas como material de refuerzo en matrices poliméricas debido a sus ventajas sobre las fibras sintéticas como: bajo costo, baja densidad, naturaleza menos abrasiva, biodegradabilidad, uso con menor riesgo para la salud, entre otras [1], [4]. No obstante, las fibras naturales al ser filamentos lignocelulósicos formados por células delgadas y largas de esclerénquima poseen también varias desventajas sobre las fibras sintéticas como por ejemplo: absorción de humedad del entorno, baja humectabilidad y estabilidad térmica y baja unión matriz/refuerzo [1], [2]. La escasa unión entre la fibra y la matriz determina su separación después de un tiempo. Sin embargo, se ha tenido un gran número de casos positivos de estudios realizados referentes al potencial que tienen las fibras naturales para ser utilizadas como refuerzo en materiales compuestos [4].

## **1.2. Fibras naturales de origen vegetal en Ecuador**

En la actualidad la creciente demanda de fibras naturales a nivel mundial presenta una gran oportunidad en el potencial que el territorio ecuatoriano posee en este campo al haberse registrado aproximadamente 25 mil especies de plantas vasculares lo que lo convierte en el país con mayor número de plantas por unidad de área en América Latina [2]. Tan solo 25 especies de plantas son producidas y comercializadas, destacando entre las de mayor demanda internacional las fibras de cabuya, algodón y abacá [2], [5].

### **1.2.1. Fibra de cabuya**

La fibra de cabuya (Figura 1.1) se extrae de las hojas de la planta de cabuya del género *furcraea* originaria de los valles y laderas de los Andes, es una planta destinada a la elaboración de productos textiles, leña, alimento para ganado, entre otras. La cabuya se encuentra en el grupo de las fibras duras, debido a que sus hojas están constituidas de fibrillas cortas y se encuentran unidas con una goma (cemento vegetal) formando ejes fibrosos, llamados también “fibras estructurales”, los cuales proporcionan resistencia, rigidez y aspereza a las hojas [2], [3].



Figura 1.1. Planta y fibra de cabuya.  
(Fuente: [3], [6])

### 1.2.1.1. Propiedades y aplicaciones de la fibra de cabuya

La fibra de cabuya posee varios atributos que la colocan como un producto atractivo al consumidor al tener un agradable color, textura, aspecto y distintas características físicas que permiten incluirla principalmente en el mercado artesanal [2], [6]. Dichas características son indicadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características físicas de la fibra de cabuya.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Longitud</b>	80 a 120 cm
<b>Color</b>	Habano
<b>Brillo</b>	Opaco
<b>Textura</b>	Dura
<b>Absorción de humedad</b>	Baja
<b>Punto de fusión</b>	No se funde
<b>Efecto ante los álcalis</b>	Resistente
<b>Efectos ante los ácidos</b>	Baja
<b>Resistencia a la luz solar</b>	Regular
<b>Efecto de los oxidantes</b>	Variable

(Fuente: [6])

Esta fibra es liviana, resistente a la tracción y al corte y, se requiera una baja energía de procesamiento lo que la convierte en una opción fiable para uso industrial [6]. Sus propiedades mecánicas, junto con la de otras fibras, se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Características mecánicas de algunas fibras naturales y sintéticas.

<b>Fibra</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	<b>Elongación de fractura (%)</b>	<b>Absorción de humedad (%)</b>
Cabuya	1,30	305,15	7,50	4,96	---
Yute	1,30	393,00 – 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	---

(Fuente: [6])

La fibra de cabuya es una buena alternativa para la fabricación de materiales compuestos, tomando en cuenta que la resistencia a la tracción de la resina poliéster oscila entre 40 y 90 MPa [2]. Las propiedades anteriormente indicadas, se complementan con la constitución química de varias fibras naturales mostradas en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Composición química de fibras naturales.

<b>Fibra</b>	<b>Celulosa (% peso)</b>	<b>Hemicelulosa (% peso)</b>	<b>Lignina (% peso)</b>	<b>Pentosas (% peso)</b>
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 – 13,00	---
Ramio	68,00 – 76,00	13,00 – 16,00	0,60 – 0,70	---
Formio	71,30	---	---	---
Lino	71,20	18,00 – 20,00	2,20	---
Cáñamo	70,00 – 75,00	17,00 – 22,00	3,70 – 5,70	---

(Fuente: [6])



De acuerdo con las tendencias comerciales, se han adoptado las fibras de cabuya para elaboración de papel, colchones, tapetes, filtros, jabón, hilo, tapicería, mochilas, cordeles (Figura 1.2). Cada vez es más utilizada para reforzar materiales compuestos de matriz polimérica, en especial, en la industria automotriz [3], [6].



Figura 1.2. Diferentes aplicaciones de la fibra de cabuya.  
(Fuente: [3])

#### 1.2.1.2. Hilo, tejido y no tejido de cabuya

Los materiales fibrosos son la mejor opción para actuar como refuerzo en matrices poliméricas, mientras más fino sea el material, se tendrán menos imperfecciones en el compuesto por lo que se reduce la probabilidad de fallo. La configuración de las fibras dentro de la matriz es un parámetro sumamente importante al momento de obtener las propiedades y características finales del material. Dichas configuraciones pueden tener variaciones en el entrelazado de las fibras y en el tipo de fibra a utilizar, ya sea larga, corta, tejida o no tejida [2]. El proceso de hilatura industrial consiste en:

**Extracción del hilo:** La fibra de cabuya pasa por un proceso de descruce, blanqueo, neutralizado, tinturado, suavizado y secado obteniendo un material de alta calidad para posteriormente ser hilada [3].

**Preparación del material:** Se controla que la fibra posea por lo menos un metro de longitud y no más de 14% de humedad [3].

**Aceitado:** Se vierte una sustancia aceitosa sobre las fibras con el fin de disminuir la fricción entre ellas y de éstas sobre los diferentes elementos [3].

Sacudido: Con ayuda de una máquina provista de un tambor y aletas que giran gracias a un motor, la fibra es peinada y sus impurezas removidas [3].

Cardado y acordonado: Se obtiene una cinta paralela uniforme en longitud y diámetro por medio de teleras con púas de diferente grosor en las cuales la fibra es estirada, peinada y repartida [3].

Hila y retorcido: Por medio de una aleta giratoria la fibra es sometida a torsión, siendo posteriormente embobinada en carretes. Se unen los cabos que comparten el mismo sentido de torsión y son retorcidos en sentido contrario elevando el grosor y resistencia del hilo [3].

Tundido: En este proceso, por medio de cuchillas se elimina por completo las vellosidades del material [3].

Enconado, ovillado, pesaje y empacado: La máquina enconadora envuelve el hilo de cabuya en un ovillo que posteriormente es pesado en una balanza y empacado para su comercialización [3].

Tejido de cabuya (Figura 1.3): Es el entrecruzamiento en diferentes configuraciones de los filamentos fijos (urdimbre) de manera longitudinal, con los filamentos horizontales (trama) [2].



Figura 1.3. Diseño esquemático de un tejido.  
(Fuente: [2])

El tejido plano (Figura 1.4) consiste en filamentos interpuestos en el cual los hilos de trama pasan sobre y debajo de los hilos de urdimbre. Es decir, en la primera columna, los hilos de trama pasan por arriba de los hilos de urdimbre mientras que en la segunda columna los hilos de trama pasan por debajo y así consecutivamente. Dicho tejido, tiene

un mayor número de entrecruzamientos por unidad de área, tiene simetría y presenta tres variaciones: tejido tipo leno, basket y oxford [2].

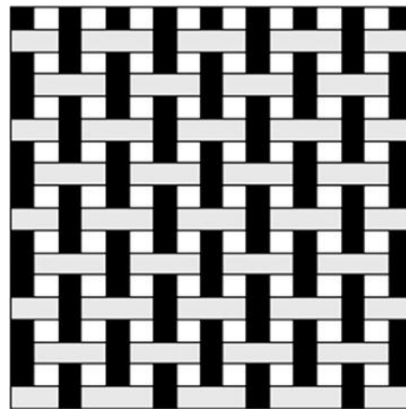


Figura 1.4. Estructura básica de un tejido plano.  
(Fuente: [2])

El tejido tipo basket está conformado por dos o más filamentos de urdimbre y trama por columna y fila respectivamente. El tejido tipo Oxford se conforma de un filamento por fila y dos por columna. El tejido tipo leno se caracteriza por tener la urdimbre muy abierta (menos filamentos en esa dirección) [2]. En la Figura 1.5 se muestran las diferentes variaciones del tejido plano.

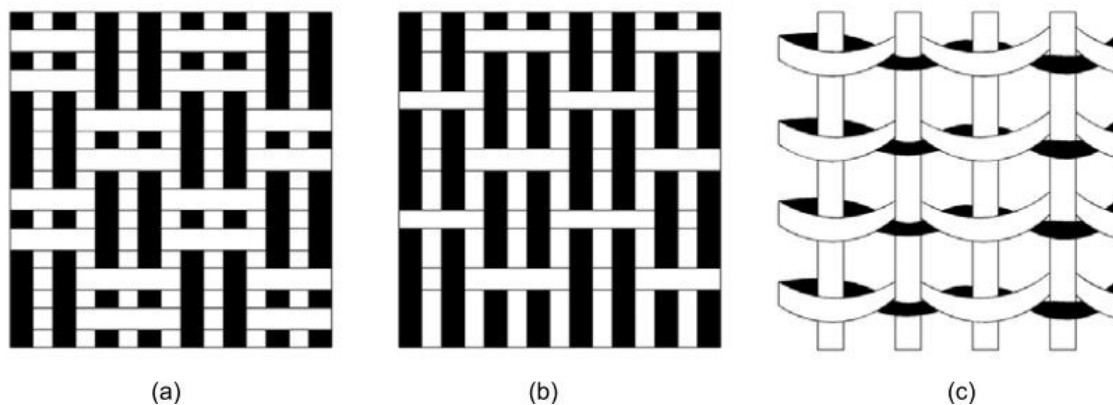


Figura 1.5. (a) Tejido tipo basket, (b) Tejido tipo oxford, (c) Tejido tipo leno.  
(Fuente: [2])

### 1.3. Materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras vegetales

Los materiales compuestos se encuentran conformados por una matriz y al menos un refuerzo de distinta naturaleza, que combinados forman un nuevo material con características diferentes a las que tienen sus componentes individualmente [7]. Dichos materiales reforzados con fibras son clasificados según el tipo de matriz: cerámica, metálica o polimérica. La función para la que el material será destinado dicta que matriz

seleccionar [5]. Los materiales poliméricos reforzados con fibras vegetales son los que tienen dichas fibras introducidas en su matriz, las cuales confieren propiedades de rigidez y resistencia, actuando como elementos de soporte de cargas mecánicas [7]. De esta manera una matriz polimérica conforma un compuesto termoestable. Las matrices termoestables son líquidos viscosos que, producto de una reacción química que modifica su estructura a nivel molecular, endurecen y conforman un sólido que no se puede remodelar o ablandar. Los materiales termoestables son los más utilizados para obtener compuestos, ya que al estar en forma líquida antes del curado son ideales para trabajar con fibras largas [8].

### 1.3.1. Resina poliéster

La resina poliéster se caracteriza por ser aislante térmico y eléctrico, liviano, que con una correcta formulación y selección puede resistir agua, intemperie y ataques químicos. Esta resina brinda a los productos hechos con ella, facilidad de transporte, mantenimiento y montaje [9]. Las propiedades mecánicas de la resina se pueden observar en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de la resina poliéster.

Propiedad	Valor
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 %

(Fuente: [10])

La resina poliéster es un polímero termoestable líquido a temperatura ambiente, el cual comúnmente usa peróxido de metil-etil cetona (MEK) y octoato de cobalto como iniciador y acelerador, respectivamente [10]. Las resinas poliéster más comunes son:

**Poliéster ortoftálico:** Resina que puede ser mezclada con otro tipo de resinas de resistencia superior. Alta resistencia química y mecánica. Es conocida en la fabricación de tejas, sillas, piezas automotrices, figuras artísticas, entre otros [10].

**Poliéster tereftálico:** Esta resina a diferencia de la oftortálica tiene mayor resistencia a ataques químicos, a elevadas temperaturas, poca absorción de agua y gran adaptación de carga mineral [10].

**Poliéster isoftálico:** En comparación con las resinas antes mencionadas, ésta las supera en resistencia química. Es usada especialmente en la fabricación de elementos expuestos a la intemperie [10].

**Poliéster Iso N.P.G:** Es la resina isoftálica modificada con Neopentil glicol (N.G.P), el cual le brinda mayor resistencia química contra el agua, hongos y microorganismos. Es usada comúnmente para construcción de toboganes, tanques de la industria alimentaria, tinas y piscinas [10].

**Poliéster bisfenólico y viniléster:** Estas resinas son aún más resistentes a la temperatura y ataques químicos. Por lo general, son usadas para construcción de tuberías, tanques, chimeneas, torres de enfriamiento y torres lavadoras [10].

El curado de la resina ocurre cuando pasa de estado líquido a sólido gracias a la acción del iniciador, acelerador y catalizador, reaccionando gradualmente a medida que transcurre el tiempo. Los principales factores que se presentan en dicho proceso son: tipo y calidad de la resina, temperatura ambiente, naturaleza y cantidad de los promotores (iniciador y acelerador), humedad relativa, exposición al sol, incremento de la temperatura del proceso y espesor del material [9].

### **1.3.2. Interfaz fibra - matriz**

La interfaz es la encargada de garantizar la unión adecuada entre los materiales asegurando también junto con un sistema efectivo, que las cargas aplicadas hacia el material sean transmitidas debidamente de la matriz hacia el refuerzo. Ésta tiene un rol clave en las propiedades mecánicas y físicas que llegan a tener los materiales compuestos, ya que las propiedades elásticas de la fibra y matriz son diferentes [11].

El nivel de facilidad con que se desprenden y separan las fibras de la matriz mientras se propaga la rotura, se relaciona de manera directa con la adhesión [11]. Los mecanismos de adhesión más representativos son:

**Adhesión mecánica:** Cuando el grado de mojabilidad y fluidez es alto, se alcanza la difusión del refuerzo y matriz, debido a que ambas superficies son irregulares en su

estado viscoelástico. Junto con una limpieza del refuerzo y control de temperatura del polímero se pretende alcanzar el mejor grado de unión mecánica entre ellas [8].

**Atracción electrostática:** Estas fuerzas surgen debido a una posible carga eléctrica entre la matriz y el refuerzo. La densidad de carga iónica es la que dicta la fuerza en la interfaz. La atracción electrostática puede favorecer al proceso de difusión de las fibras en la matriz [8].

**Interdifusión:** El número de moléculas involucradas y el grado de enmarañamiento molecular dictará la fuerza de unión que el polímero y la fibra tendrán. Esta puede ser estimulada con agentes disolventes y plastificantes, dependiendo de los constituyentes y del grado de difusión de concentración molecular que éstos tengan [8].

**Enlace químico:** El tipo y número de enlaces están directamente relacionados con la fuerza de unión entre fibra y matriz. Los enlaces químicos se forman entre un grupo químico compatible de la fibra y otro de la matriz [8].

La interfaz entre la matriz y refuerzo es afectada por las grasas y ceras que contienen las fibras vegetales, como también el carácter hidrofílico de las mismas. Dicha situación hace que las investigaciones se concentren en mejorar la unión y compatibilidad fibra-matriz con el fin de obtener el mayor provecho de los elementos que conforman el material compuesto [8].

### **1.3.3. Orientación y cantidad fibra - matriz**

La orientación, cantidad y distribución de las fibras tienen gran influencia en las propiedades de los materiales compuestos. En relación con la alineación de la fibra hay dos posibilidades: alineación al azar y alineación paralela en dirección al eje longitudinal de las fibras (Figura 1.6). Existen distintas variaciones en la colocación del refuerzo pudiendo ser tejidos y no tejidos colocados de manera diferente [2]. Al tener fibras largas unidireccionales paralelas a la dirección del esfuerzo se obtienen mejores propiedades que con otras configuraciones. Sin embargo, cuando la carga es perpendicular a la dirección de las fibras el compuesto reduce su eficiencia, estos materiales compuestos son conocidos como anisotrópicos. Cuando las fibras están orientadas al azar, aun cuando el refuerzo tenga baja eficiencia, proveen al material de las mismas propiedades en cualquier dirección, siendo así un material isotrópico con la ventaja de tener un menor costo de fabricación [12].

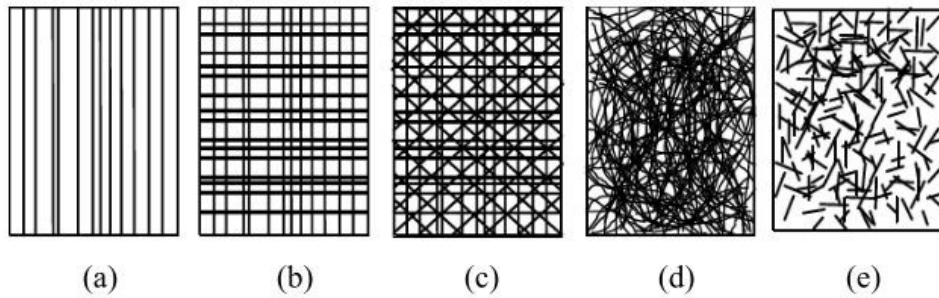


Figura 1.6. Orientación de las fibras: a) Unidireccional; b) Tejido bidireccional; d) Tejido multidireccional; e) Fibras cortas orientadas al azar.  
(Fuente: [5])

## 1.4. Propiedades mecánicas

Es importante el conocimiento de las propiedades mecánicas de materiales con aplicaciones de soporte de carga para compararlas con las especificaciones de diseño y así cumplir con las condiciones de servicio del componente. Además, un correcto empleo de técnicas de procesamiento de materiales depende del conocimiento de sus propiedades [13].

En su mayoría, los materiales compuestos reforzados con fibras poseen mejor resistencia a la tracción, a la flexión, módulo de Young, tenacidad y relación entre peso y resistencia [13].

### 1.4.1. Resistencia a la tracción

También conocida como resistencia máxima a la tracción, es el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación. Resulta de una carga axial que alcanza el valor más alto aplicada a un material antes de su fractura [14].

Hay que considerar que la resistencia a la tracción es una medida de la calidad de la interfaz y puede brindar información sobre la existencia de defectos en el material compuesto productos del proceso de fabricación. Por ejemplo, en el caso de que el material tuviese porosidades o inclusiones, el valor de resistencia máxima puede ser menor al normal [14].

### 1.4.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o módulo de Young está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del material, y es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica [13]. Conforme exista mayor contenido de celulosa en las fibras naturales, más alto será el módulo de elasticidad [15].

### **1.4.3. Resistencia a la flexión**

Es una propiedad de los materiales que describe su resistencia a soportar cargas perpendiculares a su eje. La prueba de flexión consiste en la aplicación de cargas en tres o cuatro puntos. La o las fuerzas aplicadas en los puntos medios en base a los apoyos provocan un esfuerzo resultante de la combinación de esfuerzos de tracción y compresión [13].

### **1.4.4. Tenacidad**

Mide la cantidad de energía que es capaz de absorber un material antes de su fractura. Entre los métodos más simples para determinar esta propiedad se tiene la prueba de impacto. Si se conoce la altura inicial y final del dardo en conjunto con el valor de la masa, se puede determinar la diferencia de energía potencial. Dicha diferencia representa la energía de impacto absorbida por la muestra durante la prueba [13].

En materiales compuestos, la relación entre la energía de impacto y la fracción volumétrica de refuerzo guarda una relación proporcional, es así que, si existe una mayor cantidad de refuerzo más alta será la energía de impacto [15].

## **1.5. Obtención de materiales compuestos mediante infusión al vacío**

El proceso de infusión al vacío se basa en hacer pasar resina a través de un sistema cerrado. El sistema debe ser totalmente hermético y consiste en un molde sobre el que se ubican las fibras y una bolsa de vacío con sus respectivas tomas de entrada y salida para hacer fluir el material que actuará de matriz. La succión se realiza mediante la utilización de una bomba de vacío [16].

Por la utilización de la bolsa de vacío, el control del espesor o el contenido de fibra del laminado es limitado. La disposición de los puntos de succión, así como la relajación de las láminas de fibras son clave para llegar a obtener un laminado de calidad [16].

### **1.5.1. Variables del proceso de infusión al vacío**

Para poder fabricar un material compuesto mediante infusión al vacío se deben considerar los siguientes materiales y equipos:



**Refuerzo:** El tipo de refuerzo empleado es fibra. Los materiales de la fibra pueden ser cerámicos o polímeros como vidrio, boro o carbono. También se pueden emplear fibras naturales como las de cabuya, piña, yute o abacá [2], [17].

**Matriz:** Se usa generalmente en la fabricación de compuestos de matriz termoestable como resinas poliéster, epoxi o fenólicos [17].

**Molde:** Es la base que tiene una geometría determinada y termina dando forma a la pieza final de material compuesto [17].

**Bolsa de vacío:** Debe ser flexible para adaptarse al molde mientras ejerce presión sobre la parte a fabricar [17].

**Tejido pelable:** Es una barrera que no se adhiere entre el laminado y el resto de los materiales empleados en el proceso de infusión [17].

**Film perforado o sangrador:** Se encarga del control de la cantidad de resina haciéndola pasar por perforaciones pequeñas hasta la manta de absorción [17].

**Manta de absorción:** Posibilita que el aire presente dentro de la bolsa de vacío salga libre y absorbe el exceso de resina de la pieza [17].

**Cinta sellante:** Brinda el sello hermético entre la bolsa de vacío y el molde [17].

**Desmoldante:** Evita la adherencia de la pieza al molde después del curado y puede ser de tipo aerosol o cera [17].

**Trampa de resina:** Es un envase en el que se deposita el exceso de resina que sale por succión del sistema de vacío. Su función principal es evitar que llegue resina a la bomba de vacío y termine dañándola [17].

**Bomba de vacío:** Aplica la presión de vacío al sistema para producir la succión de la resina y su paso a través del molde [17].

### **1.5.2. Curado de resinas termoestables**

Las resinas termoestables que adquieren una geometría definitiva y son curados por una reacción química no pueden volver a fundirse y adoptar otra forma. Cuando se calientan se descomponen o degradan [14].

Los poliésteres insaturados lineales están enlazados por radicales libres en forma cruzada con moléculas tipo vinilo como el estireno, ante la presencia de un agente de curado. El peróxido de metil-etil cetona (MEK) es empleado usualmente para el curado a temperatura ambiente de la resina poliéster. Con una pequeña cantidad de octoato de cobalto basta para acelerar la reacción [14].

### **1.5.3. Maquinado de materiales compuestos**

Entre los objetivos de mecanizar un material compuesto están la creación de agujeros o ranuras que no son posibles conseguir durante la fabricación de la pieza. La consecución de las tolerancias determinadas en el componente viene dada en función de los parámetros de diseño o cumplimiento de dimensiones de las normas para ensayos de evaluación de propiedades mecánicas. El mecanizado implica lijar, cortar, taladrar, fresar y otras técnicas similares al mecanizado de metales [18].

Existen ciertos inconvenientes que deben considerarse para el maquinado de materiales compuestos con la finalidad de obtener los resultados que se desean. El mecanizado expone las fibras de refuerzo a químicos, humedad y crea discontinuidad en las mismas afectando al rendimiento de la pieza. La temperatura durante el corte no debe sobrepasar la temperatura de curado para evitar la desintegración en compuestos termoestables [18].

## **1.6. Estudio de caso**

Los resultados de los ensayos de tracción y flexión provenientes del estudio “Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación” [6], son mostrados en las Tabla 1.5 y Tabla 1.6. Dicho material compuesto fue elaborado con configuraciones de fibra tejida y no tejida (longitudinal) utilizando para la matriz las proporciones de aditivos mostrados en la Tabla 2.5 y con un periodo de curado de 15 días a temperatura ambiente. El propósito es realizar una comparación con los resultados del presente trabajo.

Tabla 1.5. Resumen de resultados del ensayo de tracción por estratificación.

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica real</b>	<b>Resistencia última (MPa)</b>	<b>Módulo secante de elasticidad (MPa)</b>	<b>Incremento de resistencia (%)</b>	<b>Incremento del módulo (%)</b>
<b>Resina</b>	0,00	28,67	1492,42	---	---
<b>L.E.15d (No tejido)</b>	0,35	74,32	4025,60	159,23	169,74
<b>A.E.15d (Tejido)</b>	0,35	56,61	4962,94	97,45	232,54

(Fuente: [6])

Tabla 1.6. Resumen de resultados del ensayo de flexión por estratificación.

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica real</b>	<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	<b>Módulo secante a flexión (MPa)</b>	<b>Incremento de resistencia (%)</b>	<b>Incremento del módulo (%)</b>
<b>Resina</b>	0,00	56,62	1867,82	---	---
<b>L.CE.15d (No tejido)</b>	0,36	61,78	2953,48	9,11	58,12
<b>A.CE.15d (Tejido)</b>	0,28	72,50	3736,40	28,05	100,04

(Fuente: [6])

## 2. METODOLOGÍA

Para la elaboración de los laminados bajo el proceso de infusión al vacío fueron empleados varios materiales y equipos los cuales se describen en este capítulo. Se presentan los resultados de la caracterización de la fibra que va a ser usada como refuerzo junto con las proporciones de matriz y sus aditivos. Se abarca el proceso de obtención del material compuesto. Posteriormente, se detallan los procedimientos para conocer las densidades de los componentes individuales del material compuesto y la fracción volumétrica de refuerzo. Finalmente, se muestran los parámetros a considerar previos a la realización de los ensayos y la formulación que permite determinar las propiedades mecánicas de tracción, flexión e impacto.

### 2.1. Materiales y equipos

#### 2.1.1. Materiales usados para la infusión

Durante el proceso de realización del material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de cabuya se utilizó:

**Fibra de cabuya:** Refuerzo del material compuesto (Figura 2.1). Se usó en diferentes configuraciones en forma de tejido y no tejido (fibras orientadas longitudinalmente), cantidades relativas y disposiciones.

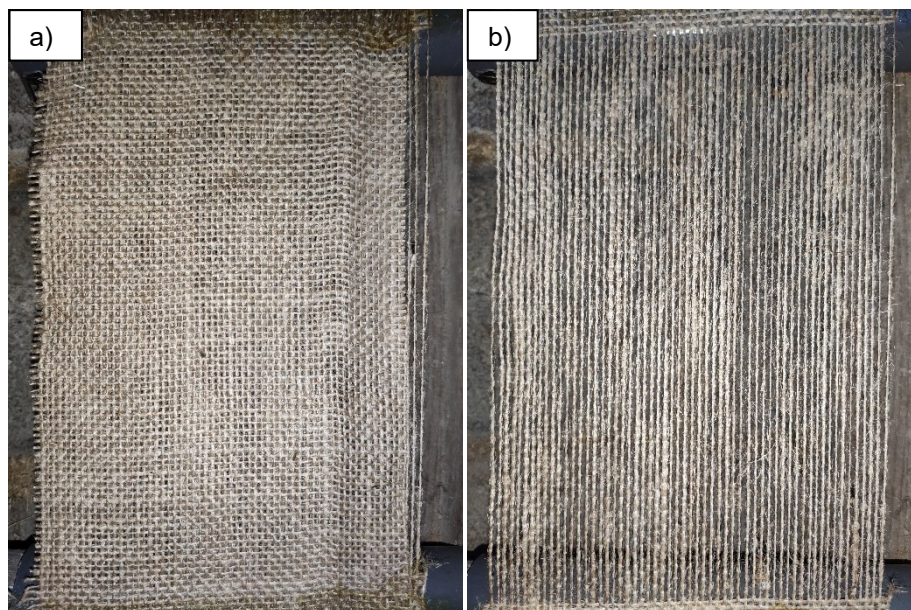


Figura 2.1. Fibra de cabuya: a) Tejido, b) No tejido.  
(Fuente: Propia)

**Resina Poliéster:** Aropol L 65305 es una resina pre-acelerada y tixotrópica la cual es usada como matriz del material compuesto. Su vida útil se reduce con el aumento de temperatura de almacenamiento, por lo que se garantiza una durabilidad de tres meses a una temperatura de 25 °C. Es recomendable alejar el producto de fuentes de calor y evitar que tenga contacto con el aire libre para reducir la probabilidad de pérdida de monómeros y absorción de humedad [19]. Para iniciar la polimerización de la resina se requiere de los siguientes aditivos:

1. Peróxido de metil-etil cetona: Peróxido orgánico fundamental cuando se realiza el curado a temperatura ambiente en unión con un acelerador de cobalto. Éste funciona como iniciador del proceso de curado ya que es una fuente de radicales libres los cuales inician y se consumen mientras ocurre la reacción de polimerización, siendo capaz de variar el tiempo de dicha reacción según el porcentaje a usar en la mezcla [20].
2. Octoato de cobalto: Compuesto capaz de descomponer un peróxido orgánico en radicales libres usado exclusivamente con el peróxido de metil-etil cetona [20].

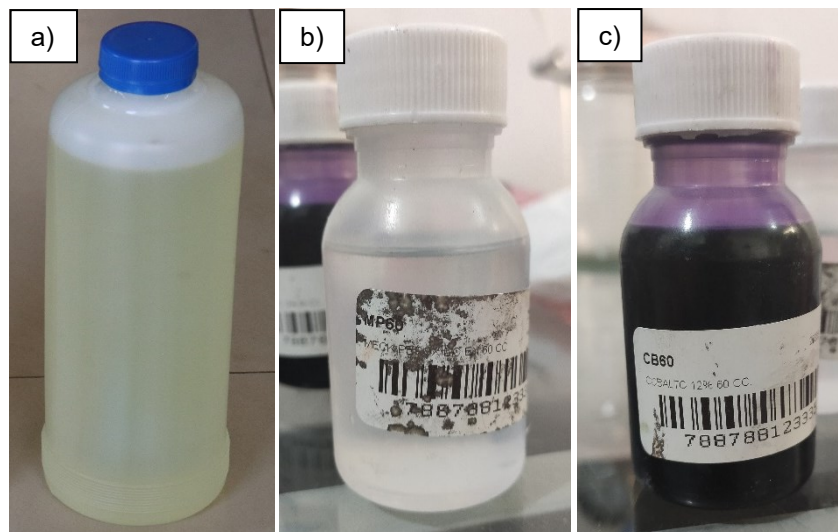


Figura 2.2. a) Resina, b) Peróxido de metil-etil cetona, c) Octoato de cobalto.  
(Fuente: Propia)

3. Monómero de estireno: Reduce la viscosidad de la resina poliéster facilitando la integración al refuerzo [20].



Figura 2.3. Monómero de estireno.  
(Fuente: Propia)

4. Tejido pelable o Peel Ply: Tiene una densidad de  $80 \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]$ , representa la barrera de contacto directo sobre el laminado y los demás materiales requeridos. No se adhiere al laminado y proporciona una superficie curada rugosa que sirve para realizar segundos laminados o para llevar a cabo pegados sin necesidad de lijar [17].

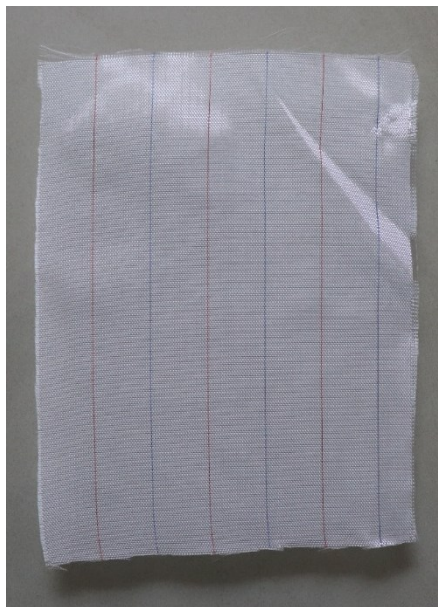


Figura 2.4. Peel Ply – tejido pelable.  
(Fuente: Propia)

5. Film perforado o sangrador: Copolímero de polietileno azul de 25 micras de espesor que se ubica sobre el Peel Ply que tiene por función la salida de gases y exceso de resina [17].



Figura 2.5. Film sangrador.  
(Fuente: Propia)

6. Manta de absorción: Manta de  $120 \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]$  de densidad fabricada con fibras poliéster que ejerce una presión homogénea en la superficie del laminado mientras extrae el exceso de resina. Está ubicada sobre el film sangrador antes de la bolsa de vacío [17].

