

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

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

**COMPONENTE: CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFAZ DE UN
MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADO
CON FIBRA NATURAL OBTENIDO POR MEDIO DE
ESTRATIFICACION MANUAL CON EL USO DE MICROSCOPIA**

**TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
MECANICO**

LUIS ALFREDO PASTUÑA MAZA

luis.pastuna@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PhD.

patricia.rodriquez@epn.edu.ec

DMQ, agosto, 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Luis Alfredo Pastuña Maza estudiante de la carrera de ingeniería mecánica, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

LUIS ALFREDO PASTUÑA MAZA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Luis Alfredo Pastuña Maza, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PhD.

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

**REVISOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**REVISOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

Luis Alfredo Pastuña Maza.

Ing. Patricia Aracelly Rodríguez Salazar PhD.

NOMBRE_COLABORADOR(ES)

Tabla de contenido

1. Contenido

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
Tabla de contenido.....	III
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Materiales compuestos.....	2
1.4.2 Fibras naturales de origen vegetal en Ecuador.....	4
1.4.3 Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra natural por medio de estratificación manual.....	10
1.4.4 Variables de procesamiento por estratificación.....	10
1.4.5 Ensayos destructivos y evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.....	13
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1.1 Materiales utilizados	17
2.1.2 Equipos	20
2.2.1 Determinación de la cantidad en peso de los componentes que conforman la matriz del material compuesto.	25
2.2.2 Determinación de la cantidad de tejido de fibras de cabuya utilizada como material de refuerzo.....	26

2.2.3	Determinación de la carga de presión adecuada.....	27
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	34
3.1	Pruebas.....	34
3.1.1	Caracterización de tejido de cabuya.....	34
3.1.2	Caracterización de materiales compuestos.....	34
3.2	Resultados.....	39
3.2.1	Ensayos de tracción.....	39
3.2.2	Ensayos de flexión.....	43
3.2.3	Ensayos de impacto.....	46
3.2.4	Micrografía.....	47
3.3	Conclusiones.....	51
3.4	Recomendaciones.....	53
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
4.	Bibliografía.....	54
5	ANEXOS.....	59

2. Índice de figuras

Figura 1 Esquema de un material compuesto [3]	3
Figura 2 Interfaz de un material compuesto, obtenido por microscopia electrónica.....	4
Figura 3 Planta de cabuya	5
Figura 4 Proceso de hilado de la cabuya	6
Figura 5 Aplicaciones de la fibra de cabuya en ecuador [17]	8
Figura 6 Esquema fundamental de un tejido	9
Figura 7 Fibras de refuerzo con: a) orientación unidireccional y b) capas cruzadas.....	9
Figura 8 Esquema del proceso de tracción de un material.....	14
Figura 9 Esquema del ensayo de flexión	14
Figura 10 comprobador de impacto variable	15
Figura 11 Microscopio óptico, Olympus BX60.....	16
Figura 12 Tejido de fibra de cabuya.....	17
Figura 13 Resina poliéster transparente	17
Figura 14 Monómero de estireno.	18
Figura 15 Octoato de cobalto.....	18
Figura 16 Peróxido metil-etil cetona.....	19
Figura 17 Rodillo de laminación	19
Figura 18 Vaselina solida desmoldante.....	20
Figura 19 Molde de duro aluminio.....	20
Figura 20 Balanza digital	21
Figura 21 Caladora para corte de material compuesto.....	21
Figura 22 Lijas abrasivas	21
Figura 23 Prensa hidráulica manual.....	22
Figura 24 Máquina de ensayo universal.....	22

Figura 25 Mecanismo de tracción	23
Figura 26 Mecanismo de flexión	23
Figura 27 Comprobador de impacto variable	24
Figura 28 Dardo para ensayo de impacto	24
Figura 29 Microscopio de marca Olympus SZX7	24
Figura 30 Muestra de resina poliéster	25
Figura 31 Plancha de material compuesto con formaciones de burbujas.....	27
Figura 32 Plancha de material compuesto con buen aspecto	27
Figura 33 Mezcla de resina con aditivos	28
Figura 34 Película delgada de mezcla resina- aditivos.....	28
Figura 35 Capa de tejido de cabuya	29
Figura 36 Aplicación de cargas con prensa hidráulica	29
Figura 37 Desmolde del material compuesto solidificado.....	29
Figura 38 Corte de planchas de material compuesto	30
Figura 39 Masa de una muestra de tejido de fibra	30
Figura 40 Volumen de una muestra de tejido de fibra	31
Figura 41 Código de identificación de fallas en probetas sometidas a ensayos de tracción	35
Figura 42 sistema de cargas de tres puntos	36
Figura 43 Código de identificación de fallas en probetas sometidas a ensayos de flexión	37
Figura 44 Probetas de material compuesto después de ensayo normalizado de tracción	39
Figura 45 Resultados de los ensayos de tracción realizados a probetas de material compuesto obtenidos por la técnica de Estratificación manual	40
Figura 46 Resultados de los ensayos de tracción realizados a probetas de material compuesto obtenidos por la técnica de infusión al vacío.....	40

Figura 47 Diagrama resistencia a la tracción vs deformación en probetas de material compuesto obtenidos por medio de la técnica de estratificación manual	41
Figura 48 Diagrama resistencia a la tracción vs deformación en probetas de material compuesto obtenidos por medio de la técnica de Infusión al vacío	41
Figura 49 Comparación del módulo secante de elasticidad en materiales compuestos obtenidos por estratificación manual e infusión al vacío.....	42
Figura 50 Comparación del módulo secante de elasticidad corregido en materiales compuestos obtenidos por estratificación manual e infusión al vacío.....	42
Figura 51 Probetas de material compuesto después de realizar el ensayo de flexión.....	43
Figura 52 Resultados de los ensayos de flexión realizados a probetas obtenidas por medio de estratificación manual	43
Figura 53 Resultados de los ensayos de flexión realizados a probetas obtenidas por medio de Infusión al vacío.....	44
Figura 54 Diagrama resistencia a la flexión vs deformación de probetas de material compuesto obtenidas por estratificación manual.....	44
Figura 55 Diagrama resistencia a la flexión vs deformación de probetas de material compuesto obtenidas por infusión al vacío	45
Figura 56 comparación del módulo elástico de flexión de probetas obtenidas por estratificación manual e infusión al vacío.....	45
Figura 57 Probetas de material compuesto después de realizar los ensayos de impacto	46
Figura 58 Micrografía de probeta 1 después del ensayo de tracción	47
Figura 59 Micrografía de probeta 2 después del ensayo de tracción	47
Figura 60 micrografía de probeta 3 después del ensayo de tracción	47
Figura 61 micrografía de probeta 4 después del ensayo de tracción	48
Figura 62 Micrografía de probeta 5 después del ensayo de tracción	48
Figura 63 Micrografía de probeta 1 después del ensayo de flexión.....	48
Figura 64 Micrografía de probeta 2 después del ensayo de flexión.....	49
Figura 65 Micrografía de probeta 3 después del ensayo de flexión.....	49

Figura 66 Micrografía de probeta 4 después del ensayo de flexión.....	49
Figura 67 Micrografía de probeta 5 después del ensayo de flexión.....	49
Figura 68 Micrografía de probeta 27 después del ensayo de impacto	50
Figura 69 Micrografía de probeta 28 después del ensayo de impacto	50
Figura 70 Micrografía de probeta 29 después del ensayo de impacto	51

3. Índice de tablas

Tabla 1 Características físicas de la fibra de cabuya	7
Tabla 2 Propiedades mecánicas de las fibras de cabuya.....	7
Tabla 3 cantidad de resina utilizada para la fabricación de planchas de material compuesto	26
Tabla 4 Porcentaje en gramos de aditivos	26
Tabla 5 número de capas de refuerzo utilizadas para cada plancha de material compuesto	26
Tabla 6 Densidad de la fibra de cabuya.....	31
Tabla 7 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de tracción.....	32
Tabla 8 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de flexión.....	32
Tabla 9 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de impacto.....	33
Tabla 10 Porcentaje volumétrico de matriz y refuerzo en probetas de material compuesto	33
Tabla 11 Propiedades mecánicas del tejido de fibras de cabuya	34
Tabla 12 Parámetros de control para ensayos de tracción	34
Tabla 13 Parámetros de control para ensayos de flexión.....	36
Tabla 14 Parámetros de control para ensayos de impacto	38
Tabla 15 Valores calculados de altura media de falla y energía media de falla de materiales compuestos obtenidos por las técnicas de estratificación manual e infusión al vacío	46

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el procedimiento realizado para la obtención de probetas de materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo de tejido de fibras de cabuya, empleando el método de estratificación manual.

Una vez obtenidas las probetas, estas fueron caracterizadas mediante ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto de acuerdo a las normas ASTM D3039/D3039 M-17, ASTM D7264/D7264 M-15 y ASTM 5628, respectivamente, para poder determinar sus propiedades mecánicas. Con los datos obtenidos se calculó los valores de resistencia a la rotura en probetas de tracción y flexión, mientras que, en las probetas de impacto, se calculó la altura media de falla y la energía media de falla.

Después de efectuarse los ensayos normalizados en las probetas, por medio de microscopia óptica se examinó la interfaz matriz- refuerzo para poder visualizar el nivel de adherencia entre ellos e intuir condiciones que produjeron las fallas del material en los ensayos realizados.

Finalmente, se comparan los resultados de las propiedades mecánicas en probetas de material compuesto obtenidas mediante la técnica de estratificación manual, con las probetas obtenidas por infusión al vacío para establecer la técnica que proporciona mejores propiedades mecánicas a un material compuesto.

PALABRAS CLAVE: Materiales compuestos, Estratificación manual, microscopia, fibras de cabuya, tejidos, refuerzo, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

This work describes the procedure carried out to obtain specimens of polymeric matrix composite materials with cabuya fiber fabric reinforcement, using the manual stratification method.

Once the specimens were obtained, they were characterized by means of standardized tensile, flexural and impact tests according to ASTM D3039/D3039 M-17, ASTM D7264/D7264 M-15 and ASTM 5628, respectively, in order to determine their mechanical properties. The data obtained were used to calculate the breaking strength values for tensile and flexural specimens, while the mean failure height and mean failure energy were calculated for impact specimens.

After the standardized tests were performed on the specimens, the matrix-reinforcement interface was examined by means of optical microscopy in order to visualize the level of adhesion between them and to intuit the conditions that produced the material failures in the tests performed.

Finally, the results of the mechanical properties of composite specimens obtained by the manual layering technique are compared with the specimens obtained by vacuum infusion, to establish the technique that provides better mechanical properties to a composite.

KEY WORDS: Composite materials, manual stratification, microscopy, cabuya fibers, fabrics, reinforcement, mechanical properties.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El componente trata del desarrollo de probetas de material compuesto con matriz polimérica, reforzada con fibras de cabuya a través del método de estratificación manual. Estas probetas fueron elaboradas con tejido de fibras de cabuya, las cuales fueron previamente caracterizadas a partir de la norma ASTM 5034 (resistencia a la tracción y elongación a la rotura). De este ensayo se evidenció que las características mecánicas del tejido de fibras de cabuya, eran similares en diferentes direcciones (estos resultados se pueden apreciar en (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de este trabajo) lo que proporciona propiedades isotrópicas al material compuesto. Para la elaboración de las planchas de material compuesto se utilizó resina poliéster junto a tres reactivos que ayudaron a reducir el tiempo de curado del componente, los cuales fueron colocados en porcentajes en peso, tomando como referencia el peso de resina utilizada. Al momento de trabajar con reactivos, se consigue un menor tiempo de curado, pero debido a la reacción química de curado se producen vapores que quedan atrapados en forma de burbujas dentro del material compuesto, lo que reduce las características mecánicas del producto final (probetas). Para reducir la formación de estas burbujas se aplica precargas de presión sobre la matriz del molde obteniendo, como resultado, un material considerablemente más compacto. Una vez obtenidas las planchas de material compuesto, estas fueron cortadas a medida de acuerdo a las medidas establecidas en las normas ASTM usadas en este trabajo para conformar las probetas necesarias para los ensayos mecánicos y a partir de estos ensayos obtener la información necesaria para poder realizar la comparación de resultados.

1.1 Objetivo general

Caracterizar la interfaz de un material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibra de cabuya obtenida por medio de estratificación manual con el uso de microscopía.

1.2 Objetivos específicos

1. Obtener probetas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzada con tejidos de fibra de cabuya mediante estratificación manual.
2. Caracterizar y analizar las propiedades mecánicas de un material compuesto, mediante ensayos mecánicos normalizados.
3. Analizar microscópicamente la interfaz del material compuesto.
4. Comparar los resultados de la caracterización de las probetas obtenidas por medio de estratificación manual con los resultados obtenidos de las probetas fabricadas por

infusión al vacío y relacionar estos resultados con la interfaz observada en ambos casos.

1.3 Alcance

Este trabajo consta de:

Obtención de las probetas de material compuesto mediante el proceso de estratificación manual. Para esto primeramente fue necesaria la fabricación de un molde metálico constituido de dos piezas, una matriz hembra y otra macho (plano adjunto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Una vez obtenido el molde, se procede a la elaboración de las planchas de material compuesto, considerando como factor principal el espesor final del material, especificado en las normas ASTM para ensayos de tracción, flexión e impacto. Después de obtener las planchas de material compuesto con sus espesores específicos, se procedió a cortar y afinar las dimensiones de largo y ancho que establecen las normas para la obtención de las probetas requeridas.

Caracterización de las probetas por medio de ensayos normalizados, para luego evaluar la interfaz de las probetas ensayadas por medio de microscopia y analizar los resultados obtenidos.

Comparación de los resultados de los materiales compuestos obtenidos por medio de la técnica de estratificación manual con los resultados obtenidos con la técnica de infusión al vacío.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos o composites, son una combinación entre dos o más elementos que poseen diferentes propiedades físicas y químicas, de tal manera que las propiedades del componente final obtenido, serán superiores al de los elementos por separado. Entre las características que se pueden mejorar con los materiales compuestos, está la resistencia a la flexión, tensión e impacto, eficiencia, efectividad, entre otras [1].

1.4.1.1 Componentes de los materiales compuestos

Los elementos característicos de un material compuesto son matriz y refuerzo (ver Figura 1):

Matriz: es la fase continua superficial del material compuesto que contiene al material de refuerzo. Estos elementos pueden ser metálicos, cerámicos o resinas orgánicas y entre

sus funciones están, definir las propiedades físicas, químicas, eléctricas y resistencia a temperaturas elevadas, así como también, transmitir las cargas al refuerzo, protegerlo y darle cohesión. Otras características que determina la matriz, es la conformabilidad y acabado superficial que tendrá el material. Dependiendo de las sollicitaciones mecánicas, la matriz es la encargada de cumplir ciertas funciones, por ejemplo, bajo cargas compresivas, es la encargada de soportar el esfuerzo, debido a que presenta una fase continua y, por tanto, es más resistente a este tipo de sollicitación mecánica. Ante cargas de tracción, es la encargada de transmitir las mismas a cada una de las fibras o partículas de refuerzo, por lo que, es necesario que exista una adecuada adhesión entre la matriz y refuerzo. Varias veces, la matriz es la encargada de determinar la resistencia al impacto y detener la propagación de una fisura [2].

Refuerzo: corresponde a la fase discontinua del material compuesto, el cual, se agrega a la matriz para proporcionarle cierta propiedad que la matriz no posee. Estos pueden colocarse en forma de fibras o partículas y son empleadas para incrementar la resistencia y rigidez mecánica, así como también para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o resistencia a la abrasión. La regla general, en cuanto a efectividad, dice que cuando menor sea el tamaño de las partículas y con una distribución más homogénea o cuando se incrementa la relación longitud- diámetro, se obtienen materiales con mejor interfase matriz- refuerzo. Las fibras más utilizadas son las fibras de carbono, fibras de vidrio, fibras orgánicas y fibras naturales [2].

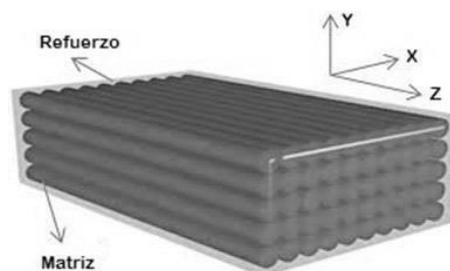


Figura 1 Esquema de un material compuesto [3]

1.4.1.2 Interfase

La interfase corresponde a la región de contacto de la matriz con las fibras de refuerzo del material compuesto y, de ésta dependerán las propiedades que presente el mismo (ver Figura 2). En consecuencia, si la interfase entre los elementos del material compuesto es débil, se forman vacíos entre la matriz y las fibras lo que no permitirá una transferencia de carga adecuada de la matriz hacia las fibras de refuerzo haciendo que la matriz soporte toda la carga y termine fracturándose.

Normalmente, obtener una adecuada adhesión entre la matriz y las fibras de un material compuesto es sumamente complicado, debido a que ambos elementos son de diferente naturaleza y la adhesión de estos depende del contacto de los átomos en la superficie de cada uno de los componentes. Para mejorar la adhesión de la matriz con la interfase, se suele incorporar aditivos sobre las fibras de refuerzo para hacer más compatible la unión con la matriz.

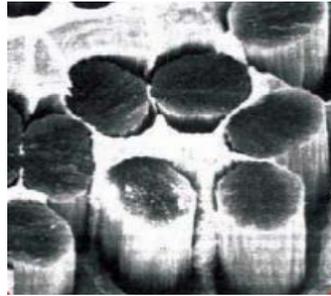


Figura 2 Interfaz de un material compuesto, obtenido por microscopía electrónica
Fuente [2]

1.4.1.3 Clasificación de los materiales compuestos

En función de sus elementos característicos los materiales compuestos se pueden clasificar según su tipo de matriz o su tipo de refuerzo [1].

Según su tipo de matriz, los materiales compuestos se clasifican en materiales compuestos de matriz metálica, matriz cerámica y matriz orgánica, polimérica o plástica reforzada.

Según su tipo de refuerzo, los materiales compuestos se clasifican en:

- Fibras de vidrio
- Fibras de carbono
- Fibras boro
- Fibras de cerámica
- Fibras metálicas
- Fibras de aramida
- Fibras naturales

1.4.2 Fibras naturales de origen vegetal en Ecuador

Las fibras son fragmentos unidimensionales de elementos cuya longitud es mucho mayor que su diámetro, los cuales se pueden hilar para obtener hilos o cuerdas que son utilizados en diferentes industrias, tal es el caso de la textil, donde es utilizada para la fabricación de prendas de vestir, y también en el campo de los materiales, donde se utilizan

frecuentemente como elemento de refuerzo en materiales compuestos [4]. En la naturaleza se pueden identificar tres tipos de fibras de origen vegetal, animal y minerales.

Con respecto a las fibras de origen vegetal, éstas se pueden extraer de semillas, como es el caso del algodón, de tallos, como el cáñamo y el lino, de fibras de follaje, como el sisal, de fibras de cáscara, como el coco, entre otras. Entre las fibras de origen animal se tienen la lana, el pelo y secreciones, como la seda [5].

Las fibras naturales que, con el descubrimiento de fibras sintéticas fueron perdiendo utilidad en la industria, nuevamente se están potencializando debido a que, por sus propiedades biodegradables, son más amigables con el medio ambiente a diferencia de las fibras sintéticas que demoran alrededor de 500 años en descomponerse [6].

