



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA TEJIDA DE BANANO.

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

FARINANGO MORALES JULIO CESAR

julio.farinango@epn.edu.ec

MOYA SEGOVIA ESTEBAN DANIEL

esteban.moya@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. SOTOMAYOR GRIJALVA MARÍA VERÓNICA, M.Sc.

veronica.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JULIO FARINANGO Y ESTEBAN MOYA**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Diaz C, M Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Verónica Sotomayor, M Sc.

CO-DIRECTORA DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **JULIO FARINANGO Y ESTEBAN MOYA**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Julio Cesar Farinango Morales

Esteban Daniel Moya Segovia

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios por regalarme la salud y la vida. Por su inmenso amor que nos ofrece día tras días, por todo eso y muchas cosas más. MUCHAS GRACIAS.

A toda mi familia que ha estado pendiente de los buenos y malos momentos en todo el transcurso de mi carrera con sus consejos, regaños, enojos, nunca me abandono. Gracias por el apoyo incondicional.

No fue nada fácil, pero lo he logrado.

“Los pequeños detalles son los que marcan la diferencia“

Julio Cesar

Este trabajo de titulación está dedicado enteramente a mi familia que siempre ha sido mi apoyo. Ellos estarán siempre en las buenas y en las malas.

Esteban Daniel

AGRADECIMIENTO

A mis directores de tesis Ing. Carlos Díaz M.Sc. e Ing. Verónica Sotomayor M.Sc, por permitirme realizar este trabajo de titulación, bajo su tutela. Aportando con su conocimiento, experiencia y profesionalismo.

A la querida Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por acogerme en todo el transcurso de mi carrera. Gracias por haberme permitido formar parte de esa prestigiosa facultad.

“La mejor facultad del mundo”

Julio Cesar

Principalmente a mis directores de tesis, Ing. Carlos Díaz, e Ing. Verónica Sotomayor, a mi compañero de tesis, Julio Farinango y a mis padres; ya que, gracias a ellos se logró sacar adelante y culminar este trabajo de manera exitosa. También a todos los amigos y compañeros, que de una u otra manera ayudaron y sirvieron de apoyo para la consecución de este trabajo. Además, agradezco a toda mi familia que con sus críticas lograron que uno se motive más para alcanzar el objetivo.

Esteban Daniel

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Fibras naturales	3
1.1.1. Fibras de origen vegetal	3
1.1.2. Estructura de las fibras vegetales	4
1.1.3. Fibras vegetales en el Ecuador	5
1.2. Fibras de banano	6
1.2.1. Características y propiedades de la fibra de banano	6
1.2.2. Proceso de obtención de la fibra de banano	7
1.2.3. Raquis	8
1.3. Poliéster	8
1.3.1. Resinas de poliéster insaturadas	9
1.3.1.1. Obtención del poliéster insaturado	9

1.3.1.2. Propiedades del poliéster insaturado.....	9
1.3.1.3. Tipos de resina poliéster.....	9
1.4. Estructura tejida para el reforzamiento de materiales compuestos	10
1.4.1. Tipos básicos de tejido.....	11
1.5. Variables para la obtención del material compuesto	13
1.5.1. Variables del procesamiento mediante compresión	13
1.5.1.1. Ventajas y desventajas del procesamiento de compresión.....	15
1.5.2. Variables del proceso de curado de la resina poliéster	15
1.5.2.1. Proceso de curado de la resina.....	15
1.5.2.2. Fases del proceso de curado.....	16
1.6. Compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales	17
1.6.1. Mecanismo de adhesión de la interfaz fibra-matriz	19
1.6.2. Mercerización.....	21
2. METODOLOGÍA	23
2.1. Materiales y equipos utilizados	23
2.1.1. Materiales	23
2.1.1.1. Resina poliéster.....	23
2.1.1.2. Fibra de banano.....	24
2.1.1.3. Soda cáustica.....	25
2.1.1.4. Molde.....	25
2.1.2. Equipos.....	26
2.2. Mercerización de las fibras de banano.....	27
2.3. Ensayos preliminares.....	29
2.3.1. Matriz de resina poliéster	29
2.3.2. Compuestos reforzados con fibra no tratada.....	31
2.3.3. Compuestos reforzados con fibra tratada.....	33
2.3.4. Refuerzo de fibra tejida de banano	35