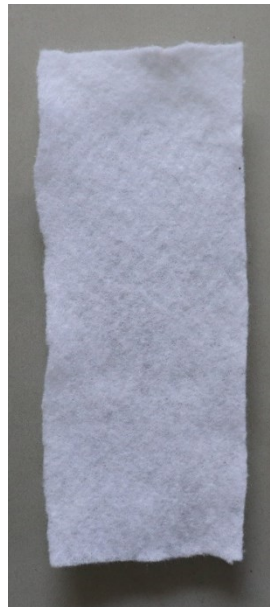


Figura 2.6. Manta de absorción.  
(Fuente: Propia)

7. Líneas de conducto: Es una manguera de plástico con cortes en espiral que tiene como objetivo la evacuación de aire del sistema y la distribución rápida y uniforme de resina para el laminado.





Figura 2.7. Líneas de conducto.  
(Fuente: Propia)

8. Conector para infusión de resina: toma de caucho para la conexión de las mangueras de succión y líneas de conducto por las que se distribuye la resina durante el proceso de infusión.



Figura 2.8. Conectores para infusión de resina.  
(Fuente: Propia)

9. Manguera de succión: Conducto de silicona para el ingreso y salida de resina del sistema de infusión con 5 [mm] y 8 [mm] de diámetro interno y externo, respectivamente.



Figura 2.9. Manguera de succión.  
(Fuente: Propia)



10. Mordazas de paso: Elementos metálicos de manejo manual, que tienen la función de válvulas de paso bloqueando o desbloqueando el paso de aire o resina dentro las mangueras de succión del sistema de infusión al vacío.



Figura 2.10. Mordazas de paso.  
(Fuente: Propia)

11. Bolsa de vacío: Bolsa con alta resistencia mecánica y 75 micras de espesor que se ubica sobre la manta de absorción. Se distribuye en rollos de 1,20 [m] de ancho y se recorta al tamaño del sistema de infusión armado.



Figura 2.11. Bolsa de vacío.  
(Fuente: Propia)

12. Cinta sellante: Cinta de butilo que tiene un excelente rendimiento en el sellado, alta fuerza adhesiva con la bolsa de vacío y facilidad de remoción de la superficie.



Figura 2.12. Cinta de butilo.  
(Fuente: Propia)

13. Aerosol desmoldeante: Lubricante y antiadherente exento de silicona el cual brinda facilidad de desmonte de la pieza de la superficie empleada como base del laminado.



Figura 2.13. Spray desmoldeante.  
(Fuente: Propia)

## 2.1.2. Equipos

En el proceso de infusión al vacío, desde la preparación del sistema hasta la obtención del material compuesto se usaron los siguientes equipos:

**Bomba de vacío:** Bomba de vacío HYVAC 7 con correa de transmisión y potencia de 1/3 [HP]. Cuenta con una velocidad de rotor relativamente lenta con el fin de garantizar un funcionamiento óptimo [21]. Debido al estado íntegro de la bomba solo fue necesario realizar un mantenimiento que consistió en abrir la bomba para eliminar residuos de aceite usado e impurezas, reajuste de los pernos de las carcasas y cambio de aceite para bombas de vacío. Adicionalmente, en la admisión se instaló un conector neumático, racor recto 10, para facilitar el acople y desacople de la manguera de succión. La bomba alcanza una presión máxima de vacío de -22 [in Hg] o -0,75 [bar].

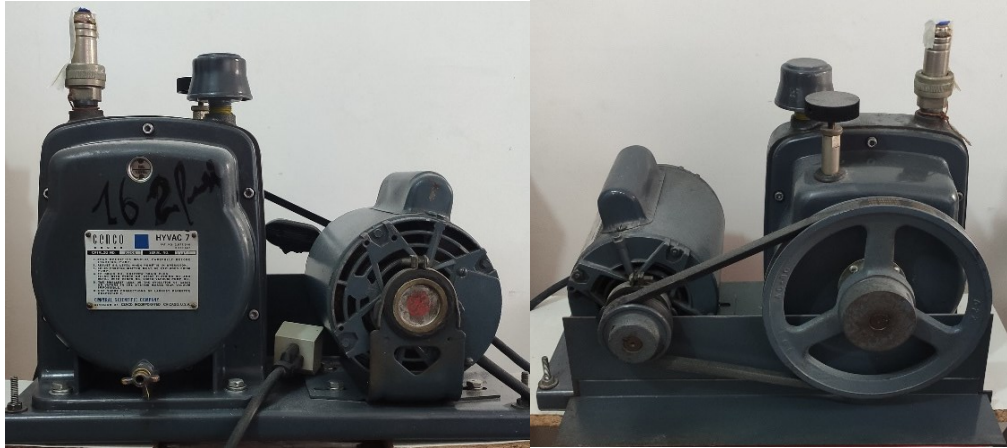


Figura 2.14. Bomba de vacío HYVAC 7.  
(Fuente: Propia)

**Trampa de resina:** Se fabricó una trampa de resina casera (Figura 2.15), formada por un recipiente de vidrio de 500 [ml], una tapa de acrílico de 2 [mm] de espesor la cual lleva un vacuómetro con rango de -1 a 1 [bar] y precisión de 0,5 [bar]. La manguera de succión azul, que va conectada directamente a la bomba, tiene un diámetro exterior de 10 [mm] y uno interior de 6,5 [mm]. La manguera transparente que va hacia el sistema de infusión se ajusta a la trampa mediante un prensaestopa SKINTOP M20x1,5 (Figura 2.15 b)). Para el sello hermético de la trampa de resina se usó una mezcla de silicona RTV con maicena como empaque.

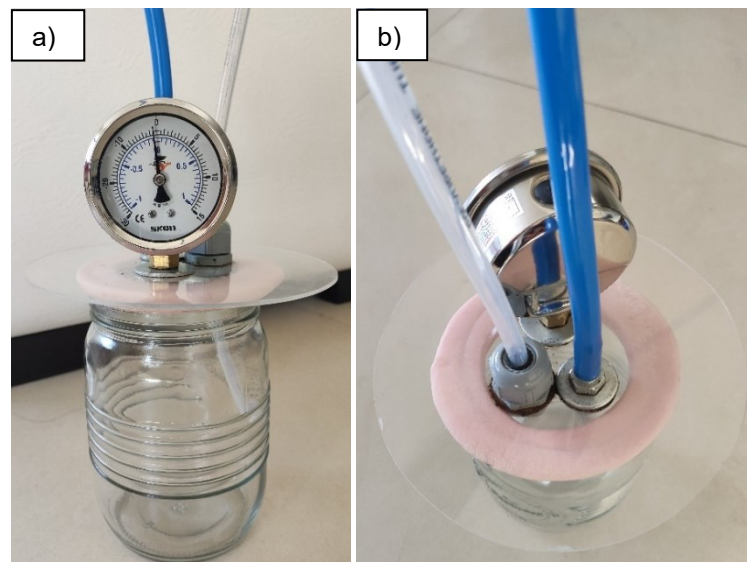


Figura 2.15. Trampa de resina: a) Vista frontal, b) Vista superior.  
(Fuente: Propia)

**Balanza electrónica digital:** Gramera con capacidad máxima de 300 [g] y 0,01 [g] de apreciación, utilizada en la toma de datos tanto de la masa de fibra empleada, así como, del refuerzo en las distintas probetas.



Figura 2.16. Balanza electrónica digital.  
(Fuente: Propia)

**Mesa de vidrio templado:** Base sobre la que se arma el sistema. Brinda facilidad en el desmolde del material compuesto.



Figura 2.17. Mesa de vidrio templado.  
(Fuente: Propia)

**Caladora manual, lija:** Herramientas que permitieron obtener las probetas con las dimensiones que establecen las distintas normas.



Figura 2.18. Caladora manual y lija, izquierda y derecha respectivamente.  
(Fuente: Propia)

Una vez obtenidas las probetas normalizadas se emplearon los siguientes equipos para llevar a cabo los distintos ensayos:

**Equipo de tracción y flexión:** Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS de 25 [KN] de capacidad máxima y 0,01 [N] de precisión.



Figura 2.19. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS.  
(Fuente: Propia)

Para la realización del ensayo de tracción se sujetan con mordazas cuneiformes y un extensómetro a las distintas probetas para empezar a aplicar la carga de tracción (Figura 2.20).



Figura 2.20. Mordazas cuneiformes y extensómetro.  
(Fuente: Propia)



En el ensayo de flexión se siguió el procedimiento de tres puntos (Figura 2.21).



Figura 2.21. Procedimiento de tres puntos.  
(Fuente: Propia)

**Equipo de impacto:** Comprobador de impacto variable Elcometer 1615 para evaluar la resistencia al impacto (elongación, agrietamiento o desprendimiento) de las probetas, este equipo usó el método de análisis directo que consiste en dejar caer un punzón hemisférico de 20 [mm] de diámetro y 690 [g] de masa sobre el material compuesto. El punzón es levantado a la altura de ensayo requerida y posteriormente liberado para el impacto [22].

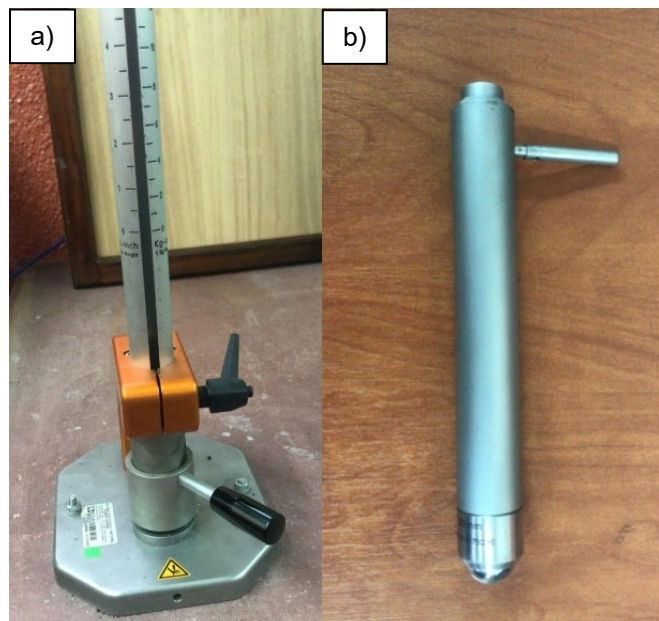


Figura 2.22. a) Equipo Elcometer 1615, b) Dardo.  
(Fuente: Propia)

## 2.2. Caracterización mecánica del tejido y no tejido de cabuya

La caracterización tiene como finalidad determinar el comportamiento mecánico del refuerzo utilizado tanto en la configuración en la que se usó el refuerzo tejido como el no tejido. De esta manera se pueden comparar los resultados no solo con los resultados teóricos sino también con los resultados obtenidos en estratificación.

### 2.2.1. No tejido

La caracterización mecánica del no tejido de cabuya se realizó bajo la norma ASTM D2256 que determina las propiedades a tracción del hilo, y consecuentemente la calidad del refuerzo. El ensayo se realizó en el Centro Textil Politécnico según el informe No. CTP-IT-2020-08-15 (ANEXO 1). Los resultados se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la fibra de cabuya.

	<b>Resistencia a la tracción [N]</b>	<b>Elongación a la rotura [%]</b>
Media	136,02	4,84
Desviación estándar	4,03	1,00

(Fuente: Propia)

### 2.2.2. Tejido

La caracterización mecánica del tejido de cabuya se realizó bajo la norma ASTM D5034, que se usa para determinar la resistencia a la tracción y la elongación mediante el procedimiento de agarre. Este procedimiento es una prueba de resistencia/elongación en el cual el centro del ancho de la muestra es agarrada en la prensa definiendo la “resistencia efectiva y la elongación”, que es la resistencia que tienen los hilos en un ancho determinado de ensayo con ayuda de los hilos contiguos [23]. El ensayo se realizó en el Centro Textil Politécnico según el informe No. CTP-IT-2020-08-15 (ANEXO 1). Los resultados se muestran en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del tejido de cabuya.

	<b>Resistencia a la tracción [N]</b>		<b>Elongación a la rotura [%]</b>	
	<b>Longitudinal</b>	<b>Transversal</b>	<b>Longitudinal</b>	<b>Transversal</b>
Media	388,34	381,48	5,12	6,05
Desviación estándar	7,05	7,42	0,28	0.27

(Fuente: Propia)

## 2.3. Armado del sistema para infusión al vacío

Las configuraciones y parámetros usados para la obtención del material compuesto se indican en la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Configuraciones de las probetas para el ensayo de tracción, flexión e impacto.

	Probetas					
	Tracción		Flexión		Impacto	
<b>Refuerzo</b>	Longitudinal	Tejido alternado	Longitudinal	Tejido alternado	Tejido alternado	
<b>Estireno</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
<b>Tiempo de curado <math>T_{amb}</math></b>	15 días	15 días	15 días	15 días	15 días	

(Fuente: Propia)

### 2.3.1. Configuración del refuerzo

Para la elaboración de los laminados bajo el proceso de infusión al vacío se tomó la misma orientación de fibra usada en el proceso de estratificación [6]. En la Tabla 2.4 se indican las diferentes configuraciones usadas.

Tabla 2.4 Configuración del refuerzo usado para las diferentes probetas de ensayo.

Probetas	Configuración del refuerzo					
	Tejido			No tejido		
	No. capas	Masa por capa [g]	Orientación	No. capas longitudinales	Masa por capa [g]	
<b>Tracción</b>	5	1,37	0°/45°/0°/45°/0°	5,50	1,36	
<b>Flexión</b>	8	0,46	0°/45°/0°/45°/0°/45°/0°/45°/0°	8,50	0,45	
<b>Impacto</b>	3	0,79	0°/45°/0°	---	---	

(Fuente: Propia)

Las distintas orientaciones se muestran en la Figura 2.23.



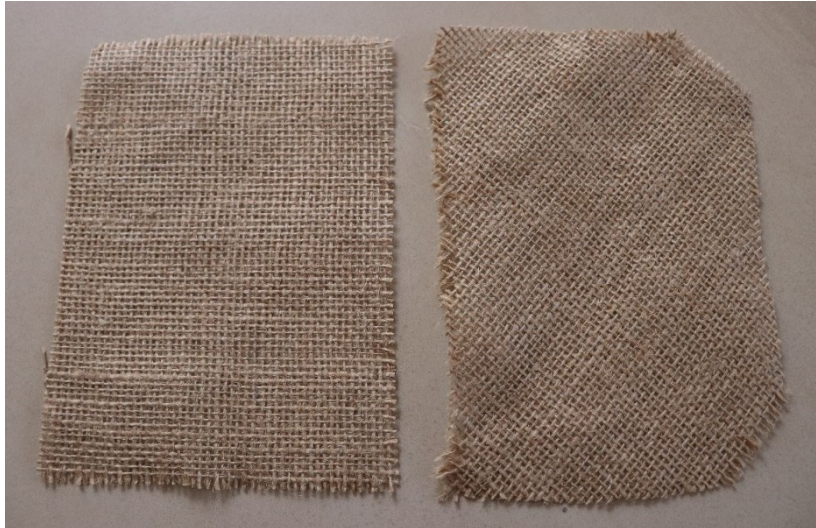


Figura 2.23. Orientación a 0° y 45° en la izquierda y derecha, respectivamente.  
(Fuente: Propia)

### 2.3.2. Armado del sistema de infusión de resina

Como primer paso, se preparó la superficie de vidrio retirando cualquier impureza que pudiera estar presente. El área de trabajo debe ser mayor que las dimensiones del laminado que se va a realizar. Para el sellado del sistema se colocó la cinta butílica formando un contorno (Figura 2.24), con una separación aproximada de 1,5 [cm] hacia fuera de lo que será el área que va a ocupar el laminado.

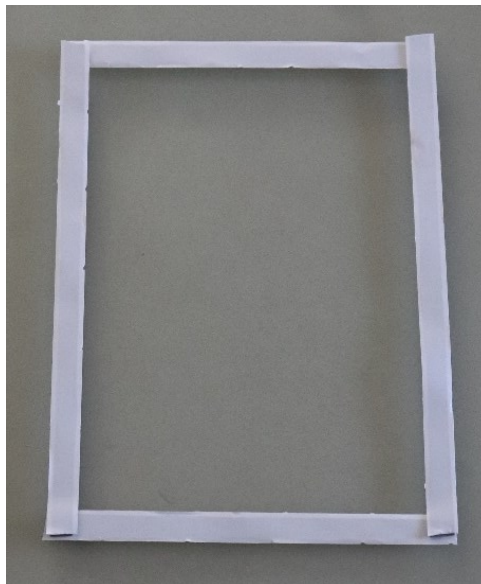


Figura 2.24. Colocación de la cinta butílica alrededor del área del laminado.  
(Fuente: Propia)

Para evitar que la resina y el laminado se adhieran a la superficie de trabajo, se aplicaron dos capas de desmoldante cerciorándose que no queden excesos para dejarlo secar por un par de minutos. Posteriormente, se colocaron las distintas capas de refuerzo

respetando las orientaciones propuestas en la Tabla 2.4. Sobre esto, se ubicaron el peel ply, filme sangrador y la manta de absorción. Estos materiales se sujetaron a la base para evitar algún posible desplazamiento y para que actúen y cubran de forma correcta al refuerzo, deben tener un tamaño aproximado de 1 [cm] mayor por lado. Las distintas etapas descritas se muestran en la Figura 2.25.

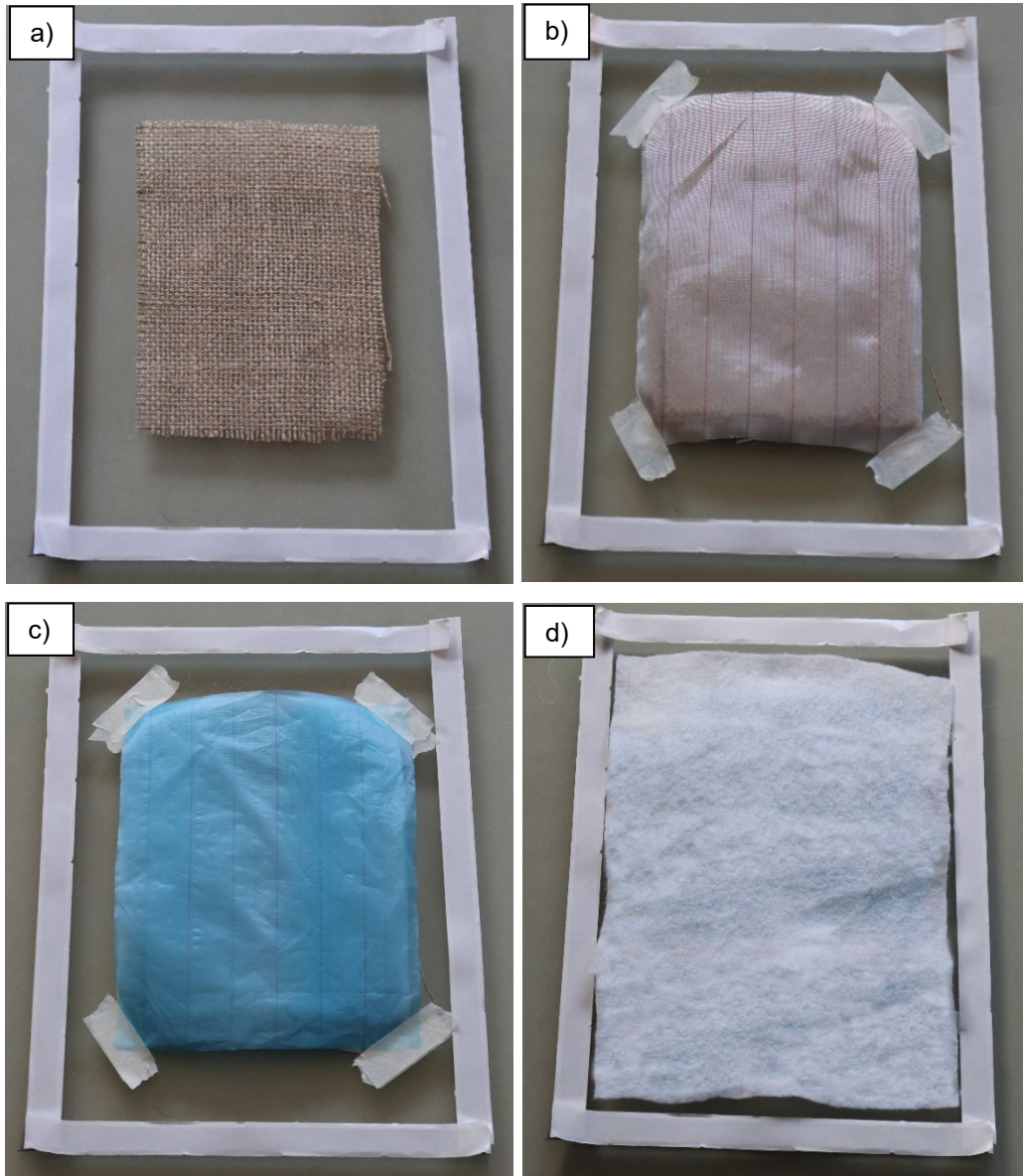


Figura 2.25. Orden de colocación de los materiales: a) Capas de refuerzo, b) Peel Ply, c) Film sangrador, d) Manta de absorción.  
(Fuente: Propia)

La distribución de la resina en el sistema se facilita mediante la utilización de líneas de conducto que poseen cortes en espiral y fueron dispuestas en forma de “U” en la entrada y de forma lineal en la salida (Figura 2.26). Sobre dichos conductos se colocaron conectores de caucho que sirvieron para introducir las mangueras de ingreso y salida de resina.



Figura 2.26. Líneas de conducto y conectores.  
(Fuente: Propia)

A continuación, se pegó la bolsa de vacío sobre la cinta butílica ejerciendo presión con las manos. Para garantizar el ajuste de la bolsa al tamaño de las cintas y evitar posibles fugas se realizaron pliegues (Figura 2.27 a)). Posteriormente, se insertaron las mangueras en los conectores haciendo huecos en la funda, una de ellas va conectada a la trampa de resina y a la bomba de vacío, en tanto que la otra permite el ingreso de la matriz hacia el sistema. Para finalizar, se realizó una prueba de hermeticidad en la que se esperó 15 minutos y se constató que la máxima presión de vacío (-22 [in Hg]) es alcanzada en la bomba y no se producen variaciones en el sistema.

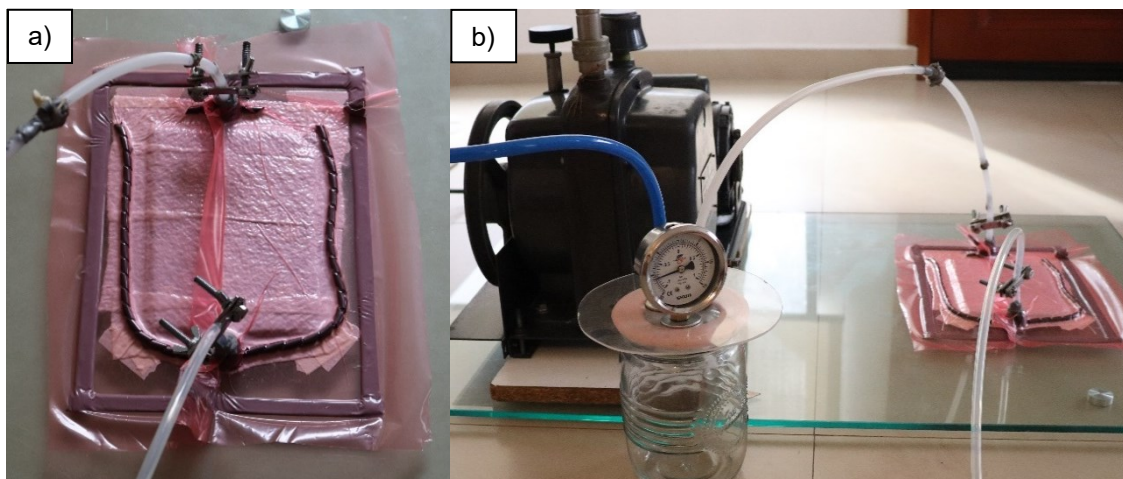


Figura 2.27. a) Bolsa de vacío y mangueras de succión, b) Sistema de infusión al vacío.  
(Fuente: Propia)

La Figura 2.28. muestra esquematizado todo el sistema de infusión con sus conexiones, materiales y equipos.



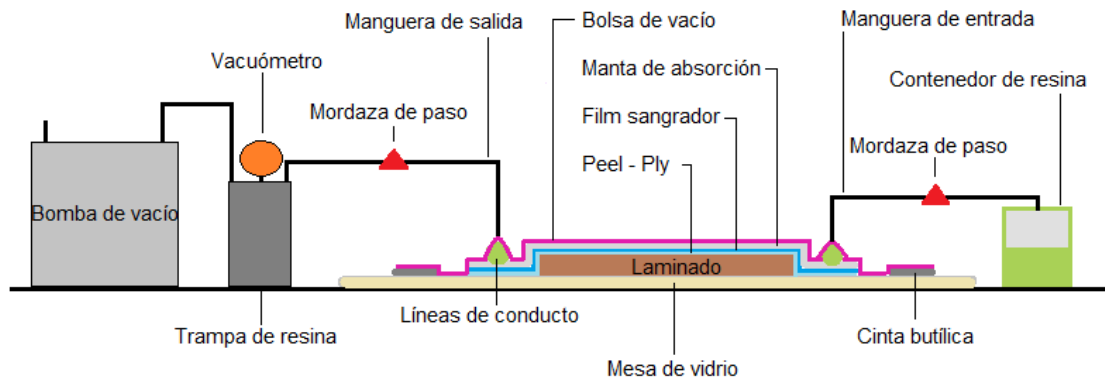


Figura 2.28. Sistema de infusión al vacío.  
(Fuente: Propia)

### 2.3.3. Obtención de los laminados

Para realizar la infusión de resina una vez configurado el sistema, se elaboró la matriz poliéster (Figura 2.29). El proceso consistió en tomar un determinado volumen de resina y en función de éste, obtener y mezclar las proporciones de los porcentajes en masa de los aditivos mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Configuración para la elaboración de la matriz de resina poliéster.

Componente	Proporción (% masa)
Estireno	10,00%
Peróxido de metil-etil cetona	1,00%
Octoato de cobalto	0,50%

(Fuente: [6])



Figura 2.29. Matriz poliéster en estado líquido.  
(Fuente: Propia)

Una vez mezclados los componentes con la resina se tuvo un tiempo de trabajo de aproximadamente 14 minutos el cual fue obtenido experimentalmente. Durante este periodo se garantiza que la mezcla se encuentra en estado líquido y por lo tanto es

posible realizar la infusión. La temperatura de trabajo es la del ambiente (25°C). Para iniciar el proceso, se encendió la bomba de vacío mientras la manguera de entrada estaba sellada con el fin de lograr vacío (Figura 2.30). Hecho esto, la manguera fue introducida en el recipiente que lleva la mezcla y posteriormente se liberó el paso para que empezara a fluir la matriz (Figura 2.31 a)). Cuando la resina alcanzó el conector de la manguera que iba hacia la trampa, se comprobó que la infusión se había realizado con éxito, esperando alrededor de 10 segundos para cerrar el paso de las mangueras. Primero se cerró la manguera por la que fue succionada la matriz para posteriormente cerrar la manguera conectada a la trampa evitando de esta manera que entre aire al sistema y dañe al compuesto (Figura 2.31 b)).

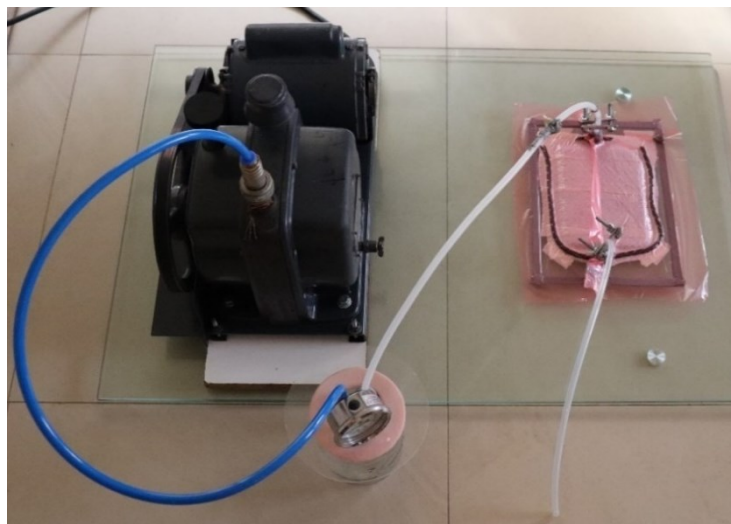


Figura 2.30. Conexiones del sistema de infusión al vacío.  
(Fuente: Propia)

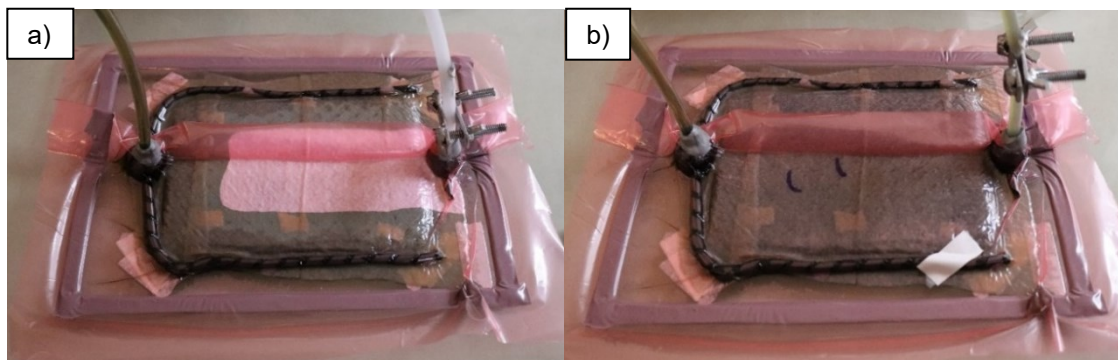


Figura 2.31. a) Inicio de infusión de la resina, b) Fin de infusión.  
(Fuente: Propia)

Luego de dos horas se abrió el sistema y se retiraron todos los materiales y accesorios para retirar al compuesto de la base (Figura 2.32). En este momento comenzó el proceso de curado durante 15 días a temperatura ambiente.

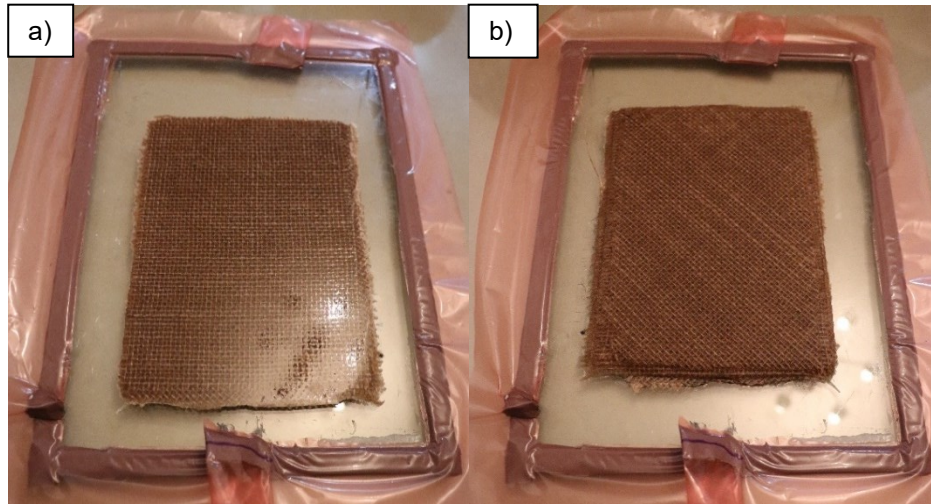


Figura 2.32. Molde de material compuesto con refuerzo tejido: a) Vista frontal, b) Vista posterior.  
(Fuente: Propia)

Se realizaron varios moldes de los cuales se obtuvieron las probetas para los distintos ensayos cuyas características se observan en la Tabla 2.6 y la Figura 2.33.

Tabla 2.6. Dimensiones de los moldes para los ensayos de tracción, flexión e impacto.