El país que posee la mayor cantidad de especies de plantas vasculares, es decir, que están constituidas por tejidos que conducen los fluidos a través de la misma y son el material principal para la obtención de fibras es Ecuador, que tiene alrededor de 25000 especies de plantas de este tipo, por lo cual, es denominado como el país de las fibras naturales, y una de las fibras que se producen con mayor demanda, es la de abacá, así como también, fibras de cabuya, totora, ceibo, palma, paja toquilla, algodón, bambú, entre otras, pero en menor proporción [7] [8].

1.4.2.1 Fibras de cabuya

La cabuya es una planta originaria de Sudamérica (ver Figura 3). Estas plantas son considerablemente grandes, con hojas alargadas de hasta 1.5 metros de coloración verde y espinas en sus bordes. Sus hojas son considerablemente carnosas y fibrosas y en su interior poseen hilos que son resistentes a procesos de tensión [9] [10]. En Ecuador la cabuya es muy abundante, sin embargo, su utilización es muy limitada debido a que el desarrollo industrial de materiales compuestos está en sus etapas iniciales en el país, por lo cual, típicamente estas plantas son utilizadas por los campesinos para alimentar al ganado vacuno [11].



Figura 3 Planta de cabuya
Fuente [12]

La obtención de las fibras de cabuya se realiza de acuerdo a las siguientes etapas:

Corte de las hojas de la planta: se realiza cuando la planta alcanza su madurez que es a partir de los 3 años. Estas plantas viven aproximadamente 15 años y producen de 50 a 100 pencas por año [9].

Extracción de la materia prima: en este proceso se utiliza una máquina que separa la fibra del bagazo de la hoja obteniendo como producto una fibra más limpia.

Lavado y secado: posterior a la extracción de la materia prima, las fibras obtenidas son lavadas con agua hasta que tome una coloración blanca, para después ponerla a secar.

Tinturado: en una vasija de barro se coloca agua con un colorante que puede ser natural o artificial y se pone a hervir de 60 a 90 minutos hasta lograr que el colorante se haya adherido a las fibras para luego dejarlas al sol para que se sequen.

Peinado: en este proceso, se hace atravesar a las fibras por una máquina peinadora formada por puntas agudas que permiten que las fibras sean peinadas y desenredadas; para obtener un producto con una textura suave, se utiliza cera.

Hilado: consiste en unir de forma manual (ver Figura 4), cada una de las terminales de las fibras peinadas hasta obtener un elemento continuo y uniforme, denominado hilo [13].



Figura 4 Proceso de hilado de la cabuya
Fuente [13]

1.4.2.2 Propiedades y aplicaciones de la fibra de cabuya

Las fibras de cabuya son elementos que poseen características que las convierten en un producto muy atractivo, de entre las cuales se tiene su coloración, textura, aspecto, abundancia, fácil obtención, entre otras cualidades que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1 Características físicas de la fibra de cabuya

Características	Cualidades
Longitud	80,000- 120,000 cm
Color	Habano
Brillo	Opaco
Textura	Dura
Absorción de humedad	Baja
Punto de fusión	No se funde
Efecto ante los álcalis	Resistente
Efecto ante los ácidos	Baja
Resistencia a la luz solar	Regular
Efecto de los oxidantes	Variable

Fuente: [14]

Con respecto a las propiedades mecánicas, la fibra de cabuya es liviana, posee gran resistencia a la tracción y al corte. Además, como se mencionó anteriormente, para el procesamiento de esta fibra, se requiere baja energía, por lo cual, es una buena opción para el uso industrial. En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas que presenta la fibra de cabuya.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de las fibras de cabuya

Fibra de cabuya	
Densidad [g/cm^3]	1,300
Resistencia a la tracción [MPa]	305,150
Módulo de elasticidad [GPa]	7,500
Elongación a la fractura [%]	4,960
Absorción de humedad [%]	--

Fuente: [15]

Las fibras de cabuya fueron materiales utilizados de la antigüedad en la fabricación de sacos y cuerdas. Actualmente en Ecuador son utilizadas de forma artesanal para la fabricación de hilos, cuerdas, cestos, alfombras, bolsos, entre otros objetos (ver Figura 5). Además, se tienen nuevas aplicaciones que se le puede dar a los residuos de la planta de cabuya que quedan después de la obtención de las fibras como por ejemplo [16] [9]:

- Se puede fabricar jabones o desengrasantes, debido a que el jugo de la cabuya posee un elemento llamado saponina que es el componente principal de los mismos.
- Las propiedades físicas de las fibras de cabuya son similares a las del abacá, por lo que pueden reemplazarlas en la fabricación de bolsas de té.
- Los residuos que quedan después de desfibrar la planta pueden servir como abono.
- Pueden reemplazar a la fibra de vidrio en la industria automotriz.

- Se puede fabricar papel a partir de su pulpa.
- La sabia fermentada puede ser utilizada para obtener licor.
- Algunas de sus sustancias, pueden ser utilizadas en la industria farmacéutica para combatir problemas dermatológicos, hormonales, cerebrales, etc. [9].



Figura 5 Aplicaciones de la fibra de cabuya en Ecuador [17]

1.4.2.3 Fibras cortas, largas, tejidas y no tejidas de cabuya

Como se mencionó anteriormente, las fibras son fragmentos de un elemento que tienen diámetros pequeños en comparación con su longitud, y pueden ser clasificadas mediante diversos criterios, como longitud, función u origen. Con respecto a su longitud, estas pueden clasificarse en cortas o largas, dependiendo de tamaño que tengan después de haber sido procesadas.

La longitud y el diámetro de las fibras para un material compuesto, típicamente se caracteriza por medio de la relación de forma $\frac{l}{d}$, donde, l representa la longitud de la fibra y d su diámetro. Generalmente las fibras presentan diámetros que varían entre 10 y 150 micrones. Para mejorar la resistencia de un material compuesto, se debe mejorar la relación de forma, es decir, que tenga el mayor valor numérico posible.

Típicamente las fibras tienden a fracturarse debido a defectos superficiales, por lo que fabricarlas con diámetros muy pequeños proporciona a la fibra menor área superficial y a la vez menos defectos que puedan propagarse durante el proceso o bajo la acción de cargas [2].

Con respecto a la cantidad de fibras, una mayor fracción volumétrica de fibras aumenta la resistencia y rigidez del material compuesto debido a que es el elemento que proporciona propiedades mecánicas esenciales. Hay que considerar que la máxima fracción volumétrica de fibras es de aproximadamente 80% ya que si se sobrepasa este valor las fibras ya no se impregnan totalmente por la matriz y la transferencia de carga deja de ser eficiente.

Las fibras se pueden introducir en la matriz en varias orientaciones, que pueden ser cortas o largas, de forma unidireccional o disposición ortogonal, cada una proporcionando ciertas características al material compuesto (ver Figura 6).



Figura 6 Esquema fundamental de un tejido
Fuente [14]

Las fibras cortas colocadas de forma aleatoria se pueden introducir fácilmente en la matriz y proporciona al material compuesto un comportamiento relativamente isotrópico.

Las fibras largas continuas y unidireccionales introducidas en la matriz, proporcionan propiedades anisotrópicas al material, con buenas características de resistencia y rigidez paralelas a las fibras, sin embargo, si la carga es perpendicular a las fibras, la orientación unidireccional presenta características pobres.

La característica más representativa de los materiales compuestos con fibras de refuerzo es que se puede modificar sus propiedades por medio de la orientación y disposición que se le dé a las fibras de refuerzo. En la matriz se puede introducir fibras largas y continuas en diversas direcciones, por medio de arreglos ortogonales (capas de $0^\circ/90^\circ$), con lo que se consigue resistencias en dos direcciones perpendiculares, y con disposiciones más complejas como (capas $0^\circ, +/- 45^\circ, 90^\circ$), se consigue refuerzos en varias direcciones (ver Figura 7). [2]

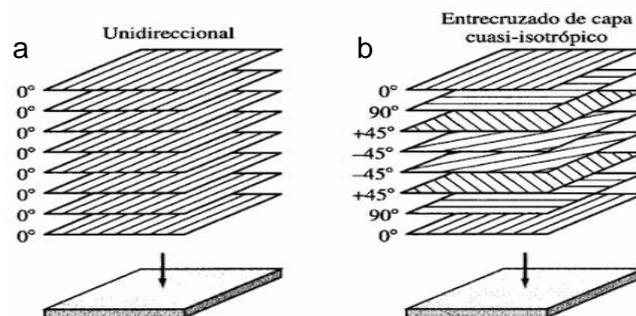


Figura 7 Fibras de refuerzo con: a) orientación unidireccional y b) capas cruzadas
Fuente [18]

1.4.2.4 Propiedades de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales son una combinación de resinas con fibras naturales de refuerzo, por lo cual, el material resultante combinará de alguna manera las propiedades de cada uno de estos elementos.

Por lo mencionado en numerales anteriores, las propiedades de estos materiales compuestos estarán determinadas por las propiedades de la matriz y la fracción volumétrica, geometría y orientación de las fibras en el material.

Una de las características más importantes de este tipo de materiales compuestos es que poseen una alta resistencia mecánica y a su vez, una baja densidad, lo que permite fabricar dispositivos resistentes y livianos al mismo tiempo.

1.4.3 Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra natural por medio de estratificación manual

La estratificación manual, también llamada moldeo por contacto, es denominado así debido a las bajas o nulas presiones que se aplican y fue la primera técnica utilizada para el laminado de polímeros con refuerzos de fibras, siendo la técnica más utilizada para la obtención de materiales compuestos. Además, es muy económica debido a que consiste en un proceso sencillo que no requiere de mano de obra excesivamente calificada, ni inversiones elevadas, sin embargo, presenta ambientes de trabajo molestos, producción lenta, mayor necesidad de mano de obra, acabado fino en un solo lado de las caras y la calidad del producto final depende de la especialización y sensibilidad del operador.

Las características mecánicas y físicas que poseen los materiales fabricados por este método son inferiores en comparación con otros métodos debido a las limitaciones de agregación del porcentaje de fibras al laminado [2].

1.4.4 Variables de procesamiento por estratificación

Para la obtención de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural por el método de estratificación manual se deben tener presentes los pasos fundamentales de procesamiento que son: impregnación, estratificación, consolidación y solidificación.

En el proceso de impregnación, se forman las láminas debido a la unión de la fibra natural con la resina. Es importante tener en cuenta la correcta humectación de las fibras en la

resina para evitar el atrapamiento de aire dentro del compuesto, producto del espacio latente entre varias fibras unidas entre sí.

La estratificación consiste en formar compuestos laminados por medio de la mezcla de la resina con las fibras naturales impregnadas que son colocadas dependiendo de la dirección de la carga aplicada. La estratificación tiene por objetivo, establecer la arquitectura de las fibras requeridas por el diseño y, para obtener el espesor del material, se coloca varias capas de resina y fibras mezcladas.

El proceso de consolidación consiste en establecer el contacto entre las láminas, asegurándose de la eliminación del aire entre capas, para lo cual, es necesaria la aplicación de cierta presión. En caso de producirse una mala consolidación, se obtendrá un material con gran cantidad de poros distribuidos superficial y sub-superficialmente.

El proceso de solidificación es el último paso que se debe seguir para obtener materiales compuestos, y consiste en el tiempo necesario para que la matriz tome una estructura sólida que, para el caso de termoestables, puede tardar aproximadamente 120 minutos, tiempo en el cual la presión debe mantenerse durante todo el proceso de solidificación. El tiempo requerido para la solidificación de la matriz, depende de la composición de la resina, catalizador y acelerante que se utilice y, de este depende la tasa de producción.

Siendo muy cuidadosos en el desarrollo de los procesos mencionados, se puede obtener materiales de alta calidad, con propiedades físicas y mecánicas deseadas [15].

1.4.4.1 Variables de proceso de curado de la resina poliéster

La resina poliéster es el termoestable más utilizado para la fabricación de materiales compuestos en el país y se obtiene por medio de la reacción de ácidos orgánicos disfuncionales con un alcohol disfuncional. Entre estos ácidos están maleico, fumárico, ftálico y tereftálico, y entre los alcoholes están el glicol etileno, glicol propileno y glicol halogenado.

Esta resina presenta una excelente resistencia a la corrosión, es versátil, fácil de manipular, además, tiene una amplia disponibilidad en el mercado con un bajo costo. Esta resina no presenta resistencias considerables, por lo que, es necesario reforzarla con fibras con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

Normalmente las resinas son sustancias líquidas que por medio de una reacción química inducida por un agente externo puede pasar a estado sólido, proceso denominado curado. Para iniciar dicho proceso es necesaria la presencia del catalizador y el acelerante,

produciéndose una reacción exotérmica que eleva la temperatura al producirse la mezcla de los diferentes elementos pudiendo llegar hasta valores de 160°C.

El proceso de curado inicia desde el momento en el que se añade el catalizador, que normalmente es octoato de cobalto. La velocidad de curado depende de la temperatura y la reactividad de la resina y la cantidad de catalizador, por lo que es esencial disponer de las cantidades adecuadas de catalizador y acelerante para garantizar el correcto proceso de curado.

El acelerante comúnmente utilizado es el MEKP (peróxido de metil-etil cetona) que es un compuesto que, al reaccionar con el catalizador, hace que la polimerización se dé a una menor temperatura.

El proceso de curado consta de tres etapas:

- Gelificación: es una etapa relativamente corta en la que la resina cambia de un estado viscoso a un gel blando.
- Endurecimiento: es el proceso por medio del cual la resina pasa de un estado gelatinoso a un estado sólido.
- Maduración: es el proceso en el cual la resina adquiere todas las características mecánicas y físicas.

Los factores que intervienen en el proceso de curado para la obtención de un material compuesto son:

- Tipo de resina empleada.
- Temperatura del ambiente, ya que, la mayoría de las resinas no curan a temperaturas inferiores a 10°C.
- Naturaleza y cantidad de catalizador y acelerante.
- Humedad relativa.
- Exceso de exposición a rayos ultravioleta.
- Incremento en la temperatura de proceso.

Una forma de controlar los tiempos de curado en la obtención de materiales compuestos se consigue actuando sobre los parámetros de temperatura, cantidad de catalizador y acelerante.

1.4.4.2 Maquinado de materiales compuestos

Normalmente los materiales compuestos son diseñados para que presenten formas cercanas al acabado final de elemento, sin embargo, en ocasiones es necesario realizar un proceso de maquinado para poder obtener el material dentro de las dimensiones finales.

Los maquinados convencionales utilizados con mayor frecuencia son el taladrado, recorte de bordes, planeado, entre otros.

Una de las características más importantes del maquinado en materiales compuestos, es que permite obtener piezas con un alto nivel de detalle, sin embargo, el proceso de desbaste de estos materiales, genera polvos que son tóxicos para la salud y en caso de usar máquinas, estos polvos provocan procesos abrasivos en sus piezas reduciendo la vida útil de las mismas. Los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y el refuerzo son diferentes y en un proceso de maquinado un material compuesto se calienta produciendo tensiones residuales, las cuales alteran las propiedades mecánicas iniciales [19].

1.4.5 Ensayos destructivos y evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos

Para determinar las propiedades mecánicas en la caracterización de materiales compuestos, es necesario realizar una serie de ensayos destructivos a estos materiales con el objetivo de observar el comportamiento que presenta en cada una de las pruebas.

Normalmente, cuando se realizan ensayos destructivos a materiales compuestos, se busca determinar propiedades que sean mejores en comparación con materiales tradicionales encontrados en el mercado y que cumplen la misma función, ya sea, con respecto a su peso, resistencia a la tracción, compresión, elasticidad, plasticidad, ductilidad, fragilidad, etc.

Entre los ensayos destructivos normalizados, se tienen los ensayos de tracción, flexión e impacto.

1.4.5.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter a una probeta normalizada a un estiramiento o fuerza uniaxial sobre su eje principal (ver Figura 8), haciendo que la fuerza aumente paulatinamente hasta lograr fracturar la probeta para así determinar parámetros como, resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material.

La norma ASTM D 3039 es la encargada de establecer las especificaciones para realizar los ensayos de tracción a materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras naturales donde se hace uso de una máquina universal.

Para realizar este ensayo, es necesario que las probetas tengan las dimensiones establecidas en la norma mencionada anteriormente y, también, es necesario que las probetas presenten superficies libres de defectos visibles, fisuras e imperfecciones.



Figura 8 Esquema del proceso de tracción de un material
Fuente [18].

1.4.5.2 Ensayo de flexión

Los ensayos normalizados de flexión se realizan de acuerdo a la norma ASTM D 7264/ D 7264M-07 que es la encargada de establecer los parámetros y características del material para realizar el ensayo de flexión, con el cual se puede determinar características como rigidez a la flexión, módulo de elasticidad valores de esfuerzo y deformación.

El ensayo de flexión consiste en un sistema de cargas de tres puntos, dos apoyos en la cara inferior de la probeta y una fuerza perpendicular en su cara superior de tal manera que la cara superior la probeta presenta esfuerzos de compresión y la cara inferior, esfuerzos de tensión (ver Figura 9).

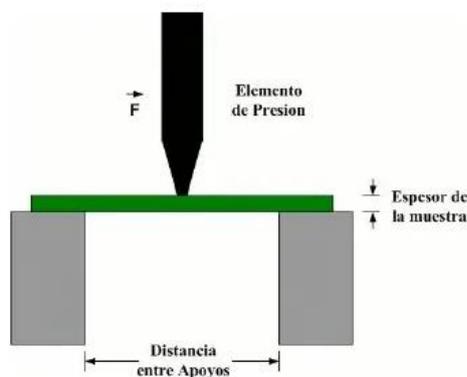


Figura 9 Esquema del ensayo de flexión
Fuente [19]

Para realizar este ensayo, se debe verificar que la probeta no presente defectos superficiales en sus caras, defectos como incrustaciones o que la probeta no tenga un espesor uniforme. Las dimensiones de la probeta la proporcionan la norma mencionada anteriormente, así como también la cantidad de probetas mínimas a ser ensayadas y la velocidad de la aplicación de la carga que es de 1 mm/min [20].

1.4.5.3 Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto para materiales compuestos se realizan empleando la norma ASTM D 5628 y, consiste en dejar caer un dardo con una masa constante de diferentes alturas hasta encontrar la altura que produzca la falla en el material (ver Figura 10). En este ensayo se debe controlar que el dardo impacte una sola vez en la probeta, con esto, se consigue determinar la altura media a la cual la mayoría de las probetas fallan.

A partir de esta prueba se puede determinar la cantidad de energía de impacto que puede absorber el material antes de fallar. Antes de realizar esta prueba, se debe observar que la probeta no presente imperfecciones geométricas o morfológicas en la zona de impacto, con el fin de no alterar los resultados del ensayo [20].



Figura 10 comprobador de impacto variable
Fuente [21]

1.4.5.4 Microscopia

La microscopia es una técnica utilizada para evaluar objetos muy pequeños bajo grandes aumentos. Estos aumentos son posibles conseguirlos por medio de instrumentos llamados microscopios (ver Figura 11) [22].

Microscopia óptica: por medio de esta técnica se puede conocer la microestructura de varios compuestos mediante la interacción con un haz de luz. Un microscopio óptico común está constituido principalmente por 3 sistemas que son, mecánico, óptico y de iluminación.

- El sistema mecánico dispone de una serie de piezas que, acopladas con los lentes de aumento, permiten el movimiento para establecer el enfoque adecuado para la evaluación del componente.
- El sistema óptico cuenta con una serie de lentes que permiten el aumento de los objetos de estudio.
- El sistema de iluminación es una parte del microscopio que permite reflejar, transmitir y regular la cantidad de luz necesaria para cada trabajo que se pretenda realizar [23].