2.4. Procedimiento experimental.....	36
2.4.1 Estrategia metodológica empleada	36
2.4.2. Elaboración del tejido tipo sarga	37
2.4.3. Elaboración de las probetas.....	39
2.4.4. Compuestos reforzados con tejido tipo sarga	42
2.4.4.1. Probetas para ensayo de tracción.....	43
2.4.4.2. Probetas para ensayo de flexión.....	44
2.4.4.3. Probetas para ensayo de impacto.....	46
2.4.5. Ensayos de caracterización mecánica.....	47
2.4.5.1. Ensayo de tracción.....	47
2.4.5.2. Ensayo de flexión.....	48
2.4.5.3. Ensayo de impacto.....	48
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
3.1. Resultados.....	48
3.1.1. Ensayos preliminares.....	48
3.1.1.1. Caracterización mecánica del refuerzo de tejido tipo sarga.....	49
3.1.1.2. Determinación del mejor tipo de fibra.....	50
3.1.1.2.1. Ensayo de tracción	49
3.1.1.2.2. Ensayo de flexión	50
3.1.1.2.3. Módulo de elasticidad.....	51
3.1.2. Compuestos reforzados con fibra tejida	52
3.1.2.1. Ensayo de tracción.....	53
3.1.2.2. Ensayo de flexión.....	54
3.1.2.3. Módulo de elasticidad.....	55
3.1.3. Ensayo de impacto	55
3.2. Discusión	55
3.2.1. Caracterización mecánica del tejido de banano	55

3.2.2. Comparación de los compuestos reforzados con fibra	57
3.2.3. Comparación de los compuestos reforzados con tejido	58
3.2.4. Ensayo de impacto de los compuestos elaborados.....	60
3.2.5. Morfología de los compuestos elaborados	61
3.2.6. Morfología de los compuestos reforzados con tejido.....	64
3.3. Comparación del material compuesto desarrollado frente a otros materiales.....	66
3.3.1. Compuestos de matriz poliéster con diferentes refuerzos naturales.....	66
3.3.2. Compuestos de diferente matriz reforzados con fibra de banano.....	69
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
4.1. Conclusiones	72
4.2. Recomendaciones	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de las fibras vegetales.	4
Figura 1.2. Fibra obtenida de la planta de banano.	7
Figura 1.3. Partes principales de una planta de banano.	8
Figura 1.4. Obtención del poliéster insaturado.	9
Figura 1.5. Esquema de un tejido y sus componentes.	11
Figura 1.6. Configuración del tejido plano.	12
Figura 1.7. Configuración del tejido sarga.	12
Figura 1.8. Configuración del tejido satén.	12
Figura 1.9. Moldeo por compresión.	13
Figura 1.10. Fases del proceso de curado de una resina poliéster.	17
Figura 1.11. Componentes de los materiales compuestos.	19
Figura 1.12. Mecanismo de adhesión adsorción y humectación. a) Buena adherencia. b) Falta de mojabilidad puede hacer que un polímero líquido no penetre en toda la superficie de la fibra, creando huecos interfaciales.	20
Figura 1.13. Métodos de modificación de superficie.	21
Figura 1.14. Fibras vegetales mercerizada.	22
Figura 2.1. Resina poliéster SINTAPOL 437.	24
Figura 2.2. Fibra de banano.	24
Figura 2.3. Soda cáustica empleada para la mercerización de la fibra.	25
Figura 2.4. Molde para elaboración de las probetas de tracción, flexión e impacto.	25
Figura 2.5. Fibras de banano después de la mercerización.	29
Figura 2.6. Proceso de curado de la resina poliéster.	30
Figura 2.7. Probetas de resina poliéster para ensayo de: a) tracción, b) flexión.	31
Figura 2.8. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra no tratada: a) continua longitudinal, b) corta aleatoria.	32