No. Moldes	Unidades [cm]				
	Tracción		Flexión		Impacto
	Tejido	No tejido	Tejido	No tejido	
1	10,5 x 27,5	13,5 x 27,5	13 x 17,5	5 x 17	13,5 x 26,5
2	6,5 x 27,5	6 x 27,5	---	7 x 17	13,5 x 26,5
3	---	---	---	3 x 17	13,5 x 26,5
4	---	---	---	---	13,5 x 26,5

(Fuente: Propia)

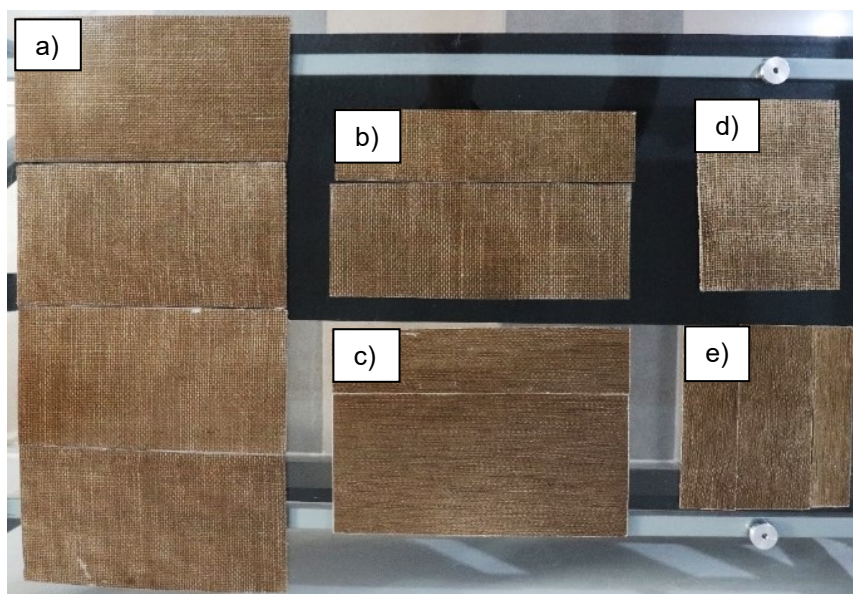


Figura 2.33. Moldes: a) Impacto, b) Tracción tejido, c) Tracción no tejido, d) Flexión tejido, e) Flexión no tejido.  
(Fuente: Propia)



Para tener las probetas con las dimensiones especificadas en las respectivas normas, se procedió a cortarlas de los moldes. Para esto se usó una caladora manual, la cual no generó calor en el material, brindando la seguridad de que no se afectó térmicamente ni se alteraron sus propiedades. Las dimensiones requeridas normalizadas para cada probeta se muestran en la Figura 2.34.

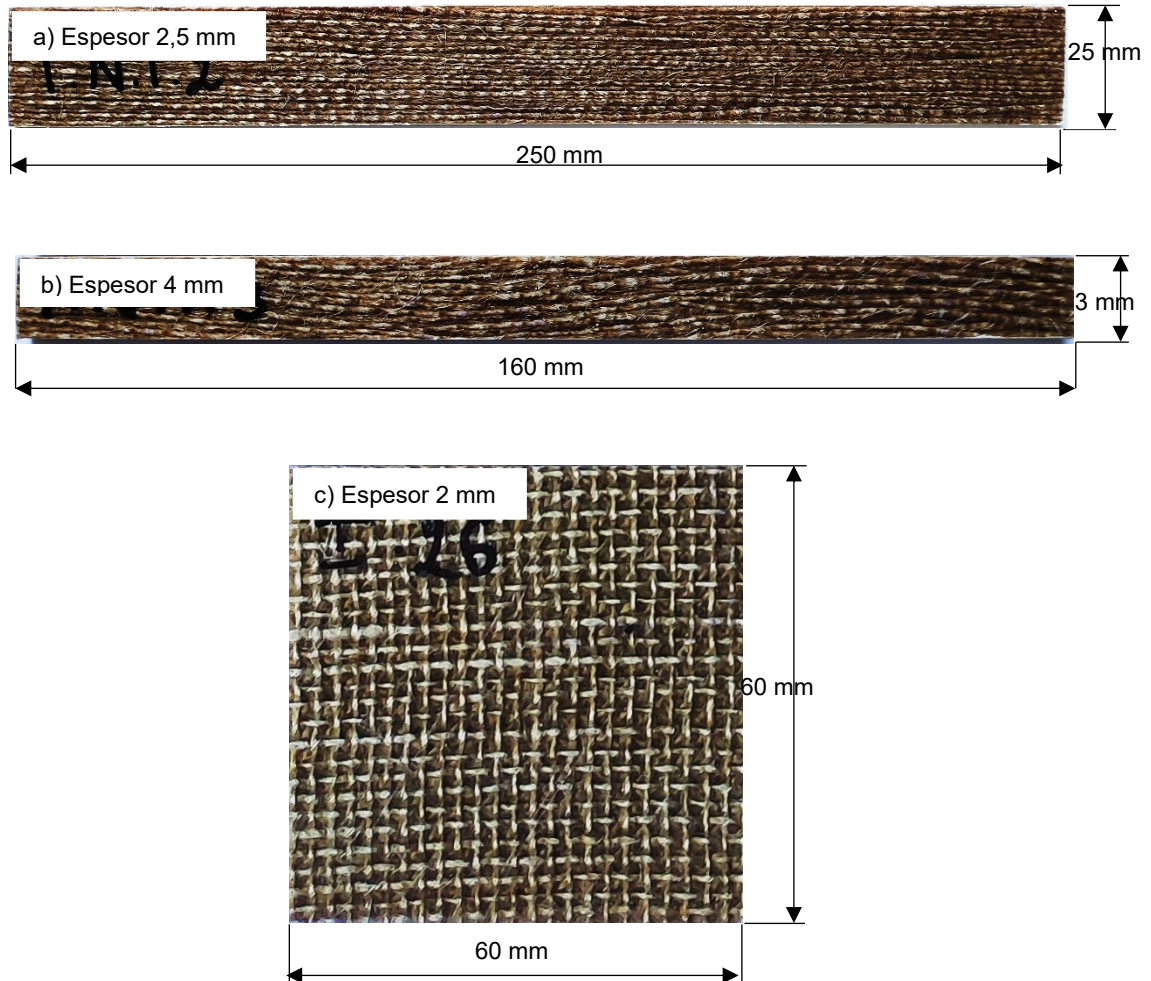


Figura 2.34. Dimensiones de probetas para ensayos de: a) Tracción, b) Flexión, c) Impacto.  
(Fuente: [24], [25], [26])

## 2.4. Densidad y fracción volumétrica de materiales compuestos

En los materiales compuestos son de suma importancia las fracciones volumétricas y sus propiedades. Estas últimas dependen directamente de la fracción individual de cada componente del material final [13]. Por esta razón, para empezar, se propone la ecuación de volumen que relaciona la masa con la densidad [6].

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

v : volumen, [cm<sup>3</sup>]

m : masa, [g]

ρ : densidad,  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$

La fracción volumétrica indica la cantidad empleada de refuerzo y matriz total en un compuesto motivo por la que su sumatoria debe ser igual a 1 [6].

$$V_{\text{refuerzo}} + V_{\text{matriz}} = 1 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

V : fracción volumétrica

Las fracciones del refuerzo y matriz son iguales a [6]:

$$V_{\text{refuerzo}} = \frac{V_{\text{refuerzo}}}{V_{\text{comp}}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$V_{\text{matriz}} = \frac{V_{\text{matriz}}}{V_{\text{comp}}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Considerando el volumen de refuerzo de la (Ec. 2.1) y haciendo un reemplazo en la (Ec. 2.3), se obtiene [6]:

$$V_{\text{refuerzo}} = \frac{m_{\text{refuerzo}}}{\rho_{\text{refuerzo}} * V_{\text{comp}}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Entonces, para calcular la fracción volumétrica de refuerzo se requiere conocer su masa, la cual se mide previamente al armado del sistema de infusión, su densidad y el volumen del compuesto.

#### 2.4.1. Densidad de resina poliéster

Utilizando una proporción de 1,25% en peso de catalizador MEK en 100 [g] de resina AROPOL L 65305, se tiene una densidad igual a 1,078  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$  conforme indica su ficha técnica. Dicho valor no fue tomado en cuenta para el presente estudio por no cumplir



con la proporción de catalizador propuesto anteriormente (Tabla 2.5). En consecuencia, se realizó una muestra de resina con forma cilíndrica (Figura 2.35) y cuyas dimensiones son presentadas en la Tabla 2.7.



Figura 2.35. Probeta cilíndrica de resina.  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.7. Dimensiones de probeta cilíndrica de resina.

No.	Masa [g]	Diámetro [cm]	Espesor [cm]
1		10,36	0,60
2		10,32	0,57
3	60,37	10,34	0,58
4		10,36	0,59
5		10,35	0,58
<b>Promedio</b>	60,37	10,35	0,58

(Fuente: Propia)

El volumen de la muestra fue igual a 49,10 [cm<sup>3</sup>]. Con el valor de masa igual a 60,37 [g] utilizando la (Ec. 2.1) se obtuvo un valor de densidad de la resina de 1,230  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$ .

#### 2.4.2. Densidad del refuerzo en un material compuesto

Para determinar la densidad de refuerzo presente en un compuesto de forma experimental se plantean las siguientes ecuaciones [6]:

$$m_{\text{comp}} = m_{\text{matriz}} + m_{\text{refuerzo}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Despejando la masa de la (Ec. 2.1), se obtiene [6]:

$$\rho_{\text{comp}} * V_{\text{comp}} = \rho_{\text{matriz}} * V_{\text{matriz}} + \rho_{\text{refuerzo}} * V_{\text{refuerzo}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Dividiendo la ecuación anterior para  $v_{comp}$  [6]:

$$\rho_{comp} = \frac{\rho_{matriz} * V_{matriz}}{V_{comp}} + \frac{\rho_{refuerzo} * V_{refuerzo}}{V_{comp}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Considerando la (Ec. 2.3) y (Ec. 2.4), se tiene [6]:

$$\rho_{comp} = \rho_{matriz} * V_{matriz} + \rho_{refuerzo} * V_{refuerzo} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Finalmente, reemplazando la  $V_{matriz}$  de la (Ec. 2.2) en la (Ec. 2.9) y despejando  $\rho_{refuerzo}$  [6]:

$$\rho_{refuerzo} = \frac{\rho_{comp} - \rho_{matriz} * (1 - V_{refuerzo})}{V_{refuerzo}} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

#### 2.4.2.1. Densidad del tejido de cabuya

Para determinar la densidad del tejido se realizó una probeta similar a la empleada para la matriz, de forma cilíndrica (Figura 2.36) con dimensiones iguales a las mostradas en la Tabla 2.8.

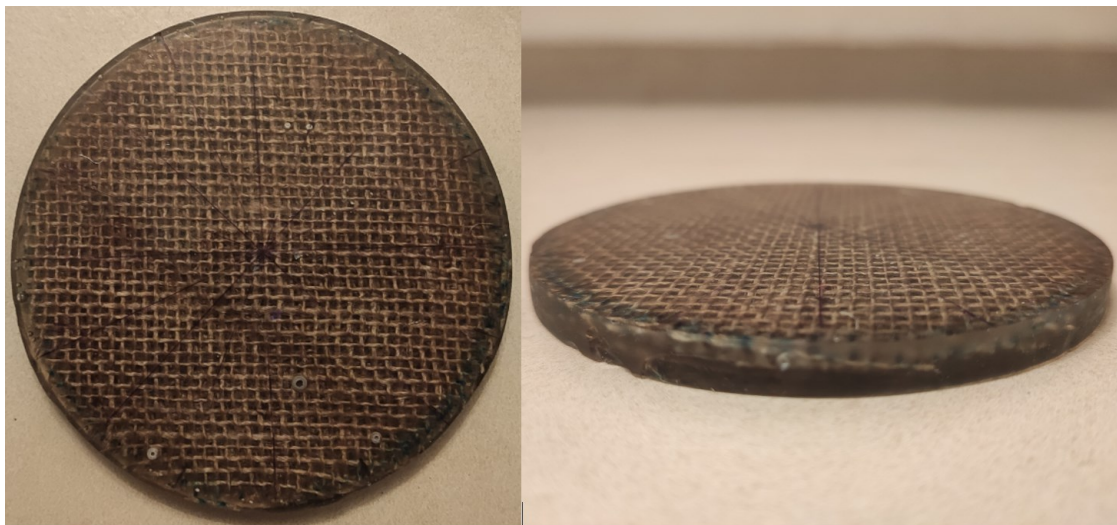


Figura 2.36. Probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo tejido.  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.8. Dimensiones de probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo tejido.

No.	Masa compuesto [g]	Masa refuerzo [g]	Diámetro [cm]	Espesor [cm]
1			10,480	0,690
2			10,470	0,680
3			10,470	0,690
4	74,280	7,320	10,490	0,690
5			10,480	0,700
6			10,500	0,700
7			10,480	0,690
8			10,470	0,690
<b>Promedio</b>	74,280	7,320	10,480	0,691

(Fuente: Propia)

Con el valor de 74,28 [g] de masa y un volumen de 59,63 [cm<sup>3</sup>] del compuesto, usando la (Ec. 2.1) se obtuvo una densidad del compuesto igual a 1,246  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$ .

Para poder determinar la densidad del refuerzo fue necesario realizar un proceso iterativo que terminó cuando el valor inicial de densidad coincidió con el calculado. Para este procedimiento se usaron las (Ec. 2.5) y (Ec. 2.10). Para la primera ecuación, todos los valores son conocidos a excepción de la densidad de refuerzo por lo que para darle solución se iniciaron las iteraciones con el valor teórico de 1,30  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$ . Con este resultado de fracción volumétrica de refuerzo y las densidades ya conocidas de la matriz y del compuesto, se utilizó la (Ec. 2.10) para obtener un nuevo valor de densidad que se tomó como dato inicial para la siguiente iteración.

#### 2.4.2.2. Densidad del no tejido de cabuya

La metodología fue la misma empleada para el cálculo de la densidad de refuerzo tejido. La muestra se observa en la Figura 2.37 y sus dimensiones en la Tabla 2.9.



Figura 2.37. Probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo no tejido.  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.9. Dimensiones de probeta cilíndrica de material compuesto con refuerzo no tejido.

	Masa compuesto [g]	Masa refuerzo [g]	Diámetro [cm]	Espesor [cm]
			10,320	0,750
			10,300	0,750
			10,360	0,770
	79,330	5,110	10,430	0,770
			10,480	0,790
			10,480	0,760
			10,440	0,770
			10,360	0,770
<b>Promedio</b>	79,330	5,110	10,396	0,776

(Fuente: Propia)

Con el valor de 79,33 [g] de masa y un volumen de 65,05 [cm<sup>3</sup>] del compuesto, usando la (Ec. 2.1) se obtuvo una densidad del compuesto igual a 1,220  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$ .

### 2.4.3. Fracción volumétrica de refuerzo

Para el cálculo de la fracción volumétrica de refuerzo utilizada en cada probeta (Tabla 3.3 y Tabla 3.4) fue necesario conocer el volumen del compuesto, como también, la masa y densidad del refuerzo. El volumen del compuesto varía en función de las distintas dimensiones y geometrías propuestas por las normas que rigen los ensayos de tracción, flexión e impacto. Estos valores se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Dimensiones y volumen de probetas de tracción, flexión e impacto.

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

(Fuente: [24]–[26])

## 2.5. Caracterización mecánica de las probetas

El objetivo de caracterizar mecánicamente las probetas es el conocer el comportamiento del material compuesto en diferentes tipos de condiciones y cargas. A continuación, se presentan los parámetros y descripción para el cálculo de las propiedades mecánicas más importantes.

### 2.5.1. Ensayo de tracción

La evaluación para el ensayo de tracción se realizó bajo la norma ASTM D3039/D3039 M-17. Dicha norma aconseja ensayar por lo menos 5 muestras por cada configuración del refuerzo [24] y seguir los parámetros descritos en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Parámetros empleados en el ensayo de tracción.

Parámetro	Valor
<b>Medidas nominales de las probetas</b>	Largo: 250 [mm]
	Ancho: $25 \pm 1\%$ [mm]
	Espesor: $2,5 \pm 4\%$ [mm]
<b>Distancia calibrada para medir la deformación</b>	50 [mm]
<b>Velocidad de ensayo</b>	2 [mm/min]

(Fuente: [24])

Para determinar la resistencia última a la tracción se utilizan las siguientes ecuaciones [24]:

$$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

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

$P^{\max}$  : carga máxima antes de la falla, N [lbf]

$\sigma_i$  : esfuerzo de tracción en el punto i, MPa [psi]

$P_i$  : carga en el punto i, N [lbf]

A : área transversal promedio, mm<sup>2</sup> [in.<sup>2</sup>]

Para conocer la deformación por tracción se utiliza la (Ec. 2.13) [24]:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

$\varepsilon_i$  : deformación por tracción en el punto i,  $\mu_\varepsilon$

$\delta_i$  : desplazamiento del extensómetro en el punto i, mm [in.]

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

Finalmente, para calcular el módulo de elasticidad [24]:

$$E_t = \frac{\Delta_\sigma}{\Delta_\varepsilon} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

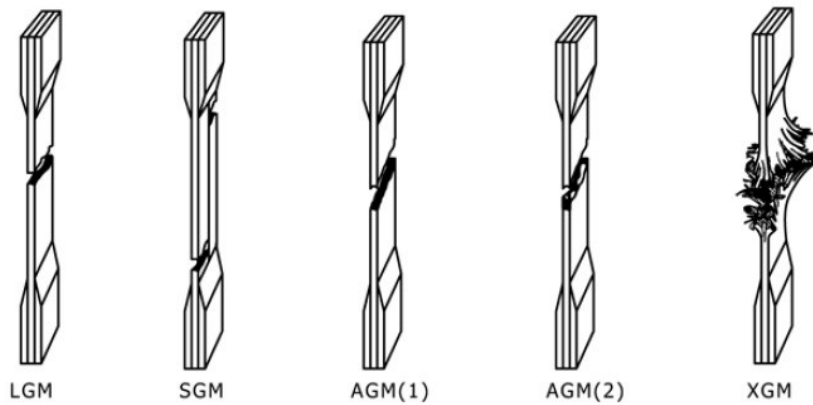
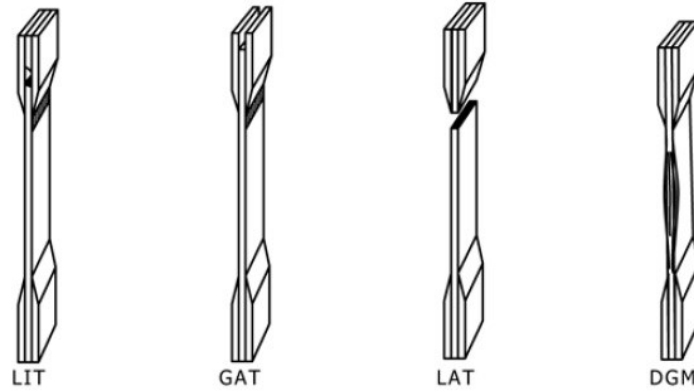
donde:

$E_t$  : módulo de elasticidad a la tracción, MPa [psi]

$\Delta_\sigma$  : diferencia de esfuerzo aplicado entre los dos puntos de deformación, MPa [psi]

$\Delta_\varepsilon$  : diferencia entre los dos puntos de deformación

Para registrar el modo y ubicación de falla para cada muestra se debe utilizar el código de modo de falla de tres partes mostrado en la Figura 2.38.



Primer dígito	
Tipo de falla	Código
Angular	A
Delaminación borde	D
aGarre / lengüeta	G
Lateral	L
Multimodo	M(xyz)
largo. diviSión	S
eXplosivo	X
Otro	O

Segundo dígito	
Zona de falla	Código
dentro agarre/lengüeta	I
en el agarre/lengüeta	A
desde agarre/lengüeta	W
Galga	G
zonas Múltiples	M
Varios	V
Desconocido	U

Tercer dígito	
Ubicación falla	Código
parte inferior	B
arriba	T
izquierda	L
deRecha	R
Medio	M
Varios	V
Desconocido	U

Figura 2.38. Código de falla de tres partes para ensayo de tracción.  
(Fuente: [24])

## 2.5.2. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó bajo la norma ASTM D7264/D7264 M-15 con el procedimiento A que hace relación a un sistema de carga de tres puntos que usa la carga central en una viga simplemente apoyada como se observa en la Figura 2.39. La norma indica que se deben ensayar al menos 5 muestras [25] y seguir los parámetros indicados en la Tabla 2.12.

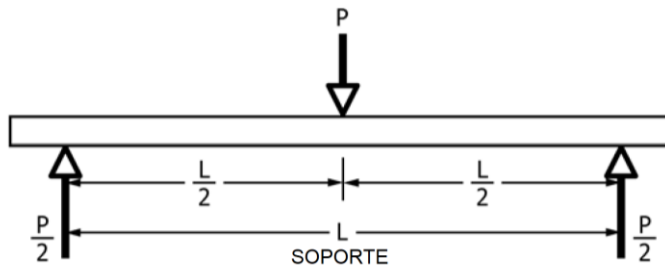


Figura 2.39. Diagrama de cargas - procedimiento A.  
(Fuente: [25])

Tabla 2.12. Parámetros empleados en el ensayo de flexión.

Parámetro	Valor
<b>Medidas nominales de las probetas</b>	Largo: 160 [mm] Ancho: 13 [mm] Espesor: 4 [mm]
<b>Procedimiento A</b>	Flexión en tres puntos
<b>Relación espesor-distancia entre apoyos</b>	1:16
<b>Velocidad de ensayo</b>	1 [mm/min]

(Fuente: [25])

La tracción máxima ocurre en la mitad de la luz de la superficie externa y responde a la ecuación [25]:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

donde:

$\sigma$  : esfuerzo en la superficie exterior en la región del tramo de carga, MPa [psi]

$P$  : fuerza aplicada, N [lbf]

$L$  : distancia entre apoyos, mm [in.]

$b$  : ancho de la viga, mm [in.]

$h$  : espesor de la viga, mm [in.]

La deformación por flexión máxima se produce igualmente en la mitad del tramo de la superficie externa y se calcula de la siguiente manera [25]:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde:



$\varepsilon$  : deformación por tracción en el punto i,  $\mu\varepsilon$

$\delta$  : deflexión en la mitad del tramo, mm [in.]

L : distancia entre apoyos, mm [in.]

h : espesor de la viga, mm [in.]

Finalmente, para calcular el módulo de elasticidad secante por flexión que es la relación entre el esfuerzo y su correspondiente deformación en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación se emplea [25]:

$$E_f^{\text{secante}} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

$E_f^{\text{secante}}$ : módulo de elasticidad secante por flexión, MPa [psi]

m : pendiente de la secante de la curva fuerza-deflexión

Para que la resistencia a flexión de las muestras sea válida se requiere que la falla tenga lugar en una de sus superficies externas. La falla en la superficie de tracción puede ser una grieta y la de la superficie en compresión puede ser un pandeo. El registro del modo, el área y ubicación de la falla para cada muestra se realiza con el código de modo de falla de tres partes (Figura 2.40) [25].

Primer dígito		Segundo dígito		Tercer dígito	
Modo de falla	Código	Zona de falla	Código	Ubicación falla	Código
Tracción	T	en la nariz de carga	A	arriba	T
Compresión	C	entre las narices de carga	B	parte inferior	B
pandeo	B	en la nariz de soporte	S	izquierda	L
corte interlaminar	S	entre la carga y la nariz de apoyo	L	deRecha	R
Multimodo	M(xyz)	desconocido	U	Medio	M
Otro	O			Varios	V
				desconocido	U

Figura 2.40. Código de falla de tres partes para ensayo de flexión.  
(Fuente: [25])

### 2.5.3. Ensayo de impacto

El ensayo de impacto se hizo bajo la norma ASTM D5628. El método consiste en determinar un valor umbral de la energía de falla de impacto requerida para romper las probetas mediante la caída de un dardo con masa constante y altura variable, encontrando la energía en la cual el 50% de muestras falle. La norma sugiere que si se

desconoce la masa media aproximada de falla, se deben usar mínimo 30 muestras para determinar el punto de partida apropiado de la prueba [26]. Los parámetros usados en el ensayo se encuentran en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Parámetros empleados en el ensayo de impacto.

Parámetro	Valor
<b>Medidas nominales de las probetas</b>	Largo: $60 \pm 2$ [mm] Ancho: $60 \pm 2$ [mm] Espesor: $2 \pm 0,1$ [mm]
<b>Altura de lanzamiento del dardo</b>	83 - 113 [mm]
<b>Masa del dardo</b>	690 [g]
<b>Punzón hemisférico</b>	20 [mm] diámetro

(Fuente: [26], Propia)

Empleando el proceso de masa constante, para calcular la altura media de falla se utiliza [26]:

$$h = h_o + d_h \left( \frac{A}{N} \pm 0,5 \right) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

donde:

$h$  : altura media de falla, mm

$d_h$  : incremento de la altura del dardo, mm

$N$  : número total de fallas o no fallas, la que sea menor. Para facilitar la notación, cualquiera que se utilice se denominará eventos.

$h_o$  : altura más baja en la que ocurrió un evento, mm

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

$i$  : 0, 1, 2... k (conteo empieza en  $h_o$ )

$n_i$  : número de eventos que ocurren en  $h_i$

$h_i$  :  $h_o + id_h$

Nota: El signo negativo se emplea cuando los eventos son fallas y el positivo cuando los eventos son no fallas.

Para calcular la energía media de falla se usa [26]:

$$MFE = hwf$$

(Ec. 2.19)

donde:

MFE : energía media de falla, J

h : altura media de falla o altura constante, según corresponda, mm

w : masa media de falla o masa constante, según corresponda, kg

f : factor de conversión a Joules ( $f = 9,80665 \times 10^{-3}$ , si  $h = \text{mm}$  y  $w = \text{kg}$ )

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de demostrar que el material compuesto obtenido mediante infusión al vacío obtuvo mejores propiedades mecánicas frente a los materiales individuales que lo conforman, se presentan y discuten los resultados de la caracterización de los componentes del material compuesto, ensayos de tracción, flexión e impacto. Para el análisis de las propiedades obtenidas en los materiales compuestos se tomó como referencia los resultados de la caracterización de probetas propias de resina poliéster elaboradas específicamente para cada tipo de ensayo. Además, se realizó la comparación de los incrementos en las propiedades con las de otros materiales compuestos elaborados por estratificación.

#### 3.1. Caracterización de componentes del material compuesto

##### 3.1.1. Densidad del tejido de cabuya

Los resultados de la iteración planteada en el punto 2.4.2.1 se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados del proceso iterativo, densidad del refuerzo tejido.

$\rho$ refuerzo inicial	V refuerzo	$\rho$ refuerzo final
<b>1,300</b>	0,094	1,400
<b>1,400</b>	0,088	1,413
<b>1,413</b>	0,087	1,415
<b>1,415</b>	0,087	1,415

(Fuente: Propia)

La densidad del refuerzo tejido fue igual a  $1,415 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$ .

##### 3.1.2. Densidad del no tejido de cabuya

Los resultados de la iteración planteada en el punto 2.4.2.2 se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados del proceso iterativo, densidad del refuerzo no tejido.

$\rho$ refuerzo inicial	V refuerzo	$\rho$ refuerzo final
<b>1,300</b>	0,0604	1,064
<b>1,064</b>	0,0740	1,094
<b>1,094</b>	0,0720	1,090
<b>1,090</b>	0,072	1,091
<b>1,091</b>	0,070	1,091

(Fuente: Propia)

La densidad del refuerzo no tejido fue igual a 1,091  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$ .

### 3.1.3. Fracción volumétrica de refuerzo tejido

Los valores de masa de refuerzo, densidad de refuerzo y volumen de compuesto necesarios para resolver la (Ec. 2.5) de fracción volumétrica de refuerzo y sus resultados se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Fracción volumétrica de refuerzo tejido.

Probeta	m refuerzo [g]	$\rho$ refuerzo [g/cm <sup>3</sup> ]	v compuesto [cm <sup>3</sup> ]	V refuerzo
Tracción	6,88		15,63	0,311
Flexión	3,67	1,415	8,32	0,311
Impacto	2,38		7,20	0,233

(Fuente: Propia)

La variación de fracción volumétrica entre las probetas obtenidas por infusión al vacío dependió del número de capas (masa de refuerzo) utilizadas para cumplir los distintos espesores que dictan las normas.

### 3.1.4. Fracción volumétrica de refuerzo no tejido

Los resultados de fracción volumétrica de refuerzo no tejido utilizados en las distintas muestras se los encuentra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Fracción volumétrica de refuerzo no tejido.

Probeta	m refuerzo [g]	$\rho$ refuerzo [g/cm <sup>3</sup> ]	v compuesto [cm <sup>3</sup> ]	V refuerzo
Tracción	1.356	1,091	15,63	0,438
Flexión	0,451		8,32	0,423

(Fuente: Propia)

No se elaboraron las probetas de impacto debido a la imposibilidad de obtener todas las muestras a la vez. Se necesitaba obtener varios moldes para los que la mezcla de la resina con sus aditivos no iba a ser siempre igual, y las condiciones ambientales durante el proceso de infusión no estaban garantizadas. Por estas razones, la variabilidad de los resultados en las propiedades mecánicas se vería incrementada lo que no permitiría realizar un análisis fiable.

### 3.1.5. Discusión

En la caracterización del refuerzo del material compuesto bajo norma ASTM D2256 se obtuvo la densidad lineal que es una propiedad particular de las fibras textiles que relaciona la masa sobre su longitud y no la masa sobre el volumen [27]. Además,

tomando en cuenta que no se tiene un diámetro constante a lo largo de la fibra natural, se emplearon las fórmulas planteadas en el punto 2.4 que no consideran la geometría del refuerzo [6].

Entonces, aunque se trata del mismo material los resultados difieren con  $1,415 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$  para el tejido y con  $1,091 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$  para el no tejido, ya que la densidad del refuerzo depende de su masa, geometría de la matriz y la del compuesto. Y hay que tener presente que la cantidad de porosidades en las interfaces fibra tejida-matriz y fibra no tejida-matriz no es la misma y no se consideró para el cálculo, tal como plantearon en los estudios [6], [28].

Para las fracciones volumétricas, en la configuración con no tejido fue posible introducir más cantidad de refuerzo debido a que no existen espacios vacíos [28], propios del entrecruzamiento de las fibras como se tiene en el tejido. Por esta razón, se tiene un mejor aprovechamiento del espacio con el no tejido para un mismo volumen de material compuesto.

## **3.2. Ensayos de tracción**

### **3.2.1. Resultados**

Los ensayos de tracción para las probetas de resina, tejido y no tejido fueron realizados en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional empleando la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS y el micrómetro de bola con precisión de  $0,0025 \text{ [mm]}$  ( $0,0001 \text{ [in]}$ ).

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados del ensayo de tracción de las probetas de resina poliéster.

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción - resina.

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TR)</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia última (MPa)</b>	<b>Módulo secante de elasticidad (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>
<b>TR-1 (MI-20-0566)</b>	0,00	2805,00	43,77	5749,81	0,75
<b>TR-2 (MI-20-0567)</b>	0,00	3037,50	45,78	5541,37	0,80
<b>TR-3 (MI-20-0568)</b>	0,00	2081,68	29,39	6285,01	0,44
<b>TR-4 (MI-20-0569)</b>	0,00	2812,03	45,15	6016,01	0,75
<b>TR-5 (MI-20-0570)</b>	0,00	2806,70	42,59	5330,26	0,79
<b>Promedio</b>	0,00	2708,58	41,34	5784,49	0,71
<b>Desviación estándar</b>	0,00	364,29	6,79	377,74	0,15

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados del ensayo de tracción de las probetas de resina poliéster reforzadas con no tejido.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de tracción - compuesto con no tejido.

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TNT)</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia última (MPa)</b>	<b>Módulo secante de elasticidad (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>
<b>TNT-1 (MI-20-0571)</b>	0,432	7357,22	114,52	14340,96	0,77
<b>TNT-2 (MI-20-0572)</b>	0,46	7856,75	121,58	12845,88	0,88
<b>TNT-3 (MI-20-0573)</b>	0,43	7766,78	120,69	14837,54	0,73
<b>TNT-4 (MI-20-0574)</b>	0,432	6972,41	108,01	15785,09	0,64
<b>TNT-5 (MI-20-0575)</b>	0,436	7259,48	113,08	13542,81	0,78
<b>Promedio</b>	0,438	7442,53	115,58	14270,46	0,76
<b>Desviación estándar</b>	0,01	366,92	5,63	1137,93	0,09

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados del ensayo de tracción de las probetas de resina poliéster reforzadas con tejido.