Figura 11 Microscopio óptico, Olympus BX60
Fuente [23]

2 METODOLOGÍA

El método de investigación utilizado para el desarrollo de este trabajo es de tipo experimental con un enfoque mixto, es decir, contempla características cualitativas y cuantitativas. Cualitativas debido a que se realizó una comparativa entre las propiedades mecánicas de las probetas, obtenidas por dos diferentes técnicas de fabricación (estratificación manual e infusión al vacío) manteniendo las mismas variables en peso de los componentes utilizados (resina, reactivos y material de refuerzo) y a partir de esta comparativa se determinó la técnica que otorga una mejor efectividad en la obtención de materiales compuestos. Cuantitativa debido a que, para determinar la técnica de fabricación que otorga la mejor efectividad, es necesario comparar los datos numéricos obtenidos de las dos técnicas, en los ensayos normalizados realizados a cada una de las probetas. Finalmente, se determina la técnica de fabricación que aporta mejores propiedades mecánicas al material compuesto y se analiza las razones por las cuales ocurre dicha mejora.

2.1 Materiales y equipos

2.1.1 Materiales utilizados

Para la fabricación de los materiales compuestos por la técnica de estratificación manual, se utilizaron los siguientes materiales:

Tejido de fibra de cabuya artesanal: es el elemento que actuó como refuerzo en la fabricación de las probetas de materiales compuestos (ver Figura 12). Previo a la fabricación de materiales compuestos, este tejido fue caracterizado para evaluar las propiedades mecánicas de tracción y elongación a la rotura que presentaba, dando como resultado los datos presentados en la Tabla 11 del presente trabajo.

Nota: los datos mostrados en la Tabla 11 se pueden verificar en (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) del presente documento.



Figura 12 Tejido de fibra de cabuya
(Fuente Propia)

SKU/ RD1TK-1K: es una resina poliéster de alta viscosidad, la cual posee un adecuado equilibrio entre dureza y flexibilidad (ver Figura 13). La característica más destacada de esta resina es que presenta moderadas reacciones exotérmicas que permiten evitar la formación de espacios intersticiales en el interior del material compuesto debido a distorsiones generadas por el exceso de calor [24]. La ficha técnica de la resina se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 13 Resina poliéster transparente
Fuente (propia)

Monómero de estireno: es un aditivo utilizado para disminuir la viscosidad de la resina poliéster, esto a su vez, permite mejorar la mojabilidad de las fibras utilizadas como refuerzo, permitiendo así, mejorar la interfaz matriz-refuerzo (ver Figura 14).

Las características del monómero de estireno se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 14 Monómero de estireno.
Fuente (propia)

Octoato de cobalto: también llamado acelerador y es el componente encargado de modificar la velocidad de reacción en las resinas poliéster (ver Figura 15) [25]. Las características técnicas del octoato de cobalto se presentan en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Figura 15 Octoato de cobalto
Fuente (propia)

Peróxido de metil-etil cetona (MEKP): también llamado catalizador y es el componente encargado de polimerizar por medio de una reacción exotérmica (ver Figura 16) [25]. Las características técnicas del compuesto metil- etil cetona se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

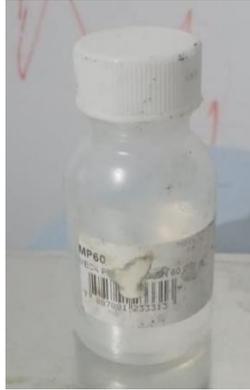


Figura 16 Peróxido metil-etil cetona
Fuente (propia)

Nota: después de mezclar la resina con los reactivos, se tiene alrededor de 15 min antes de que empiece a solidificar. Este dato fue obtenido de forma experimental, realizando pruebas de solidificación sobre la resina.

Rodillo de laminación: esta herramienta está constituida de una espuma especial obtenida por termofusión que permite esparcir la resina por toda la superficie del molde, reduciendo el efecto de salpicadura, mejorando el rendimiento y aportando un acabado relativamente fino (ver Figura 17) [26].



Figura 17 Rodillo de laminación
Fuente (propia)

Vaselina sólida desmoldante: sustancia en forma de pasta de aspecto graso que impide el contacto directo entre el molde y la resina, facilitando el proceso de desmoldado (ver Figura 18).



Figura 18 Vaselina solida desmoldante
Fuente (propia)

2.1.2 Equipos

Molde metálico: para la obtención de las planchas de material compuesto, fue necesaria la construcción de un molde metálico. Para este trabajo, el molde fue de duraluminio, el cual fue maquinado para obtener las matrices hembra y macho (ver Figura 19). El maquinado de estas matrices se realizó por fresado para conseguir un acabado superficial relativamente fino. Para este trabajo se utilizó un único molde, el cual fue utilizado para la fabricación de las planchas de material compuesto de cada uno de los ensayos a realizar (tracción, flexión e impacto). Las dimensiones de las matrices están adjuntas en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del presente trabajo.



Figura 19 Molde de duro aluminio
Fuente (Propia)

Balanza electrónica digital: tiene una apreciación de 0.01g y una capacidad máxima de 300g (ver Figura 20). Este instrumento fue utilizado para medir la masa de cada uno de los componentes utilizados en la fabricación de materiales compuestos (resina, aditivos y material de refuerzo), garantizando el porcentaje equilibrado de cada uno de estos.



Figura 20 Balanza digital
Fuente (propia)

Sierras para corte: utilizadas para cortar las planchas de material compuesto y dimensionarlas a las medidas establecidas en las normas con las que se trabajó (ver Figura 21).



Figura 21 Caladora para corte de material compuesto
Fuente (propia)

Lijas: para proporcionarle un acabado superficial relativamente fino a las probetas de material compuesto, se utilizó lijas abrasivas de diferente numeración (ver Figura 22). Lijas #60 para desbastar las probetas cortadas y remover rebabas producidas en el corte de las mismas, lijas #180 para afinar el desbaste realizado anteriormente y lijas #360 para pulir las probetas y otorgarle un acabado superficial muy liso.

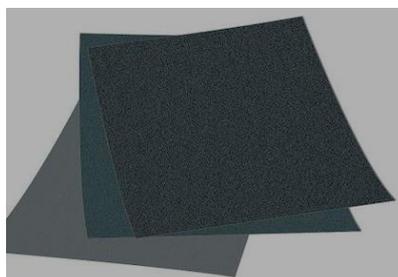


Figura 22 Lijas abrasivas
Fuente (propia)

Prensa hidráulica: es un mecanismo de doble columna que presenta una capacidad de presión máxima de 5000 PSI (ver Figura 23). Este mecanismo fue utilizado para aplicar

presión sobre las superficies de la matriz del molde, evitando la formación de espacios intersticiales de gases en el interior del material compuesto, debido a la reacción exotérmica que se genera al mezclar la resina con los reactivos.



Figura 23 Prensa hidráulica manual
Fuente (propia)

Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25K-S UTM: la presente máquina posee una precisión de 0.01 [N] y una capacidad de carga máxima de 25 [KN] (ver Figura 24).



Figura 24 Máquina de ensayo universal
Fuente (propia)

Con esta máquina universal se realizaron los ensayos, tanto de tracción como de flexión en las probetas de materiales compuestos.

Para los ensayos de tracción se utilizó un mecanismo de mordazas cuneiformes y un extensómetro para determinar la deformación en las probetas. Este mecanismo se presenta en la siguiente Figura 25.



Figura 25 Mecanismo de tracción
Fuente (propia)

En los ensayos de flexión se utilizó el mecanismo de tres puntos, el cual se muestra en la siguiente Figura 26.

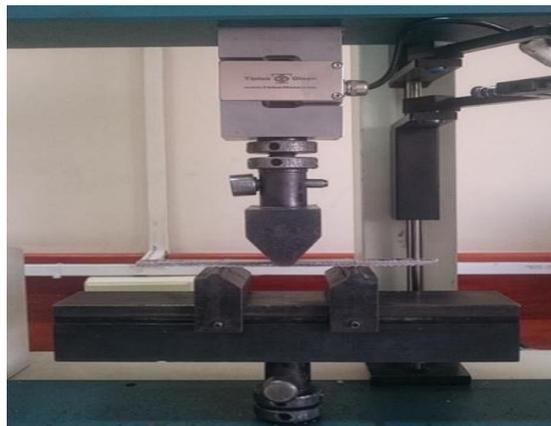


Figura 26 Mecanismo de flexión
Fuente (propia)

Equipo de impacto: los ensayos de impacto fueron realizados en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla de la Escuela Politécnica Nacional, con un comprobador de impacto variable de la marca “Elcometer 1615” (ver Figura 27). Este mecanismo es de fácil utilización y permite evaluar la resistencia de un elemento a esfuerzos de impacto (elongación, resquebrajamiento o descascarillado) [21]. El método de evaluación con este equipo, consiste en dejar caer un dardo de un peso específico (ver Figura 28) y desde una altura predeterminada sobre la superficie de una probeta para posteriormente revisar la deformación que se produce.



Figura 27 Comprobador de impacto variable
Fuente (propia)



Figura 28 Dardo para ensayo de impacto
Fuente (propia)

Microscopio: la evaluación de las probetas de material compuesto por medio de microscopia óptica, fue realizado en el laboratorio de desgaste y falla de la Escuela Politécnica Nacional, con el uso del microscopio de marca Olympus SZX7, el cual se muestra en la siguiente Figura 29.



Figura 29 Microscopio de marca Olympus SZX7
Fuente (propia)

Por medio de este instrumento se puede realizar aumentos de 7:1. Posee un sistema galileano para obtener imágenes brillantes con índices de aumentos de 0.8x a 5.6x y junto con los lentes de objetivo sin distorsión, proporciona imágenes de alta calidad.

2.2 Ensayos preliminares.

Para la elaboración de las planchas de material compuesto, fue necesario realizar ensayos preliminares para determinar la cantidad de componentes necesarios que garanticen las mejores características del componente final.

2.2.1 Determinación de la cantidad en peso de los componentes que conforman la matriz del material compuesto.

Para determinar la cantidad en peso de los componentes que conforman la matriz del material compuesto, primeramente, se determinó la densidad de la resina poliéster a partir de la masa y el volumen de una muestra tomada (ver Figura 30), considerando la siguiente ecuación 1:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

ρ . – densidad

m . – masa

v . – volumen



Figura 30 Muestra de resina poliéster
Fuente (propia)

La densidad obtenida fue de 1.25 g/cm^3 .

Posteriormente se calcula el volumen necesario de resina para la elaboración de cada una de las planchas de material compuesto (planchas para tracción, flexión e impacto). Para esto se determinó el área de la cavidad del molde y se multiplico por los espesores que

especifican las normas para el dimensionamiento de las probetas. Una vez calculado el volumen, se despeja la masa de la **ecuación 1** para obtener la cantidad en gramos de resina necesaria para cada caso.

$$m = \rho * v \quad \text{Ecuación 2}$$

Las cantidades en gramos de resina necesaria se mencionan en la siguiente Tabla 3:

Tabla 3 cantidad de resina utilizada para la fabricación de planchas de material compuesto

Planchas	Área de cavidad [mm ²]	Espesor de norma [mm]	Volumen de plancha [mm ³]	Densidad de resina [g/mm ³]	Cantidad en gramos de resina [g]
Tracción	56672,000	2,500	141680,000	0.00125	177,000
Flexión		4,000	226688,000		284,000
Impacto		2,000	113344,000		142,000

Fuente (propia)

Para colocar los gramos de aditivos (estireno, octoato de cobalto y MEKP), se tomó como referencia las cantidades en porcentaje utilizadas por los ingenieros Tapia y Revelo en su trabajo de titulación. Estos datos se muestran en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4 Porcentaje en gramos de aditivos

Aditivos	Porcentaje en masa
Estireno	10,000
Peróxido de metil- etil cetona	1,000
Octoato de cobalto	0,500

Fuente [14]

Nota: los porcentajes en masa de cada uno de los aditivos están relacionados directamente con la cantidad de resina utilizada.

2.2.2 Determinación de la cantidad de tejido de fibras de cabuya utilizada como material de refuerzo.

La determinación del número de capas de tejido de cabuya para cada proceso de fabricación, se realizó por prueba y error hasta conseguir que las capas de refuerzo queden sumergidas totalmente dentro de la matriz del material compuesto. El número de capas que se utilizó para cada caso se muestran en la siguiente Tabla 5:

Tabla 5 número de capas de refuerzo utilizadas para cada plancha de material compuesto

Planchas	Dimensiones de la capa de refuerzo	Número de capas
Tracción	300,00 [mm] x 180,000[mm]	3
Flexión		4
Impacto		2

Fuente (propia)

2.2.3 Determinación de la carga de presión adecuada.

Este procedimiento se realizó por prueba y error hasta obtener planchas con buenas características, es decir, que no presenten burbujas visibles de gases en su interior.

En la primera prueba se utilizó una carga de 1000 PSI, observando formaciones de burbujas en el interior de la plancha (ver Figura 31).

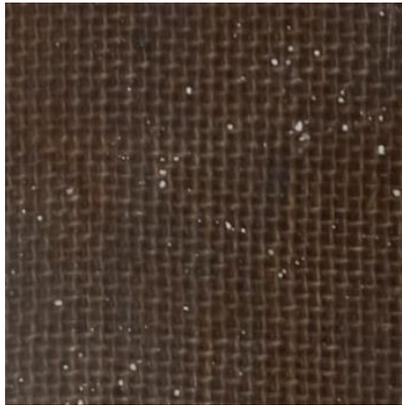


Figura 31 Plancha de material compuesto con formaciones de burbujas
Fuente (propia)

En la segunda prueba se utilizó una carga de 2000 PSI, observando reducción del espesor deseado en las planchas.

En la tercera prueba se utilizó una carga de 1000 PSI, pero se esperó a que la presión disminuya a 400 PSI para aumentar la carga hasta 800 PSI, reducir nuevamente a 400 PSI para volver a aumentar a 800 PSI (ver Figura 32).

Con la tercera prueba se pudo notar que, aplicando dicha configuración de cargas, las planchas de material compuesto tenían un acabado bastante bueno, por lo cual, se utilizó el mismo procedimiento para la fabricación de todas las planchas de material compuesto.



Figura 32 Plancha de material compuesto con buen aspecto
Fuente (propia)

2.3 Procedimiento de fabricación de planchas de material compuesto por estratificación manual.

A partir de la cantidad en gramos de resina, establecido en la Tabla 3, se calcula la masa de aditivos necesarios a utilizar. Una vez determinada la cantidad de resina y aditivos, se coloca en un recipiente y se mezcla hasta obtener una composición uniforme (ver Figura 33).



Figura 33 Mezcla de resina con aditivos
Fuente (propia)

Posteriormente coloca una capa de la mezcla por todo el molde (ver Figura 34).



Figura 34 Película delgada de mezcla resina- aditivos
Fuente (propia)

Sobre la capa de la mezcla se coloca una capa de tejido de cabuya (ver Figura 35).



Figura 35 Capa de tejido de cabuya
Fuente (propia)

Sobre la capa de tejido se coloca otra capa de la mezcla, esparciéndola totalmente por toda la superficie del molde.

Este procedimiento se lo realiza consecutivamente hasta conseguir la configuración adecuada para cada ensayo (tracción, flexión e impacto).

Una vez obtenida la configuración, se tapa el molde y se lleva a la prensa (ver Figura 36) hidráulica para aplicar las presiones mencionadas en el apartado 2.2.3



Figura 36 Aplicación de cargas con prensa hidráulica
Fuente (propia)

El tiempo de solidificación fue de un día y posterior a eso, se **desmoldó** el material compuesto (ver Figura 37).



Figura 37 Desmolde del material compuesto solidificado
Fuente (propia)

Después de desmoldar el compuesto, se esperó 15 días para un adecuado curado del material y posterior a este periodo de tiempo, se procedió a cortar y lijar las planchas para ajustar a las dimensiones que especifican las normas para las probetas (ver Figura 38).



Figura 38 Corte de planchas de material compuesto
Fuente (propia)

2.4 Densidad de la fibra de cabuya.

Para obtener la densidad de las fibras de cabuya, primeramente, se cortaron muestras con áreas específicas. Posteriormente, se obtuvo los valores de masa por medio de una balanza digital (ver Figura 39) y, para la medición del volumen se empleó el método de desplazamiento de agua, para lo cual, se utilizó una probeta graduada (ver Figura 40) y una pipeta. Finalmente, con los datos de masa y volumen obtenidos, por medio de la **ecuación 1** se calculó la densidad.



Figura 39 Masa de una muestra de tejido de fibra
Fuente (propia)



Figura 40 Volumen de una muestra de tejido de fibra
Fuente (propia)

En la siguiente Tabla 6 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 6 Densidad de la fibra de cabuya

Muestra	Largo [cm]	Ancho [cm]	Masa [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]
1	25,000	16,000	12,200	11,800	1,034
2			11,800	11,400	1,035
3			12,000	11,800	1,017
4			11,600	11,200	1,036
5			12,400	11,800	1,051
Promedio			12,000	11,600	1,034

Fuente (propia)

2.5 Fracción volumétrica de la matriz y el refuerzo de las probetas de material compuesto.

Para calcular la fracción volumétrica de los componentes (matriz y refuerzo), se utiliza la fórmula que se muestra a continuación:

$$\%V_{componente} = \frac{v_{componente}}{v_{compuesto}} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$\%V_{componente}$ - Fracción volumétrica de un componente, el cual puede ser matriz o refuerzo.

$v_{componente}$ - Volumen del componente. Este puede ser matriz o refuerzo.

$v_{compuesto}$ - Volumen de la probeta de material compuesto.

De la **ecuación 1** se despeja el volumen, obteniendo la siguiente ecuación:

$$v = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ecuación 4}$$

Reemplazando la ecuación 4 en la 3, se tiene:

$$\%V_{componente} = \frac{\frac{m_{componente}}{\rho_{componente}}}{v_{compuesto}} * 100$$

Operando, se tiene que:

$$\%V_{componente} = \frac{m_{componente}}{\rho_{componente} * v_{compuesto}} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas de material compuesto.

Para determinar el porcentaje volumétrico del refuerzo utilizado en la fabricación de cada probeta, se inició cortando muestras de un área específica de tejido que contenga tanto el número de capas para cada probeta, como las dimensiones establecidas en las normas utilizadas en el presente trabajo. Una vez cortadas las muestras, estas se pesan y junto a la **ecuación 5** con la densidad de la fibra obtenida en el literal 2.4, se calcula el porcentaje volumétrico del refuerzo del material compuesto. Los datos de porcentajes volumétricos se presentan en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9

Tabla 7 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de tracción

Muestras	Largo [cm]	Ancho [cm]	Masa [g]	Densidad [g/cm ³]	Volumen de material compuesto [cm ³]	Porcentaje volumétrico de tejido [%]
1	25,000	7,500	6,000	1,034	15,625	0,371
2			5,500			0,340
3			5,600			0,347
4			5,500			0,340
5			5,800			0,359
Promedio			5,680			0,352

Fuente (propia)

Tabla 8 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de flexión

Muestras	Largo [cm]	Ancho [cm]	Masa [g]	Densidad [g/cm ³]	Volumen de material compuesto [cm ³]	Porcentaje volumétrico de tejido [%]
1	16,000	5,200	2,600	1,034	8,320	0,302
2			2,580			0,300
3			2,600			0,302
4			2,560			0,298
5			2,700			0,314
Promedio			2,608			0,303

Fuente (propia)

Tabla 9 Porcentaje volumétrico de refuerzo en probetas para ensayos de impacto

Muestras	Largo [cm]	Ancho [cm]	Masa [g]	Densidad [g/cm ³]	Volumen de material compuesto [cm ³]	Porcentaje volumétrico de tejido [%]
1	6,000	12,000	2,100	1,034	7,200	0,282
2			2,300			0,309
3			2,200			0,296
4			2,100			0,282
5			2,300			0,309
Promedio			2,200			0,296

Fuente (propia)

Porcentaje volumétrico de la matriz en probetas de material compuesto.