Figura 2.9. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra no tratada: a) continua longitudinal, b) corta aleatoria.....	33
Figura 2.10. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra tratada: a) continua longitudinal y b) corta aleatoria.....	34
Figura 2.11. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra tratada: a) continua longitudinal y b) corta aleatoria.....	35
Figura 2.12. Probetas del tejido para el ensayo de tracción.....	36
Figura 2.13. Estrategia metodológica usada en el proyecto.....	37
Figura 2.14. Proceso para la obtención del tejido de fibra de banano.....	38
Figura 2.15. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra tejida: a) orientada 0°, b) orientada 30° y c) orientada 45°.....	43
Figura 2.16. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra tejida: a) orientada 0°, b) orientada 30° y c) orientada 45°.....	45
Figura 2.17. Probetas del material compuesto para ensayo de impacto con fibra: a) corta tratada, b) longitudinal tratada, c) corta no tratada, d) longitudinal no tratada e) tejida orientada a 0°, f) resina.....	45
Figura 2.18. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de tracción según la norma ASTM D-638 [14].....	46
Figura 2.19. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de flexión según la norma ASTM D-7264/D-7264M [15].....	47
Figura 2.20. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de impacto según la norma ASTM D-5420 [04].....	47
Figura 3.1. Diagrama carga - deformación a tensión del tejido de fibra de banano.....	49
Figura 3.2. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra corta y continua longitudinal.....	50
Figura 3.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra corta y continua longitudinal.....	51
Figura 3.4. Módulo de elasticidad a tracción y flexión de las configuraciones con fibra corta y continua longitudinal.....	51

Figura 3.5. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con tejido.	53
Figura 3.6. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con tejido.	54
Figura 3.7. Módulo de elasticidad a flexión y tracción de las configuraciones con tejido. .	54
Figura 3.8. Tejido de fibra de banano para ensayo de tracción mediante norma D5035-11.	56
Figura 3.9. Carga de rotura para tejidos con fibra natural	57
Figura 3.10. Esfuerzo máximo, módulo de elasticidad de las configuraciones con fibra corta y continua.	58
Figura 3.11. Esfuerzo máximo, módulo de elasticidad de las configuraciones con tejido.	59
Figura 3.12. Diagrama área vs energía potencial de los diferentes compuestos elaborados.	60
Figura 3.13. Diagrama resistencia - altura de los diferentes compuestos elaborados.	61
Figura 3.14. Microscopía del compuesto reforzado con fibra no tratada.	62
Figura 3.15. Microscopía del compuesto reforzado con fibra no tratada.	62
Figura 3.16. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tratada.	63
Figura 3.17. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tratada.	64
Figura 3.18. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tejida.	65
Figura 3.19. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tejida.	65
Figura 3.20. Resistencia combinada de tracción y flexión de materiales compuestos matriz poliéster reforzado con distintas fibras naturales.	69
Figura 3.21. Resistencia combinada de tracción y flexión de materiales compuestos diferentes matrices poliéster reforzado con fibra de banano.	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de fibras naturales según la parte de obtención en la planta.	4
Tabla 1.2. Composición química de algunas fibras vegetales.	5
Tabla 1.3. Propiedades mecánicas de la fibra de banano.	7
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de resinas poliéster puras.	10
Tabla 1.5. Comparación de propiedades de diferentes tipos de tejido utilizados como refuerzo.	12
Tabla 1.6. Etapas para la elaboración de un material compuesto.	14
Tabla 1.7. Ventajas y desventajas del moldeo por compresión.	15
Tabla 1.8. Tipos de matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos.	18
Tabla 1.9. Tipos de matrices termoestables según la temperatura de utilización.	19
Tabla 2.1. Propiedades de la resina SINTAPOL 437.	23
Tabla 2.2. Equipos utilizados.	26
Tabla 2.3. Procedimiento de mercerización de las fibras.	28
Tabla 2.4. Fórmula utilizada para el curado de la resina SINTAPOL 437.	30
Tabla 2.5. Designación y significado de las probetas con fibra no tratada para ensayo de tracción y flexión.	32
Tabla 2.6. Designación y significado de las probetas con fibra tratada para ensayo de tracción y flexión.	34
Tabla 2.7. Proceso de elaboración de las probetas.	39
Tabla 2.8. Cantidad y tipo de probetas elaboradas.	41
Tabla 2.9. Designación y significado de las probetas con tejido sarga para ensayo de tracción.	42
Tabla 2.10. Designación y significado de las probetas con tejido sarga para ensayo de flexión.	44
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas a tensión del tejido de fibra de banano tipo sarga.	48