Tabla 3.7. Resultados del ensayo de tracción - compuesto con tejido.

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TT)</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia última (MPa)</b>	<b>Módulo secante de elasticidad (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>
<b>TT-1 (MI-20-0561)</b>	0,32	3120,00	47,90	11839,84	0,59
<b>TT-2 (MI-20-0562)</b>	0,30	3123,33	47,90	14306,24	0,60
<b>TT-3 (MI-20-0563)</b>	0,31	3268,73	50,51	10987,86	0,55
<b>TT-4 (MI-20-0564)</b>	0,30	3200,00	49,76	10702,68	0,55
<b>TT-5 (MI-20-0565)</b>	0,33	3208,26	49,24	12007,77	0,59
<b>Promedio</b>	0,31	3184,06	49,06	11968,88	0,58
<b>Desviación estándar</b>	0,01	62,85	1,15	1418,37	0,02

(Fuente: Propia)

### 3.2.2. Discusión

En la Figura 3.1 se observa que se logró mejorar la resistencia última a la tracción tanto en las probetas de tejido y no tejido en comparación a la de resina, la cual alcanza un valor igual a 41,34 [MPa]. Esto también se evidenció en el estudio de la influencia de fibras naturales y sintéticas para materiales compuestos [29]. La mejora de esta propiedad se debe a que la interfaz fibra-matriz que se obtiene por infusión es óptima ya que permite reducir la cantidad de espacios vacíos. La configuración con refuerzo no tejido con 115,58 [MPa] fue la que obtuvo la mayor resistencia última de todas las probetas, lo que supone un incremento del 179,58%. En contraparte, la configuración con refuerzo tejido con 49,06 [MPa] de resistencia obtuvo un aumento del 18,67%.



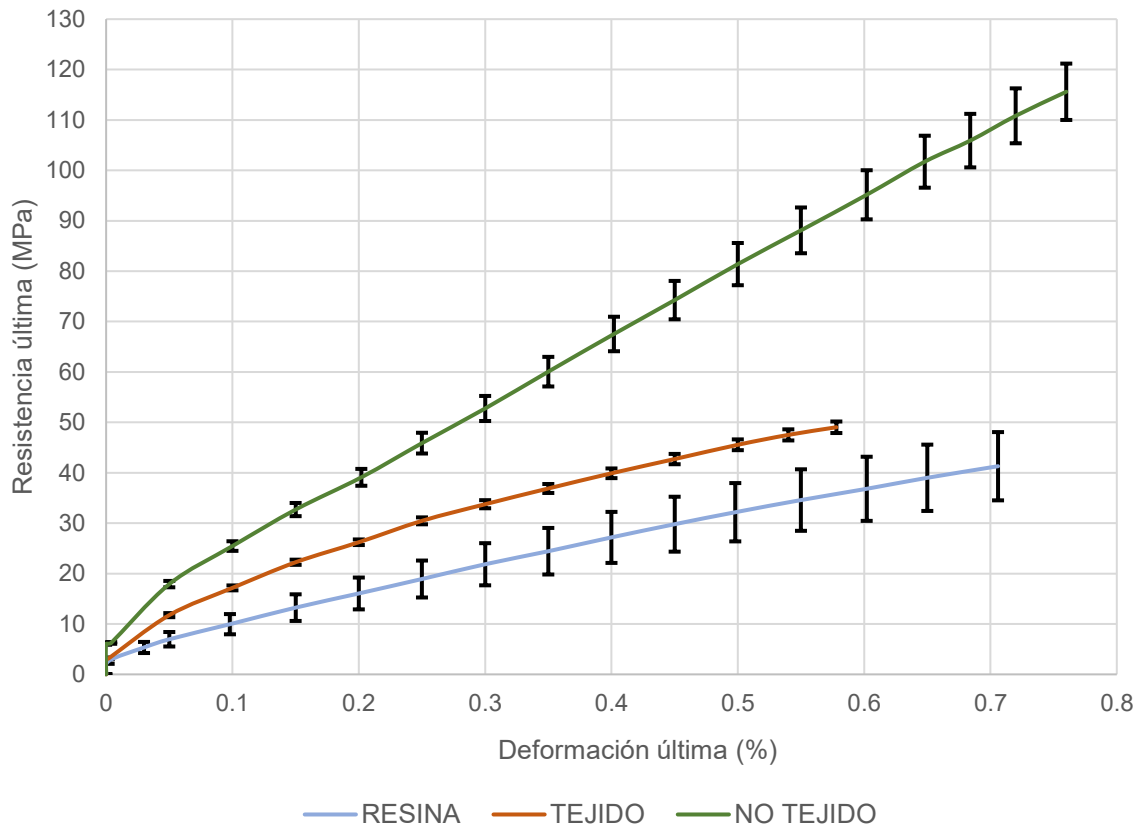


Figura 3.1. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación.  
(Fuente: Propia)

El material compuesto reforzado con no tejido tiene el mayor módulo secante de elasticidad (Figura 3.2) dado que la fuerza de enlace entre átomos es superior a la de la matriz y el compuesto con tejido lo cual también ha sido reportado en el estudio [28]. Adicionalmente, el módulo del compuesto no tejido como resultado de poseer una mayor fracción volumétrica que el compuesto con tejido y gracias a la incorporación de refuerzo con mayor módulo de Young que la resina, incrementa. La resina posee un módulo de elasticidad de 5784,49 [MPa], seguido de los 11968,88 [MPa] del compuesto reforzado con tejido mejorando dicha propiedad en un 106,91%. Por otro lado, destaca la configuración con refuerzo no tejido que llega a 14270,46 [MPa] lo que representa un incremento de 146,70%.

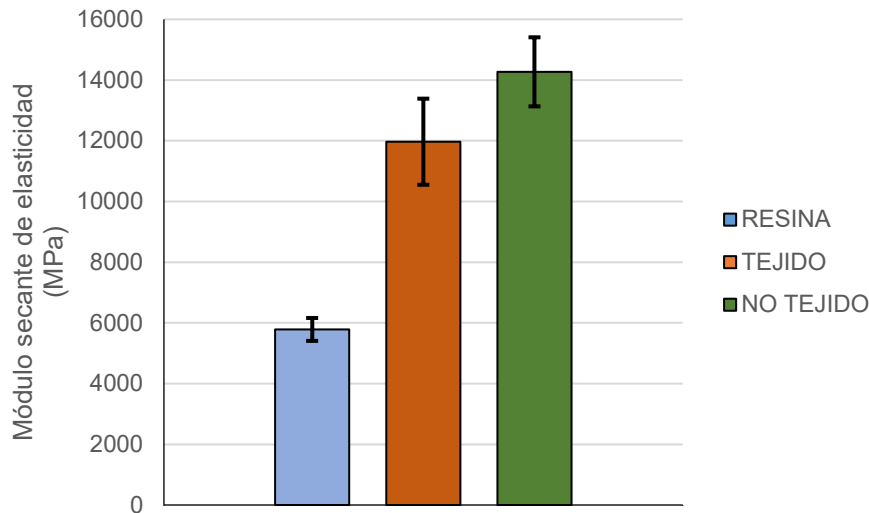


Figura 3.2. Comparación del módulo secante de elasticidad.  
(Fuente: Propia)

Tabla 3.8. Resumen de resultados del ensayo de tracción por infusión al vacío.

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17					
Muestra	Fracción volumétrica real	Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Incremento de resistencia (%)	Incremento del módulo (%)
TR (Resina)	0,00	41,34	5784,49	---	---
TNT (No tejido)	0,44	115,58	14270,46	179,58	146,70
TT (Tejido)	0,31	49,06	11968,88	18,67	106,91

(Fuente: Propia)

Considerando los resultados generales de la Tabla 3.8, el compuesto reforzado con no tejido es el material que presenta las mejores propiedades mecánicas tanto en resistencia a la tracción como en módulo de elasticidad de todas las de la comparativa. Esto se debe a que por poseer una cantidad de refuerzo o fracción volumétrica de 0,44 mayor al 0,31 del material compuesto reforzado con tejido, se ve aumentada la capacidad de soportar más cargas de tracción y se incrementa su rigidez. Esta aseveración coincide con los resultados de las investigaciones que se encuentran en [28]–[31]. Adicionalmente, al contar con fibras largas en su eje longitudinal ubicadas paralelamente a la dirección en la que actúan las cargas durante el ensayo el incremento en la resistencia a la tracción es beneficiado, tal como se puede constatar en [6], [28].

De las Tabla 3.8 y Tabla 1.5 se evidencia que el compuesto reforzado con tejido obtenido mediante estratificación posee mejores incrementos de propiedades que su similar obtenido por infusión al vacío y es que gracias a tener una fracción volumétrica más alta equivalente a 0,35, su capacidad para soportar mayores cargas es superior. Al contrario,

el compuesto reforzado con no tejido obtenido mediante infusión alcanza esta vez la mayor fracción volumétrica, por lo que su incremento de la resistencia a la tracción es mayor, pero tiene un menor incremento del módulo de Young frente al material de estratificación. Esta disconformidad ocurre debido a que para la resina, el valor teórico del módulo de Young propuesto en la literatura del estudio que trata la obtención de materiales compuestos mediante estratificación [6], tiene un valor bajo con relación a lo esperado. Por lo cual, el valor del incremento de dicha propiedad no resulta ser fiable para ser considerada en una comparación.

A continuación, se muestra el antes y el después de las distintas configuraciones de probetas que fueron sometidas al ensayo de tracción (Figura 3.3 - Figura 3.8):

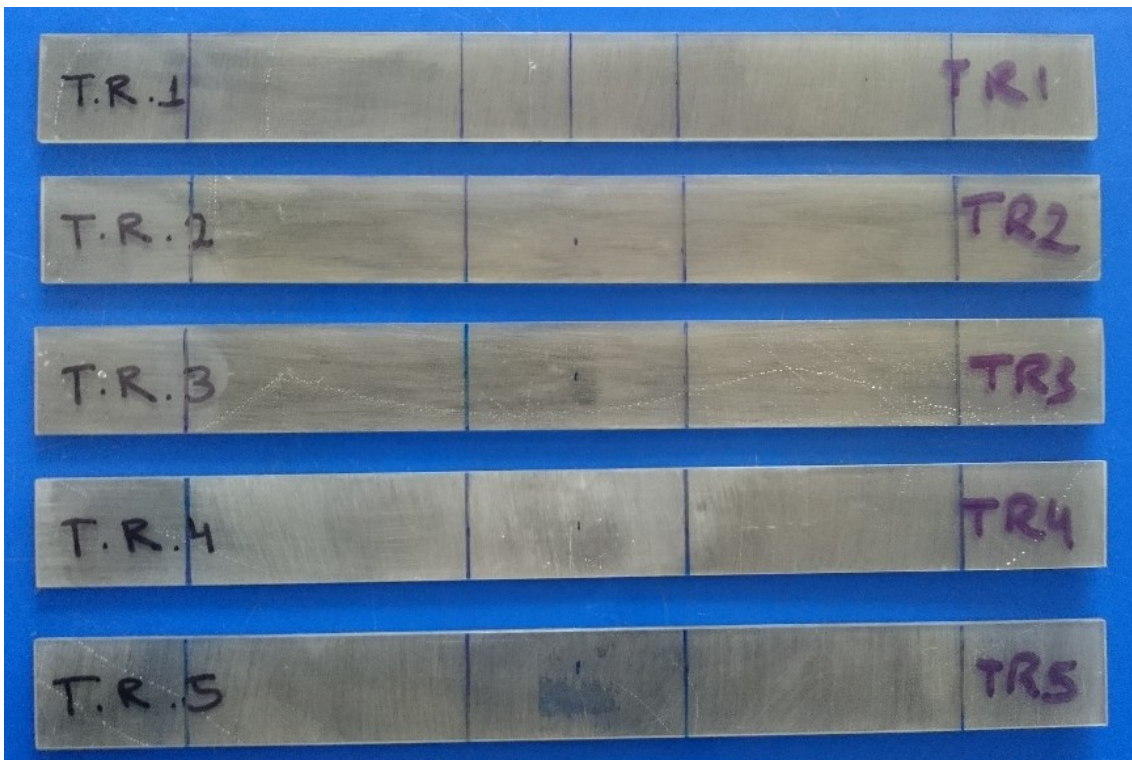


Figura 3.3. Probetas de resina previo al ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)

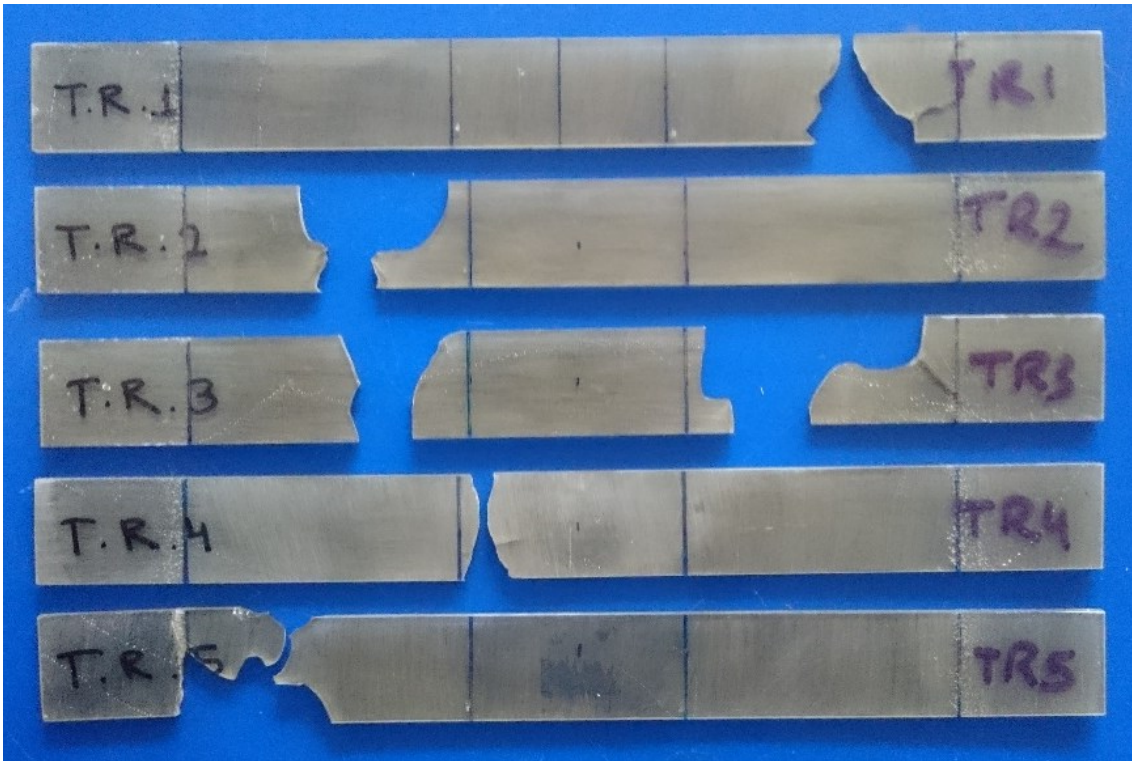


Figura 3.4. Probetas de resina después del ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)



Figura 3.5. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido previo al ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)



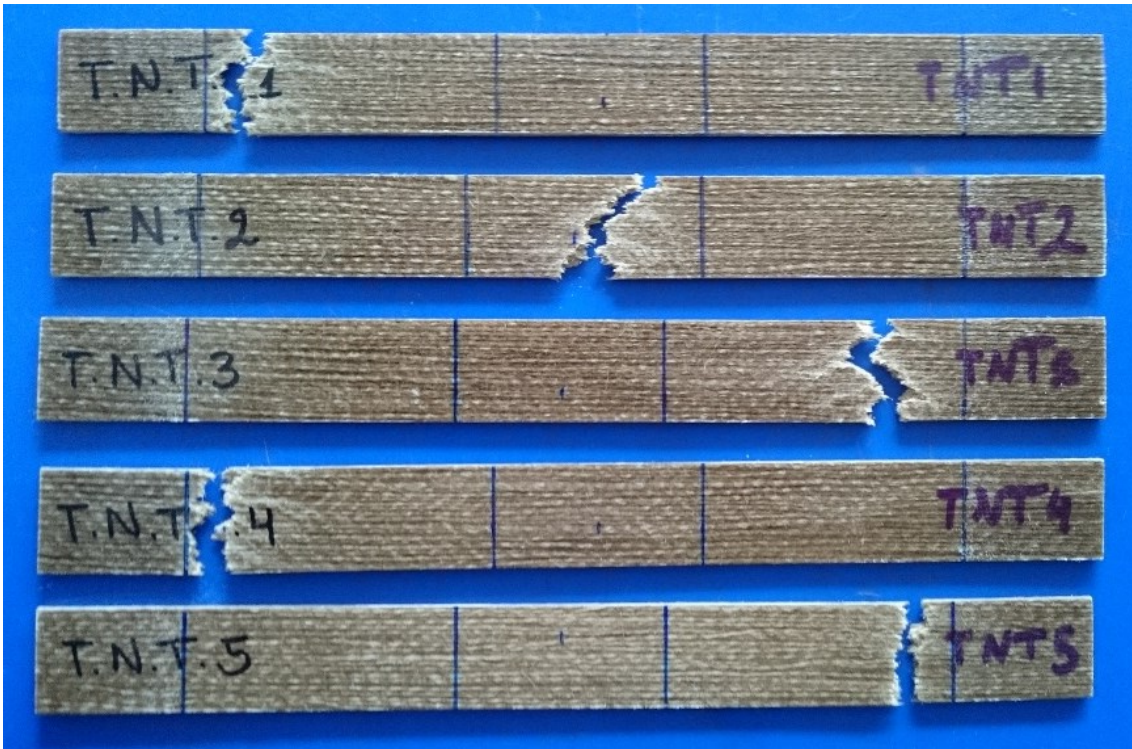


Figura 3.6. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)

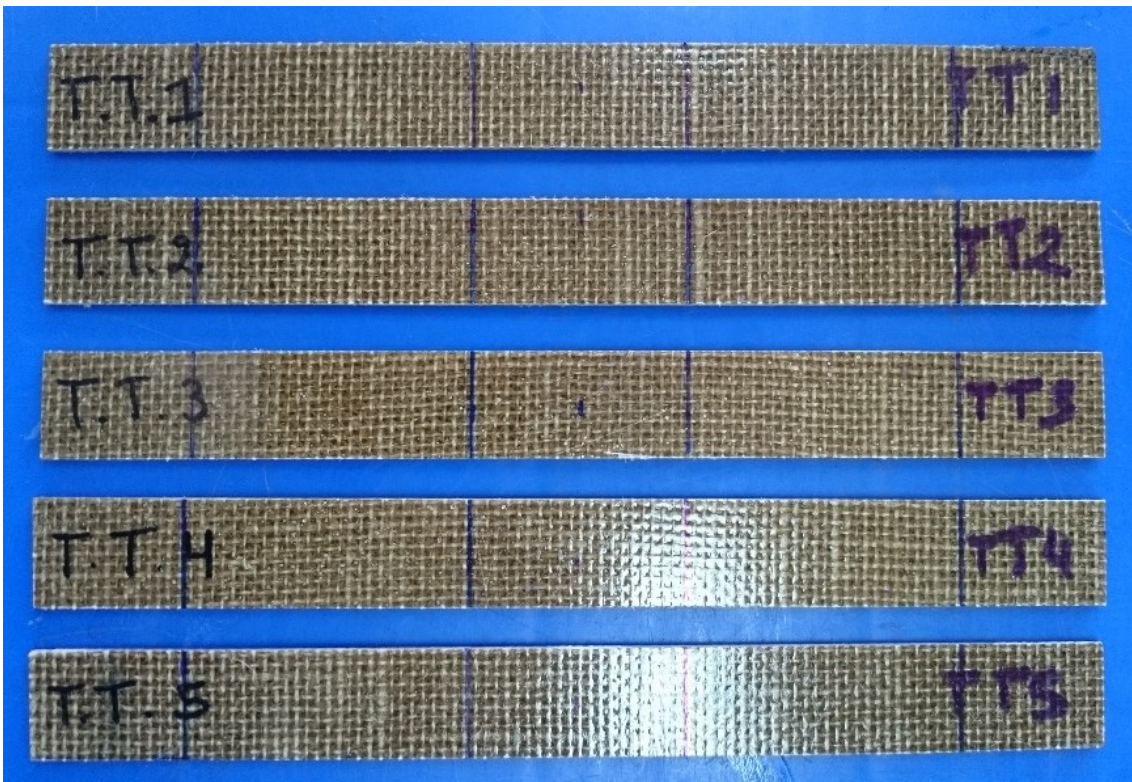


Figura 3.7. Probetas de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)



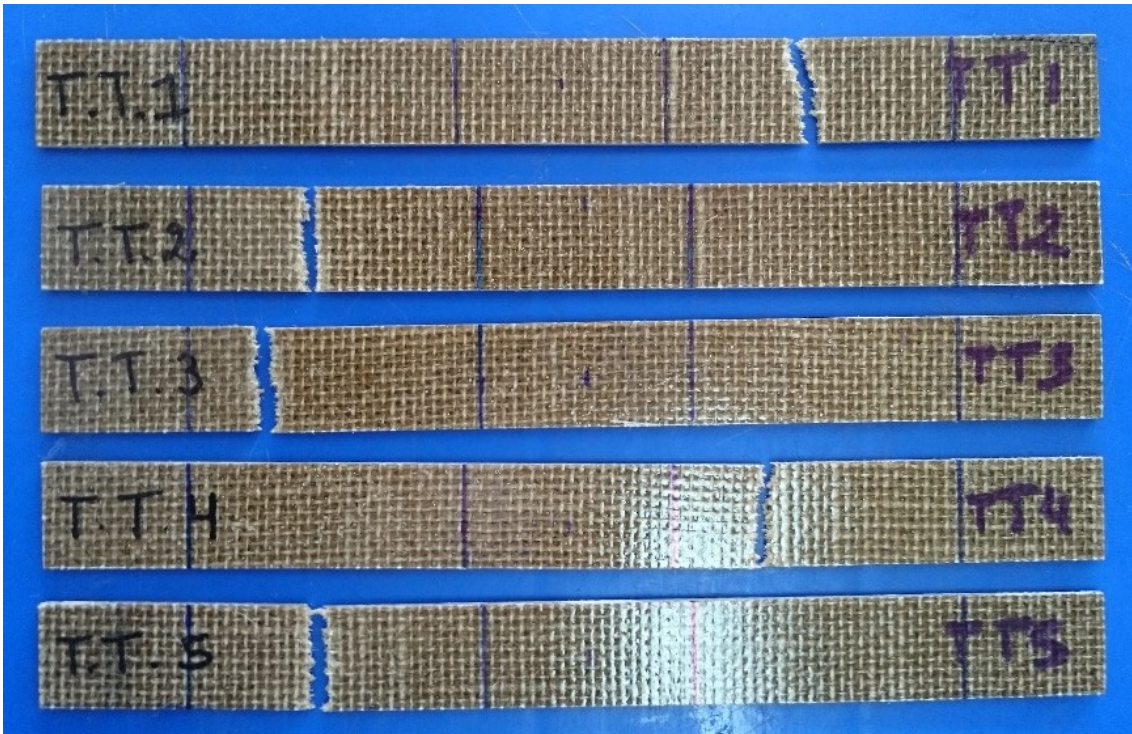


Figura 3.8. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de tracción.  
(Fuente: Propia)

Utilizando el código de tres partes (Figura 2.38), los modos de falla que sufrieron las distintas probetas en el ensayo de tracción se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Modos de falla de probetas ensayadas a tracción.

Códigos de falla - Ensayo de tracción					
Resina		No Tejido		Tejido	
Muestra	Código	Muestra	Código	Muestra	Código
TR-1 (MI-20-0566)	MMT	TNT-1 (MI-20-0571)	MWB	TT-1 (MI-20-0561)	AUT
TR-2 (MI-20-0567)	MMB	TNT-2 (MI-20-0572)	MGM	TT-2 (MI-20-0562)	LWB
TR-3 (MI-20-0568)	MMV	TNT-3 (MI-20-0573)	MWT	TT-3 (MI-20-0563)	LWB
TR-4 (MI-20-0569)	MGM	TNT-4 (MI-20-0574)	GAB	TT-4 (MI-20-0564)	AUT
TR-5 (MI-20-0570)	GMB	TNT-5 (MI-20-0575)	MWT	TT-5 (MI-20-0565)	LWB

(Fuente: Propia)

### 3.3. Ensayos de flexión

#### 3.3.1. Resultados matriz – compuesto no tejido

Los ensayos de flexión para las probetas de resina, tejido y no tejido fueron realizados en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional empleando la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS y el micrómetro de bola con precisión de 0,0025 [mm] (0,0001 [in]).

En la Tabla 3.10 se presentan los resultados del ensayo de flexión de las probetas de resina poliéster que servirán para la comparación con las de material compuesto reforzada con no tejido (Tabla 3.11).

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de flexión - resina.

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR)</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	<b>Módulo secante a flexión (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>	<b>Deformación a la rotura (%)</b>
<b>FR-1 (MI-20-0581)</b>	0,00	165,00	75,36	2800,91	2,94	2,94
<b>FR-2 (MI-20-0582)</b>	0,00	219,17	99,17	2972,41	4,20	4,21
<b>FR-3 (MI-20-0583)</b>	0,00	210,00	97,66	2910,81	4,12	4,12
<b>FR-4 (MI-20-0584)</b>	0,00	202,50	87,57	2876,48	3,35	3,36
<b>FR-5 (MI-20-0585)</b>	0,00	193,33	85,83	3176,27	3,00	3,00
<b>Promedio</b>	0,00	198,00	89,12	2947,38	3,52	3,53
<b>Desviación estándar</b>	0,00	20,76	9,70	142,16	0,60	0,61

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de flexión - compuesto con no tejido.

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FNT)</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	<b>Módulo secante a flexión (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>	<b>Deformación a la rotura (%)</b>
<b>FNT-1 (MI-20-0586)</b>	0,45	287,50	144,32	8203,86	2,96	3,11
<b>FNT-2 (MI-20-0587)</b>	0,40	332,50	178,55	12722,99	2,98	3,03
<b>FNT-3 (MI-20-0588)</b>	0,41	324,68	175,55	11798,94	3,23	3,25
<b>FNT-4 (MI-20-0589)</b>	0,42	306,67	158,07	10149,84	2,76	2,84
<b>FNT-5 (MI-20-0590)</b>	0,44	333,54	179,65	13569,65	2,94	2,98
<b>Promedio</b>	0,42	316,98	167,23	11289,06	2,97	3,04
<b>Desviación estándar</b>	0,02	19,68	15,50	2140,88	0,17	0,15

(Fuente: Propia)

### 3.3.2. Resultados matriz – compuesto tejido

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados del ensayo de flexión de las probetas de resina poliéster que servirán para la comparación con las de material compuesto reforzada con tejido (Tabla 3.13).

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de flexión – resina.

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR2)</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Fracción volumétrica</b>	<b>Carga última (N)</b>	<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	<b>Módulo secante a flexión (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>	<b>Deformación a la rotura (%)</b>
<b>FR2-1 (MI-20-0686)</b>	0,00	178,33	86,47	2594,20	5,11	7,75
<b>FR2-2 (MI-20-0687)</b>	0,00	176,67	82,17	2490,77	5,34	7,94
<b>FR2-3 (MI-20-0688)</b>	0,00	173,33	77,85	2242,97	5,40	8,15
<b>FR2-4 (MI-20-0689)</b>	0,00	173,33	79,98	2286,74	5,18	6,41
<b>FR2-5 (MI-20-0690)</b>	0,00	155,16	73,28	2061,87	5,80	7,98
<b>Promedio</b>	0,00	171,36	79,95	2335,31	5,37	7,65
<b>Desviación estándar</b>	0,00	9,31	4,91	210,27	0,27	0,71

(Fuente: Propia)



Tabla 3.13. Resultados del ensayo de flexión - compuesto con tejido.

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FT)						
Muestra	Fracción volumétrica	Carga última (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
FT-1 (MI-20-0691)	0,31	184,17	104,70	6465,01	3,37	3,62
FT-2 (MI-20-0692)	0,33	196,67	110,25	6749,68	3,59	3,77
FT-3 (MI-20-0693)	0,30	189,86	100,76	6609,11	3,39	3,55
FT-4 (MI-20-0694)	0,30	174,17	93,68	5261,05	3,38	3,67
FT-5 (MI-20-0695)	0,31	191,67	107,48	6469,52	3,73	4,16
<b>Promedio</b>	0,31	187,31	103,37	6310,87	3,49	3,75
<b>Desviación estándar</b>	0,01	8,60	6,46	598,45	0,16	0,24

(Fuente: Propia)

### 3.3.3. Discusión

En la Figura 3.9 se observa que se logró mejorar la resistencia a flexión en las probetas de no tejido con 167,23 [MPa] frente a los 89,12 [MPa] de las probetas de resina. Esto supone un incremento del 87,65%.

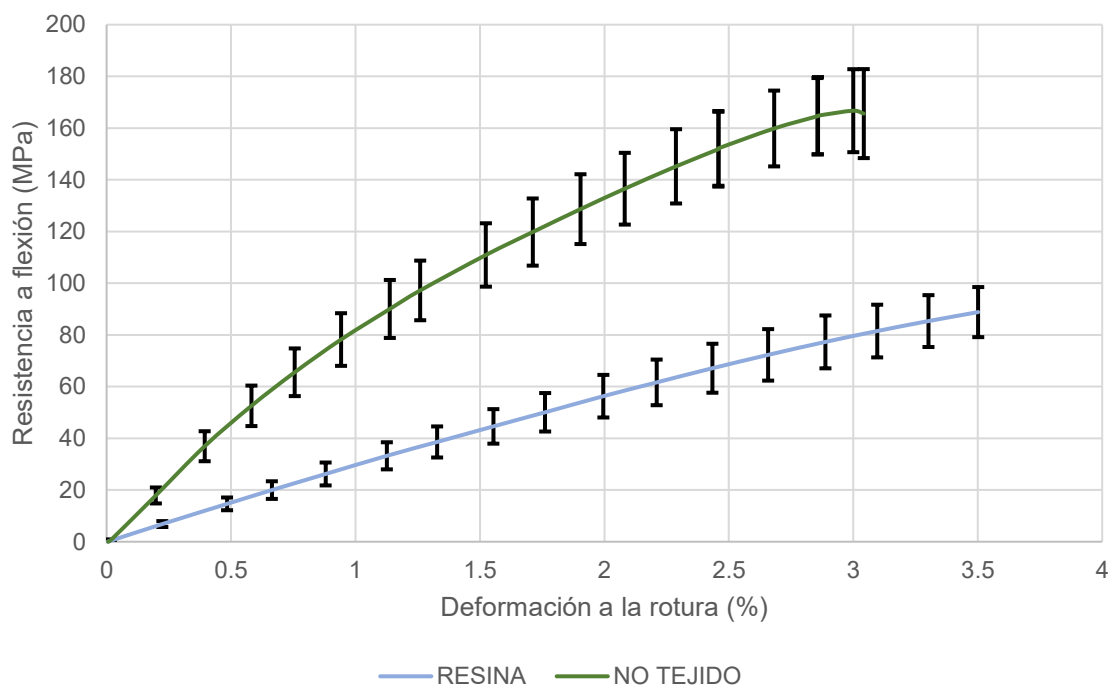


Figura 3.9. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación.  
(Fuente: Propia)

Se muestra en la Figura 3.10 que el material compuesto reforzado con no tejido tiene un módulo secante a flexión mayor que el material sin refuerzo. La resina posee un módulo secante a flexión de 2947,38 [MPa] y el compuesto reforzado con no tejido de 11289,06 [MPa] mejorando dicha propiedad en un 283,02%.