Para estimar el porcentaje de la matriz en las probetas de material compuesto, se lo realizó mediante la siguiente **ecuación 6**:

$$\%V_{matriz} + \%V_{refuerzo} = 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\%V_{matriz}$ - porcentaje volumétrico de la matriz del material compuesto

$\%V_{refuerzo}$ - porcentaje volumétrico del refuerzo del material compuesto

Por medio de la **ecuación 6** y junto con los datos mostrados en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 se determinó el porcentaje volumétrico de la matriz, cuyos resultados se muestran en la siguiente Tabla 10:

Tabla 10 Porcentaje volumétrico de matriz y refuerzo en probetas de material compuesto

Probetas	Porcentaje volumétrico de tejido [%]	Porcentaje volumétrico de tejido [%]
Tracción	0,352	0,648
Flexión	0,303	0,697
Impacto	0,296	0,704

Fuente (propia)

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Pruebas

3.1.1 Caracterización de tejido de cabuya.

Previo a la fabricación de materiales compuestos, este tejido fue caracterizado para evaluar las propiedades mecánicas de tracción y elongación a la rotura que presentaba. Esta caracterización fue realizada por el departamento de ingeniería química por medio de la norma ASTM 5034, dando como resultado los datos presentados en la Tabla 11:

Tabla 11 Propiedades mecánicas del tejido de fibras de cabuya

Propiedades determinadas	Dirección de la carga	Resultados
Resistencia a la tracción	Longitudinal	44,970 [Kgf]
	Transversal	43,410 [Kgf]
Elongación a la rotura	Longitudinal	7,000%
	Transversal	4,000%

Fuente (propia)

3.1.2 Caracterización de materiales compuestos.

La caracterización de los materiales es de gran importancia para evaluar las propiedades de los mismos, cuando son expuestos a sollicitaciones mecánicas. En este trabajo se evalúan tres características principales en las probetas de materiales compuestos, que son la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto.

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó a cinco probetas bajo la norma ASTM D3039/D3039 M-17. Las dimensiones de las probetas fabricadas se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12 Parámetros de control para ensayos de tracción

Parámetros de control	Valores
Medidas nominales de probetas	Largo: 250,000 [mm]
	Ancho: 25,000±1% [mm]
	Espesor: 2,500±1% [mm]
Distancia calibrada para medir deformación	50,000 [mm]
Velocidad de ensayo	2,000 [mm/min]

Fuente [29]

El código de identificación de la falla en las probetas se muestra en la Figura 41.

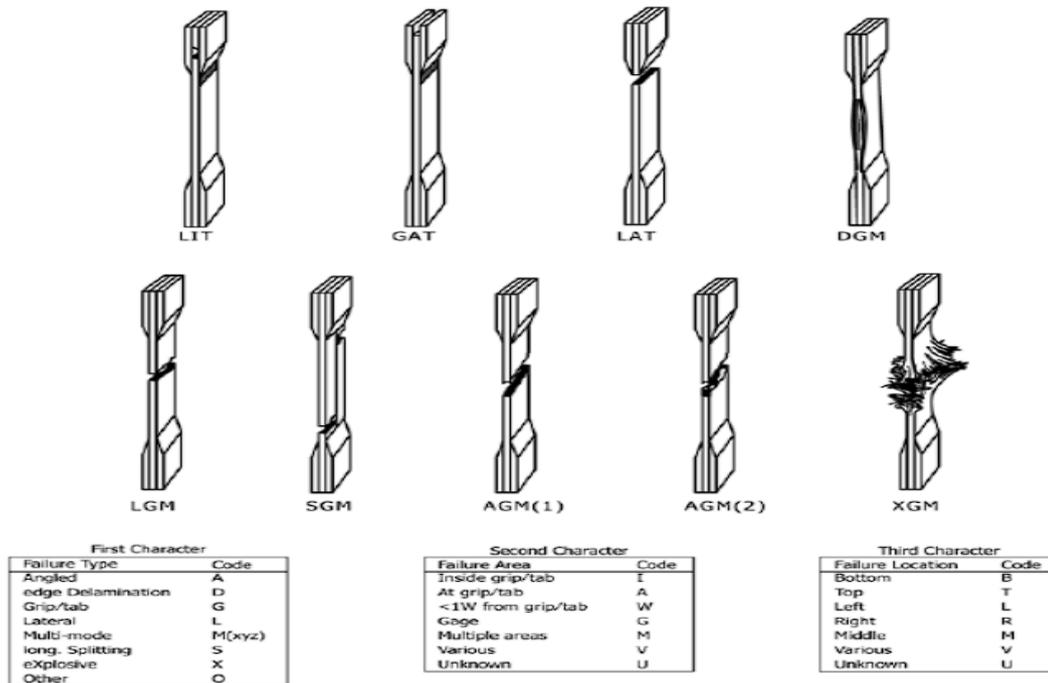


Figura 41 Código de identificación de fallas en probetas sometidas a ensayos de tracción
Fuente [29]

La resistencia última a la tracción se determina a partir de las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$F_{tu} = \frac{P_{Max}}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

F_{tu} . – Resistencia a la tracción medida en MPa o PSI

P_{Max} . – Carga máxima antes de la falla medida en N o lbf

A . – Área transversal de la probeta medida en mm^2 o in^2

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

σ_i . – Esfuerzo de tracción en el punto i, medida en MPa o PSI

P_i . – Carga en el punto i medida en N o lbf

A . – Área transversal de la probeta medida en mm^2 o in^2

Para determinar la deformación por tracción, se emplea la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

ε_i . – Deformación por tracción en el punto I

δ_i . – Desplazamiento del extensómetro en el punto i medidos en mm o in

L_g . – Longitud del extensómetro medido en mm o in

El módulo de elasticidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \text{ Ecuación 10}$$

Donde:

E_t . – Modulo de elasticidad a la tracción medido en MPa o PSI

$\Delta\sigma$. – Diferencia de esfuerzos aplicados entre dos puntos de deformación medidos en MPa o PSI

$\Delta\varepsilon$. – Diferencia entre los dos puntos de deformación.

Ensayo de flexión

Para los ensayos de flexión, se utilizó el método descrito por la norma ASTM D7264/D7264 M-15, procedimiento A, el cual consiste en un sistema de cargas de tres puntos a una viga simplemente apoyada (ver Figura 42).

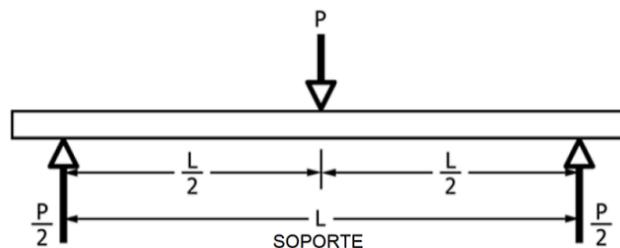


Figura 42 sistema de cargas de tres puntos
Fuente [30]

Los parámetros que se controlan para el ensayo de flexión son los que se muestran en la siguiente Tabla 13:

Tabla 13 Parámetros de control para ensayos de flexión

Parámetros de control	Valores
Medidas nominales de probetas	Largo: 160,000 [mm]
	Ancho: 13,000 [mm]
	Espesor: 4,000 [mm]
Relación espesor- distancia entre apoyo	1:16
Velocidad de ensayo	1,000 [mm/min]

Fuente [30]

El código de identificación de la falla en las probetas se muestra en la Figura 43

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 43 Código de identificación de fallas en probetas sometidas a ensayos de flexión
Fuente [30]

Para un sistema de una viga simplemente apoyada en dos puntos y con carga puntual en el centro, el esfuerzo máximo a la flexión, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ Ecuación 11}$$

Donde:

σ . – Esfuerzo en la superficie exterior en la región del tramo de carga medido en [MPa] o [PSI]

P . – Carga aplicada medido en [N] o [lbf]

L . – Distancia entre apoyos medido en [mm] o [in]

b . – Ancho de la viga medido en [mm] o [in]

h . – Espesor de la viga medido en [mm] o [in]

La flexión máxima que se producen en las vigas, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \text{ Ecuación 12}$$

Donde:

ε . – Deformación de la superficie externa.

δ . – Deflexión en el centro de la viga medido en [mm] o [in]

L . – Distancia entre apoyos medido en [mm] o [in]

h . – Espesor de la viga medido en [mm] o [in]

El módulo de elasticidad de las probetas se obtiene mediante los datos de esfuerzo-deformación que comprende la parte recta de la curva. El módulo de elasticidad se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \text{ Ecuación 13}$$

Donde:

E_f . – Módulo de elasticidad por flexión medido en [MPa] o [PSI]

m . – pendiente de la curva fuerza- deflexión.

Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto fueron realizados bajo la norma ASTM D5628. Este ensayo consiste en determinar la energía necesaria para deformar las probetas por medio de la caída libre de un dardo que posee una masa constante, mientras se varía la altura de la cual se deja caer. La energía de falla es aquella con la cual, el 50% de las probetas tienden a fracturarse. Los parámetros establecidos para este ensayo, son los que se muestran en la siguiente Tabla 14:

Tabla 14 Parámetros de control para ensayos de impacto

Parámetros de control	Valores
Medidas nominales de probetas	Largo: 60,000±2 [mm]
	Ancho: 60,000±2 [mm]
	Espesor: 2,000±0,1 [mm]
Masa de dardo	690,000 [g]
Diámetro de punzón	20,000 [mm]
Altura de lanzamiento	45,000- 145,000 [mm]

Fuente [31]

Bajo la consideración de masa constante, se calcula la altura media de falla mediante la siguiente ecuación:

$$h = h_0 + d_h \left(\frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \text{ Ecuación 14}$$

Donde:

h . – Altura media de falla medida en [mm]

h_0 . – Altura más baja en la que ocurrió un evento medida en [mm]

d_h . – Incremento de la altura del dardo medido en [mm]

A . – Sumatoria del número de fallas.

N . – Número total de fallas o no fallas, cualquiera que sea menor.

Para calcular la energía media de falla se lo realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$MFE = hwf \text{ Ecuación 15}$$

Donde:

MFE. – Energía media de falla medida en [J]

h. – Altura media de falla o altura constante dependiendo del caso medida en [mm]

w. – Masa media de falla o masa constante según corresponda, medida en [mm]

f. – Factor de conversión a Joules

Nota: $f = 9.80665 \times 10^{-3}$, si *h* [mm] y *w* [Kg].

3.2 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos normalizados de tracción (ver Figura 44, Figura 45, Figura 46), flexión (ver Figura 51, Figura 52, Figura 53), impacto (Figura 57) y microscopía realizadas en las probetas.

3.2.1 Ensayos de tracción.



Figura 44 Probetas de material compuesto después de ensayo normalizado de tracción
Fuente (propia)

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

Figura 45 Resultados de los ensayos de tracción realizados a probetas de material compuesto obtenidos por la técnica de Estratificación manual
Fuente (propia)

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

Figura 46 Resultados de los ensayos de tracción realizados a probetas de material compuesto obtenidos por la técnica de infusión al vacío
Fuente (propia)

Comparando la Figura 45 y Figura 46, correspondientes a resultados obtenidos de los ensayos de tracción a materiales compuestos fabricados por las técnicas de estratificación manual e infusión al vacío, se pudo notar que las propiedades mecánicas de carga última, resistencia última y deformación última, son mejores en los materiales obtenidos por infusión al vacío.

Con los datos de fuerza y área, obtenidos de los ensayos de tracción, se calculó los valores de resistencia en función del porcentaje de deformación en probetas fabricadas por

estratificación manual (ver Figura 47) y en probetas fabricadas por infusión al vacío (ver Figura 48)

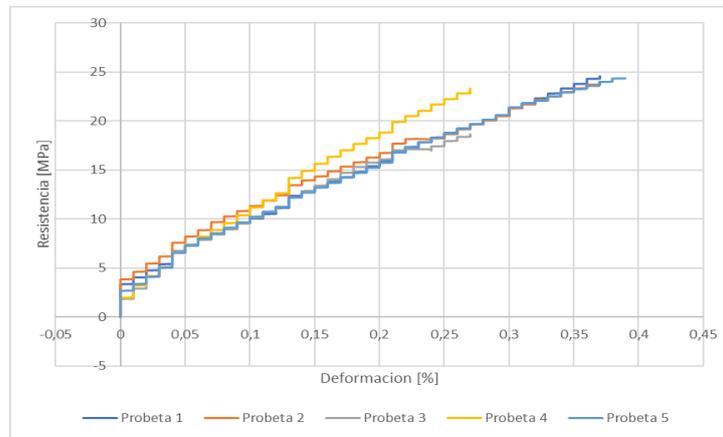


Figura 47 Diagrama resistencia a la tracción vs deformación en probetas de material compuesto obtenidos por medio de la técnica de estratificación manual
Fuente (propia)

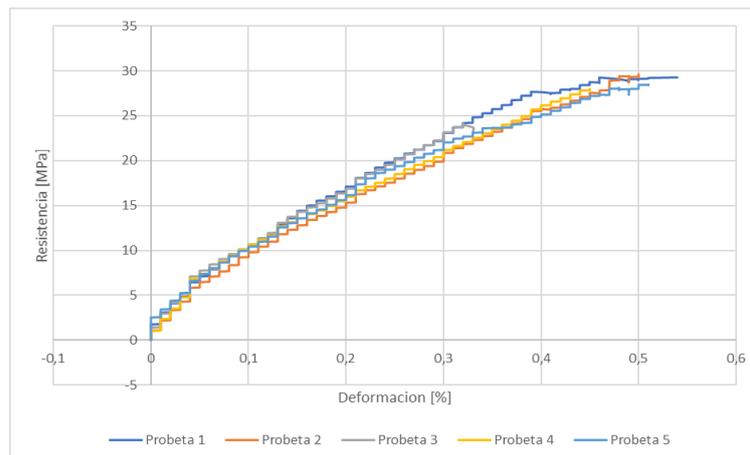


Figura 48 Diagrama resistencia a la tracción vs deformación en probetas de material compuesto obtenidos por medio de la técnica de Infusión al vacío
Fuente (propia)

De los diagramas de la Figura 47 y Figura 48, se pudo visualizar que, en materiales obtenidos mediante infusión al vacío, los rangos de deformación y resistencia a la tracción son mayores que en materiales fabricados por estratificación manual. Esto quiere decir que, los materiales fabricados por infusión al vacío soportan altas cargas de deformación antes de llegar a fracturarse.

Con los valores de módulo secante de elasticidad se realizó una gráfica comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos realizado, los cuales se muestran en la Figura 49.

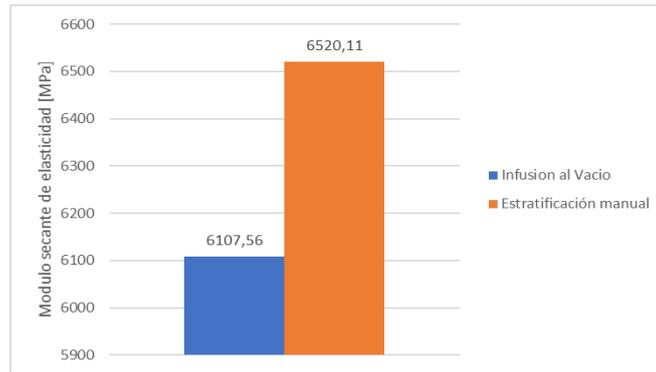


Figura 49 Comparación del módulo secante de elasticidad en materiales compuestos obtenidos por estratificación manual e infusión al vacío
Fuente (propia)

Con respecto a los módulos secantes de elasticidad se pudo notar que el promedio de los datos obtenidos de los ensayos, es mayor el de las probetas fabricadas mediante la estratificación manual, sin embargo, el rango aceptable de valores del módulo secante de elasticidad esta entre 5500 y 6700, ya que la mayoría de los valores arrojados por los ensayos contemplan dicho rango, por lo cual, se considera que aquellos que tienen un módulo superior al rango mencionado presentaron algún inconveniente en los ensayos realizados. En la Figura 45 se observó que las probetas 3 y 4 presentan bajos porcentajes de deformación por lo cual, el módulo de elasticidad aumenta excesivamente, esto puede atribuirse a la presencia de concentradores de esfuerzos en el material, dado que esto disminuye el porcentaje de deformación del mismo.

Para estimar mejores resultados del módulo secante de elasticidad, se desprecian los valores que superan el rango mencionado anteriormente y se promedian los otros valores obtenidos, con lo cual se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 50.

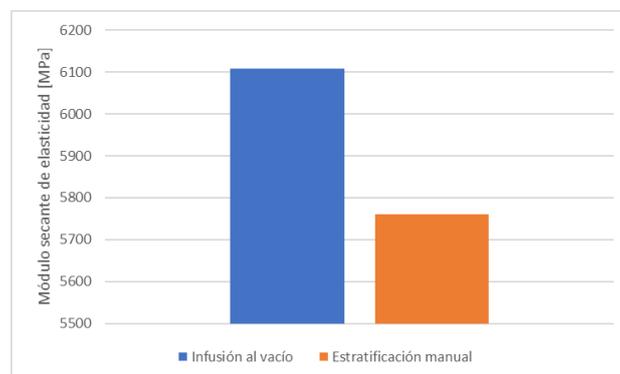


Figura 50 Comparación del módulo secante de elasticidad corregido en materiales compuestos obtenidos por estratificación manual e infusión al vacío
Fuente (propia)

Una vez corregidos los valores de módulo secante de elasticidad, se pudo visualizar que las probetas de material compuesto obtenidas por infusión al vacío poseen mejores

características, es decir, son materiales más rígidos y compactos que soportan altas cargas y altos porcentajes de deformación.

3.2.2 Ensayos de flexión

En el siguiente apartado se muestran la imágenes de las probetas después de los ensayos de flexión (ver Figura 51) y los resultados obtenidos en probetas fabricadas por estratificación manual e infusión al vacío (ver Figura 52 y Figura 53)



Figura 51 Probetas de material compuesto después de realizar el ensayo de flexión
Fuente (propia)

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

Figura 52 Resultados de los ensayos de flexión realizados a probetas obtenidas por medio de estratificación manual
Fuente (propia)

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

Figura 53 Resultados de los ensayos de flexión realizados a probetas obtenidas por medio de Infusión al vacío
Fuente (propia)

De la Figura 52 y Figura 53 se pudo notar que las probetas para ensayos de flexión fabricadas por medio infusión al vacío tienen mejores características mecánicas en relación con las probetas fabricadas por estratificación manual. Estos se evidencian en la carga última, resistencia última, módulo elástico y porcentaje de deformación que alcanzan las probetas obtenidas por infusión al vacío.