Tabla 3.2. Características mecánicas e incrementos del material compuesto con fibra tratada y no tratada obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de Tracción.....	49
Tabla 3.3. Características mecánicas e incrementos del material compuesto con fibra tratada y no tratada obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de Flexión.....	50
Tabla 3.4. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de los compuestos reforzados con tejido respecto a la matriz de resina poliéster.	52
Tabla 3.5. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de los compuestos reforzados con tejido respecto a la matriz de resina poliéster.	53
Tabla 3.6. Características mecánicas del material compuesto con fibra tratada continua, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de impacto.....	55
Tabla 3.7. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster con diferentes refuerzos naturales.	66
Tabla 3.8. Propiedades mecánicas de compuestos de diferente matriz reforzados con fibra de banano.....	70

RESUMEN

En este proyecto de titulación se desarrollaron y caracterizaron materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra del raquis de banano, inicialmente se utilizó fibras tratadas químicamente mediante mercerización y fibras sin tratar, con las configuraciones corta y continua longitudinal al 10% en peso (wt) de fibra para la elaboración de las probetas de los ensayos preliminares. Determinando la fibra más adecuada para elaborar el material compuesto reforzado con tejido tipo sarga orientado a 0°, 30° y 45° al 20% wt.

Todas las probetas fueron obtenidas mediante moldeo por compresión y sus propiedades mecánicas se evaluaron mediante ensayos mecánicos normalizados de tracción, flexión e impacto en base a las respectivas normas ASTM D-638[14], ASTM D-7264, ASTM D-5420 [04].

Dentro de los resultados más importantes se obtuvo un aumento del 29.08% en resistencia a la tracción del material compuesto reforzado con fibra tratada continua longitudinal. Sin embargo, está disminuye su resistencia a la flexión en 30.41% en relación de la matriz de poliéster.

Mientras para el compuesto reforzado con fibra tejida orientada a 45° se obtuvo los mejores resultados en relación a las orientaciones 0°, 30°. Sin embargo en comparación a la matriz de resina esta presentó un decremento del 35.46% ,31.64% en las resistencias de tracción y flexión respectivamente. Por lo cual no es factible trabajar con este tipo de refuerzo tejido, al menos con las variables usadas en este trabajo.

Finalmente se realizó una comparación de los compuestos elaborados en este proyecto con otros compuestos estudiados en investigaciones previas.

Palabras clave: Ensayos mecánicos Fibra de banano, Poliéster, Moldeo por compresión, Materiales compuestos, Tratamiento químico.

ABSTRACT

In this degree work, fiber reinforced polyester matrix composite materials were developed and characterized, and the fibers were chemically treated using mercerization and untreated fibers, with the 10% weight (wt) longitudinal and continuous longitudinal configurations by weight of fiber for the preparation of the specimens of the preliminary tests. Determining the most suitable fiber to make the composite material reinforced with twill type fabric oriented at 0°, 30° and 45° at 20% wt.

All specimens were obtained by compression molding and their mechanical properties were evaluated by standard mechanical tests of tensile, flexion and impact based on the respective standards ASTM D-638 [14], ASTM D-7264, ASTM D-5420 [04].

Among the most important results, a 29.08% increase in tensile strength of the composite material reinforced with longitudinal continuous treated fiber was obtained. However, its flexural strength is reduced by 30.41% in relation to the polyester matrix.

While for the 45° oriented fiber reinforced fiber composite, it obtained the best results in relation to the 0°, 30° orientations. However, in comparison to the resin matrix it shows a decrease of 35.46%, 31.64% in the resistance of traction and flexion respectively. What is concluded that it is not feasible to work with this type of fabric reinforcement, at least with the variables used in this degree work.

Finally, a comparison of the composite materials elaborated in this project with other composite materials studied in previous researches was made.

Keyword: Mechanical testing, Banana fiber, Polyester resin, Compression molding, Composite materials, Chemical treatment

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA TEJIDA DE BANANO.