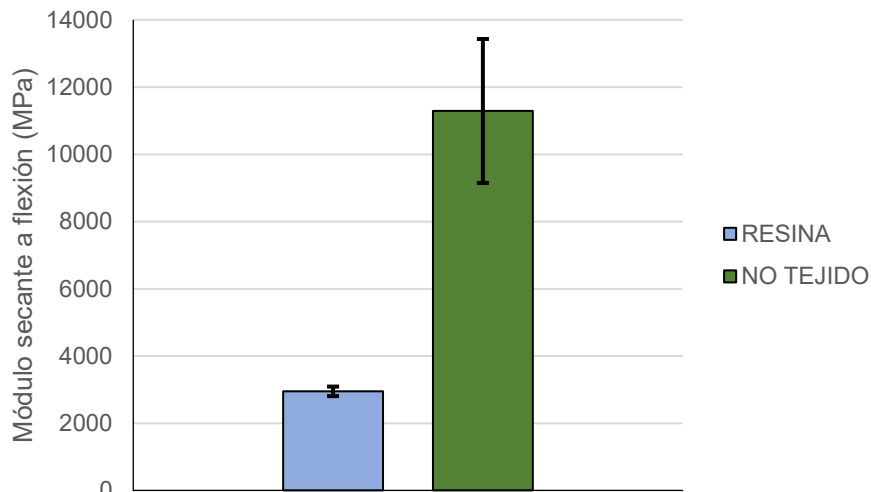


Figura 3.10. Comparación del módulo secante a flexión.  
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.11 se observa que la resistencia a flexión alcanzado por el compuesto reforzado con tejido es de 103,37 [MPa] siendo mayor al de resina que tiene 79,95 [MPa]. La mejora en esta propiedad asciende a un 29,29%.

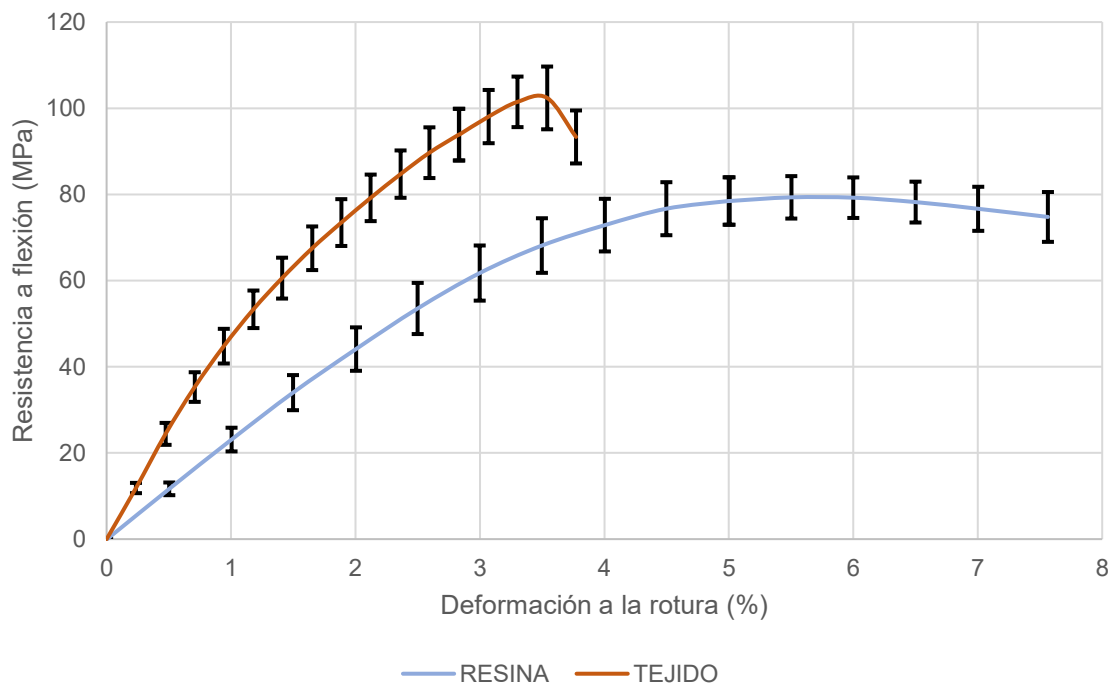


Figura 3.11. Comparación de materiales en la curva Resistencia vs. Deformación.  
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.12 se muestra que el material compuesto reforzado con tejido tiene un módulo secante a flexión superior al del material base. La resina posee un módulo secante a flexión de 2335,31 [MPa] y el compuesto de 6310,87 [MPa] obteniendo una mejora de 170,24%.

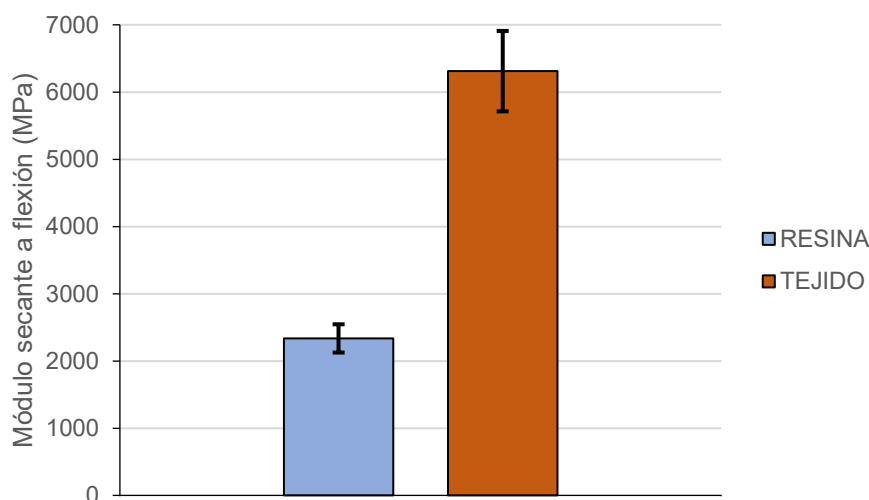


Figura 3.12. Comparación del módulo secante a flexión.  
(Fuente: Propia)

Tabla 3.14. Resumen de resultados del ensayo de flexión por infusión al vacío.

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15					
Muestra	Fracción volumétrica real	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Incremento de resistencia (%)	Incremento del módulo (%)
FR (Resina)	0,00	89,12	2947,38	---	---
FNT (No tejido)	0,42	167,23	11289,06	87,65	283,02
FR2 (Resina)	0,00	79,95	2335,31	---	---
FT (Tejido)	0,31	103,37	6310,87	29,29	170,24

(Fuente: Propia)

Con los resultados mostrados en la Tabla 3.14 se aprecia que el compuesto reforzado con no tejido es el material con las mejores propiedades mecánicas tanto en la resistencia a flexión como en módulo secante a flexión gracias a que posee una fracción volumétrica de 0,42, valor mayor al 0,31 del material reforzado con tejido. Por esta razón, la capacidad de soportar más carga es superior a la de la resina y el material reforzado con tejido alternado, equivalente a los resultados mostrados en [6], [29], [31]. La mejora de las propiedades ya mencionadas en el material reforzado con no tejido se debe también a la buena adhesión matriz-refuerzo que ocurrió durante el proceso de obtención del material, en donde la infusión de resina seguía la misma dirección en la

que estaban orientadas las fibras. Las mejoras de las propiedades en función de la distribución longitudinal de las fibras pueden también contrastarse en [6], [28].

Por otro lado, se demuestra que la configuración isotrópica de refuerzo tejido consigue incrementar las propiedades mecánicas cuando la carga actúa perpendicularmente sobre el material compuesto, como se puede verificar en el estudio [6]. Este material resiste 103,37 [MPa] en flexión, pero 49,06 [MPa] en tracción.

En los resultados de la Tabla 3.14 y Tabla 1.6 se muestra que el proceso de infusión al vacío resulta ser superior que el de estratificación si se busca obtener los mejores incrementos de las propiedades mecánicas de resistencia y módulo secante a flexión. Esto sucede porque se obtienen materiales compuestos con una mayor fracción volumétrica ya sea que se utilice refuerzo tejido o no tejido. En otras palabras, para un mismo volumen de compuesto se tiene más cantidad de refuerzo. Con la infusión al vacío se retira gran parte del aire que podría quedar atrapado dentro del molde lo que permite a las fibras ocupar esos espacios. Sin embargo, a pesar del vacío no es posible extraer el aire en su totalidad debido a la fuerza de compactación que ejerce sobre el refuerzo como afirman en el estudio [17].

A continuación, se muestra el antes y el después de las distintas configuraciones de probetas que fueron sometidas al ensayo de flexión (Figura 3.13 - Figura 3.21):

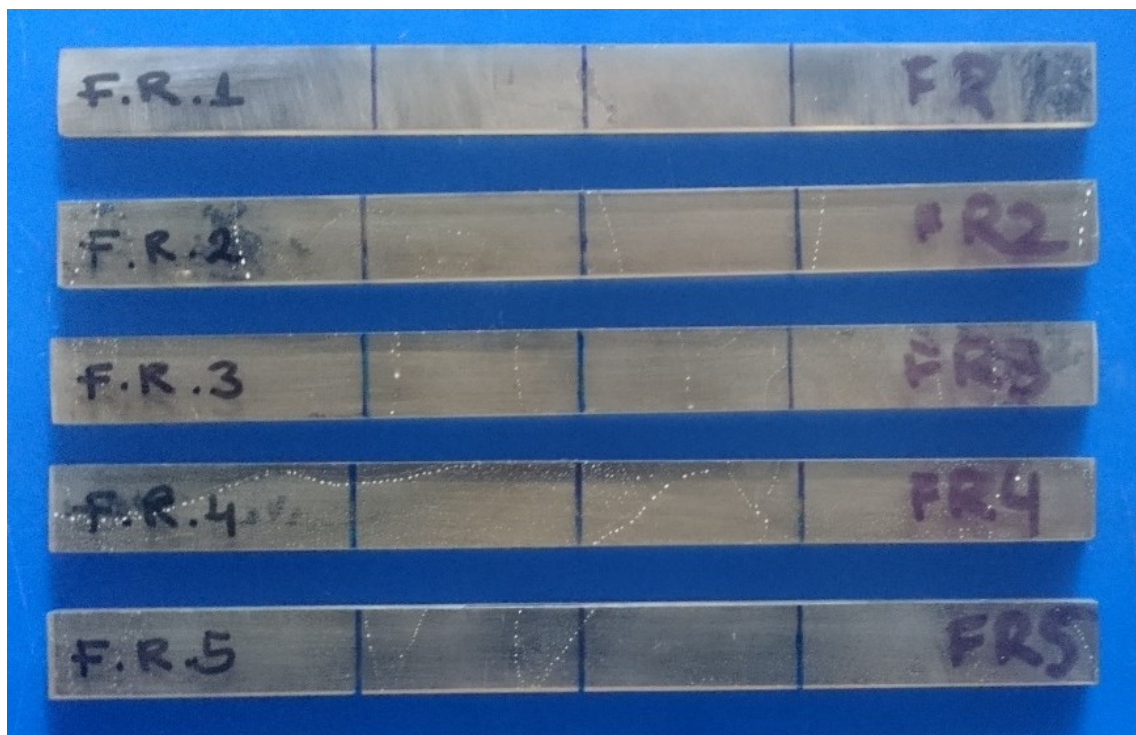


Figura 3.13. Probetas de resina (FR) previo al ensayo de flexión.  
(Fuente: Propia)



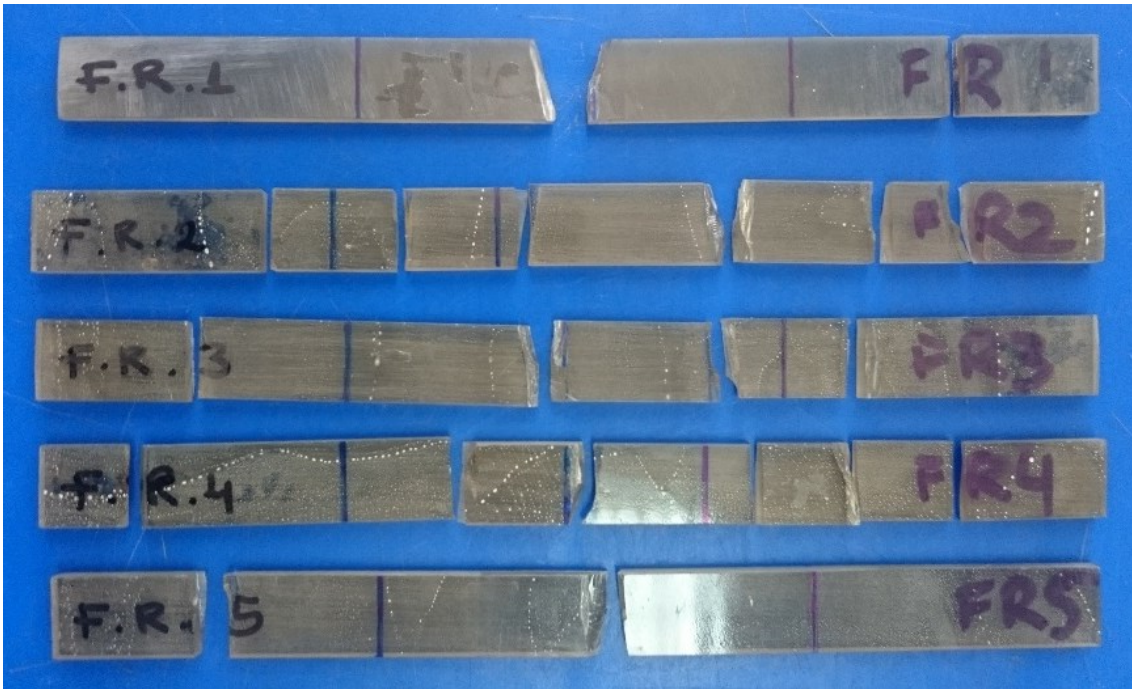


Figura 3.14. Probetas de resina (FR) después del ensayo de flexión.  
(Fuente: Propia)



Figura 3.15. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido previo al ensayo de flexión.  
(Fuente: Propia)

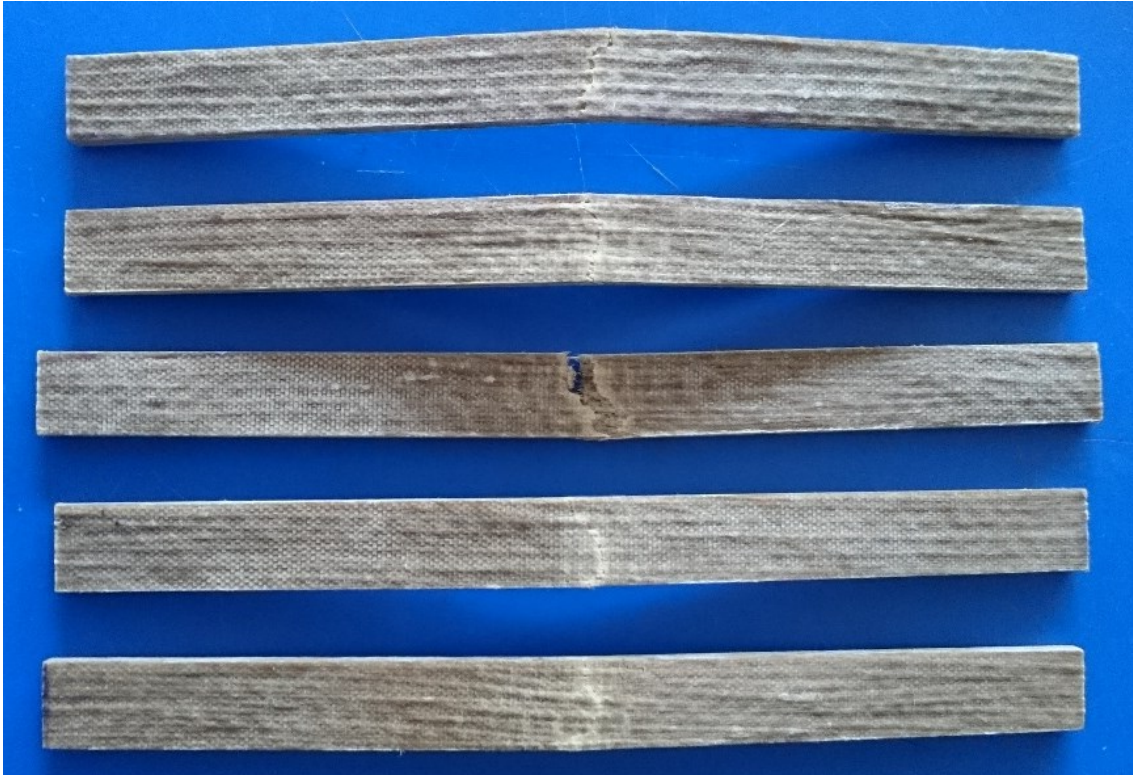


Figura 3.16. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de flexión. Desde arriba (FNT-1) hasta abajo (FNT-5).  
(Fuente: Propia)



Figura 3.17. Probetas de material compuesto reforzado con no tejido después del ensayo de flexión. Vista lateral, desde arriba (FNT-1) hasta abajo (FNT-5).  
(Fuente: Propia)



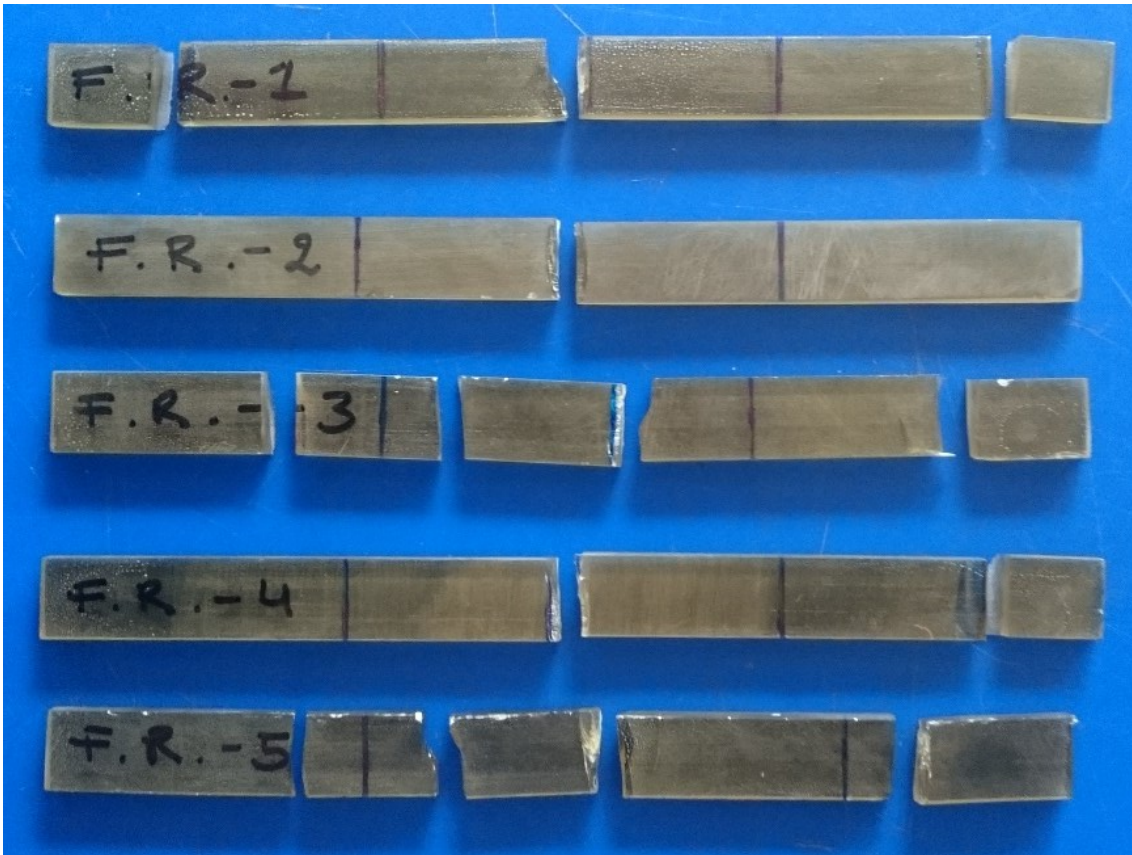


Figura 3.18. Probetas de resina (FR2) después del ensayo de flexión.  
(Fuente: Propia)

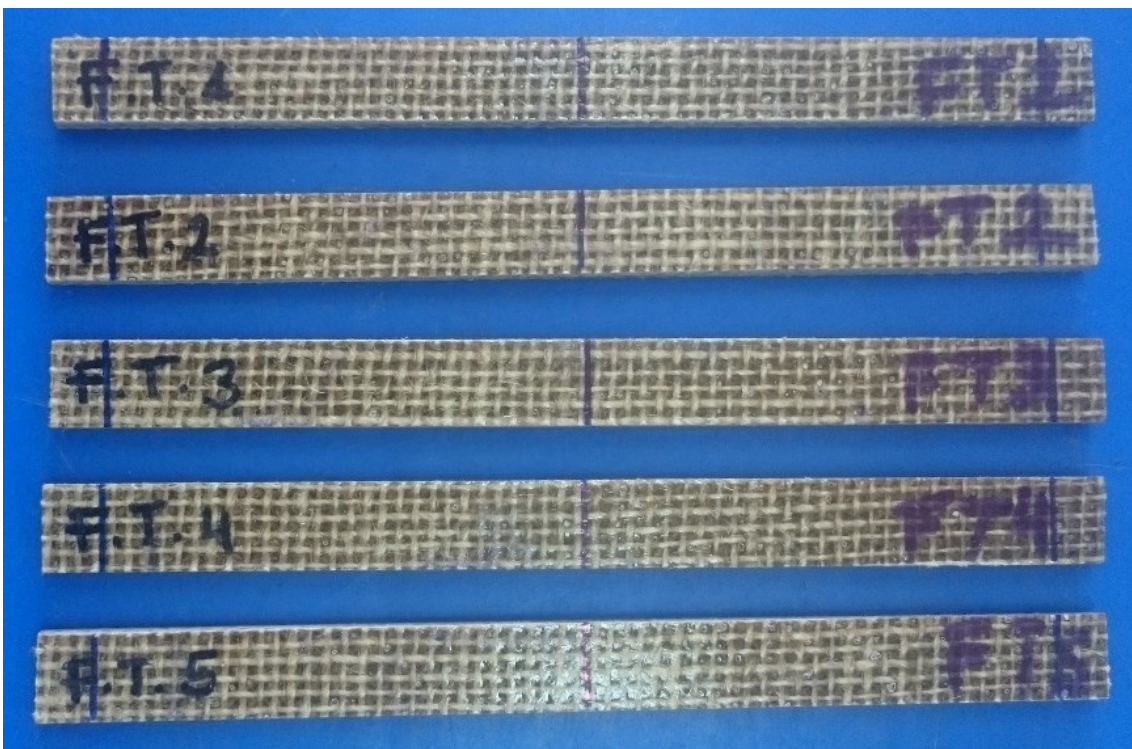


Figura 3.19. Probetas de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de flexión.  
(Fuente: Propia)





Figura 3.20. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de flexión. Vista posterior, desde arriba (FT-1) hasta abajo (FT-5).  
(Fuente: Propia)

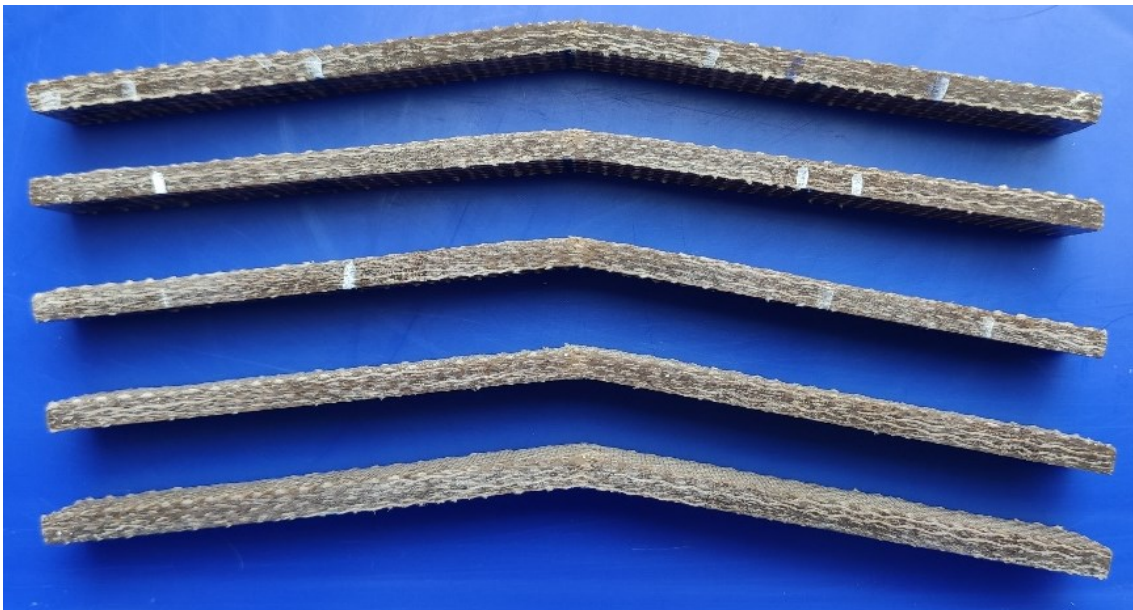


Figura 3.21. Probetas de material compuesto reforzado con tejido después del ensayo de flexión. Vista lateral, desde arriba (FT-1) hasta abajo (FT-5).  
(Fuente: Propia)

Utilizando el código de tres partes (Figura 2.40), los modos de falla que sufrieron las distintas probetas en el ensayo de flexión se presentan en la Tabla 3.15.



Tabla 3.15. Modos de falla de probetas ensayadas a flexión.

Códigos de falla - Ensayo de flexión							
Resina (FR)		No Tejido		Resina (FR2)		Tejido	
Muestra	Código	Muestra	Código	Muestra	Código	Muestra	Código
FR-1 (MI-20-0581)	MUV	FNT-1 (MI-20-0586)	TAM	FR2-1 (MI-20-0686)	MUV	FT-1 (MI-20-0691)	TAM
FR-2 (MI-20-0582)	MUV	FNT-2 (MI-20-0587)	TAM	FR2-2 (MI-20-0687)	MUV	FT-2 (MI-20-0692)	TAM
FR-3 (MI-20-0583)	MUV	FNT-3 (MI-20-0588)	MAM	FR2-3 (MI-20-0688)	MUV	FT-3 (MI-20-0693)	TAM
FR-4 (MI-20-0584)	MUV	FNT-4 (MI-20-0589)	TAM	FR2-4 (MI-20-0689)	MUV	FT-4 (MI-20-0694)	TAM
FR-5 (MI-20-0585)	MUV	FNT-5 (MI-20-0590)	TAM	FR2-5 (MI-20-0690)	MUV	FT-5 (MI-20-0695)	TAM

(Fuente: Propia)

### 3.4. Ensayos de impacto

#### 3.4.1. Resultados

Los ensayos de impacto para las probetas de resina y tejido fueron realizados en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional empleando el equipo de impacto variable ELCOMETER 1615 y los resultados se muestran en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de impacto.

ENSAYO DE IMPACTO ASTM D5628-10		
Muestra	Fracción volumétrica real	Energía media de falla (J)
IR (Resina)	0,00	0,07
IT (Tejido)	0,23	0,67

(Fuente: Propia)

#### 3.4.2. Discusión

Es posible apreciar una gran diferencia en el valor de la energía media de falla entre la resina y el material compuesto reforzado con tejido en la Figura 3.22. Pasando de los 0,0677 [J] que alcanza el material empleado como matriz a los 0,6710 [J] del compuesto, lo que significa una mejora de 891,14%. Esto se debe a que la matriz al estar reforzada con fibras, transmite los esfuerzos a las mismas, las cuales soportan la mayor parte de la carga aplicada como se menciona en [29], [31].

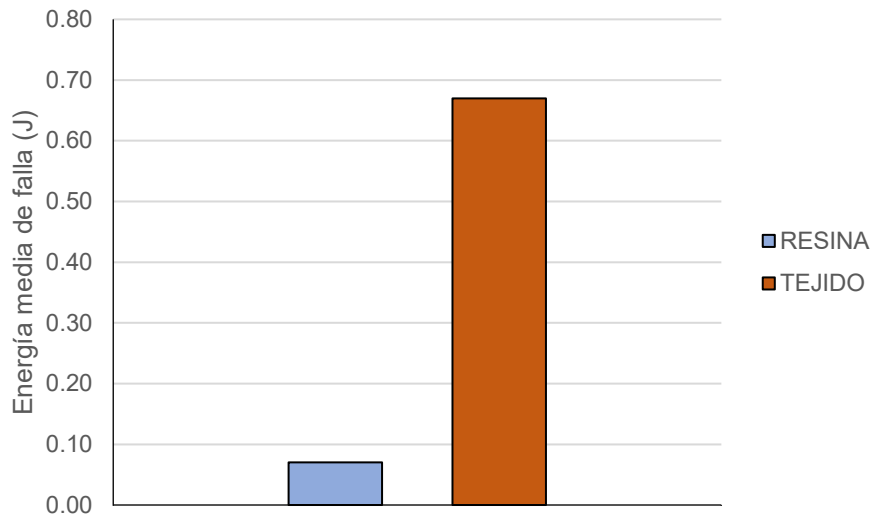


Figura 3.22. Comparación de la energía media de falla.  
(Fuente: Propia)

A continuación, se muestra el antes y el después de una probeta de resina y una de material compuesto reforzado con tejido que se sometieron al ensayo de impacto:



Figura 3.23. Probeta de resina previo al ensayo de impacto. Probeta ensayada vista frontal y vista posterior.  
(Fuente: Propia)



Figura 3.24. Probeta de material compuesto reforzado con tejido previo al ensayo de impacto. Probeta ensayada vista frontal y vista posterior.  
(Fuente: Propia)

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Se cumplió satisfactoriamente con el objetivo general dado que se obtuvieron y caracterizaron materiales compuestos reforzados con tejido y no tejido de fibra de cabuya mediante infusión al vacío.

En el proceso de infusión al vacío el espesor del material compuesto está determinado por el espesor y número de capas de refuerzo que se utilicen.

Por infusión al vacío debido a la ausencia de aire y compactación del molde, es posible agregar más cantidad de refuerzo por lo que se obtienen materiales compuestos con mayor fracción volumétrica.

Mientras mayor fracción volumétrica de refuerzo posea el material compuesto, mejores serán sus propiedades mecánicas de tracción, flexión e impacto.

El tiempo al que empieza a gelificar la resina poliéster estuvo entre 10 y 15 minutos, por lo que no se puede lograr una infusión completa al trabajar con volúmenes de material compuesto mayores a 120 [cm<sup>3</sup>].

El tiempo de solidificación de la resina fue de 120 minutos para todos los materiales compuestos obtenidos.

Para obtener el volumen deseado de material compuesto, se tiene que incrementar las dimensiones de largo y ancho del refuerzo, ya que por la succión que genera la bomba existe un aplastamiento en los bordes de este.

La configuración de refuerzo no tejido que presentó una resistencia última a tracción de 115,58 [MPa] y un módulo secante de elasticidad de 14270,46 [MPa] fue la que obtuvo mejores propiedades mecánicas frente a la resina, con incrementos del 179,58% y 146,70% de resistencia y módulo, respectivamente, como resultado de la mayor fracción volumétrica empleada (0,44).

La configuración de las fibras dispuestas longitudinalmente en el compuesto reforzado con no tejido mejora el comportamiento mecánico del material frente a cargas aplicadas en la misma dirección.

La configuración de refuerzo tejido con fracción volumétrica de 0,31 presentó una resistencia última a tracción de 49,06 [MPa], lo que supone un incremento de 18,67% y un módulo secante de elasticidad de 11968,88 [MPa], lo que representa una mejora de 106,91%.

La configuración de refuerzo no tejido que presentó una resistencia a flexión de 167,23 [MPa] y un módulo secante a flexión de 11289,06 [MPa] fue la que obtuvo mejores propiedades mecánicas frente a la resina, con incrementos del 87,65% y 283,02% de resistencia y módulo, respectivamente, como resultado de la mayor fracción volumétrica empleada (0,42).

La configuración de refuerzo tejido con fracción volumétrica de 0,31 presentó una resistencia a flexión de 103,37 [MPa], lo que supone un incremento de 29,29% y un módulo secante a flexión de 6310,88 [MPa], lo que representa una mejora de 170,24%.

La isotropía de la configuración del refuerzo tejido mejoró el comportamiento mecánico del material compuesto frente a cargas perpendiculares, soportando 103,37 [MPa] en flexión y tan solo 49,06 [MPa] en tracción.