Con los resultados de fuerza y área obtenidos de los ensayos de flexión, se calcula los datos de resistencia del material en función de la deflexión para probetas fabricadas por estratificación manual (ver Figura 54) e infusión al vacío (ver Figura 55)

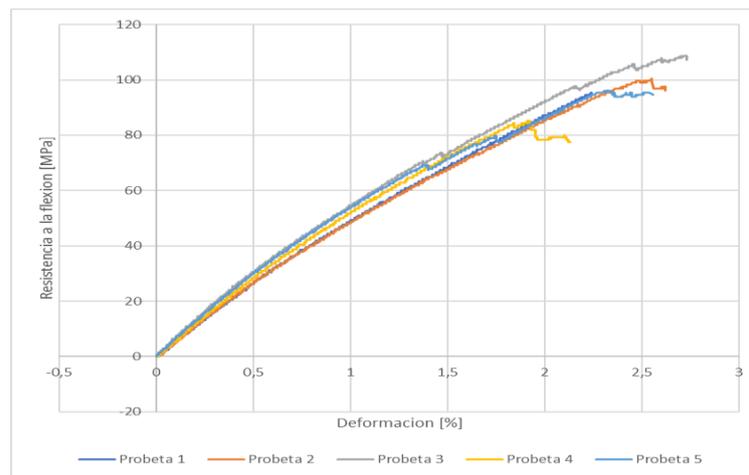


Figura 54 Diagrama resistencia a la flexión vs deformación de probetas de material compuesto obtenidas por estratificación manual
Fuente (propia)

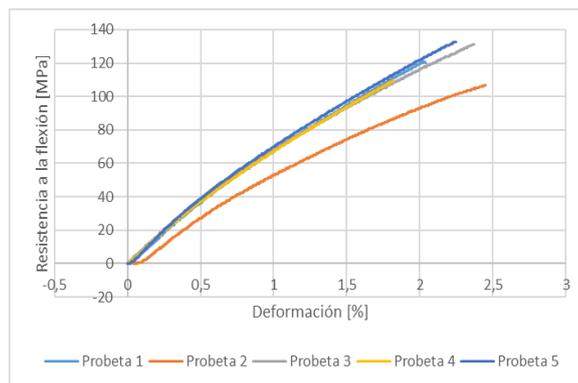


Figura 55 Diagrama resistencia a la flexión vs deformación de probetas de material compuesto obtenidas por infusión al vacío
Fuente (propia)

Al comparar los diagramas de la Figura 54 y Figura 55, se puede notar que las probetas obtenidas por infusión al vacío son más compactas que las obtenidas por estratificación manual, ya que, en todo el proceso de deformación no existe reducción de la resistencia y las curvas que se obtienen son continuas sin registro de deformaciones.

En la Figura 54 se puede visualizar que, a cierto valor de resistencia, las probetas experimentan una reducción en la resistencia, lo que está asociada a la fatiga del material o presencia de concentradores de esfuerzos.

Con los valores de módulo elástico de flexión se realizó una gráfica comparativa de los resultados obtenidos (ver Figura 56).

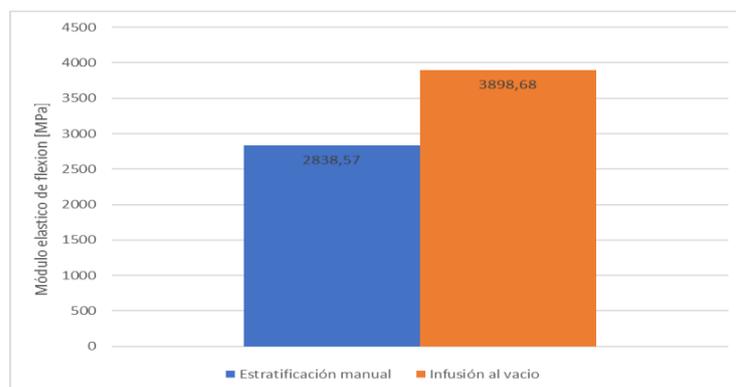


Figura 56 Comparación del módulo elástico de flexión de probetas obtenidas por estratificación manual e infusión al vacío
Fuente (propia)

En la Figura 56 se puede ver la comparación de los módulos elásticos de flexión entre probetas de materiales compuestos fabricados por estratificación manual e infusión al vacío, observando que, por infusión al vacío, el valor del módulo de flexión es considerablemente mayor, otorgando a estas probetas mejores propiedades de doblado,

es decir, estas probetas pueden tener un mayor rango de deformación sin alcanzar la fractura de los mismos.

3.2.3 Ensayos de impacto

Los ensayos de impacto fueron realizados en el laboratorio de desgaste y falla de la Escuela Politécnica Nacional, a partir del sistema de masa constante y altura variable. Las probetas ensayadas se muestran en Figura 57 y las alturas utilizadas para este ensayo fueron de 45 a 145 milímetros que se aumentaron desde el límite mínimo hasta el límite máximo en un rango de 10 milímetros consecutivamente.

Con los datos obtenidos del ensayo de impacto, a partir de la **ecuación 14** se determinó la altura media de falla y con la **ecuación 15** se obtuvo la energía media de falla, tanto para las probetas de material compuesto obtenidas por la técnica de estratificación manual, como las obtenidas por infusión al vacío. Los valores calculados se muestran en la Tabla 15:

Tabla 15 Valores calculados de altura media de falla y energía media de falla de materiales compuestos obtenidos por las técnicas de estratificación manual e infusión al vacío

Técnica	Altura media de falla [mm]	Energía media de falla [J]
Estratificación manual	65,000	0,440
Infusión al vacío	65,000	0,440

Fuente (propia)

Comparando los valores calculados, se visualizó que, en cuanto a resistencia al impacto, ambas técnicas de fabricación aportan características similares, ya que, la altura media de falla y la energía media de falla es la misma para las probetas obtenidas por infusión al vacío, como para las obtenidas por estratificación manual.



Figura 57 Probetas de material compuesto después de realizar los ensayos de impacto
Fuente (propia)

3.2.4 Micrografía

Probetas de tracción.

Después de los ensayos de tracción en las probetas, se utilizó micrografía para visualizar defectos y la interfaz entre la matriz y el refuerzo (ver Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61 y Figura 62)



Figura 58 Micrografía de probeta 1 después del ensayo de tracción
Fuente (propia)

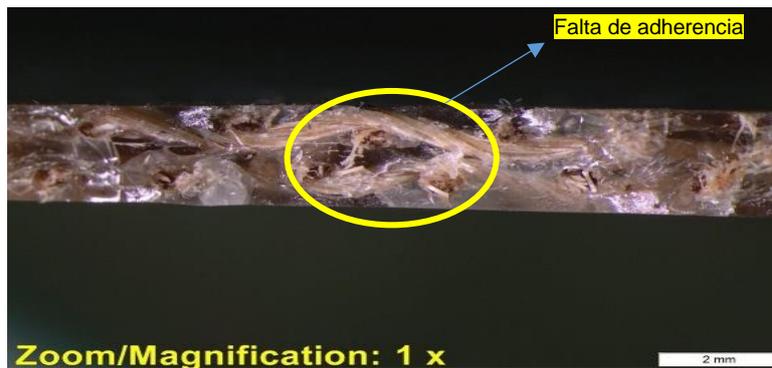


Figura 59 Micrografía de probeta 2 después del ensayo de tracción
Fuente (propia)

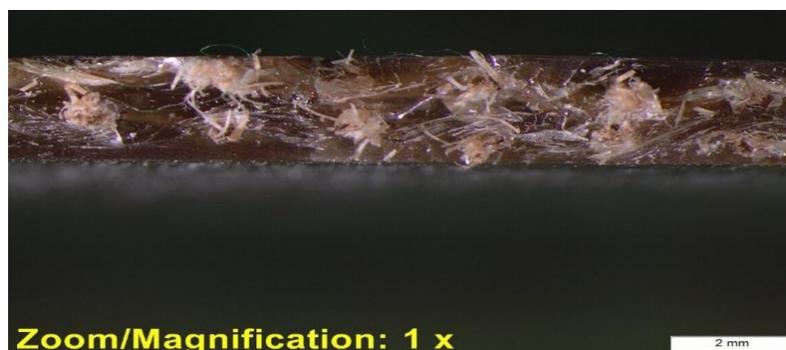


Figura 60 micrografía de probeta 3 después del ensayo de tracción
Fuente (propia)

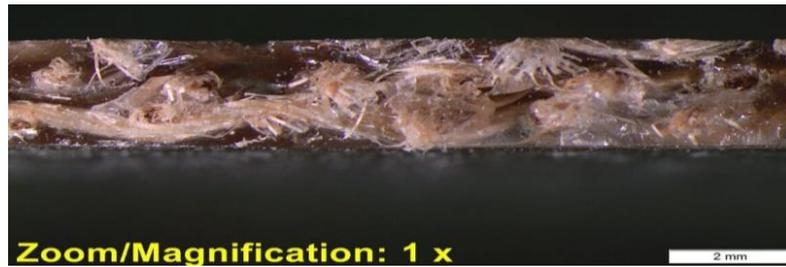


Figura 61 micrografía de probeta 4 después del ensayo de tracción
Fuente (propia)



Figura 62 Micrografía de probeta 5 después del ensayo de tracción
Fuente (propia)

De las Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62, se puede notar que la interface entre la matriz y el refuerzo es relativamente buena, ya que, se puede visualizar la formación de cavidades muy pequeñas, lo que disminuye la generación de concentradores de esfuerzos y, los tejidos de las fibras tienen una adherencia considerablemente aceptable a la matriz, lo que permite fortalecer las características del material compuesto, ya que, esto permite que exista una distribución de carga uniforme sobre toda el área transversal de la probeta.

Probetas de flexión.

Posterior a los ensayos de impacto, se utilizó micrografía para evaluar la interfaz matriz-refuerzo de las probetas, así como también, para poder visualizar los defectos del material (ver Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66 y Figura 67).

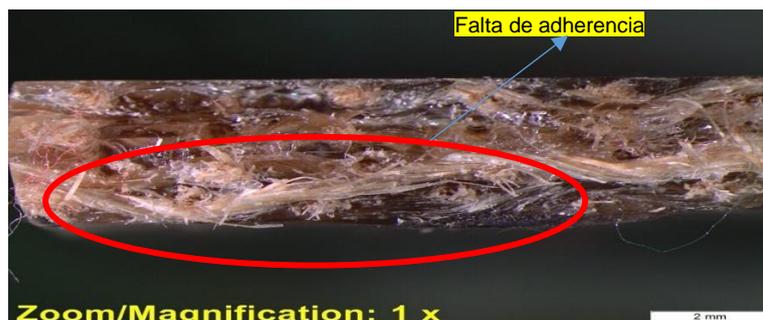


Figura 63 Micrografía de probeta 1 después del ensayo de flexión
Fuente (propia)



Figura 64 Micrografía de probeta 2 después del ensayo de flexión
Fuente (propia)

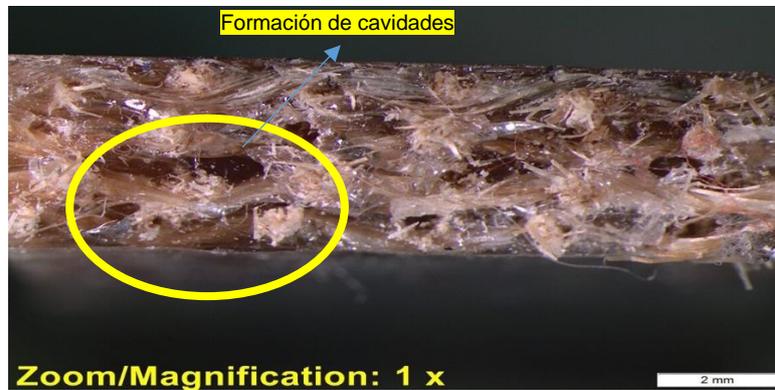


Figura 65 Micrografía de probeta 3 después del ensayo de flexión
Fuente (propia)

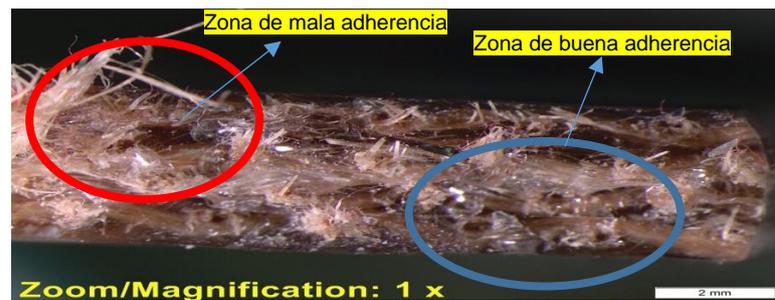


Figura 66 Micrografía de probeta 4 después del ensayo de flexión
Fuente (propia)

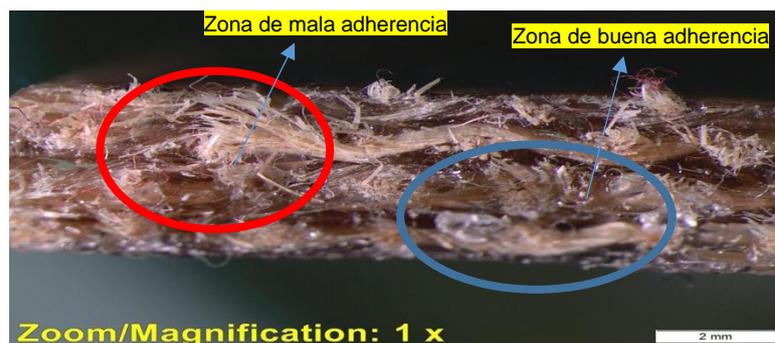


Figura 67 Micrografía de probeta 5 después del ensayo de flexión
Fuente (propia)

De las Figura 63Figura 64Figura 65Figura 66Figura 67, correspondientes a la microscopia realizadas a las probetas de flexión, se puede notar que la interface es relativamente buena. Se pudo visualizar que el material de refuerzo en ciertas secciones se encuentra recubierto por la matriz, formando un solo componente, mientras que en otras zonas se pudo notar que la matriz y el refuerzo no se unieron adecuadamente. También se pudo observar formaciones de pequeños espacios vacíos debido a los gases encerrados que se forman en el proceso de reacción exotérmica.

Probetas de impacto.

Después de los ensayos de impacto se utilizó micrografía para evaluar la interfaz matriz-refuerzo y poder visualizar los defectos existentes en las probetas (ver Figura 68, Figura 69 y Figura 70)



Figura 68 Micrografía de probeta 27 después del ensayo de impacto
Fuente (propia)



Figura 69 Micrografía de probeta 28 después del ensayo de impacto
Fuente (propia)



Figura 70 Micrografía de probeta 29 después del ensayo de impacto
Fuente (propia)

En las Figura 68Figura 69Figura 70 se pudo notar la existencia de cavidades, sin embargo, la interface del refuerzo con la matriz es considerablemente buena, ya que, después del impacto recibido por el dardo, permanecen compactos.

3.3 Conclusiones

La estratificación manual es una de las técnicas más antiguas para la fabricación de materiales compuestos, por lo cual, en comparación con otras técnicas es la menos eficiente, ya que, a pesar de ser una técnica rápida, de fácil aplicación y económica, no otorga las características mecánicas superiores que se desea para el material compuesto. En este trabajo se cumplió satisfactoriamente la obtención y caracterización de las probetas de materiales compuestos, utilizando como material de refuerzo el tejido de las fibras de cabuya y la técnica de estratificación manual, el cual fue el objetivo general de este trabajo, adicionando a esta técnica un proceso de compactación para disminuir la formación de espacios vacíos o burbujas de gases formados por la reacción exotérmica generada por la mezcla de la resina y sus reactivos. Por medio de estratificación manual se notó que no era posible controlar perfectamente la formación de espacios vacíos en el interior del material, ya que, no se sabe con certeza la cantidad de presión que se debe aplicar sobre las matrices del molde para poder compactar adecuadamente la matriz y el refuerzo, sin alterar el espesor del material, por lo cual se logró obtener las dimensiones de las probetas y pequeñas formaciones de espacios vacíos que se pudieron visualizar por medio de la microscopía óptica.

Una vez obtenidas las probetas de material compuestos se realizaron los ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto para determinar las características mecánicas del material fabricado. En las probetas de flexión e impacto no se registraron ninguna novedad, ya que los datos de las características mecánicas obtenidas estaban

estrechamente relacionadas, es decir, los valores eran similares, sin embargo, en las probetas fabricadas para los ensayos de tracción, dos probetas presentaron inconvenientes en cuanto a características de carga última, resistencia última, módulo secante de elasticidad y porcentaje de deformación, esto se puede visualizar en la Figura 45, lo cual está asociado al método utilizado para la compactación del refuerzo y la matriz, así como también, al método utilizado para maquinarse las probetas, lo que provocó la obtención de datos erróneos en el ensayo realizado. Para ajustar las probetas a las dimensiones establecidas por las normas utilizadas para este trabajo, se cortaron las planchas de material compuesto por medio de una caladora manual, lo que puede producir grietas en la periferia de las probetas y para prevenir la existencia de dichas grietas se realizó un proceso de lijado con lijas de varios números de granos, desde uno de grano grueso hasta uno de grano fino, sin embargo, no se puede garantizar una superficie totalmente libre de grietas.

La microscopia fue una técnica bastante útil para determinar la interface entre la matriz y el refuerzo, así como también, para determinar posibles condiciones de falla. Por medio de la microscopia se pudo determinar que, en ciertas secciones de las probetas, la interface entre el refuerzo y la matriz no era la adecuada, además, se visualizó formaciones de espacios intersticiales en el interior del material compuesto, lo que se atribuye a la falla prematura en los ensayos realizados.

Comparando los resultados de los ensayos normalizados realizados a las probetas fabricadas por medio de estratificación manual y las probetas fabricadas por infusión al vacío se puede notar que las características mecánicas obtenidas por infusión al vacío son superiores a las de estratificación manual, esto se debe a que, por medio de infusión al vacío, se puede controlar de mejor manera la formación de burbujas en el interior del material, así como también, mejorar la compactación del material compuesto, es decir, mejorar la interface de la matriz con el refuerzo. En cuanto a los ensayos de impacto, ambas técnicas de fabricación proporcionaron los mismos resultados, la altura media de falla fue de 65 mm y la energía media de falla fue de 0,44 J, esto se debe a que las dimensiones de las probetas son similares (largo, ancho y espesor), y el porcentaje volumétrico de la matriz y refuerzo fue prácticamente el mismo. En general, se puede concluir que la técnica de infusión al vacío es mejor que la técnica de estratificación manual, debido a que las características que proporciona son superiores al comparar ambas técnicas.

3.4 Recomendaciones

Para futuros trabajos, utilizar moldes que eviten el proceso de maquinado de las probetas de material compuesto, ya que, el proceso de maquinado puede producir fisuras o grietas que actúan como concentradores de esfuerzos, los cuales generan datos erróneos en los ensayos a realizar.

Para minimizar la formación de espacios intersticiales en el interior del material compuesto, adquirir resinas que produzcan bajas reacciones exotérmicas.

Utilizar películas muy pequeñas de desmoldante, ya que, al exceder una cantidad específica, este tiende a repeler la resina poliéster produciendo mal formaciones del material compuesto.

Aplanar la superficie del material de refuerzo, ya que, de no hacerlo, las secciones dobladas pueden quedar fuera de la matriz reduciendo la resistencia del material en dicha sección.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[INFINITIA , «Materiales compuestos: ¿Qué son y para qué sirven?,» 08 07 2022. [En 1 línea]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-compuestos-que-son-y-para-que-sirven/>. [Último acceso: 03 09 2022].

[F. Stupenengo, «Materiales y materia prima,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>. [Último] acceso: 03 09 2022].

[M. Cano, «Desarrollo de un cuadricóptero-mini basado en materiales compuestos,» 03 3 209. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Representacion-de-un-material-compuesto_fig1_331635362. [Último acceso: 03 09 2022].

[A. M. Sendra, «ESTUDIO COMPARATIVO DE FIBRAS NATURALES PARA 4 REFORZAR HORMIGÓN,» 2020. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/160345/Mart%C3%ADn%20%20Estudio%20comparativo%20de%20%20fibras%20naturales%20para%20reforzar%20hormig%C3%B3n.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 28 08 2022].