INTRODUCCIÓN

Las plataneras o bananeras son plantas herbáceas pertenecientes al género Musa, habitan generalmente las regiones tropicales y subtropicales, razón por la cual son plantas representativas del Ecuador. Anualmente se cultivan gran cantidad de estas plantas, principalmente por su fruto para consumo y exportación, además en menor medida para obtener su fibra, la cual se utiliza principalmente como fibra textil en artesanías. Cuando se cultiva el fruto, se corta la planta por el pie, dejando los vástagos que son los que darán más frutos en un futuro, estos residuos orgánicos obtenidos se dejan generalmente botados a la intemperie, los mismos que no son tratados adecuadamente, provocando la contaminación de suelos y el agua, además de la aparición de enfermedades.

La fibra de banano presenta características y propiedades que la convierten en una opción atractiva e interesante para ser utilizada como refuerzo en materiales compuestos. Estas fibras son livianas y flexibles, presentan una baja densidad lo que se traduce en una elevada resistencia específica, bajo coste, tienen una buena resistencia mecánica, es un recurso renovable, al final de su vida útil son 100% biodegradables a diferencia de las fibras sintéticas que tardan cientos de años en descomponerse. Para su obtención se requiere de una menor cantidad de energía que la requerida en la fabricación de fibras sintéticas y artificiales. Además, cabe destacar que su cultivo, procesamiento y producción generan puestos de empleo.

En el país existe, además, poca producción de fibras naturales, tomando en cuenta el gran potencial que ofrece para la producción de estas fibras. En la mayoría de los casos, estas fibras se emplean en la fabricación de productos de poco valor agregado, principalmente en artesanías.

El desarrollo de materiales compuestos en el Ecuador se encuentra todavía en las etapas iniciales, por lo que existen limitadas investigaciones destinadas al aprovechamiento de las fibras naturales para la creación de nuevos materiales.

En los últimos años, las fibras naturales han recobrado importancia a nivel mundial, ya que habían perdido espacio con el descubrimiento de las fibras sintéticas. Esto ha permitido la aparición de nuevos materiales compuestos como alternativas a los materiales compuestos clásicos.

Buscando disminuir el impacto ambiental generado por estos residuos y debido a las buenas características y propiedades que ofrecen, el presente trabajo se enfoca en el aprovechamiento de la fibra de banano como refuerzo para el desarrollo de materiales compuestos de matriz poliéster.

Objetivo general

Caracterizar un material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra tejida de banano.

Objetivos específicos

- Definir las variables físicas que intervienen en la composición matriz-fibra para la obtención del material compuesto.
- Obtener el material compuesto con matriz de poliéster y refuerzo de fibra tejida de banano.
- Realizar ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto.
- Caracterizar los materiales obtenidos para determinar sus características y propiedades mecánicas.
- Comparar las propiedades del material compuesto obtenido en relación a otros materiales compuestos de matriz poliéster y refuerzo de fibras vegetales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fibras naturales

Las fibras naturales son aquellas fibras que provienen de la naturaleza siendo su longitud y diámetro aptos para su transformación en hilo, estas fibras pueden ser de origen vegetal, animal o mineral.

Ejemplos de fibras naturales según su origen:

De origen vegetal: yute, algodón, cáñamo, lino, esparto, ramio.

De origen animal: seda, lana, pelaje de diferentes animales.

De origen mineral: cerámicas, metales, vidrio, carbono o grafito. (CALVOSEALING)

Las fibras de origen natural tienen características y propiedades ideales para su uso en materiales compuestos, estas presentan una baja densidad lo que se traduce en una elevada resistencia específica, son livianas, de bajo coste, tienen una buena resistencia mecánica, son un recurso renovable, al final de su vida útil son 100% biodegradables a diferencia de las fibras sintéticas que tardan alrededor de 500 años en descomponerse. Para su obtención se requiere de una menor cantidad de energía que la requerida en la fabricación de fibras sintéticas y artificiales. Además, cabe destacar que su cultivo, procesamiento y producción generan gran cantidad de puestos de empleo.

Todo esto hace que las fibras naturales sean una opción atractiva, interesante y sostenible para su uso como refuerzo en materiales compuestos.