En el ensayo de impacto, la matriz transmitió efectivamente la carga al refuerzo tejido por lo que absorbió 0,67 [J] y alcanzó una mejora del 891,14% frente a la resina.

## **4.2. Recomendaciones**

A pesar de que la configuración de refuerzo longitudinal presentó mejores resultados, es preferible trabajar con el refuerzo tejido porque facilita el armado del sistema de infusión invirtiendo menos tiempo.

Cuando la infusión de resina ha llenado el molde, primero se recomienda cerrar la manguera de entrada y 10 segundos después la de salida permitiendo así, la evacuación de residuos de aire.

La fibra de cabuya es un material poco comercializado en la actualidad en el mercado local por lo que no es recomendable trabajar con la misma.

Adquirir la suficiente cantidad de matriz y refuerzo para la realización del estudio y evitar cambios que puedan producirse en las propiedades de los materiales compuestos debido a posibles variaciones si son de diferente lote.

En el armado del sistema se recomienda que la distribución de arterias ocupe la mayor parte del perímetro del molde para evitar problemas de llenado debido al corto tiempo de gelificación de la resina.

Preparar como mínimo un 50% más de resina del volumen a ocupar en la infusión debido a las pérdidas en las mangueras de entrada y salida, tanto como también en la manta de absorción, elementos que no deben tener sobredimensionamiento.

## Referencias Bibliográficas

- [1] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, pp. 1–15, 2015, doi: 10.1155/2015/243947.
- [2] J. Dávila *et al.*, *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*. Quito, 2011.
- [3] F. M. Jurado Arturo and C. M. Checa Gordillo, "Mejoramiento de la calidad de la fibra de cabuya y su aplicación.," Universidad Técnica del Norte, 2014.
- [4] K. F. Adekunle, "Surface Treatments of Natural Fibres—A Review: Part 1," *Open J. Polym. Chem.*, vol. 05, no. 03, pp. 41–46, 2015, doi: 10.4236/ojchem.2015.53005.
- [5] F. R. Delgado, "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros.," Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [6] N. A. Tamayo, "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación," Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [7] S. Restrepo, G. Arroyave, and D. Vásquez, "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review," *SENA Cent. Nac. Asist. Técnica a la Ind.*, pp. 77–86, 2016.
- [8] J. C. Moscoso, "Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión," Escuela Politécnica Nacional.
- [9] C. X. Espín, "Obtención de un material compuesto de matriz poliéster y lana de oveja para evaluar el comportamiento mecánico," Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [10] G. E. Mazón, "Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales," Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [11] H. G. Villacís, "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación," Escuela Politécnica Nacional, 2011.

- [12] W. D. Calister, *Introducción a la ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 2002.
- [13] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A., 2012.
- [14] W. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S. A., 2006.
- [15] E. F. Cunalata and C. A. Jiménez, “Caracterización de un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute precargada mediante moldeo por compresión,” Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [16] E. Alcudia Zacarías, A. Abúndez Pliego, B. González Vizcarra, A. Hernández Delgado, J. A. Paz González, and M. L. Paz González, “Influencia del método de infusión de resina en las propiedades de un compuesto laminado polimérico,” *Conf. XXI Congr. Int. Anu. la SOMIM*, vol. 1, no. Septiembre, p. 9, 2015, [Online]. Available:  
[https://www.researchgate.net/publication/312577825\\_Influencia\\_del\\_metodo\\_de\\_infusion\\_de\\_resina\\_en\\_las\\_propiedades\\_de\\_un\\_compuesto\\_laminado\\_polimerico](https://www.researchgate.net/publication/312577825_Influencia_del_metodo_de_infusion_de_resina_en_las_propiedades_de_un_compuesto_laminado_polimerico).
- [17] J. Arruti, “La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi,” *Rev. Ing. UC*, vol. 23, no. 1, pp. 22–29, 2016, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70745478004.pdf>.
- [18] S. K. Mazumdar, *Composites manufacturing*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002.
- [19] Ashland/Performance Materials, “Ashland Performance Materials AROPOL™ L 65305 Series de Resinas,” 2015.
- [20] A. Arias, “Estudio de materiales compuestos de cuero recuperado aglomerados con resina polimérica,” 2013.
- [21] HYVAC/Productos, “High Vacuum Pumps Service Instructions,” 1973.
- [22] Elcometer/Limited, “Elcometer 1615,” *Elcometer Limited*, pp. 1–6, 2015.
- [23] ASTM, “ASTM D5034 SPANISH.”
- [24] ASTM International, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. C, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/D3039.
- [25] ASTM International, “Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer

- Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, no. C, pp. 1–11, 2007, doi: 10.1520/D7264.
- [26] A. International, “Standard Test Method for Impact Resistance of Flat , Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart ( Tup or Falling Mass ) 1,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 96, no. Reapproved, pp. 1–10, 2011, doi: 10.1520/D5628-10.2.
- [27] A. International, “Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method 1,” *Annu. B. ofASTM Stand. Vol 07.01*, vol. vii, no. C, pp. 1–15, 2002.
- [28] P. Pontón and V. Guerrero, “Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá mediante estratificación manual,” *Rev. Tecnológica ESPOL – RTE*, vol. 23, no. November, pp. 47–54, 2010.
- [29] V. Guerrero, P. Pontón, A. Tamayo, H. Villacís, F. Delgado, and S. Galeas, “Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas,” *Congr. Cienc. y Tecnol. ESPE*, vol. 8, no. 1, pp. 70–74, 2013, doi: 10.24133/CCTESPE.V8I1.112.
- [30] J. G. Paredes Salinas, C. F. Pérez Salinas, and C. B. Castro Miniguano, “Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 3, pp. 1–15, 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n3.163.
- [31] F. Delgado, S. Galeas, and V. Guerrero, “Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibras de coco y vidrio para la elaboración de tableros,” *Rev. EPN*, vol. 33, no. 2, p. 9, 2014.



## Anexo I. Caracterización del tejido y no tejido de fibra de cabuya.



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



**INFORME No. CTP-IT-2020-08-15**

**Página 1 de 3**

### **EMPRESA SOLICITANTE**

PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ  
JORGE LUIS TAPIA  
Escuela Politécnica Nacional (Ingeniería Mecánica)

### **MATERIAL QUE ENTREGA**

Tejido e hilo de cabuya artesanal identificados por el Centro textil de la siguiente manera:

### **TRABAJO SOLICITADO**

Determinar: Resistencia a la tracción del tejido según norma ASTM D 5034 y Resistencia a la Tracción sobre el hilo según norma ASTM D 2256

**FECHA DE RECEPCION ORDEN DE TRABAJO** 2020 / 08 / 17

**FECHA DE REALIZACIÓN DEL INFORME** 2020 / 08 / 24

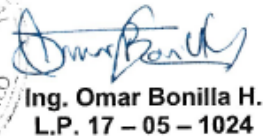
**NÚMERO DE ORDEN DE TRABAJO** DQ-OTI0017-2020

**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. 4305-4306-4307  
E-mail: [omar.bonilla@epn.edu.ec](mailto:omar.bonilla@epn.edu.ec); [hilda.trujillo@epn.edu.ec](mailto:hilda.trujillo@epn.edu.ec)

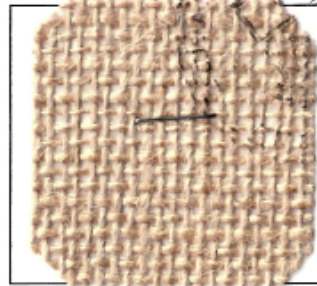


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO**



**INFORME No. CTP-IT-2020-08-15**

Página 2 de 3



**MUESTRA DE TEJIDO DE CABUYA ARTESANAL**

Probeta	LONGITUDINAL	
	Fuerza a la rotura (kgf)	Elongación (%)
1	44,85	5,59
2	45,60	4,87
3	32,13	5,10
4	31,69	4,99
5	43,73	5,06
Media	39,60	5,12
Desviación estándar	7,05	0,28

Probeta	TRANSVERSAL	
	Fuerza a la rotura (kgf)	Elongación (%)
1	43,44	5,73
2	25,73	6,18
3	42,65	5,79
4	41,16	6,28
5	41,51	6,29
Media	38,90	6,05
Desviación estándar	7,42	0,27

**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. 4305-4306-4307  
E-mail: [omar.bonilla@epn.edu.ec](mailto:omar.bonilla@epn.edu.ec); [hilda.trujillo@epn.edu.ec](mailto:hilda.trujillo@epn.edu.ec)



**HILO ARTESANAL DE CABUYA**  
**DETERMINACIÓN DEL TÍTULO (ASTM D1577) Y RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y**  
**ELONGACIÓN A LA ROTURA (ASTM D 2256)**

Probeta	Velocidad ensayo [mm/min]	Fuerza rotura [N]	Elongación [%]	Densidad lineal [tex]	Tiempo de rotura [s]	Tenacidad [N/tex]
1	30,0	139,0	4,53	572,0	18,2	24,4
2	30,0	115,0	5,61	560,0	22,6	20,5
3	30,0	107,0	3,96	628,0	15,9	17,1
4	30,0	178,0	4,49	584,0	18,0	30,4
6	30,0	166,0	4,30	556,0	17,2	29,9
8	30,0	225,0	5,16	968,0	20,8	23,3
9	30,0	112,0	4,41	530,0	17,7	21,2
10	30,0	181,0	4,30	710,0	17,2	25,6
11	30,0	97,6	4,52	610,0	18,2	16,0
12	30,0	169,0	5,11	742,0	20,5	22,7
13	30,0	97,4	4,37	586,0	17,5	16,6
14	30,0	69,4	5,89	616,0	23,7	11,3
15	30,0	87,9	5,90	506,0	23,7	17,4
16	30,0	158,0	4,47	684,0	17,9	23,1
17	30,0	112,0	5,06	570,0	20,3	19,7
18	30,0	112,0	4,90	650,0	19,7	17,2
19	30,0	163,0	5,25	662,0	21,1	24,7
21	30,0	168,0	5,11	770,0	20,5	21,9
22	30,0	169,0	6,06	696,0	24,3	24,2
23	30,0	126,0	3,84	696,0	15,4	18,0
24	30,0	100,0	4,48	550,0	18,0	18,3
Media	30,0	136,0	4,84	640,3	19,5	21,1
Desviación estándar		39,5	1,00	104,3	2,57	5,0

Nota: Las probetas 5,7 y 20 presentaron la ruptura fuera del rango de tiempo indicado en la norma y por tanto, fueron excluidas.

**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.

## Anexo II. Ficha técnica resina.

Document 4049 V2 F2, Language ES V1, Approved 2014-6-11, © 2015 Ashland Inc. Page 1 (3)

### Technical Datasheet Ashland Performance Materials



### AROPOL™ L 65305 Series de Resinas:

Las series de resina de uso general AROPOL L 65305 son pre-aceleradas y tixotrópicas. Estas resinas han sido formuladas para laminación manual y por aspersión.

Propiedades Típicas del Líquido a 25°C: Existen versiones de la resina AROPOL L 65305 con diferentes tiempos de gel. La versión de 17 minutos de gel es representada abajo.

Propiedad <sup>(1)</sup>	AROPOL L 65305 T-17	Unidad
Sólidos	64	%
Tiempo de Gel	17	Minutos
Viscosidad, Brookfield, # 3 a 60 RPM	500	mPa-s (cps)
Índice de Tixotropía	2.5	Unidades
Densidad	9.0	Lbs / Galón

El tiempo de gel fué medido usando 1.25% de catalizador MEKP-9 en 100 gramos de resina a 25°C.

<sup>(1)</sup>Las propiedades son valores típicos basados en materiales probados en laboratorio, pero varían según la muestra. Estos valores típicos no deben ser interpretados como un análisis de garantía de cualquier lote específico o como especificaciones.

Propiedades Típicas del Curado:	Propiedades <sup>(1)</sup>	Valor <sup>(2)</sup>	Valor <sup>(3)</sup>	Unidad	Método
	Resistencia a la Tracción	7,300	7,100	PSI	ASTM D638
	Módulo de Elasticidad en Tracción	480	550	KSI	ASTM D638
	Elongación a la Ruptura	1.7	1.5	%	ASTM D638
	Resistencia a la Flexión	11,000	11,900	PSI	ASTM D790
	Módulo de Flexión	470	510	KSI	ASTM D790
	Temperatura de Distorsión, HDT	69 (156)	85 (185)	°C (°F)	ASTM D648

<sup>(2)</sup>El curado de las probetas (sin refuerzo) se realizaron con 1.25% de catalizador DDM-9. El post curado de las probetas se realizó a una temperatura de 60°C por 2 horas.

<sup>(3)</sup>El curado de las probetas (sin refuerzo) se realizaron con 1.25% de catalizador DDM-9. El post curado de las probetas se realizó a una temperatura de 138°C por 2 horas.



Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.  
\* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.

**ASHLAND**  
With good chemistry great things happen.™



## Technical Datasheet

Ashland Performance Materials



### AROPOL™ L 65305 Series de Resinas:

**Certificados y Aprobaciones:** La fabricación, el control de calidad, y la distribución de productos por Ashland Performance Materials cumplen con uno o más de las siguientes normas: ISO 9001, Responsible Care, ISO 14001 y OHSAS 18001.

**Embalaje Estándar:** Cilindro de acero, no retornable, peso neto 220 Kg.  
Drum with Net Weight of 220 Kg.

**Garantía Comercial:** Este producto tiene una garantía comercial de tres meses desde la fecha de producción cuando el almacenamiento se realiza de acuerdo con las condiciones señaladas abajo:

**Recomendaciones Para El Almacenamiento:** Cilindros – Almacenar a temperaturas menores a 25 °C. La vida útil disminuye con el aumento de la temperatura de almacenamiento. Evitar la exposición a fuentes de calor como por ejemplo, la luz solar directa o ductos de vapor. Para evitar la contaminación del producto con agua, no almacenar al aire libre. Mantenerlos sellados para evitar la absorción de humedad y pérdida de monómeros. Alternar stock. Se recomienda agitar ligeramente cuando es almacenado por largo tiempo.

A granel – Véase el Manual de Manipulación y Almacenamiento a Granel de Ashland para resinas poliéster y viniléster. Puede obtener una copia de este manual llamando a Ashland Performance Materials al teléfono

1- 614-790-3333 ó 1-800-523-6963.

El resto de condiciones se mantendrán iguales, a temperatura de almacenaje más alta se reducirá la estabilidad del producto y a temperatura de almacenamiento más baja se extenderá la estabilidad del producto.

**Nota** Toda la información aquí presentada se reputa ser exacta y confiable, y se provee sólo para la consideración, investigación y verificación del usuario. La información no debe ser tomada como una expresa o implícita representación o garantía por la cual Ashland asuma responsabilidad legal. Cualesquiera garantías, incluyendo garantías de mercantilidad o de no infracción de derechos de propiedad intelectual de terceros, están expresamente excluidas.

Puesto que las formulaciones de producto, los empleos específicos y las condiciones de uso del producto por parte del usuario están más allá del control de Ashland, Ashland no realiza ningún tipo de garantía o representación respecto a los resultados que puedan ser obtenidos por el usuario. Será responsabilidad



Responsible Care®

Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

\* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.

**ASHLAND**  
With good chemistry great things happen.™

**Technical Datasheet**  
Ashland Performance Materials



**AROPOL™ L 65305 Series de Resinas:**

del usuario determinar la conveniencia de cualquiera de los productos mencionados para el empleo específico que quiera darle el usuario.

Ashland solicita y requiere que el usuario lea, comprenda y cumpla con la información contenida en este documento así como en la Hoja de Datos de Material de Seguridad en vigor.

Para más información Ashland Performance Materials  
Americas Headquarters  
5200 Blazer Parkway  
Dublin, OH 43017 Ohio  
USA  
Phone: +1 800 523 6963  
PMamericasales@ashland.com



Responsible Care®

Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.  
\* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.

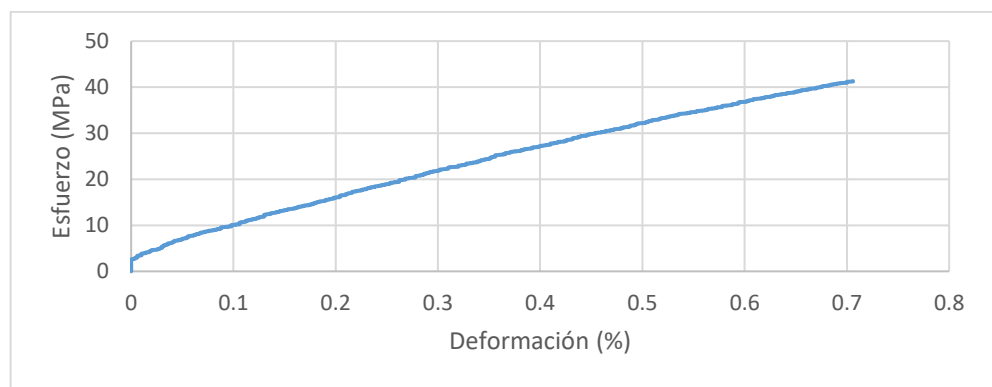
**ASHLAND**

With good chemistry great things happen.™

**Anexo III. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de tornillo micrométrico de bola con precisión de 0,0025 [mm] (0,0001 [in]) para medición de las dimensiones de probetas.**

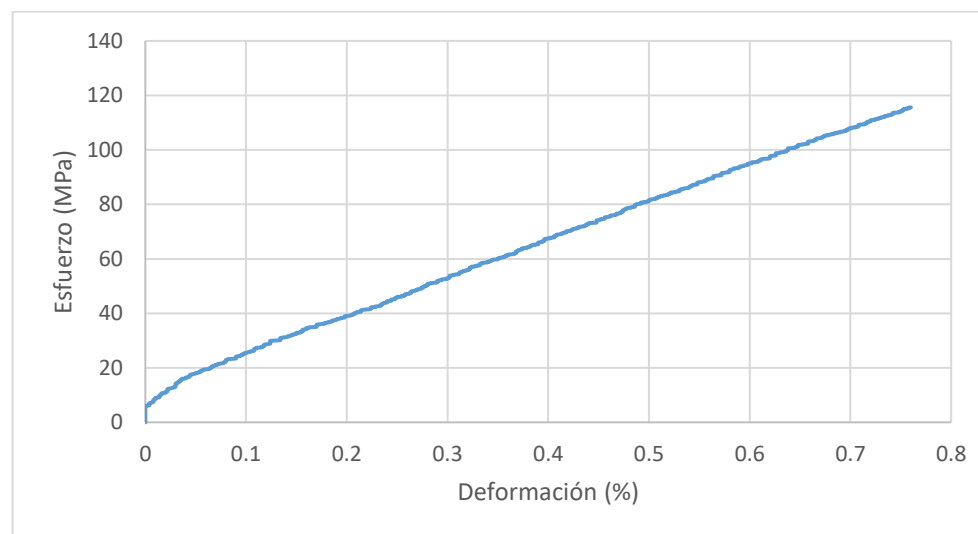
ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TR) (Resina)										
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Código de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Deformación última (%)	
TR-1 (MI-20-0566)	0.00	25.33	2.53	64.09	MMT	2805.00	43.77	5749.81	0.75	
TR-2 (MI-20-0567)	0.00	25.23	2.63	66.36	MMB	3037.50	45.78	5541.37	0.80	
TR-3 (MI-20-0568)	0.00	25.25	2.81	70.83	MMV	2081.68	29.39	6285.01	0.44	
TR-4 (MI-20-0569)	0.00	25.02	2.49	62.29	MGM	2812.03	45.15	6016.01	0.75	
TR-5 (MI-20-0570)	0.00	25.16	2.62	65.91	GMB	2806.70	42.59	5330.26	0.79	
Promedio						$\bar{x}$	2708.58	41.34	5784.49	0.71
Desviación estándar						$s_{n-1}$	364.29	6.79	377.74	0.15
Coeficiente de variación						CV	13.45	16.43	6.53	21.31

- Gráfico esfuerzo vs deformación - resina.



ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TNT) (No tejido)									
Muestra No.	Fracción volumétrica	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 (%)
TNT-1 (MI-20-0571)	0.432	25.05	2.56	64.24	MWB	7357.22	114.52	14340.96	0.77
TNT-2 (MI-20-0572)	0.46	25.24	2.56	64.62	MGM	7856.75	121.58	12845.88	0.88
TNT-3 (MI-20-0573)	0.43	25.06	2.57	64.35	MWT	7766.78	120.69	14837.54	0.73
TNT-4 (MI-20-0574)	0.432	25.23	2.56	64.55	GAB	6972.41	108.01	15785.09	0.64
TNT-5 (MI-20-0575)	0.436	25.14	2.55	64.20	MWT	7259.48	113.08	13542.81	0.78
Promedio						7442.53	115.58	14270.46	0.76
Desviación estándar						366.92	5.63	1137.93	0.09
Coeficiente de variación						4.93	4.87	7.97	11.43

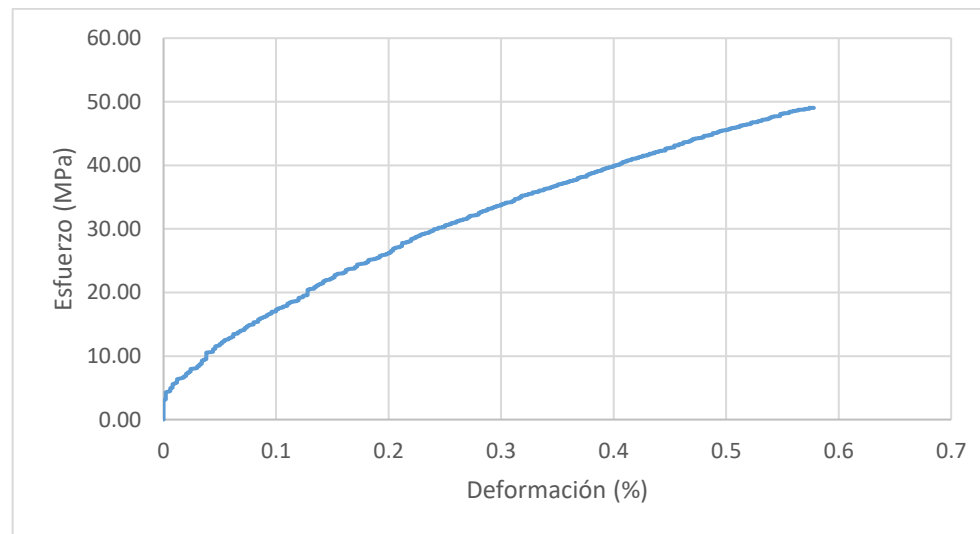
- Gráfico esfuerzo vs deformación – no tejido.





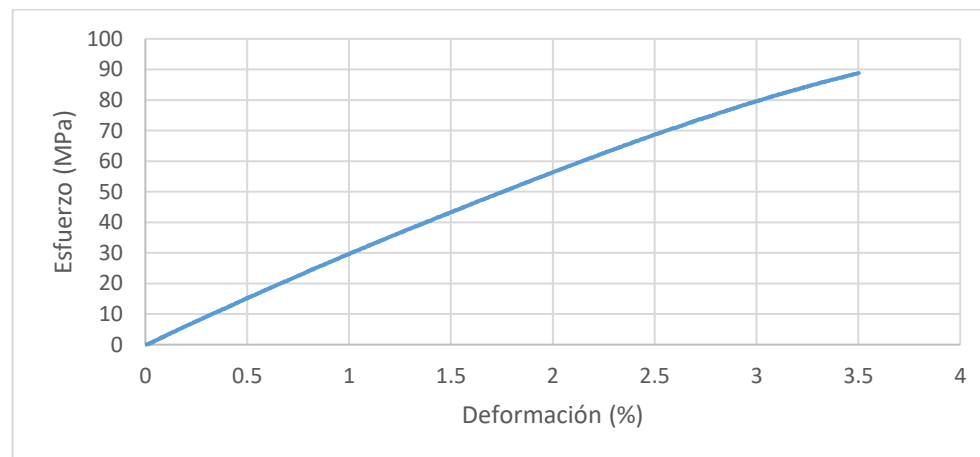
ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039-M17 (Grupo: TT) (Tejido)									
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Código de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Deformación última (%)
TT-1 (MI-20-0561)	0.32	25.38	2.57	65.13	AUT	3120.00	47.90	11839.84	0.59
TT-2 (MI-20-0562)	0.30	25.25	2.58	65.20	LWB	3123.33	47.90	14306.24	0.60
TT-3 (MI-20-0563)	0.31	25.21	2.57	64.72	LWB	3268.73	50.51	10987.86	0.55
TT-4 (MI-20-0564)	0.30	25.22	2.55	64.32	AUT	3200.00	49.76	10702.68	0.55
TT-5 (MI-20-0565)	0.33	25.35	2.57	65.16	LWB	3208.26	49.24	12007.77	0.59
Promedio						3184.06	49.06	11968.88	0.58
Desviación estándar						62.85	1.15	1418.37	0.02
Coeficiente de variación						1.97	2.34	11.85	4.15

- Gráfico esfuerzo vs deformación – tejido.



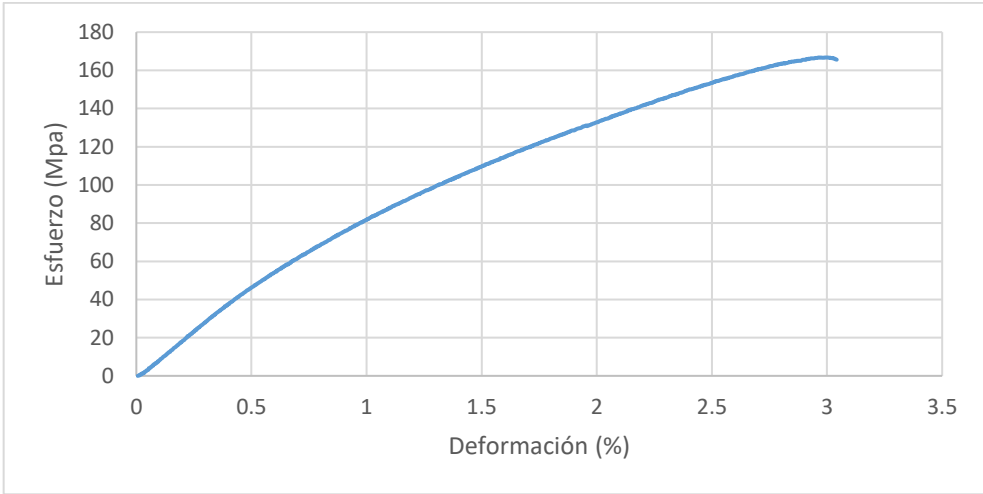
ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR) (Resina)												
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Deformación (%)	Deformación a la rotura (%)	
FR-1 MI-20-0581	0.00	13.27	3.96	52.55	63.36	MUV	165.00	75.36	2800.91	2.94	2.94	
FR-2 MI-20-0582	0.00	13.00	4.08	65.28	65.28	MUV	219.17	99.17	2972.41	4.20	4.21	
FR-3 MI-20-0583	0.00	12.95	3.99	63.76	63.76	MUV	210.00	97.66	2910.81	4.12	4.12	
FR-4 MI-20-0584	0.00	13.23	4.20	55.50	67.12	MUV	202.50	87.57	2876.48	3.35	3.36	
FR-5 MI-20-0585	0.00	13.11	4.13	54.06	66.00	MUV	193.33	85.83	3176.27	3.00	3.00	
Promedio							$\bar{x}$	198.00	89.12	2947.38	3.52	3.53
Desviación estándar							$s_{n-1}$	20.76	9.70	142.16	0.60	0.61
Coeficiente de variación							CV	10.48	10.89	4.82	17.14	17.18

- Gráfico esfuerzo vs deformación - resina



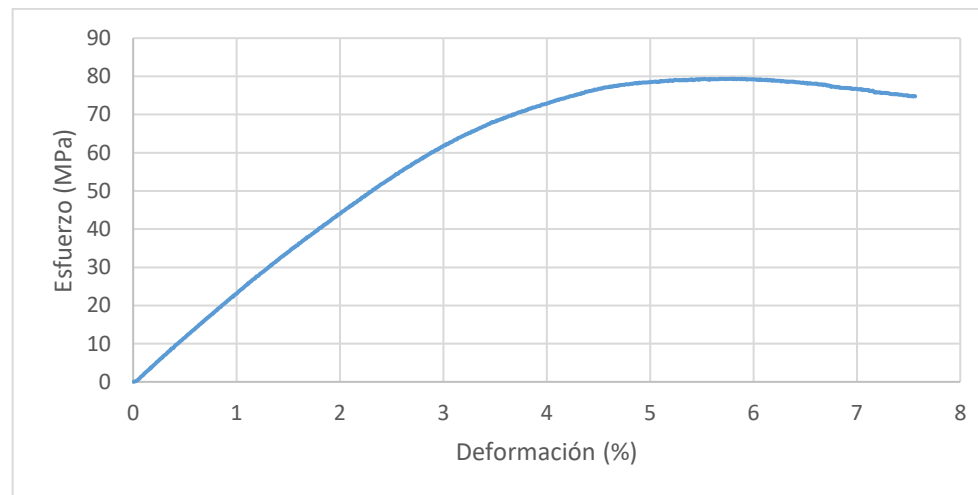
ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FNT) (No tejido)												
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Deformación (%)	Deformación a la rotura (%)	
FNT-1 MI-20-0586	0.45	13.31	3.86	51.33	66.24	TAM	287.50	144.32	8203.86	2.96	3.11	
FNT-2 MI-20-0587	0.40	13.24	3.84	50.82	69.84	TAM	332.50	178.55	12722.99	2.98	3.03	
FNT-3 MI-20-0588	0.41	13.26	3.86	51.24	71.36	MAM	324.68	175.55	11798.94	3.23	3.25	
FNT-4 MI-20-0589	0.42	13.25	3.85	51.05	67.60	TAM	306.67	158.07	10149.84	2.76	2.84	
FNT-5 MI-20-0590	0.44	13.31	3.85	51.29	70.96	TAM	333.54	179.65	13569.65	2.94	2.98	
Promedio							$\bar{x}$	316.98	167.23	11289.06	2.97	3.04
Desviación estándar							$s_{n-1}$	19.68	15.50	2140.88	0.17	0.15
Coeficiente de variación							CV	6.21	9.27	18.96	5.64	5.00

- Gráfico esfuerzo vs deformación – no tejido.



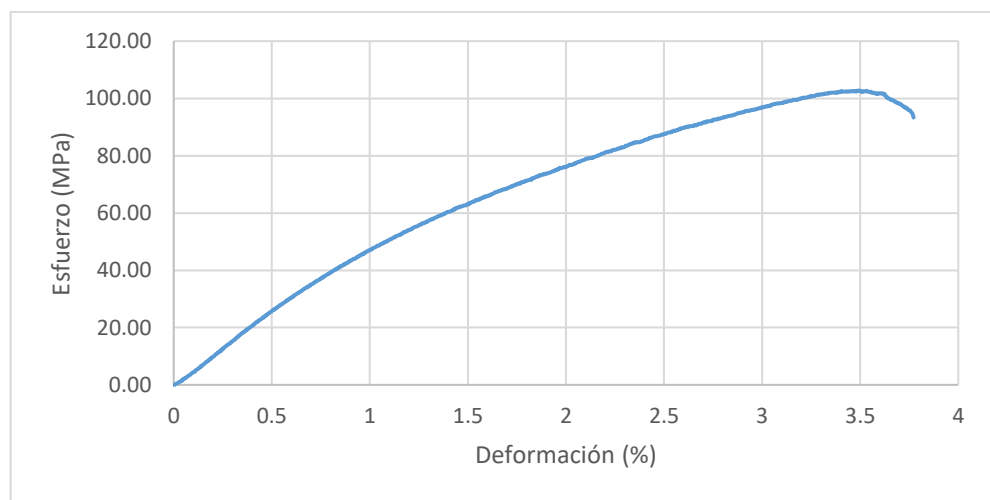
ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR2) (Resina)												
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Deformación (%)	Deformación a la rotura (%)	
FR2-1 MI-20-0686	0.00	12.89	3.84	49.50	61.44	MUV	178.33	86.47	2594.20	5.11	7.75	
FR2-2 MI-20-0687	0.00	12.90	4.00	51.60	64.00	MUV	176.67	82.17	2490.77	5.34	7.94	
FR2-3 MI-20-0688	0.00	13.26	4.03	53.44	64.48	MUV	173.33	77.85	2242.97	5.40	8.15	
FR2-4 MI-20-0689	0.00	12.97	4.01	52.01	64.16	MUV	173.33	79.98	2286.74	5.18	6.41	
FR2-5 MI-20-0690	0.00	13.06	3.95	51.59	64.16	MUV	155.16	73.28	2061.87	5.80	7.98	
Promedio							$\bar{x}$	171.36	79.95	2335.31	5.37	7.65
Desviación estándar							$s_{n-1}$	9.31	4.91	210.27	0.27	0.71
Coeficiente de variación							CV	5.44	6.14	9.00	5.02	9.23

- Gráfico esfuerzo vs deformación – resina.



ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FT) (Tejido)												
Muestra No.	Fracción volumétrica	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante a flexión (MPa)	Deformación (%)	Deformación a la rotura (%)	
FT-1 MI-20-0691	0.31	13.04	3.87	50.49	74.08	TAM	184.17	104.70	6465.01	3.37	3.62	
FT-2 MI-20-0692	0.33	13.04	3.87	50.43	72.88	TAM	196.67	110.25	6749.68	3.59	3.77	
FT-3 MI-20-0693	0.30	12.95	3.91	50.65	70.08	TAM	189.86	100.76	6609.11	3.39	3.55	
FT-4 MI-20-0694	0.30	12.84	3.86	49.55	68.56	TAM	174.17	93.68	5261.05	3.38	3.67	
FT-5 MI-20-0695	0.31	13.10	3.88	50.78	73.60	TAM	191.67	107.48	6469.52	3.73	4.16	
Promedio							$\bar{x}$	187.31	103.37	6310.87	3.49	3.75
Desviación estándar							$s_{n-1}$	8.60	6.46	598.45	0.16	0.24
Coeficiente de variación							CV	4.59	6.25	9.48	4.62	6.41

- Gráfico esfuerzo vs deformación – tejido.



#### Anexo IV. Resultados del ensayo de impacto.

- Resultados de las fallas del material al impacto – resina.

Altura total del dardo (mm)	Resultado de la prueba (1= falla fractura; 0= falla fisura)																				Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Falla fractura	Falla fisura
10			1	0	0	0	1	0	0	1		0	0								3	7
20											1			1	1	1	1	1	1	1	8	0
70		1																			1	0
75	1																				1	0

- Resultados de las fallas al impacto del material compuesto reforzado con tejido.

Altura total del dardo (mm)	Resultado de la prueba (1= Falla; 0= No falla)																														Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Falla	No falla
73	0	0		0	0																										0	4
83						0			0	0																					0	3
93											0	0			0										1	1	0	1	1	0	4	5
103																	1	1	1	1	1	0	1							6	1	
113								1																						1	0	
123																														0	0	
133													1																	1	0	
263																1														2	0	
413												1																		1	0	
463							1																							1	0	
563			1																											1	0	
1063																1														1	0	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE METALOGRAFÍA  
DESGASTE Y FALLA



Quito, 08 de marzo del 2021

**CERTIFICADO**

A quien interese:

Por medio de la presente certifico que los señores; Luis Tapia Morales y William Darío Revelo Zavala, estudiantes de pregrado de la FIM, realizaron los ensayo de impacto (40 muestras) en los meses Noviembre y Diciembre del 2020, en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, utilizando el equipo "Medidor de Impacto Variable" ELCOMETER 1615 con una masa de caída de 690g y punzón de 20 mm, como complemento a su proyecto de titulación: **"Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido y no tejidos de fibra de cabuya mediante infusión al vacío"**.

Los señores en mención, pueden hacer uso del presente certificado según les convenga.

Atentamente,

Ing. Carlos Díaz

Jefe del Laboratorio de Metalografía,

Desgaste y Falla





## Anexo V. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de calibrador vernier para medición de dimensiones de las probetas (Primer informe).



### 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-2020-026

Solicitud de trabajo No. LANUM-2020-ST.026

Quito, 10 de noviembre de 2020

#### DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

Solicitado por: Patricia Rodríguez, Ph.D.

Empresa / Institución: EPN- 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 "TR"
- 5 Probetas "TT"
- 5 Probetas "TNT"
- 5 Probetas "FR"
- 5 Probetas "FT"
- 5 Probetas "FNT"

Descripción de la(s) muestra(s):

15 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con tejido y no tejido de fibras de cabuya, preparados mediante infusión al vacío. Las probetas de los grupos "TR", "TT" y "TNT" se utilizarán para realizar ensayos de tracción, tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17.

15 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con tejido y no tejido de fibras de cabuya, preparados mediante infusión al vacío. Las probetas de los grupos "FR", "FT" y "FNT" se utilizarán para realizar ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15.

**Observación:** De acuerdo con la proforma LANUM-2020-028 y la solicitud de trabajo No. LANUM-2020-ST.026 el cliente solicitaba ensayos de tracción y flexión en 3 grupos de 6 probetas respectivamente; sin embargo, el cliente únicamente entregó al laboratorio 3 grupos de 5 probetas para tracción y flexión respectivamente.

#### LABORATORIO

Fecha de ingreso al Laboratorio: 19/10/2020

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

- MI-20-0561 a la MI-20-0565 para las probetas del grupo "TT",
- MI-20-0566 a la MI-20-0570 para las probetas del grupo "TR",
- MI-20-0571 a la MI-20-0575 para las probetas del grupo "TNT",
- MI-20-0576 a la MI-20-0580 para las probetas del grupo "FT",
- MI-20-0581 a la MI-20-0585 para las probetas del grupo "FR",
- MI-20-0586 a la MI-20-0590 para las probetas del grupo "FNT"

Fecha en que se realizó el ensayo: 28/10/2020, 30/10/2020, 04/11/2020 y 06/11/2020



## 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



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.

**Tabla 1.** Condiciones ambientales corregidas en las fechas que se ensayaron los grupos de probetas.

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
"TR" MI-20-0566 a la MI-20-0570	28/10/2020	19,5	19,8	60,0	60,7
"TNT" MI-20-0571 a la MI-20-0575	28/10/2020	19,6	19,8	61,2	61,4
"TT" MI-20-0561 a la MI-20-0565	30/10/2020	18,1	19,0	60,7	58,9
"FT" MI-20-0576 a la MI-20-0580	04/11/2020	19,4	19,7	26,7	25,7
"FR" MI-20-0581 a la MI-20-0585	04/11/2020	19,7	19,7	25,7	24,9
"FNT" MI-20-0586 a la MI-20-0590	06/11/2020	20,0	20,1	36,5	34,8

### EQUIPOS UTILIZADOS

- Máquina universal de ensayos marca: Tinius Olsen, modelo: H25KS; capacidad máxima 25 KN; precisión utilizada: 0,01 N. Utilizado para medir las propiedades a tracción y flexión de las probetas de material compuesto.
- Calibrador de vernier marca: Mitutoyo, modelo: Absolute Digimatic (12"/300 mm) con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir las dimensiones de las probetas de material compuesto.
- Termohigrómetro marca ELITECH, modelo RCW-800 wifi con una apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR. Utilizado para medir y registrar las condiciones ambientales.

### MÉTODO EMPLEADO

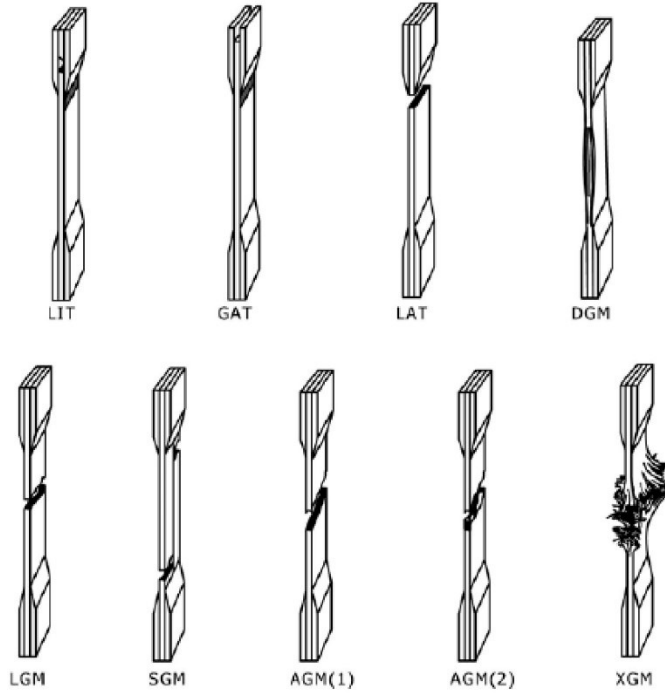
**Ensayos de Tracción:** El método empleado es el descrito en la norma ASTM D3039/D3039 M-17

- Medidas nominales de las probetas (recomendado): Largo: 250, Ancho: 25 mm (+/- 1%) y Espesor: 2,5 mm (+/- 4%)
- Distancia calibrada para medir la deformación: 50 mm
- Velocidad de ensayo: 2 mm/minuto
- El código de identificación de la falla en las probetas se muestra en la figura 1 y corresponde a la figura 4 de la norma ASTM 3039/D3039 M-17, página 10.



## 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



First Character		Second Character		Third Character	
Failure Type	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Angled	A	Inside grip/tab	I	Bottom	B
edge Delamination	D	At grip/tab	A	Top	T
Grip/tab	G	<1W from grip/tab	W	Left	L
Lateral	L	Gage	G	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Multiple areas	M	Middle	M
long. Splitting	S	Various	V	Various	V
eXplosive	X	Unknown	U	Unknown	U
Other	O				

**Figura 1.** Código de identificación de las fallas en las probetas sometidas a los ensayos de tracción ASTM D3039/D3039 M-17.

**Ensayos de flexión:** El método empleado es el descrito en la norma ASTM D7264/D7264 M-15

- Procedimiento A: Flexión en tres puntos
- Relación espesor-distancia entre apoyos: 1:16
- Velocidad de ensayo: 1 mm/min
- El código de identificación de la falla en las probetas se muestra en la figura 2 y corresponde a la figura 6 de la norma ASTM D7264/D7264-M15, página 6.



## 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



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 2.** Código de identificación de las fallas en las probetas sometidas a los ensayos de flexión.

### RESULTADOS

#### **Ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17:**

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados en los grupos de probetas "TR", "TT" y "TNT" respectivamente.

**Tabla 2.** Resultados de los ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17 para las probetas del grupo "TR"

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo: TR)								
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 (%)
TR-1 (MI-20-0566)	25,33	2,53	64,09	MMT	2805,00	43,77	5749,81	0,75
TR-2 (MI-20-0567)	25,23	2,63	66,36	MMB	3037,50	45,78	5541,37	0,80
TR-3 (MI-20-0568)	25,25	2,81	70,83	MMV	2081,68	29,39	6285,01	0,44
TR-4 (MI-20-0569)	25,02	2,49	62,29	MGM	2812,03	45,15	6016,01	0,75
TR-5 (MI-20-0570)	25,16	2,62	65,91	GMB	2806,70	42,59	5330,26	0,79
Promedio				$\bar{x}$	2708,58	41,34	5784,49	0,71
Desviación estándar				$S_{n-1}$	364,29	6,79	377,74	0,15
Coeficiente de variación				CV	13,45	16,43	6,53	21,31

**Observación:** Únicamente la probeta TR-4 (MI-20-0569) se rompió en la zona calibrada para la medición de la deformación con extensómetro, el valor de la deformación fue 0,75%. Debido a esto no se reporta deformación a la rotura para el resto de las probetas del grupo "TR".



## 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



**Tabla 3.** Resultados de los ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17 para las probetas del grupo "TT"

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo: TT)									
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 (%)	
TT-1 (MI-20-0561)	25,38	2,97	75,25	AUT	3120,00	41,46	10251,20	0,59	
TT-2 (MI-20-0562)	25,25	3,10	78,28	LWB	3123,33	39,90	11919,02	0,60	
TT-3 (MI-20-0563)	25,21	2,97	74,75	LWB	3268,73	43,73	9496,88	0,55	
TT-4 (MI-20-0564)	25,22	2,85	71,75	AUT	3200,00	44,60	9574,55	0,55	
TT-5 (MI-20-0565)	25,35	2,9	73,39	LWB	3208,26	43,72	10630,35	0,59	
Promedio					$\bar{x}$	3184,06	42,68	10374,40	0,58
Desviación estándar					$S_{n-1}$	62,85	1,94	984,42	0,02
Coeficiente de variación					CV	1,97	4,55	9,49	4,18

**Observación:** Ninguna probeta se rompió en la zona calibrada para la medición de la deformación con extensómetro. Debido a esto no se reporta deformación a la rotura para las muestras del grupo "TT".

**Tabla 4.** Resultados de los ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D3039/D3039 M-17 para las probetas del grupo "TNT"

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo: TNT)									
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 (%)	
TNT-1 (MI-20-0571)	25,05	2,81	70,39	MWB	7357,22	104,52	13007,14	0,77	
TNT-2 (MI-20-0572)	25,24	2,72	68,51	MGM	7856,75	114,68	12145,45	0,88	
TNT-3 (MI-20-0573)	25,06	2,85	71,30	MWT	7766,78	108,94	13398,26	0,73	
TNT-4 (MI-20-0574)	25,23	2,77	69,87	GAB	6972,41	99,79	14576,33	0,64	
TNT-5 (MI-20-0575)	25,14	2,56	64,36	MWT	7259,48	112,80	13546,25	0,78	
Promedio					$\bar{x}$	7442,53	108,15	13334,69	0,76
Desviación estándar					$S_{n-1}$	366,92	6,08	882,05	0,09
Coeficiente de variación					CV	4,93	5,62	6,61	11,43





## 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



**Observación:** Únicamente la probeta TNT-2 (MI-20-0572) se rompió en la zona calibrada para la medición de la deformación con extensómetro, el valor de la deformación fue 0,88%. Debido a esto no se reporta deformación a la rotura para el resto de las probetas del grupo "TNT".

**Ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15:**

En las tablas 5, 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados en los grupos de probetas "FR", "FT" y "FNT" respectivamente.

**Tabla 5.** Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "FR"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR)										
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 (%)
FR-1 MI-20-0581	13,27	3,96	52,55	63,36	MUV	165,00	75,36	2800,91	2,94	2,94
FR-2 MI-20-0582	13,00	4,08	65,28	65,28	MUV	219,17	99,17	2972,41	4,20	4,21
FR-3 MI-20-0583	12,95	3,99	63,76	63,76	MUV	210,00	97,66	2910,81	4,12	4,12
FR-4 MI-20-0584	13,23	4,2	55,50	67,12	MUV	202,50	87,57	2876,48	3,35	3,36
FR-5 MI-20-0585	13,11	4,13	54,06	66,00	MUV	193,33	85,83	3176,27	3,00	3,00
				Promedio	$\bar{x}$	198,00	89,12	2947,38	3,52	3,53
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	20,76	9,70	142,16	0,60	0,61
				Coefficiente de variación	CV	10,48	10,89	4,82	17,14	17,18



## 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



**Tabla 6.** Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "FT"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FT)										
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 (%)
FT-1 MI-20-0576	13,07	4,48	58,53	71,68	TAM	190,83	78,25	3029,59	3,43	3,57
FT-2 MI-20-0577	13,16	4,39	57,77	70,24	TAM	185,00	76,85	4366,66	3,07	3,41
FT-3 MI-20-0578	13,08	4,43	57,88	70,8	TAM	174,17	72,22	4388,06	2,95	3,38
FT-4 MI-20-0579	13,22	4,43	58,50	70,80	TAM	191,67	78,63	4238,85	3,05	3,17
FT-5 MI-20-0580	13,28	4,47	59,27	71,44	TAM	183,33	74,23	4437,27	3,04	3,29
				Promedio	$\bar{x}$	185,00	76,04	4092,09	3,11	3,36
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	7,05	2,74	598,45	0,19	0,15
				Coefficiente de variación	CV	3,81	3,61	14,62	5,98	4,41

**Tabla 7.** Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "FNT"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FNT)										
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 (%)
FNT-1 MI-20-0586	13,31	4,14	55,08	66,24	TAM	287,50	125,27	6650,28	2,96	3,11
FNT-2 MI-20-0587	13,24	4,37	57,77	69,84	TAM	332,50	138,13	8640,39	2,98	3,03
FNT-3 MI-20-0588	13,26	4,46	59,12	71,36	MAM	324,68	131,81	7659,26	3,23	3,25
FNT-4 MI-20-0589	13,25	4,23	55,98	67,60	TAM	306,67	131,47	7635,86	2,76	2,84
FNT-5 MI-20-0590	13,31	4,44	59,01	70,96	TAM	333,54	135,66	8874,93	2,94	2,98
				Promedio	$\bar{x}$	316,98	132,47	7892,14	2,97	3,04
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	19,68	4,89	892,73	0,17	0,15
				Coefficiente de variación	CV	6,21	3,69	11,31	5,64	5,00





## 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



### Bibliografía

- American Society for Testing and Materials; ASTM D3039/D3039 M-17; Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials; West Conshohocken; 2017
- American Society for Testing and Materials; ASTM D7264/D7264 M-15; Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials; West Conshohocken; 2015

**OBSERVACIÓN:** La normativa para la organización y gestión de los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional, capítulo IV (De la difusión) menciona: "Si la contribución de un laboratorio es significativa y sustancial para la realización de una publicación, se deberá colocar al miembro(s) del laboratorio que contribuyó al desarrollo de la investigación como co-autor(es) de la publicación realizada". En este caso, por favor mantener comunicado al LANUM.

"El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe, así como de los respaldos enviados en formato digital para su tratamiento".

**NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO**

Realizado por:

Ing. Oriando Campaña  
Analista Técnico

Revisado y aprobado por:

Ing. Salomé Galeas  
Responsable Técnico (sustituto)

Autorizado por:

Paulina Romero, Ph.D.  
Coordinador del Laboratorio



## 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



### ANEXO A. Fotografías de las probetas después de los ensayos de tracción y flexión

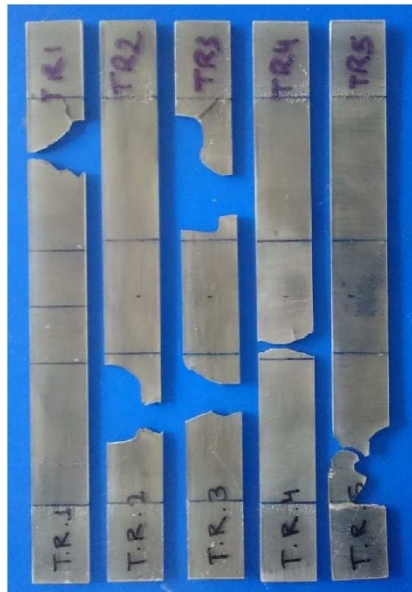


Figura A1. Probetas del grupo "TR" después de los ensayos de tracción.



Figura A2. Probetas del grupo "TT" después de los ensayos de tracción.



## 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



Figura A3. Probetas del grupo "TNT" después de los ensayos de tracción.



Figura A4. Probetas del grupo "FR" después de los ensayos de 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



**Figura A5.** Probetas del grupo "FT" después de los ensayos de flexión.



**Figura A6.** Probetas del grupo "FNT" después de los ensayos de flexión.



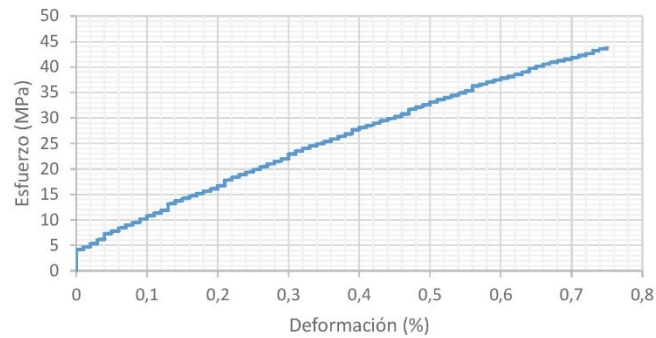


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

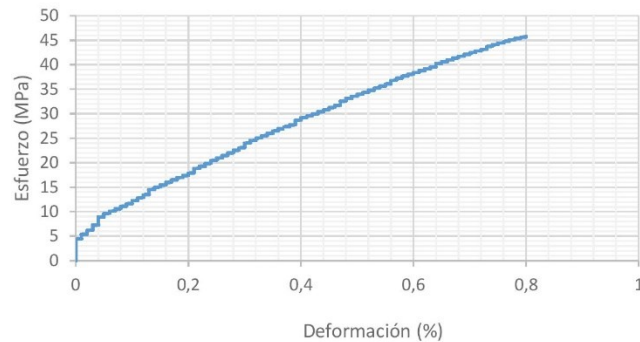
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



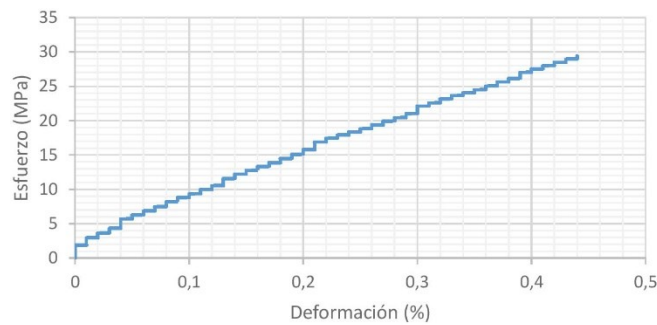
### ANEXO B. CURVAS ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA LAS PROBETAS DE TRACCIÓN.



**Figura B1.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TR-1 (MI-2020-0566)



**Figura B2.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TR-2 (MI-2020-0567)

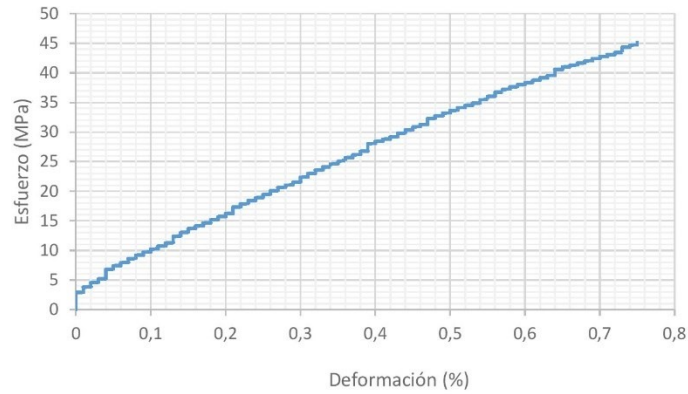


**Figura B3.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TR-3 (MI-2020-0568)

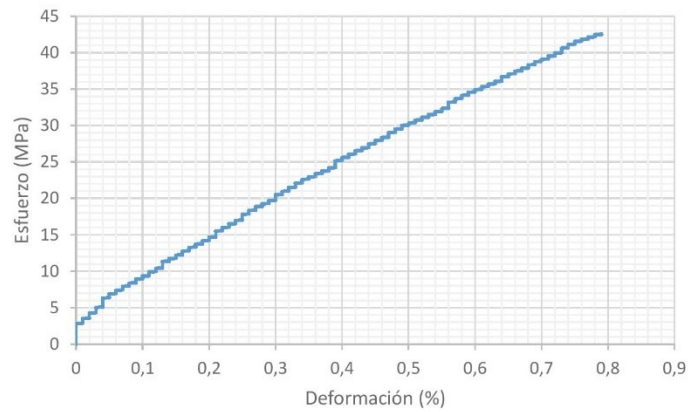


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura B4.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TR-4 (MI-2020-0569)

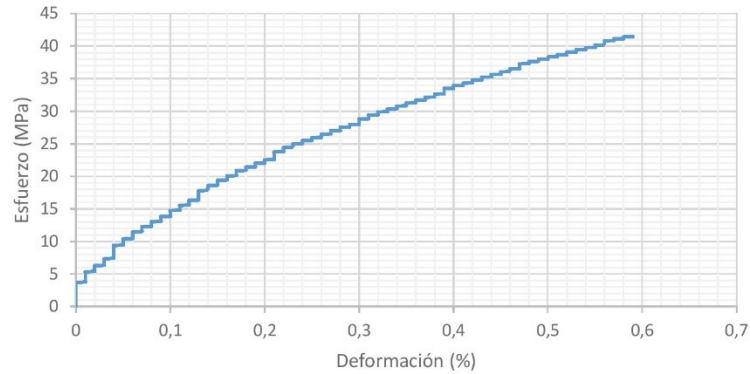


**Figura B5.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TR-5 (MI-2020-0570)

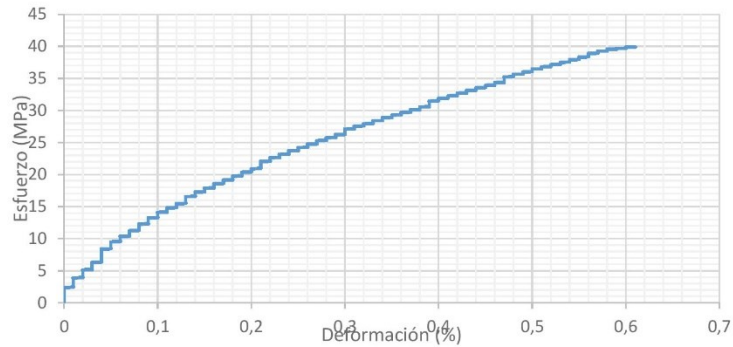


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

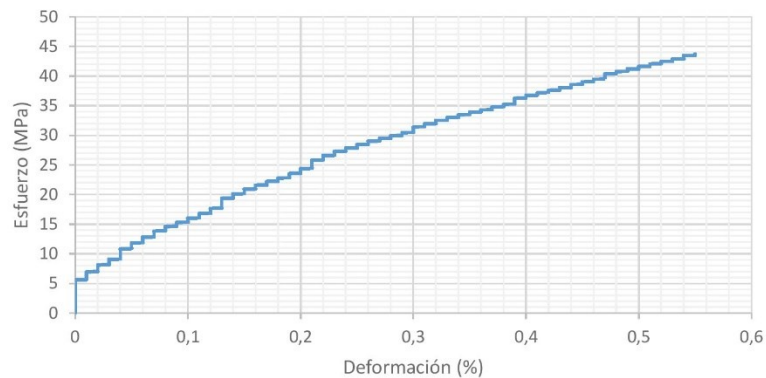
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura B6.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TT-1 (MI-2020-0561)



**Figura B7.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TT-2 (MI-2020-0562)



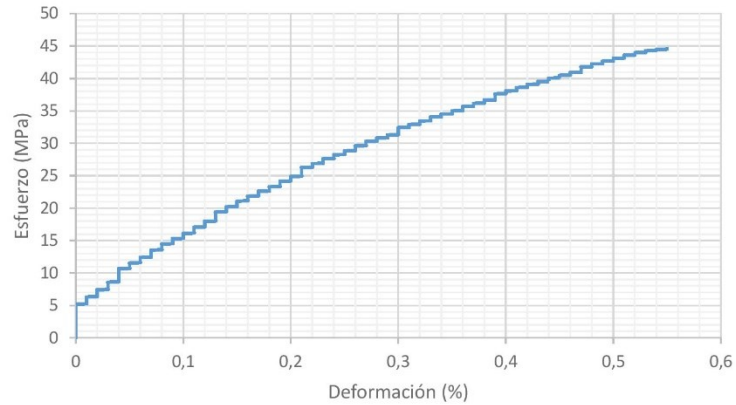
**Figura B8.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TT-3 (MI-2020-0563)



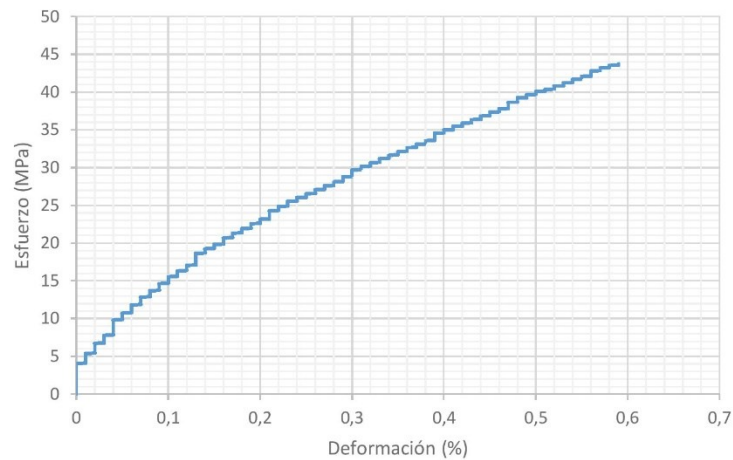


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura B9.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TT-4 (MI-2020-0564)

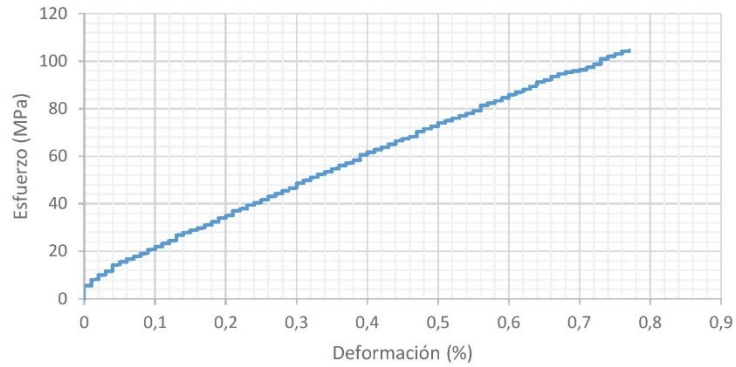


**Figura B10.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TT-5 (MI-2020-0565)

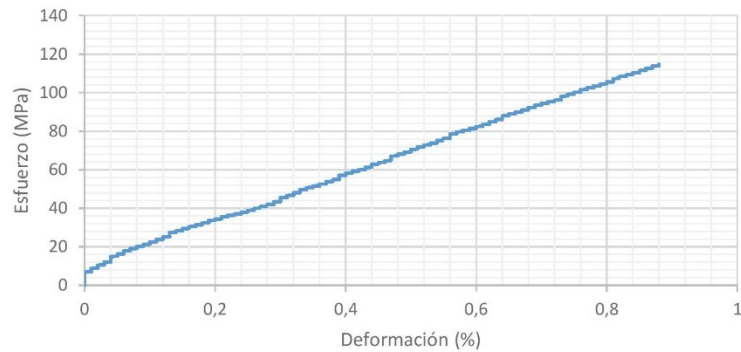


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

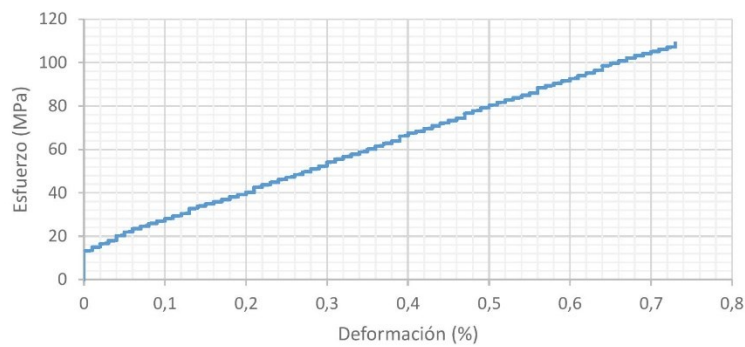
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura B11.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TNT-1 (MI-2020-0571)



**Figura B12.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TNT-2 (MI-2020-0572)

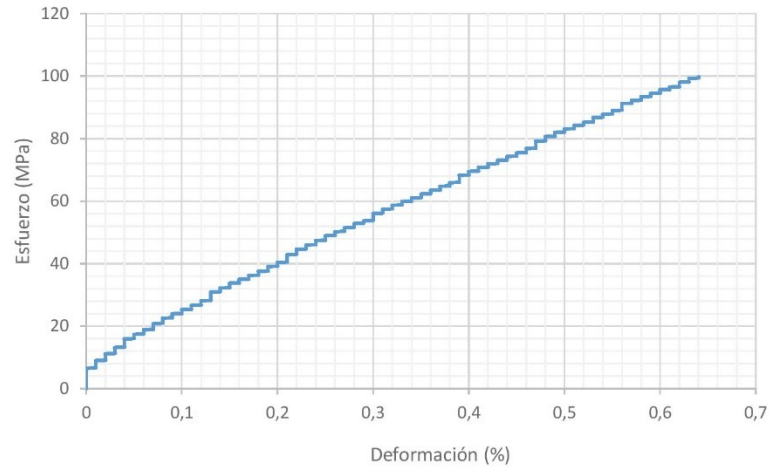


**Figura B13.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TNT-3 (MI-2020-0573)

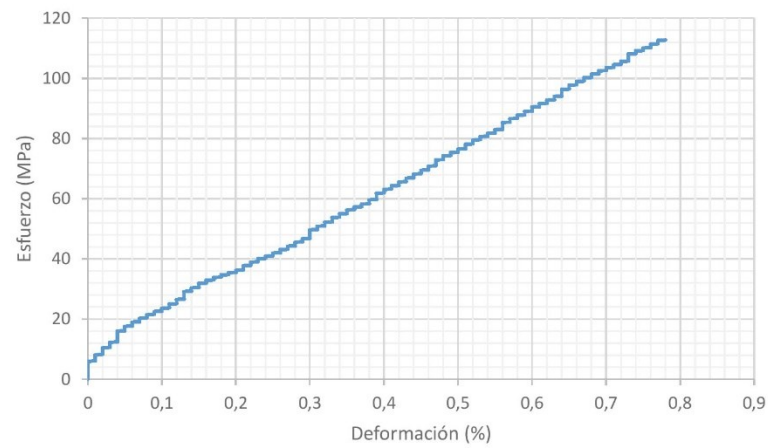


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura B14.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TNT-4 (MI-2020-0574)



**Figura B15.** Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta TNT-5 (MI-2020-0575)

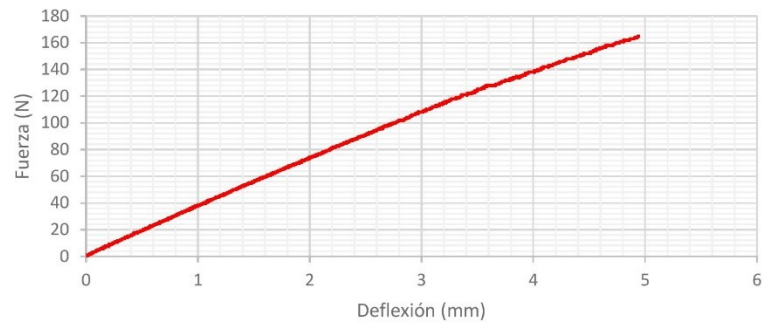


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

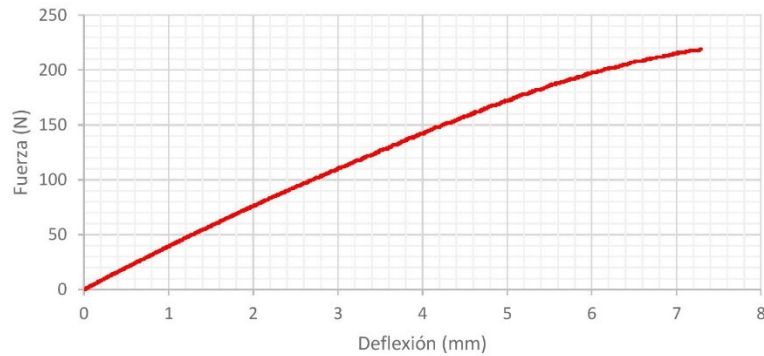
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



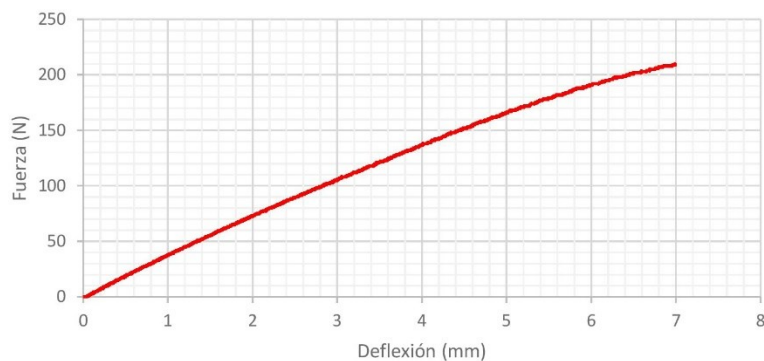
### ANEXO C. CURVAS FUERZA VS. DEFLEXIÓN PARA LAS PROBETAS DE FLEXIÓN.