[Food and Agriculture Organization of the United Nations , «Perfiles de 15 de las 5 principales fibras de origen vegetal y animal,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.fao.org/natural-fibres-2009/about/15-natural-fibres/es/#:~:text=Entre%20las%20fibras%20de%20origen,y%20secreciones%2C%20como%20la%20seda..> [Último acceso: 28 08 2022].

[EXPLORED, «25 Fibras Vegetales Son El Potencial Del Ecuador,» 21 03 2000. [En 6 línea]. Available: <https://hoy.tawsa.com/noticias-ecuador/25-fibras-vegetales-son-el-potencial-del-ecuador-5688.html#:~:text=Ecuador%20es%20considerado%20un%20para%C3%ADso%20en%20cuanto%20a%20fibras%20naturales.&text=de%20oveja%2C%20alpaca%20y%20conejo..> [Último acceso: 28 08 2022].

[B. Acosta, «Plantas vasculares: qué son, características y ejemplos,» 04 03 2021. [En 7 línea]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/plantas-vasculares-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-2770.html>. [Último acceso: 28 08 2022].

[Inter Press Sevice , «ECUADOR: Creativo potencial económico de las fibras 8 vegetales,» 04 04 2000. [En línea]. Available: <https://ipsnoticias.net/2000/04/ecuador-creativo-potencial-economico-de-las-fibras-vegetales/>. [Último acceso: 28 08 2022].

[E. C. I. Pontón, «Fabricación y comercialización de sacos de fibra de cabuya en el 9 Ecuador,» 08 2012. [En línea]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/235/1/T-UCSG-PRE-ECO-GES-16.pdf>. [Último acceso: 28 08 2022].

[B. C. Morveli, «Cabuya o maguey andino y su uso en tiempo de los Incas,» 19 03 2019. 1 [En línea]. Available: <http://cuzcoeats.com/es/cabuya-o-maguey-andino-y-su-uso-en-0-tiempo-de-los-incas/>. [Último acceso: 28 08 2022].

[F. V. F. C. C. P. Luis Pruna, «Elaboración de la fibra de cabuya en tejido plano como 1 matriz de refuerzo para la construcción de un retrovisor,» 2020. [En línea]. Available: 1 <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n24/1390-650X-Ingenius-24-00081.pdf>. [Último 1 acceso: 28 08 2022].

[ALLPA.COM, «Cabuya joven,» 13 12 2018. [En línea]. Available: 1 <https://www.allpa.org/cabuya/>. [Último acceso: 28 08 2022].

2
]

[GoRaymi International TouristicPlatform S.A., «Artesanías de fibra de Cabuya en 1 Intag,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.goraymi.com/es-3-ec/imbabura/cotacachi/tejidos/artesantias-fibra-cabuya-intag-a2qvovstr>. [Último acceso: 1 28 08 2022].

[T. M. J. L. REVELO ZAVALA WILLIAM DARÍO, «OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN 1 DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON

4 TEJIDOS Y NO TEJIDOS DE FIBRA DE CABUYA MEDIANTE INFUSION AL VACIO.,»
] 05 2021. [En línea]. Available: file:///C:/Users/User/Downloads/Tesis_Revelo_Tapia.pdf.
[Último acceso: 29 08 2022].

[N. A. T. DUQUE, «OBTENCION Y CARACTERIZACION DE MATERIALES
1 COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADA CON FIBRAS DE CABUYA
5 MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN,» 06 2012. [En línea]. Available:
] <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4714/1/CD-4344.pdf>. [Último acceso: 29
08 2022].

[H. J. Cisneros, «EL TRABAJO CON FIBRA DE CABUYA EN LA PROVINCIA DE
1 IMBABURA.,» 08 1992. [En línea]. Available:
6 <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/9929/1/REXTN-SA16-04->
] [Jaramillo.pdf](#). [Último acceso: 29 08 2022].

[J. Sanipatin, «SlideShare,» 29 04 2018. [En línea]. Available:
1 <https://es.slideshare.net/AlexandraSanipatin/cabuya-95422699>. [Último acceso: 29 08
7 2022].
]

[zwickroell, «Ensayos de tracción,» S.F. [En línea]. Available:
1 <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/>.
8 [Último acceso: 03 09 2022].
]

[juanfergp, «SCRIBD,» 07 11 2014. [En línea]. Available:
1 <https://es.scribd.com/document/245841641/Ensayo-de-Flexion>. [Último acceso: 03 09
9 2022].
]

[L. S. P. TOBAR, «CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE
2 RESINA EPÓXICA REFORZADO CON FIBRA DE CABUYA COMPARADO CON LA
0 MISMA RESINA REFORZADO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR.,» 02 2020. [En
] línea]. Available:

file:///C:/Users/User/Downloads/04%20MAUT%20109%20TRABAJO%20GRADO.pdf.
[Último acceso: 03 09 2022].

[Elcometer, «elcometer.com,» 2023. [En línea]. Available:
2 [https://www.elcometer.com/es/comprobador-de-impacto-variable-elcometer-1615-](https://www.elcometer.com/es/comprobador-de-impacto-variable-elcometer-1615-11.html)
1 1.html. [Último acceso: 30 07 2023].
]

[PCE Ibérica S.L., «PCE Instrument,» 10 03 2023. [En línea]. Available: [https://www.pce-](https://www.pce-iberica.es/)
2 iberica.es/. [Último acceso: 13 08 2023].
2
]

[Univesitat de les Illes Balears, «Microscopia optica,» 2023. [En línea]. Available:
2 [https://sct.uib.es/Instruments-i-equipos-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-](https://sct.uib.es/Instruments-i-equipos-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-microscopia-optica-i-electronica/Microscopia-optica.cid108042)
3 [microscopia-optica-i-electronica/Microscopia-optica.cid108042](https://sct.uib.es/Instruments-i-equipos-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-microscopia-optica-i-electronica/Microscopia-optica.cid108042). [Último acceso: 13 08
] 2023].

[PINTULAC , «pintulac.com,» 2021. [En línea]. Available:
2 [https://www.pintulac.com.ec/resina-poliester-transparente-con-envase-de-1-kilogramo-](https://www.pintulac.com.ec/resina-poliester-transparente-con-envase-de-1-kilogramo-rd1.html)
4 rd1.html. [Último acceso: 2023 07 26].
]

[CHEMIA S.A. , S.F.. [En línea]. Available:
2 <https://www.chemia.com.ar/informacion/aprendiendo/>. [Último acceso: 28 07 2023].
5
]

[artyfloor.com, «ARTYFLOOR,» S.F. [En línea]. Available:
2 <https://artyfloor.com/product/rodillo-de-espuma-18-cm/>. [Último acceso: 29 07 2023].
6
]

[L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed.,
2 Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.

7
]

[MEXPOLIMEROS, «ENSAYOS DE IMPACTO,» S.F. [En línea]. Available:
2 <https://www.mexpolimeros.com/charpy.html>. [Último acceso: 03 09 2022].

8
]

5 ANEXOS

5.1 ANEXO I. Caracterización de tejido de fibra de cabuya



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO



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

Página 1 de 2

EMPRESA SOLICITANTE

PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ
Escuela Politécnica Nacional (Ingeniería Mecánica)

MATERIAL QUE ENTREGA

Tejido de cabuya artesanal

TRABAJO SOLICITADO

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

FECHA DE RECEPCION ORDEN DE TRABAJO 2022 / 12/ 21

FECHA DE REALIZACIÓN DEL INFORME 2022 / 12/ 21

NÚMERO DE ORDEN DE TRABAJO DQ-OTI0019-2022

Responsable del Centro Textil


Ing. Hilda Trujillo A.



Director del Centro Textil


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



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO



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

Página 2 de 2



MUESTRA DE TEJIDO DE CABUYA ARTESANAL

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

Responsable del Centro Textil

Ing. Hilda Trujillo A.



Director del Centro Textil

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

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

Dirección: Andalucía N23-441 y Veintimilla Teléfonos: 2976 300 - 3938 780 Ext. 4305-4306-43-07
E-mail: omar.bonilla@epn.edu.ec; hilda.trujillo@cpn.edu.ec

5.2 ANEXO II. Ficha técnica de resina poliéster



RESINA POLIÉSTER ORTOFTÁLICA

33000

Octubre 2022

CARACTERÍSTICAS

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

USOS

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

PROPIEDADES DE LA RESINA LÍQUIDA

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

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

PROPIEDADES MECÁNICAS

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

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

RECOMENDACIONES Y ALMACENAMIENTO

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

RESINA_POLIÉSTER_RD1_TREX.DPKC.B_22.10.24-2

5.3 ANEXO III. Ficha técnica de monómero de estireno



Estirénico de las Américas

24 Waterway Avenue, Suite 1200 The

Woodlands, TX 77380

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

PROVEEDOR: AMERICAN STYRENICS

REF: TPE-032-12

MONÓMERO DE ESTIRENO - COMO

Especificación de ventas

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

¹ Sujeto a cambios sin previo aviso.

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

Propiedades típicas

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

MSDS # AS-00001

Fecha de revisión: octubre de 2008

© Americas Styrenics LLC 2008

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

5.4 ANEXO IV. Ficha técnica de cobalto

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

NOMBRE QUÍMICO: *OCTOATO DE COBALTO*

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

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

PESO MOLECULAR: *345.37 g/mol*

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
APARIENCIA	Líquido, sin impurezas.	Visual
COLOR	Violeta o azul violeta	Visual

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

* Método de análisis de Producciones Químicas S.A.

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

DOCUMENTOS ASOCIADOS	
NORMA	No Aplica

5.5 ANEXO V. Ficha técnica de MEC

BOLETÍN TÉCNICO	BAC 001-02 Versión 01 Página 1 de 1
------------------------	---



PEROXICOL 80 (Peróxido de Metil Etil Cetona)

Rótulos:
NFPA:



UN:



DESCRIPCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

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

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

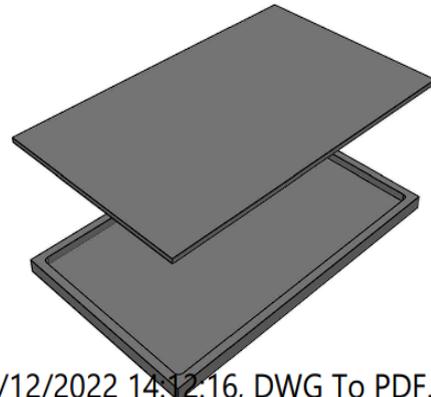
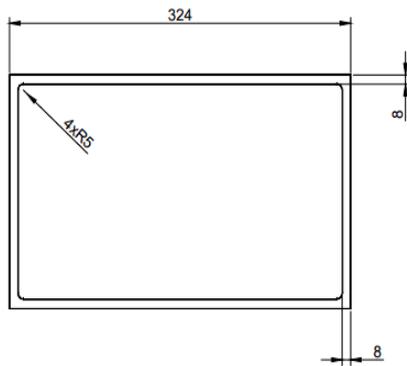
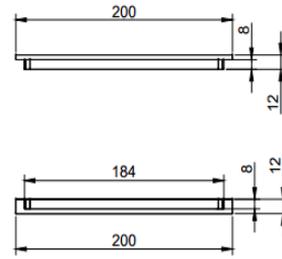
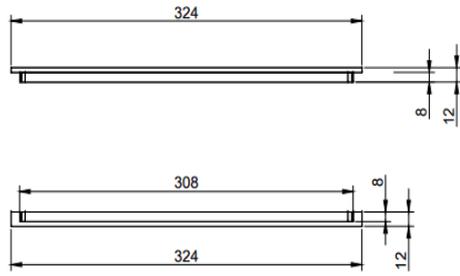
- > Productos en plástico reforzado con fibra de vidrio como botes, cabinas de automóviles, tejas plásticas, etc.
- > Láminas y vaciados de poliéster para botones.
- > Revestimientos, masillas y selladores de poliéster, etc.

ASISTENCIA TÉCNICA

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

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

5.6 ANEXO VI. Plano del molde



C:\Users\Administrador\Documents\molde.dwg, 21/12/2022 14:12:16, DWG To PDF.pc3

5.7 ANEXO VII. Resultados de ensayos de tracción y flexión



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

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



INFORME DE RESULTADOS No. II-2023-024

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

Quito, 19 de mayo de 2023

DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

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

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

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

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

Descripción de la(s) muestra(s):

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

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

LABORATORIO

Fecha de ingreso al Laboratorio: 11/05/2023

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

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

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

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

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



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)
"PL-TRAC-01" a "PL-TRAC-05" 23-27-0001 a 23-27-0005	15/05/2023	21,7	21,8	45,3	47,3
"PL-TRAC-01-COMP" a "PL-TRAC-05-COMP" 23-27-0006 a 23-27-0010	15/05/2023	21,3	21,6	46,2	45,3
"PL-FLEX-01" a "PL-FLEX-05" 23-27-0011 a 23-27-0015	16/05/2023	24,5	24,3	43,3	39,2
"PL-FLEX-01-COMP" a "PL-FLEX-05-COMP" 23-27-0016 a 23-27-0020	16/05/2023	24,4	24,7	39,4	43,4

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.
- Calibrador de vernier marca: Mitutoyo, modelo: Absolute Digimatic (12"/300 mm) con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir las dimensiones de la sección transversal de las probetas.
- Micrómetro analógico de caras planas marca: Mitutoyo, modelo: 103-104 con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir el espesor de las probetas.
- 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

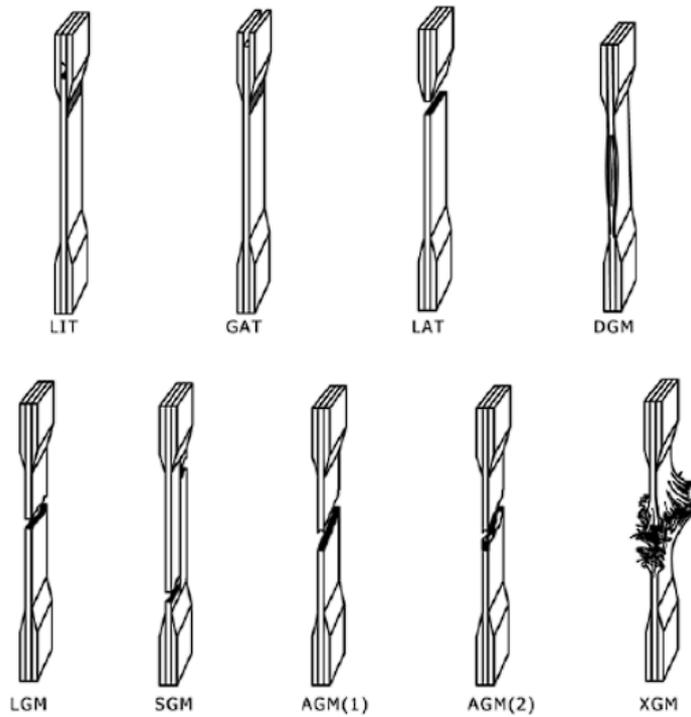
Ensayos de Tracción: El método empleado es el descrito en la norma ASTM D3039/D3039 M-17

- 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. Spitting	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 y 3 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados en los grupos de probetas "PL-TRAC", "PL-TRAC-COMP" respectivamente.

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

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D3039/D3039 M-17 (Grupo: PL-TRAC)									
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Código de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
PL-TRAC-01 (23-27-0001)	25,14	2,50	62,85	AWB	1500,00	23,87	4116,00	0,56	-
PL-TRAC-02 (23-27-0002)	24,88	2,53	62,95	AGM	1623,85	25,80	3550,98	0,68	0,68
PL-TRAC-03 (23-27-0003)	24,55	2,64	64,81	LUM	2015,67	31,10	3747,62	0,79	-
PL-TRAC-04 (23-27-0004)	25,13	2,54	63,69	LWB	2042,94	32,08	4017,24	0,81	-
PL-TRAC-05 (23-27-0005)	24,96	2,37	59,16	LGM	1042,38	17,62	4128,57	0,42	0,42
			Promedio	\bar{x}	1644,97	26,09	3912,08	0,65	0,55
			Desviación estándar	S_{n-1}	412,42	5,87	253,45	0,16	0,18
			Coefficiente de variación	CV	25,07	22,49	6,48	25,09	33,43

Observación: Únicamente las probetas "PL-TRAC-02" y "PL-TRAC-05" se rompieron en la zona calibrada para la medición de la deformación con extensómetro. Debido a esto no se reporta deformación a la rotura para el resto de las probetas del grupo "PL-TRAC".



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 "PL-TRAC-COMP"

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

Observación: Únicamente las probetas "PL-TRAC-01-COMP" y "PL-TRAC-02-COMP" se rompieron en la zona calibrada para la medición de la deformación con extensómetro. Debido a esto no se reporta deformación a la rotura para el resto de las probetas del grupo "ITR".

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

En las tablas 4 y 6 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados en los grupos de probetas "PL-FLEX", "PL-FLEX-COMP" 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 4. Resultados de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D7264/D7264 M-17 para las probetas del grupo "PL-FLEX"

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D7264/D7264-M15 (Grupo: PL-FLEX)											
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Distancia entre apoyos (mm)	Tipo de falla	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)	
PL-FLEX-01 23-27-0011	12,67	3,92	49,67	62,72	MAM	182,50	88,19	2558,74	3,72	3,72	
PL-FLEX-02 23-27-0012	12,92	3,71	47,93	59,36	MAM	201,67	100,97	2630,94	4,60	4,62	
PL-FLEX-03 23-27-0013	12,93	3,89	50,23	62,16	MAM	225,00	107,50	2835,79	4,55	4,57	
PL-FLEX-04 23-27-0014	12,79	3,82	48,77	61,04	MAV	101,67	50,03	1231,84	6,55	8,71	
PL-FLEX-05 23-27-0015	12,76	3,94	50,27	63,04	MAM	199,24	95,11	3077,23	3,58	3,58	
					Promedio	\bar{x}	182,02	88,36	2466,91	4,60	5,04
					Desviación estándar	S_{n-1}	47,40	22,58	719,25	1,19	2,11
					Coefficiente de variación	CV	26,04	25,56	29,16	25,77	41,78

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

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



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

Los resultados de los ensayos de tracción y flexión realizados, conjuntamente con los datos tratados y las gráficas generadas, se envían al solicitante adjunto con el presente informe.

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

NOTA DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: En caso de que las muestras entregadas no cumplieran con las especificaciones solicitadas por el LANUM (dimensiones, cantidad de muestra), y a pesar de eso el cliente diera su consentimiento para la realización de análisis, el LANUM no se responsabiliza si los resultados son afectados debido a estas desviaciones (no cumplimiento de especificaciones)

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. Karina Lagos
Responsable Técnico

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 "PL-TRAC" después de los ensayos de tracción.



Figura A2. Probetas del grupo "PL-TRAC-COMP" 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 "PL-FLEX" después de los ensayos de flexión.



Figura A4. Probetas del grupo "PL-FLEX-COMP" 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.