1.1.1. Fibras de origen vegetal

“Las fibras vegetales son filamentos lignocelulósicos compuestos de células largas y delgadas de esclerénquima, que se encuentran formando parte de las plantas y que cumplen funciones específicas dentro de ellas, como las de dar soporte, dureza y rigidez a los tejidos vegetales. Según la parte de la planta en la que se localizan, las fibras poseen distintas características y propiedades, lo cual las clasifica básicamente en tres grupos: las fibras blandas, duras y de superficie.” (Mancía, 2006).

Estas fibras de origen vegetal son las fibras naturales más utilizadas en la actualidad como refuerzo en materiales compuestos, algunos ejemplos de estas son las fibras provenientes del yute, cáñamo, sisal, banano, algodón, lino, abacá, coco, bambú, entre otras.

En la Tabla 1.1 se muestran algunos ejemplos de fibras vegetales según su ubicación dentro de la planta.

Tabla 1.1. Tipos de fibras naturales según la parte de obtención en la planta.

F. Blandas	F. Duras	F. Superficie	Otras	
Tallo	Hojas	Semillas	Caña	Frutos
Cáñamo	Abacá	Algodón	Esparto	Palma aceitera
Ramio	Sisal	Kapok	Bejuco	Coco
Lino	Cuarua	Algodoncillo	Bambú	
Kenaf	Formio	Yute	Bagazo	

(Fuente: (A. Mohanty, 2009))

Las principales desventajas que presentan las fibras vegetales son: baja resistencia a los microorganismos, baja estabilidad térmica, alta absorción de humedad, tienen propiedades mecánicas inferiores a las fibras no naturales. (Fibrenamics, s.f.)

1.1.2. Estructura de las fibras vegetales

Las fibras vegetales se encuentran fundamentalmente constituidas por celulosa, hemicelulosa y lignina, razón por la cual se las llama fibras lignocelulósicas. Otros elementos minoritarios que constituyen la estructura de estas fibras son proteínas, resinas, ceras y componentes inorgánicos. En la Figura 1.1 se puede observar la estructura típica de una fibra natural.

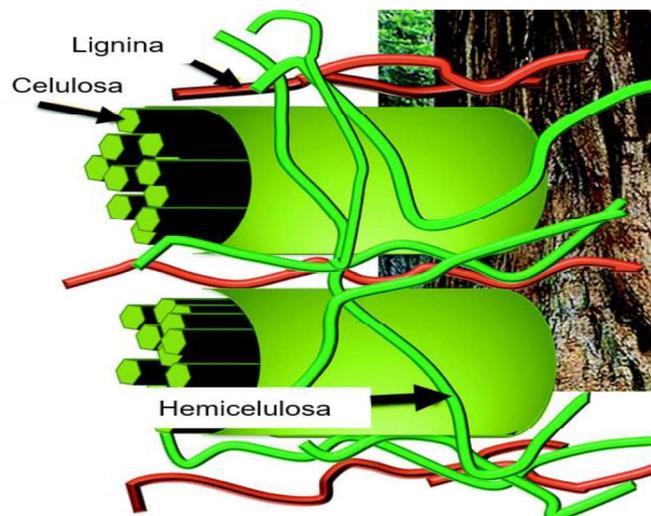


Figura 1.1. Estructura de las fibras vegetales.
(Fuente: (Lu & Sun, 2012))

Algunos factores que influyen en la composición química de las fibras son el tipo o especie de planta, las condiciones climáticas y la edad. Sin embargo, se conoce que la relación

entre la celulosa, hemicelulosa y lignina es generalmente de 4:3:3. El porcentaje en peso de estos componentes en las fibras vegetales permite tener una idea del comportamiento que estas van a tener al ser sometidas a distintas aplicaciones industriales. En la Tabla 1.2 se muestra el porcentaje en peso de los principales elementos constituyentes de algunas fibras vegetales. (Páez, 2007)

Tabla 1.2. Composición química de algunas fibras vegetales.