**Figura C1.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-1 (MI-2020-0581)



**Figura C2.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-2 (MI-2020-0582)

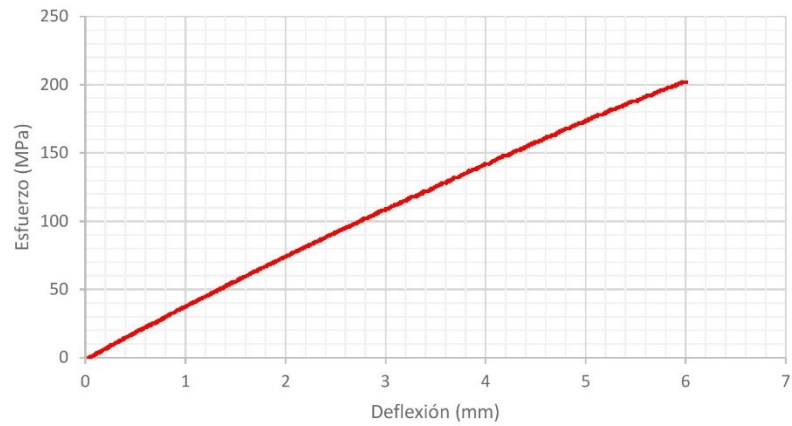


**Figura C3.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-3 (MI-2020-0583)

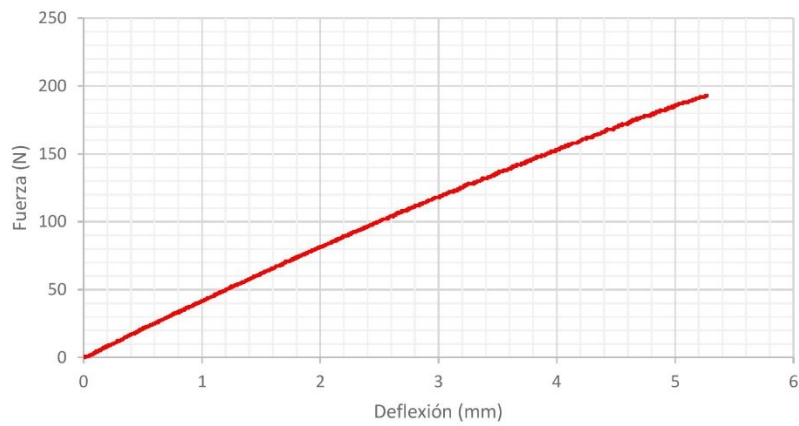


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura C4.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-4 (MI-2020-0584)

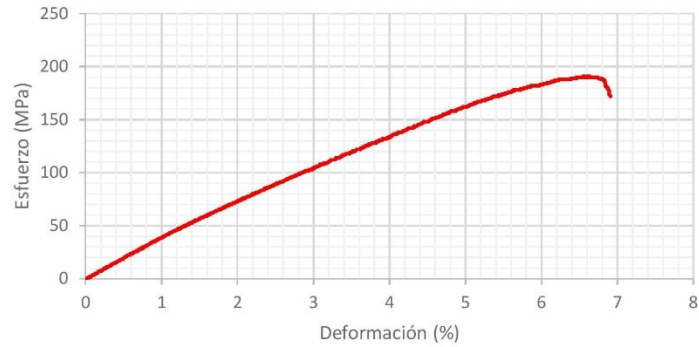


**Figura C5.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-4 (MI-2020-0585)

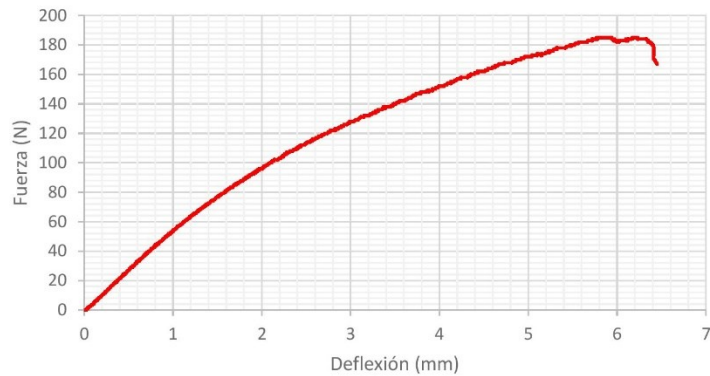


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

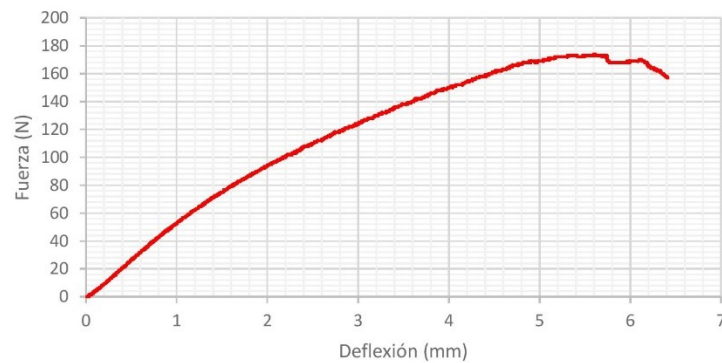
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura C6.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-1 (MI-2020-0576)



**Figura C7.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-2 (MI-2020-0577)



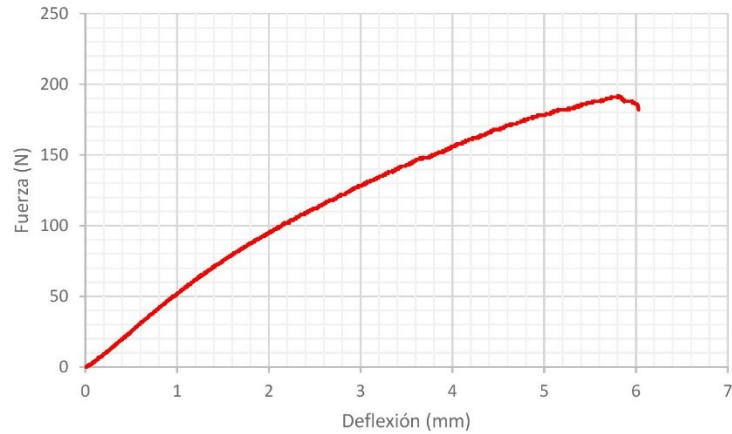
**Figura C8.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-3 (MI-2020-0578)



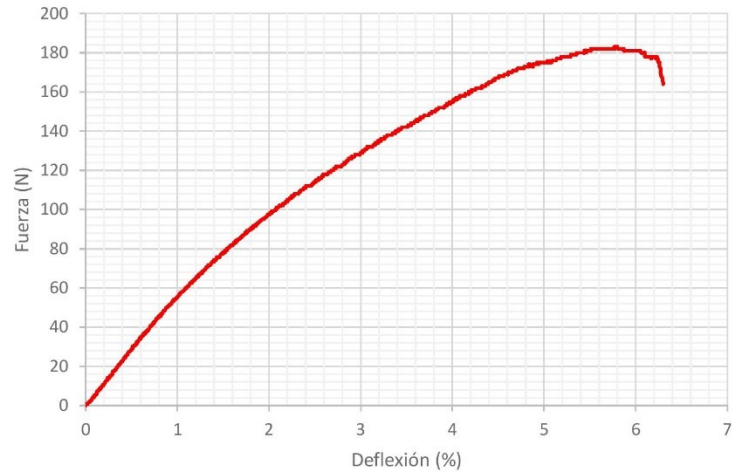


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura C9.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-4 (MI-2020-0579)



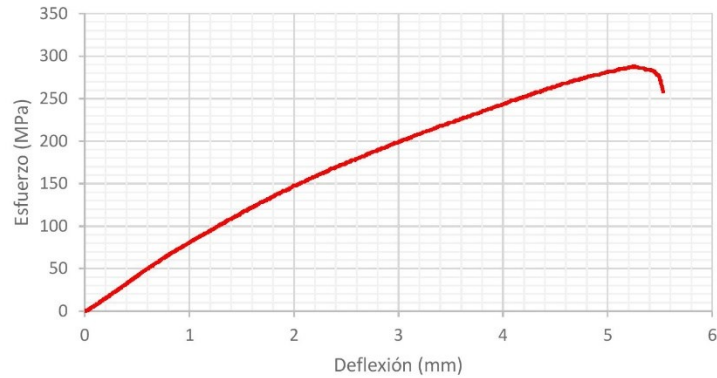
**Figura C10.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-5 (MI-2020-0580)



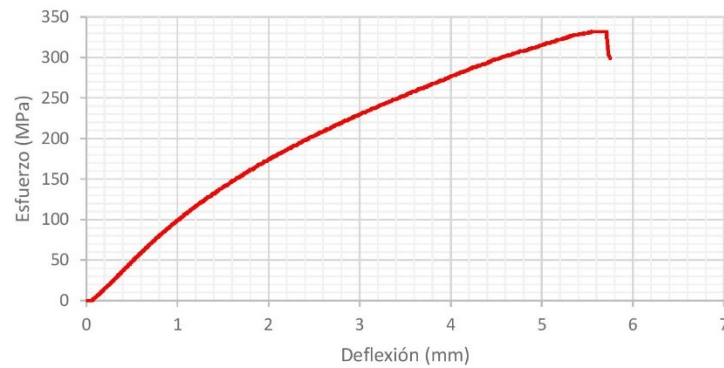


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

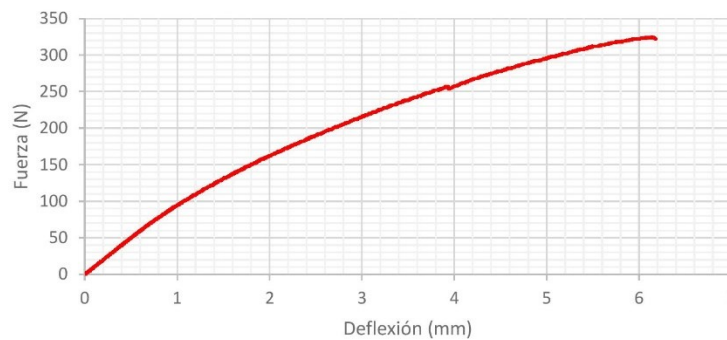
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura C11.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FNT-1 (MI-2020-0586)



**Figura C12.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FNT-2 (MI-2020-0587)

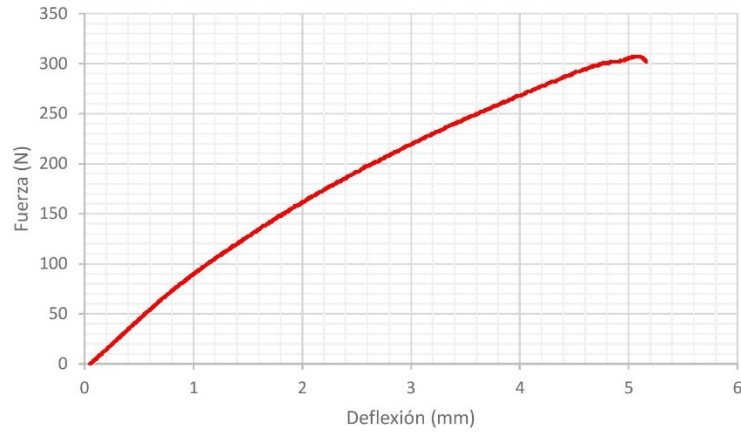


**Figura C13.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FNT-3 (MI-2020-0588)

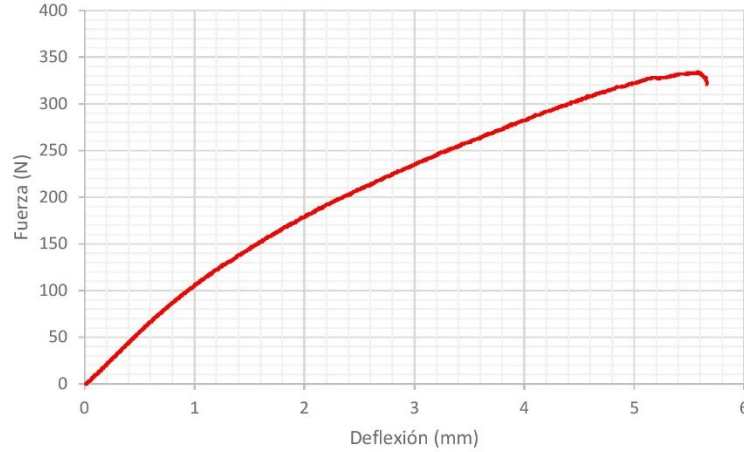


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura C14.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FNT-4 (MI-2020-0589)



**Figura C15.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FNT-5 (MI-2020-0590)

## Anexo VI. Resultados de ensayos de tracción y flexión con uso de calibrador vernier para medición de dimensiones de las probetas (Segundo informe).



### 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-2020-028

Solicitud de trabajo No. LANUM-2020-ST.030

Quito, 21 de diciembre de 2020

#### DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

Solicitado por: Patricia Rodríguez, Ph.D.  
Empresa / Institución: EPN- 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 "FR"  
5 Probetas "FT"

Descripción de la(s) muestra(s):

10 probetas de materiales compuestos con matriz de resina poliéster y reforzados con tejido de fibras naturales, preparados mediante infusión al vacío. Las probetas de los grupos "FR" y "FT" y se utilizarán para realizar ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15.

**Observación:** De acuerdo con la proforma LANUM-2020-032 y la solicitud de trabajo No. LANUM-2020-ST.030 el cliente solicitaba ensayos flexión en 11 probetas; sin embargo, el cliente únicamente entregó al laboratorio 10 probetas.

#### LABORATORIO

Fecha de ingreso al Laboratorio: 09/12/2020

Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):  
MI-20-0686 a la MI-20-0690 para las probetas del grupo "FR",  
MI-20-0691 a la MI-20-0695 para las probetas del grupo "FT"

Fecha en que se realizó el ensayo: 14/12/2020 y 16/12/2020

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.



## 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



**Tabla 1.** Condiciones ambientales corregidas en las fechas que se ensayaron los grupos de probetas.

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
"FR" MI-20-0686 a la MI-20-0690	14/12/2020	19,5	19,9	51,1	50,7
"FT" MI-20-0691 a la MI-20-0695	16/12/2020	19,8	20,1	47,6	48,9

### EQUIPOS UTILIZADOS

- Máquina universal de ensayos marca: Tinius Olsen, modelo: H25KS; capacidad máxima 25 KN; precisión utilizada: 0,01 N. Utilizado para medir las propiedades a tracción y flexión de las probetas de material compuesto.
- Calibrador de vernier marca: Mitutoyo, modelo: Absolute Digimatic (12"/300 mm) con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir las dimensiones de las probetas de material compuesto.
- Termohigrómetro marca ELITECH, modelo RCW-800 wifi con una apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR. Utilizado para medir y registrar las condiciones ambientales.

### MÉTODO EMPLEADO.

**Ensayos de flexión:** El método empleado es el descrito en la norma ASTM D7264/D7264 M-15

- Procedimiento A: Flexión en tres puntos
- Relación espesor-distancia entre apoyos: 1:16
- Velocidad de ensayo: 1 mm/min
- El código de identificación de la falla en las probetas se muestra en la figura 2 y corresponde a la figura 6 de la norma ASTM D7264/D7264-M15, página 6.

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 1.** Código de identificación de las fallas en las probetas sometidas a los ensayos de flexión.

### RESULTADOS

**Ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-15:**

En las tablas 2, y 3 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados en los grupos de probetas "FR" y "FT" respectivamente.



## 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



**Tabla 2.** Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "FR"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FR)										
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 secante a flexión (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
FR-1 MI-20-0686	12,89	3,84	49,50	61,44	MUV	178,33	86,47	2594,20	5,11	7,75
FR-2 MI-20-0687	12,90	4,00	51,60	64,00	MUV	176,67	82,17	2490,77	5,34	7,94
FR-3 MI-20-0688	13,26	4,03	53,44	64,48	MUV	173,33	77,85	2242,97	5,40	8,15
FR-4 MI-20-0689	12,97	4,01	52,01	64,16	MUV	173,33	79,98	2286,74	5,18	6,41
FR-5 MI-20-0690	13,06	3,95	51,59	64,16	MUV	155,16	73,28	2061,87	5,80	7,98
				Promedio	$\bar{x}$	171,36	79,95	2335,31	5,37	7,65
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	9,31	4,91	210,27	0,27	0,71
				Coefficiente de variación	CV	5,44	6,14	9,00	5,02	9,23

**Tabla 3.** Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "FT"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: FT)										
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 secante a flexión (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
FT-1 MI-20-0691	13,04	4,63	60,38	74,08	TAM	184,17	73,21	3764,75	3,37	3,62
FT-2 MI-20-0692	13,04	4,56	59,37	72,88	TAM	196,67	79,50	4140,70	3,59	3,77
FT-3 MI-20-0693	12,95	4,38	56,70	70,08	TAM	189,86	80,36	4694,30	3,39	3,55
FT-4 MI-20-0694	12,84	4,29	55,02	68,56	TAM	174,17	75,97	3839,63	3,38	3,67
FT-5 MI-20-0695	13,10	4,6	60,24	73,60	TAM	191,67	76,36	3889,03	3,73	4,16
				Promedio	$\bar{x}$	187,31	77,08	4065,68	3,49	3,75
				Desviación estándar	$S_{n-1}$	8,60	2,89	378,70	0,16	0,24
				Coefficiente de variación	CV	4,59	3,75	9,31	4,62	6,41





## 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



### Bibliografía

- American Society for Testing and Materials; ASTM D7264/D7264 M-15; Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials; West Conshohocken; 2015

**OBSERVACIÓN:** La normativa para la organización y gestión de los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional, capítulo IV (De la difusión) menciona: "Si la contribución de un laboratorio es significativa y sustancial para la realización de una publicación, se deberá colocar al miembro(s) del laboratorio que contribuyó al desarrollo de la investigación como co-autor(es) de la publicación realizada". En este caso, por favor mantener comunicado al LANUM.

"El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe, así como de los respaldos enviados en formato digital para su tratamiento".

**NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO**

Realizado por:

Ing. Orlando Campaña  
Analista Técnico

Revisado y aprobado por:

Ing. Salomé Galeas  
Responsable Técnico (sustituto)

Autorizado por:

Paulina Romero, Ph.D.  
Coordinador del Laboratorio



## 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



### ANEXO A. Fotografías de las probetas después de los ensayos flexión.



Figura A1. Probetas del grupo "FR" después de los ensayos de flexión.



Figura A2. Probetas del grupo "FT" después de los ensayos de flexión.



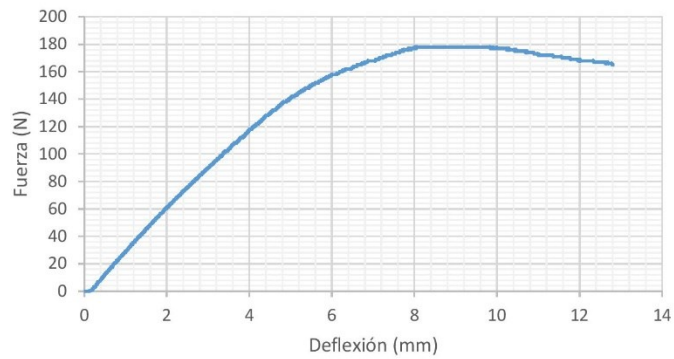


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

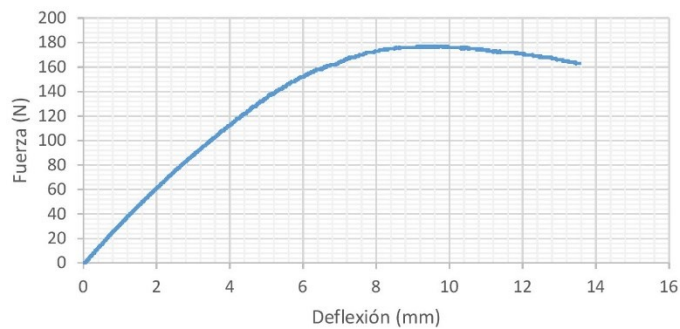
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



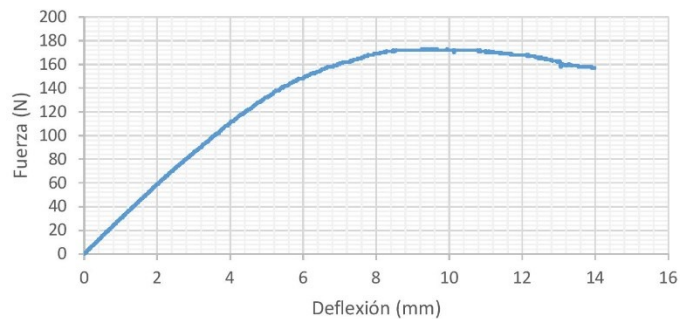
### ANEXO B. CURVAS ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA LAS PROBETAS DE FLEXIÓN.



**Figura B1.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-1 (MI-2020-0686)



**Figura B2.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-2 (MI-2020-0687)

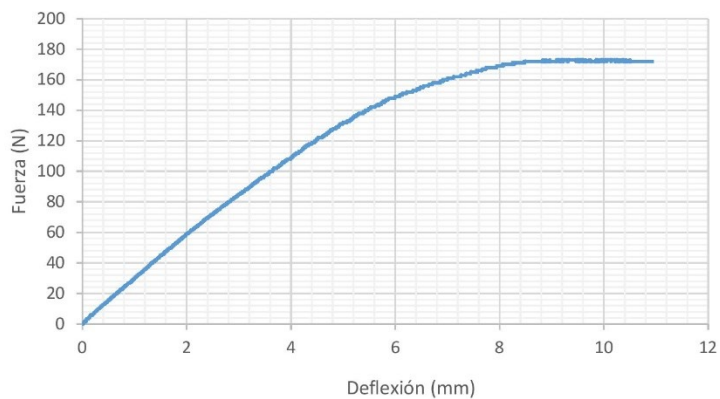


**Figura B3.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-3 (MI-2020-0688)

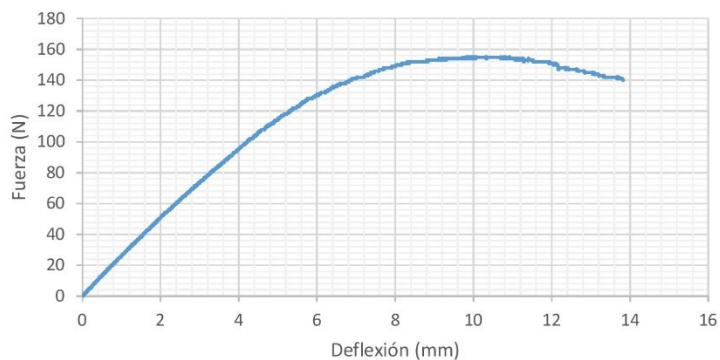


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura B4.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-4 (MI-2020-0689)

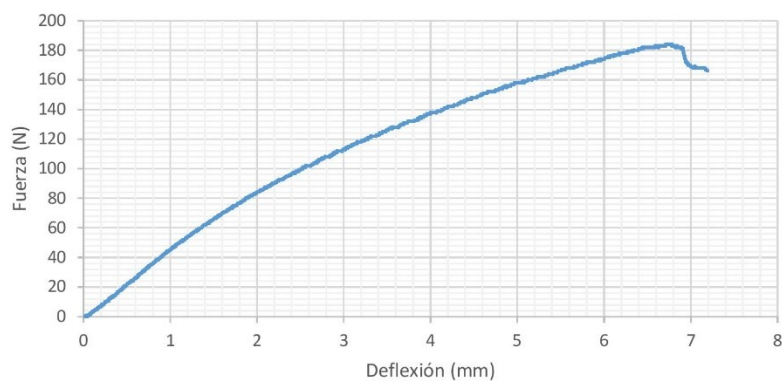


**Figura B5.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FR-5 (MI-2020-0690)

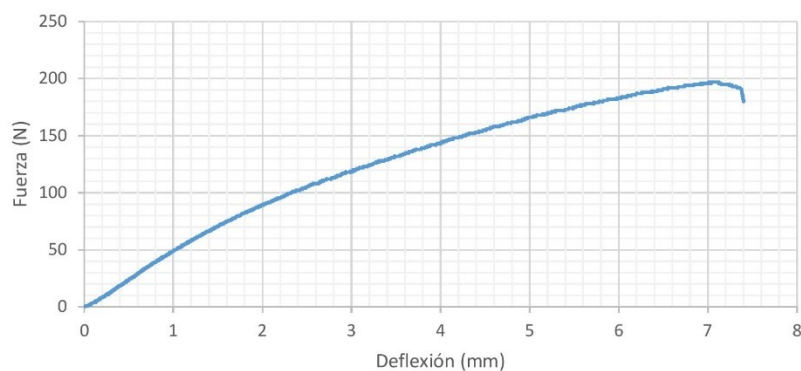


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

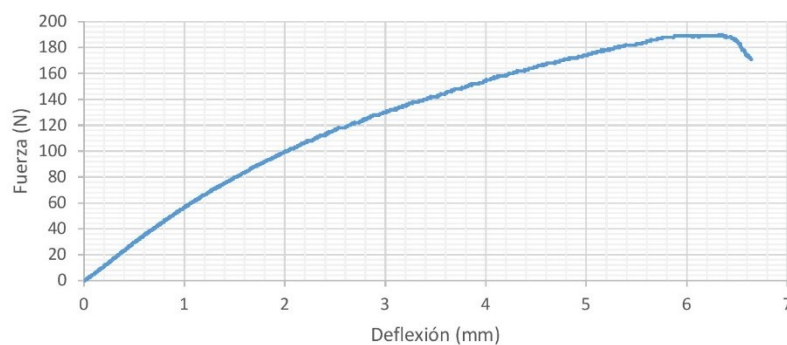
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura B6.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-1 (MI-2020-0691)



**Figura B7.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-2 (MI-2020-0692)

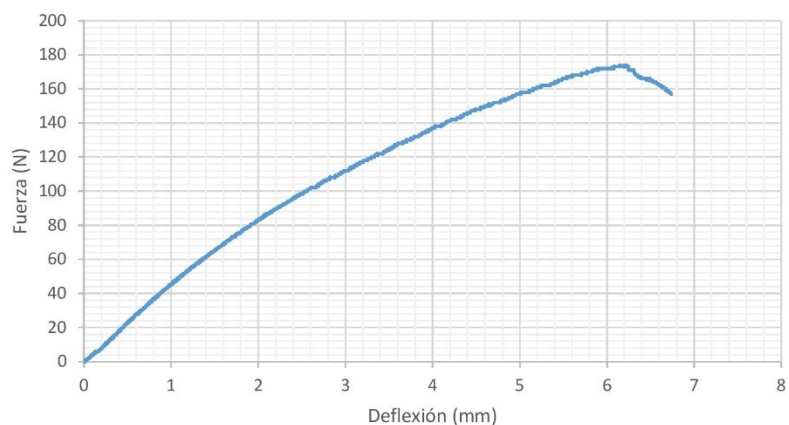


**Figura B8.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-3 (MI-2020-0693)

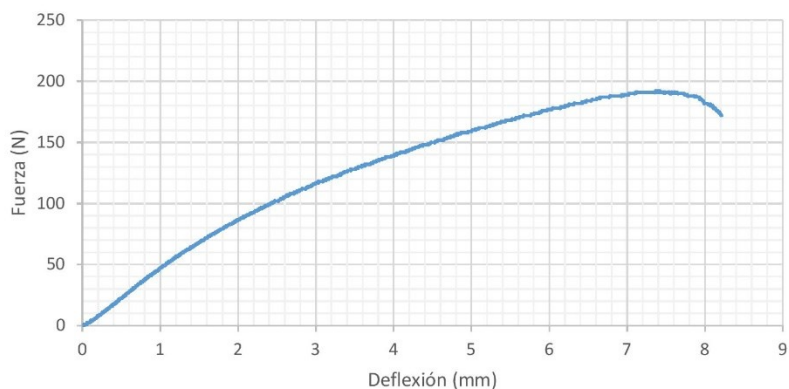


## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



**Figura B9.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-4 (MI-2020-0694)



**Figura B10.** Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta FT-5 (MI-2020-0695)