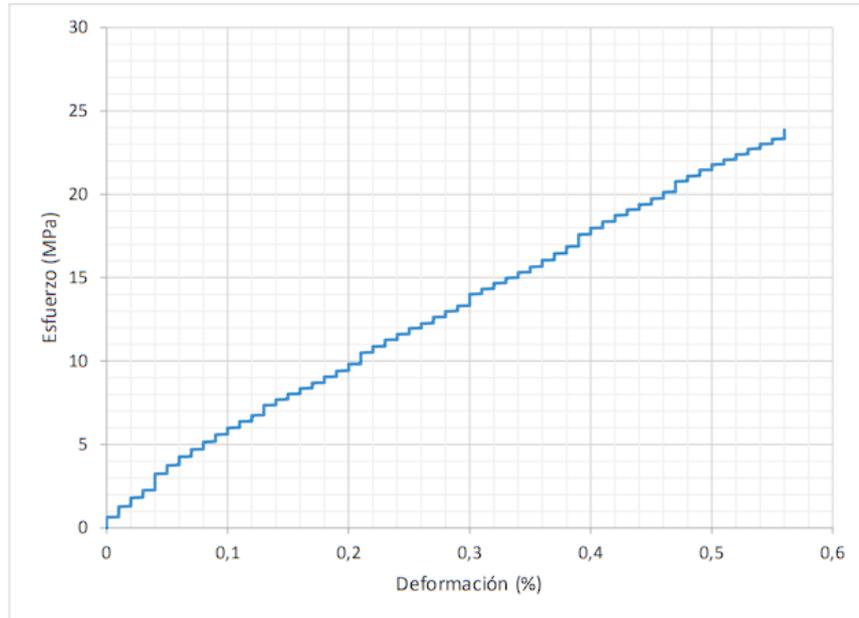


Figura B1. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-01 (23-27-0001)

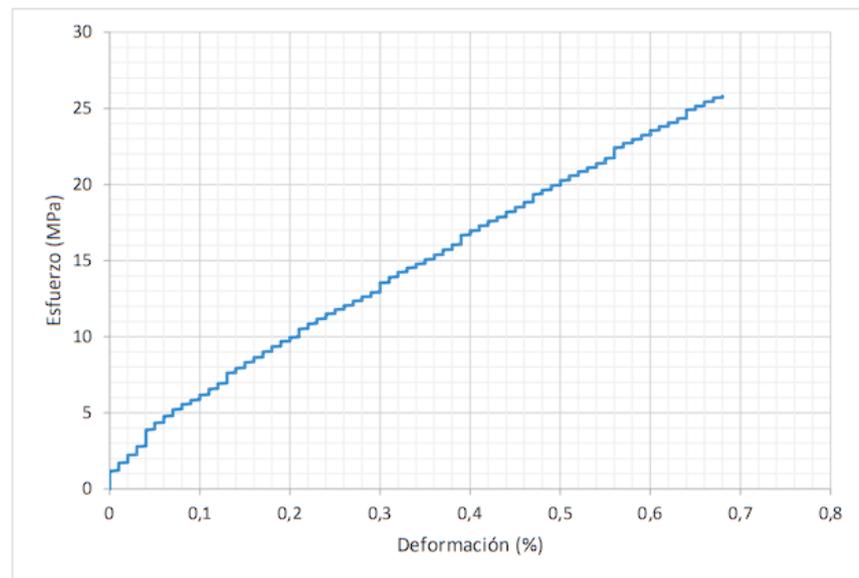


Figura B2. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-02 (23-27-0002)



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

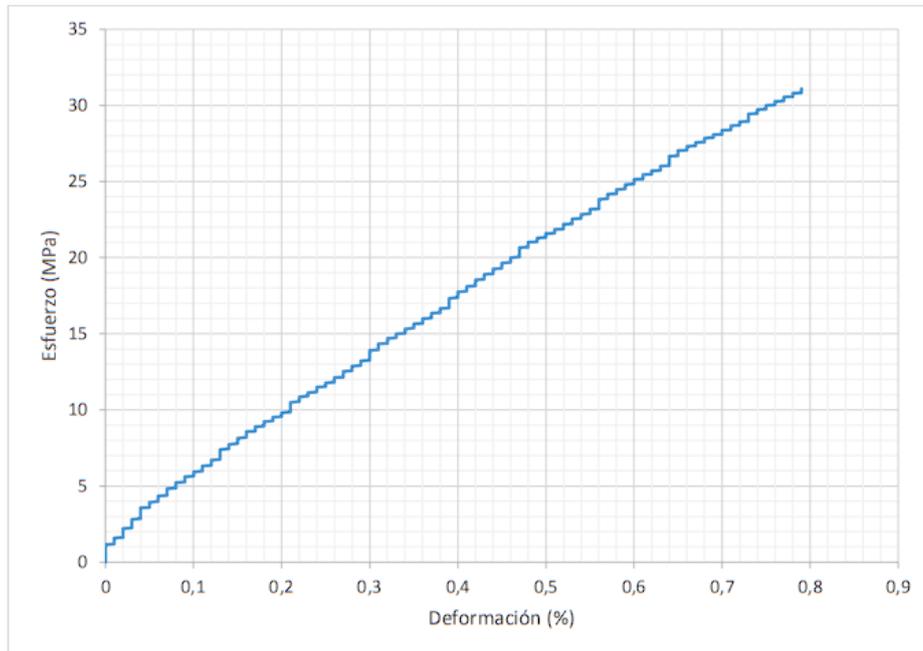


Figura B3. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-03 (23-27-0003)

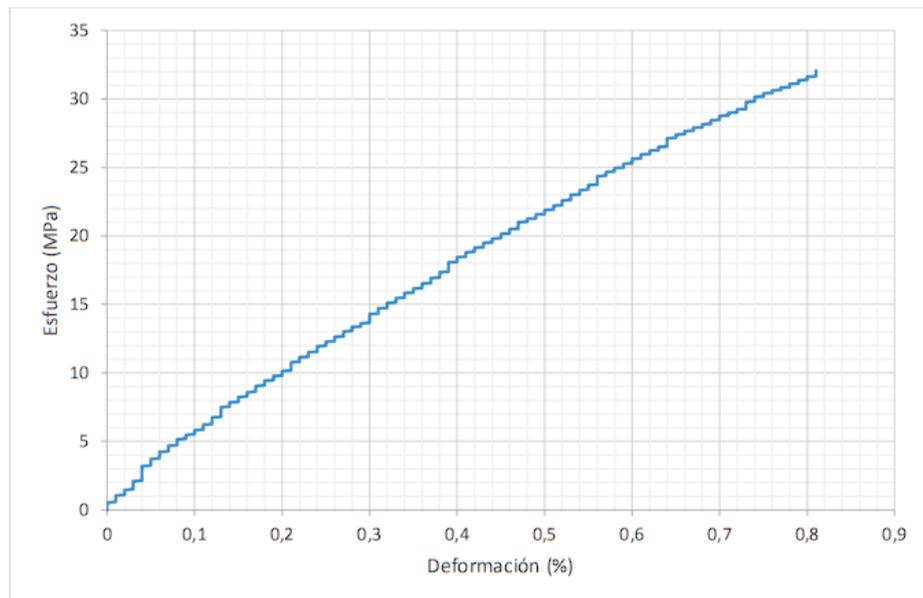


Figura B4. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-04 (23-27-0004)



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

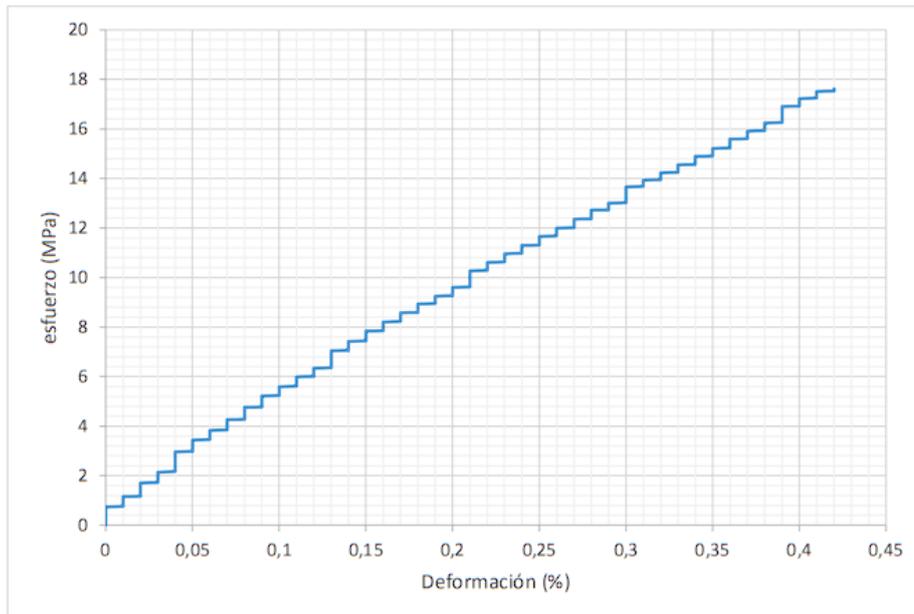


Figura B5. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-05 (23-27-0005)

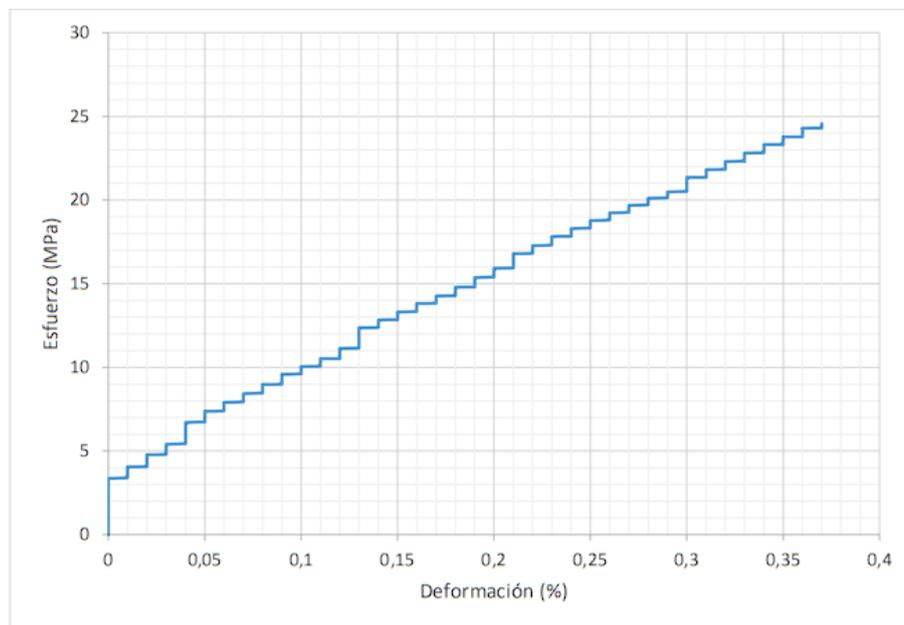


Figura B6. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-01-COMP (23-27-0006)



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.fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

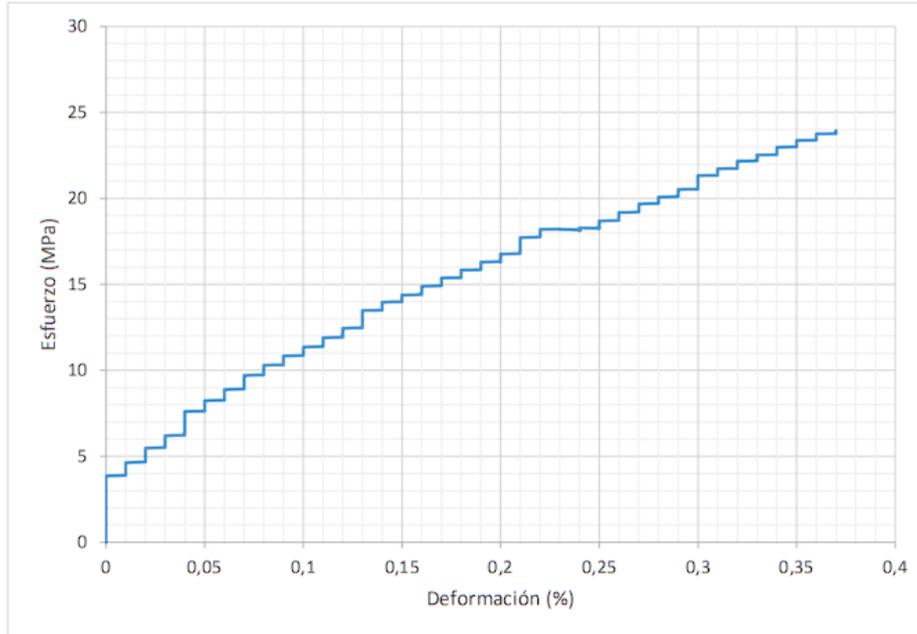


Figura B7. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-02-COMP (23-27-0007)

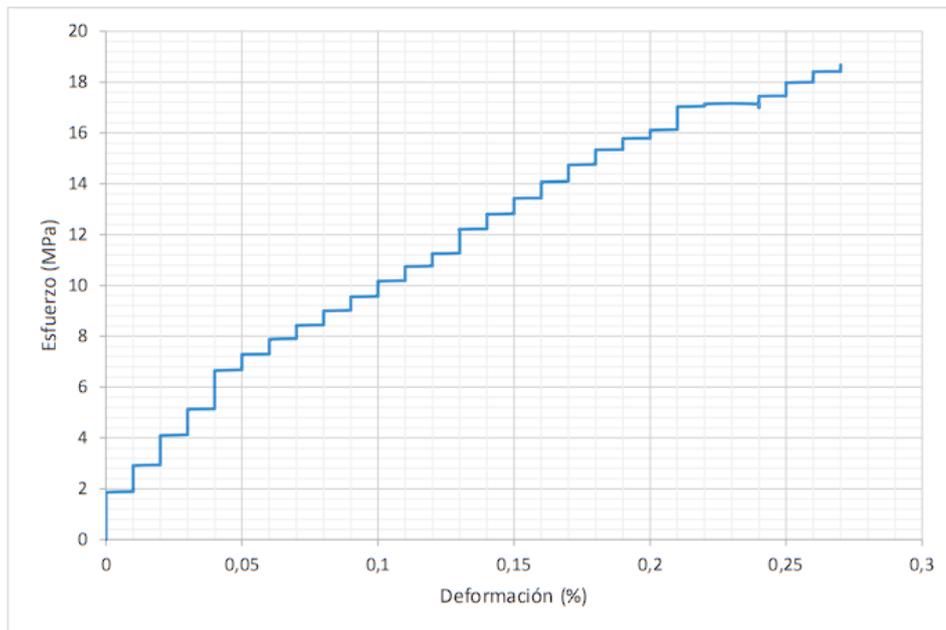


Figura B8. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-03-COMP (23-27-0008)



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

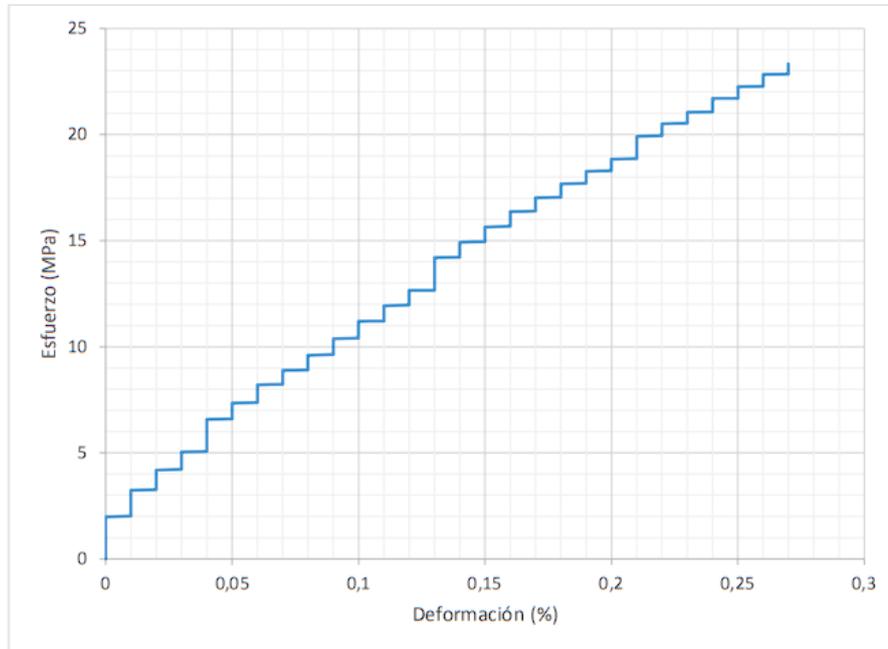


Figura B9. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-04-COMP (23-27-0009)

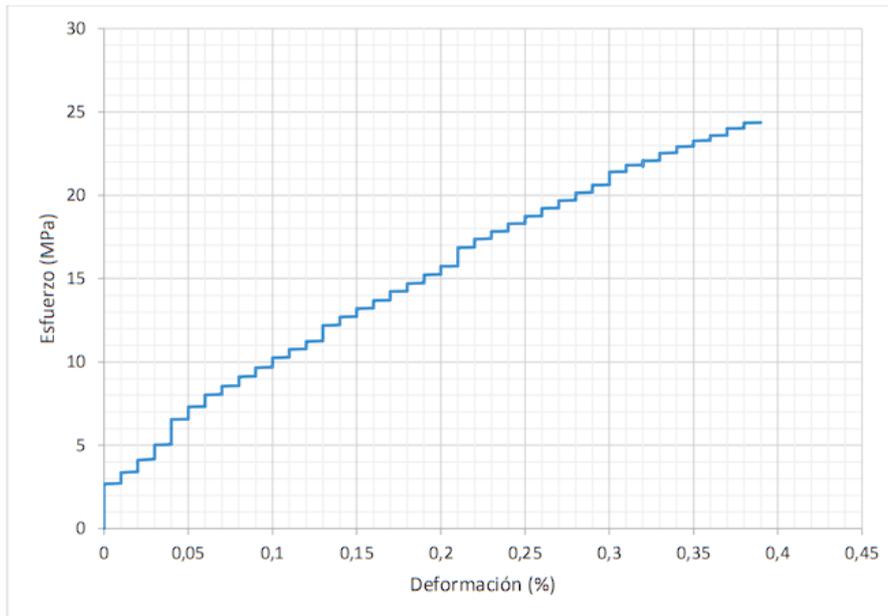


Figura B10. Curva Esfuerzo vs Deformación para la probeta PL-TRAC-05-COMP (23-27-0010)



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.