Fibra	Celulosa (% peso)	Hemicelulosa (% peso)	Lignina (% peso)
Lino	71.2	18-20	2.2
Cáñamo	70-75	17-22	3.7-5.7
Yute	61-71	13-20	8.1-13
Kenaf	45-57	21	8-13
Ramio	68-76	13-16	0.6-0.7
Abacá	63-70	20-21	5-6
Sisal	67-78	10-14	8-14
Algodón	82-93	3-6	-
Bambú	35-61	15	27-32
Coco	32-43	0.15-0.25	40-45
Banana	63-64	10	5

(Fuente: (Páez, 2007))

1.1.3. Fibras vegetales en el Ecuador

La extracción de fibras vegetales ha sido escasa en el país, tomando en cuenta el gran potencial que ofrece el Ecuador para la producción de estas fibras, esta escasa extracción puede cambiar debido a la necesidad de desarrollar aplicaciones de mayor valor agregado para las mismas, en la mayoría de casos las fibras que se obtienen se emplean en productos de escaso valor agregado, mientras que en otros casos, se aprovechan tan sólo el recurso alimenticio de las plantas desechando la parte fibrosa.

Las fibras naturales a nivel interno en el Ecuador tienen una mayor demanda en el sector artesanal lo que constituye un sustento de vida para muchos sectores. En Imbabura se tiene tejedores de esteras de totora y productores de papel de cabuya, en Manabí fabricantes de sombreros de paja toquilla, tejedores de cestos de palmas en Esmeraldas, entre otros. (Explored, 2000)

En lo que se refiere a la producción de otras fibras naturales, el Ecuador es el segundo productor mundial de abacá después de Filipinas, con una producción aproximada de

10.000 toneladas al año, el abacá se cultiva principalmente en Quinindé, Quevedo, Santo Domingo de los Tsáchilas y La Maná. La producción de cabuya generó en el año 2008 aproximadamente 2,7 millones de dólares, en este año se produjo 5400 toneladas según el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.

En lo referente al coco, este se cultiva en Esmeraldas, El Oro, Guayas, Manabí, Napo, Orellana y Galápagos, aunque no existen datos actuales, se conoce que en el año 2006 la producción anual de coco aproximada fue de 51.000 TM. (MAGAP, 2006)

El principal producto de exportación en el Ecuador es el banano, existen alrededor de 5000 productores de banano, el 80% corresponden a productores con plantaciones menores de 30 hectáreas y tan solo el 3% a productores con plantaciones mayores de 100 hectáreas.

El banano se produce en 20 provincias del país, la Costa abarca el 89% de esta producción, la Sierra el 10% y el Oriente un 1%. Se cultiva en gran cantidad, principalmente por su fruto para consumo y exportación, en menor medida para obtener su fibra, la cual se utiliza principalmente como fibra textil en artesanías. Todos estos datos muestran que el Ecuador dispone de una gran cantidad de materia prima de fibras naturales que pueden ser destinadas para el desarrollo de materiales compuestos. (Torres & Vera, 2015)

1.2. Fibras de banano

El banano, plátano o guineo es un fruto comestible que se da en una variedad de plantas herbáceas pertenecientes al género Musa, estas plantas de gran tamaño son conocidas con el nombre de plataneras o bananeras. El hábitat de las especies Musa son generalmente las regiones tropicales y subtropicales, razón por la cual son plantas representativas del Ecuador.

1.2.1. Características y propiedades de la fibra de banano

La fibra de banano es ligera y flexible, aunque no elástica, su color es generalmente amarillo claro, aunque su tonalidad depende de su exposición a la luz solar. Las fibras de banano pueden llegar a alcanzar los 3m de largo y su extracción se realiza generalmente a mano. Estas fibras son livianas, de bajo coste, presentan una buena resistencia mecánica, son un recurso renovable y 100% biodegradables al final de su vida útil. En la Tabla 1.3 se enlistan algunas propiedades mecánicas de la fibra de banano.

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas de la fibra de banano.

Resistencia a la tracción (MPa)	529-914
Resistencia específica a la tracción (MPa)	392-677
Módulo de Young (GPa)	27-32
Módulo específico de Young (GPa)	20-24
Deformación hasta la falla (%)	1-3
Densidad (kg/m ³)	950-750

(Fuente:_(Bhatnagar, Gupta, & Yadav, 2015))

1.2.2. Proceso de obtención de la fibra de banano

La fibra de banano puede extraerse de diferentes partes de la planta como son el pseudotallo, pedúnculo floral o raquis.