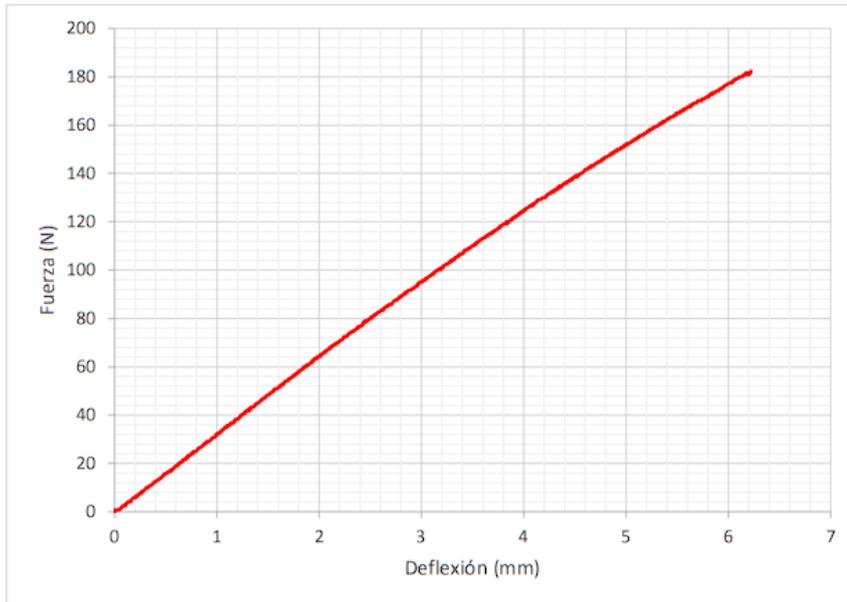


Figura C1. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-01 (23-27-0011)

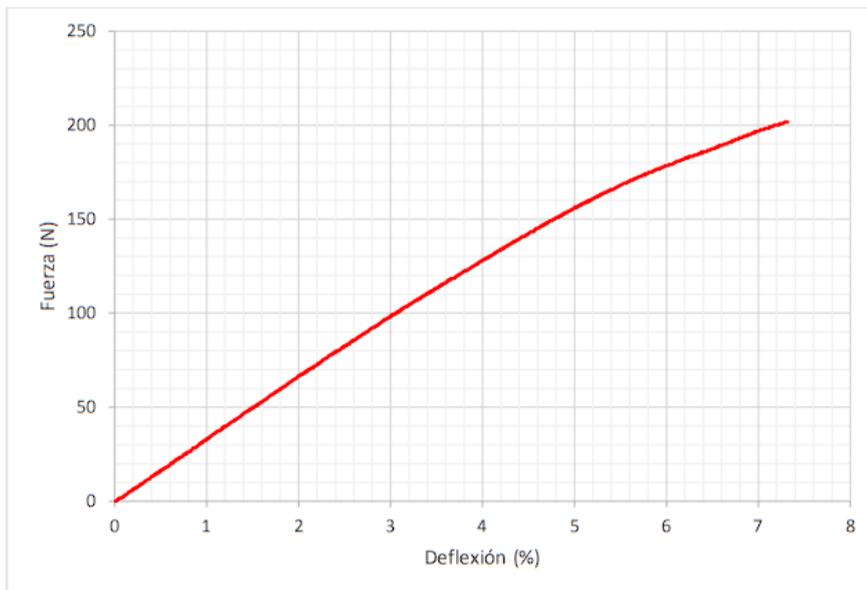


Figura C2. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-02 (23-27-0012)



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

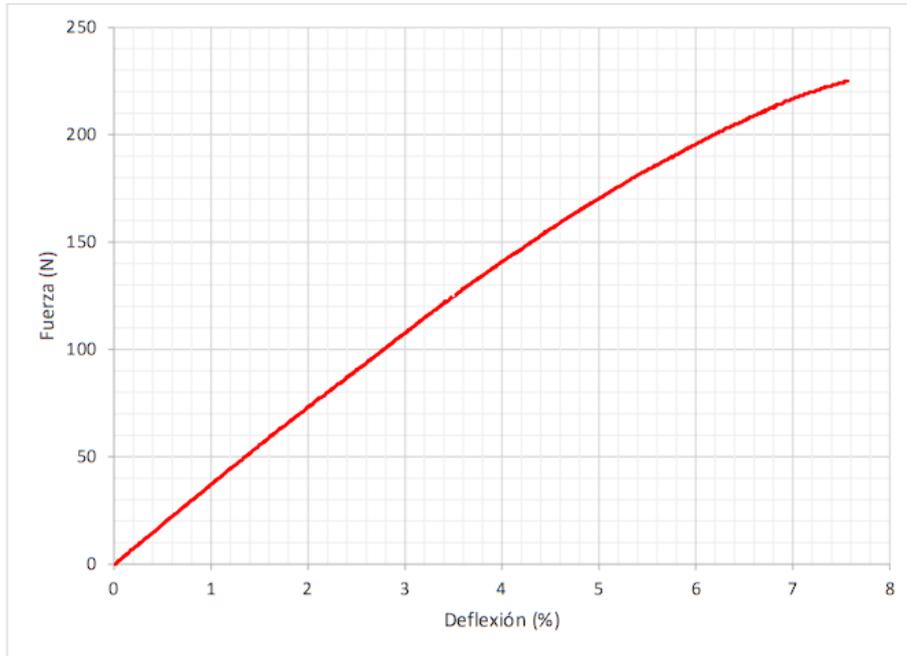


Figura C3. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-03 (23-27-0013)

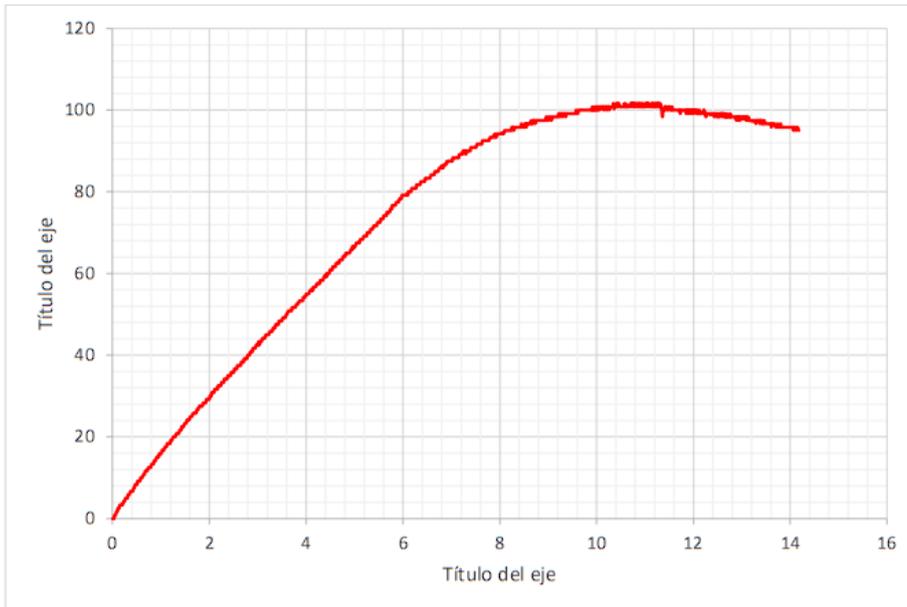


Figura C4. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-04 (23-27-0014)



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

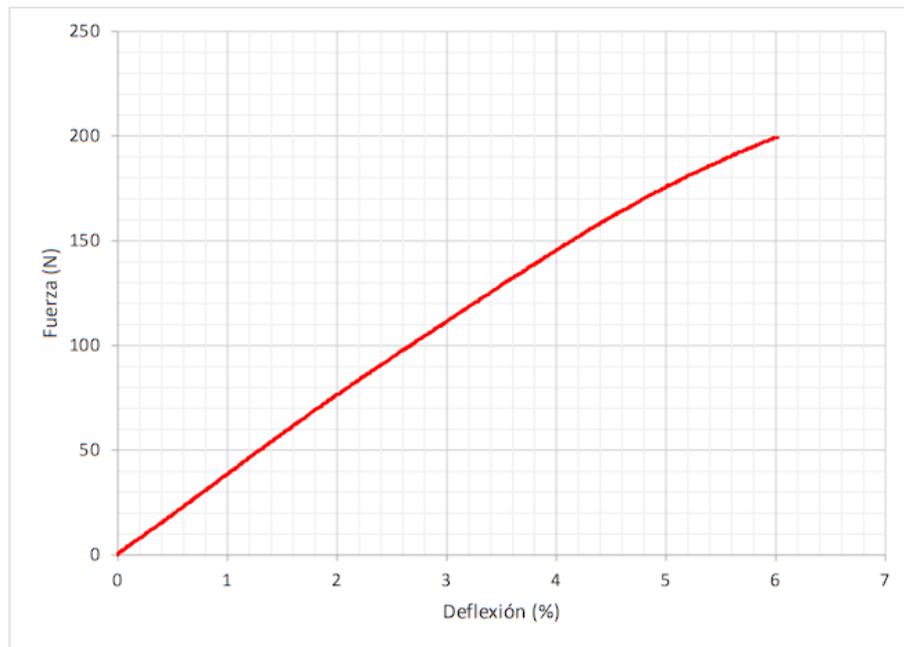


Figura C5. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-05 (23-27-0015)

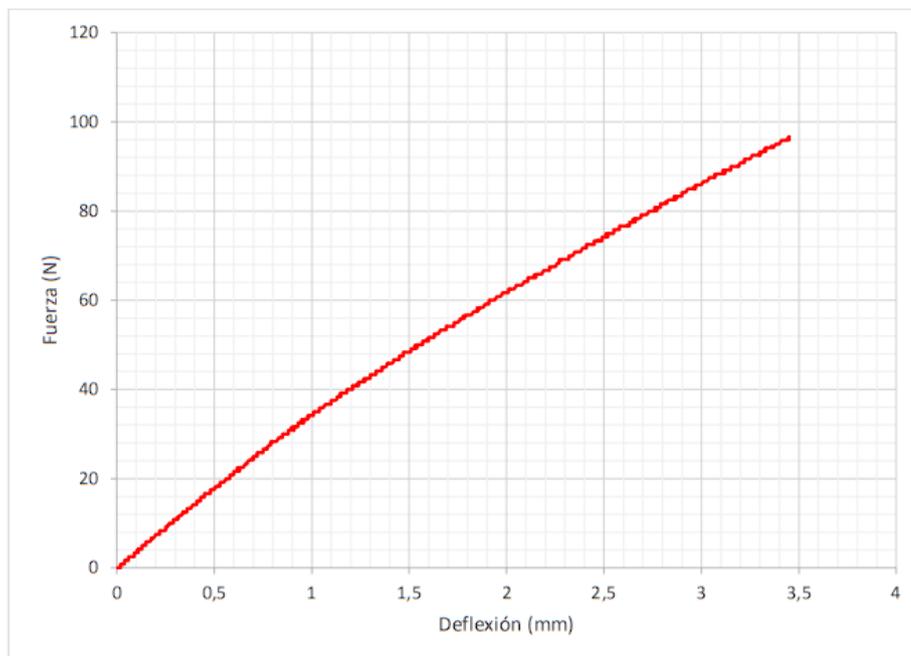


Figura C6. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-01-COMP (23-27-0016)



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

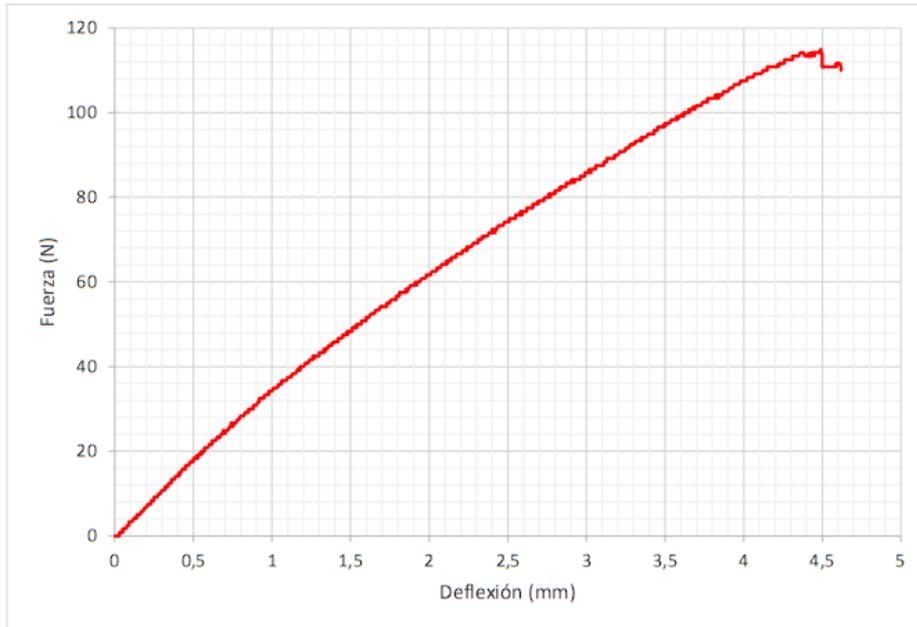


Figura C7. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-02-COMP (23-27-0017)

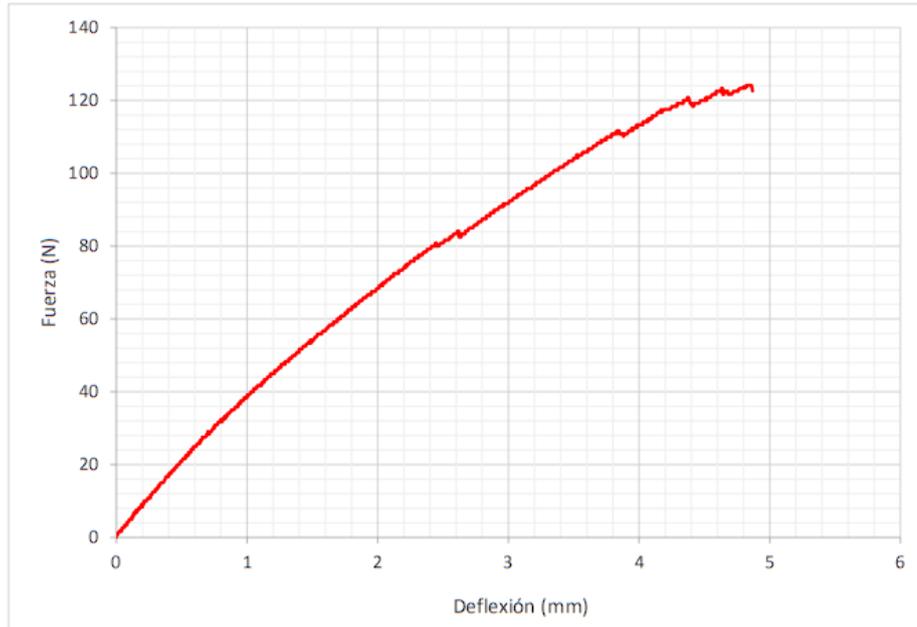


Figura C8. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-03-COMP (23-27-0018)



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

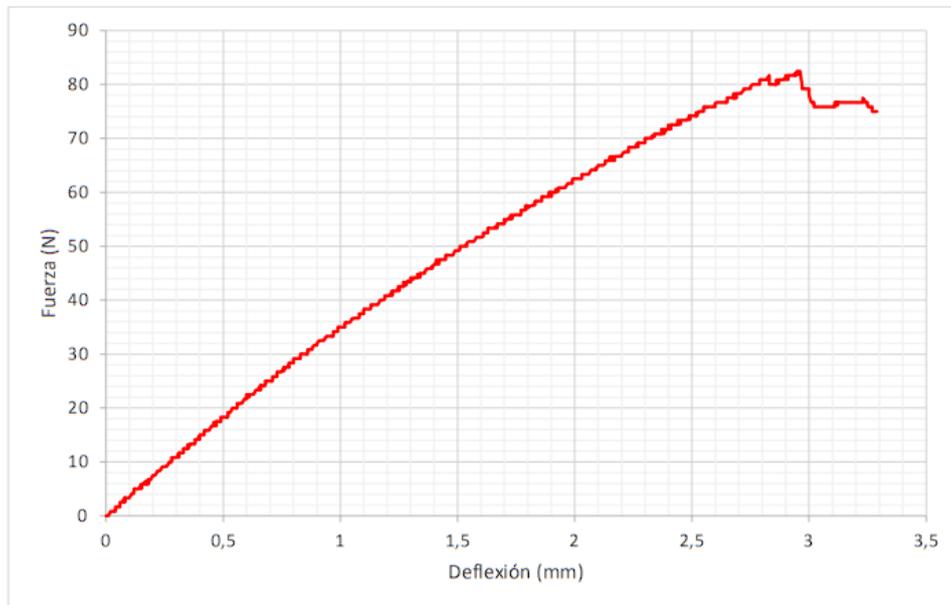


Figura C9. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-04-COMP (23-27-0019)

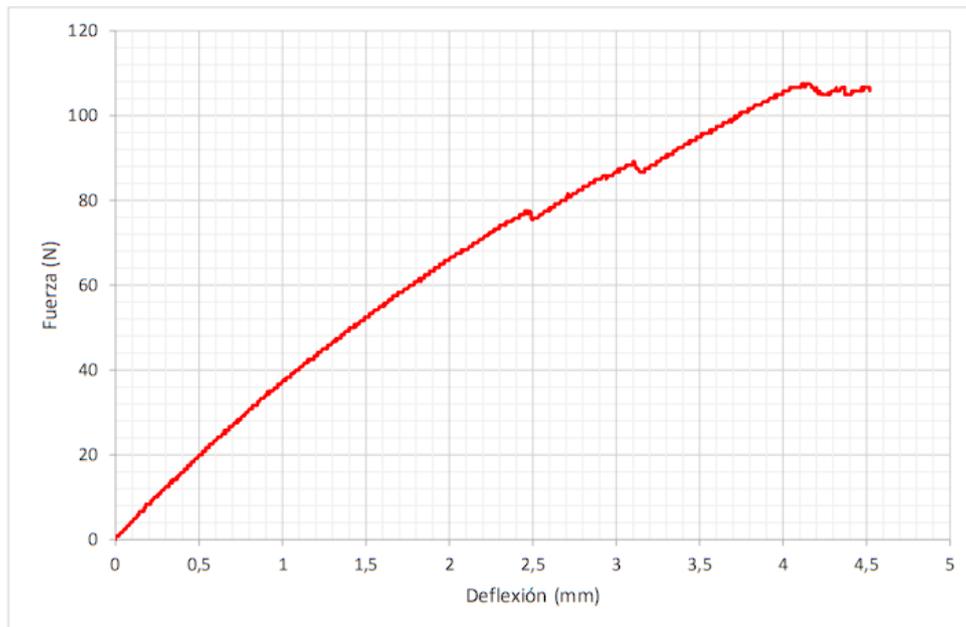


Figura C10. Curva Fuerza vs Deflexión para la probeta PL-FLEX-05-COMP (23-27-0020)

5.8 ANEXO VIII. Resultados de ensayo de impacto

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

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

Información General

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

1. ANTECEDENTES.

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

2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Probetas de material compuesto.

3. ENSAYO DE IMPACTO

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

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

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec
Quito-Ecuador

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
	INFORME DE RESULTADOS	Página: Pág. 2 de 3	
	Nº OTI0208-23-B	RT-LMDF-0701	

Altura dardo [mm]	Muestra	Falla/No falla
45	EIC1	0
	EIC2	0
55	EIC3	0
	EIC4	0
65	EIC5	0
75	EIC6	0
	EIC7	1
	EIC8	1
85	EIC9	1
	EIC10	0
	EIC11	1
95	EIC12	1
	EIC13	1
	EIC14	1
105	EIC15	1
	EIC16	1
	EIC17	1
	EIC18	1
115	EIC19	1
	EIC20	1
	EIC21	1
	EIC22	1
125	EIC23	1
	EIC24	1
	EIC25	1
135	EIC26	1
	EIC27	1
	EIC28	1

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión:	000	
		Fecha:	22/09/2019	
		Página:	Pág. 3 de 3	
	INFORME DE RESULTADOS		RT-LMDF-0701	
Nº OTI0208-23-B				

145	EIC29	1
	EIC30	1

Falla=1

No falla=0

DECLARATORIA:

- *Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.*
- *Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.*
- *Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.*

Atentamente:

Informe

Elaborado por:

Revisado y Aprobado por:

Ing. Patricia Proaño
**Especialista del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.**

Ing. Carlos Díaz
**Jefe del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.**

5.9 ANEXO IX. Resultados de ensayo de microscopía

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 22/09/2019 Página: Pág. 1 de 2	
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0262-2023-A	RT-LMDF-0701	

INFORME DE RESULTADOS N° OTI0262-2023-A

Información General

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

1. ANTECEDENTES.

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

2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Muestras de polímero reforzado.

3. RESULTADO DE MACROGRAFÍA

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

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
	Página: Pág. 2 de 2		
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0262-2023-A		

Muestra 23-053-EI21; aumento de 8X.



Muestra 23-053 IF aumento de 10x



Muestra 23-053-3T aumento de 10x



DECLARATORIA:

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

Atentamente:

Informe

Elaborado por:

Revisado y Aprobado por:

Ing. Patricia Proaño
**Especialista del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.**

Ing. Carlos Díaz
**Jefe del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N° 14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec Quito-Ecuador