Para la extracción de las fibras del pseudotallo primero se corta el tallo y se retiran las diferentes capas del tallo de la planta, las cuales permitirán obtener distintos tipos de fibra. La primera capa externa proporciona fibras suaves, de la segunda capa se obtienen fibras de fácil manipulación, la tercera capa proporciona un tejido de fibras tipo "malla", la cuarta capa se obtienen fibras duras y finalmente de la última capa del tallo se obtiene las fibras más finas. En lo que se refiere a la extracción de las fibras del raquis, primero se debe cortar el racimo y quitar todos los frutos, quedando un tallo no muy grueso del cual se extraen a mano las fibras. Las fibras obtenidas se indican en la Figura 1.2.

Finalmente se deben secar las fibras obtenidas por aproximadamente 72 horas a temperatura ambiente, esto debido a que la planta presenta un alto porcentaje de contenido en agua. Las fibras secas deben ser protegidas cubriéndose con cera de vela o mediante engomado utilizando agua y goma. (Muscio, 2018)



Figura 1.2. Fibra obtenida de la planta de banano.

1.2.3. Raquis

El raquis o pinzote es el tallo que soporta el racimo de banano, se extiende desde el primer fruto hasta las flores masculinas y presenta una forma helicoidal. Constituye aproximadamente un 7% del racimo y posee una masa de alrededor de 2.05 kg. Este es un residuo orgánico que se acumula en grandes cantidades después de la cosecha del fruto.

Generalmente el raquis se desecha a la intemperie pudiendo convertirse en un elemento contaminante del medio ambiente. Un uso importante que se le puede dar al raquis es la extracción de sus fibras las cuales presentan varias características importantes para su utilización en diferentes aplicaciones, estas fibras son renovables y biodegradables, su densidad es cercana a la mitad de la de las fibras de vidrio, son muy resistentes, durante su combustión no se generan gases tóxicos. En la Figura 1.3 se indican las partes principales de la planta de banano.

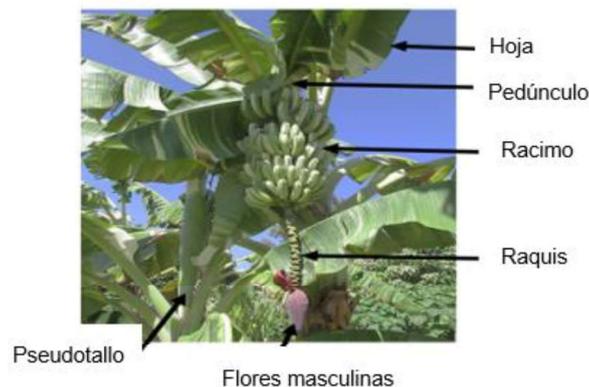


Figura 1.3. Partes principales de una planta de banano.

Algunas aplicaciones que se le puede dar a estas fibras son las siguientes: refuerzos en materiales compuestos para su utilización en la industria automovilística y la aviación, materia prima en la fabricación de artesanías y biotextiles, en la industria papelera, entre otras. (Blanco, 2008)

1.3. Poliéster

El poliéster pertenece a la categoría de los polímeros y contiene en su cadena principal el grupo funcional éster, el cual es un compuesto orgánico derivado del petróleo. (Besednjak, 2005)

1.3.1. Resinas de poliéster insaturadas

Las resinas de poliéster insaturadas son polímeros termoestables muy versátiles de amplia aplicación como matriz o fase continua para la fabricación de materiales compuestos. Estas resinas son las más utilizadas a nivel mundial, comercialmente existe una gran cantidad de diferentes formulaciones de resinas poliéster, esto da la posibilidad de elegir la resina más adecuada según la aplicación que se le quiera dar.

1.3.1.1. Obtención del poliéster insaturado

Las resinas de poliéster insaturadas se producen a partir de reacciones de polimerización por condensación (policondensación) de anhídrido maleico con etilenglicol, produciéndose un poliéster insaturado, este polímero obtenido se mezcla con estireno para disminuir la viscosidad y facilitar la procesabilidad de la resina. Finalmente se añade un último componente, conocido como inhibidor, con el fin de prevenir una posible gelificación y endurecimiento prematuro de la resina. Esta mezcla final forma el sistema de resina poliéster que se suministra al cliente. En la Figura 1.4 se muestra la reacción para la obtención de poliéster insaturado. (Groover, 1997)

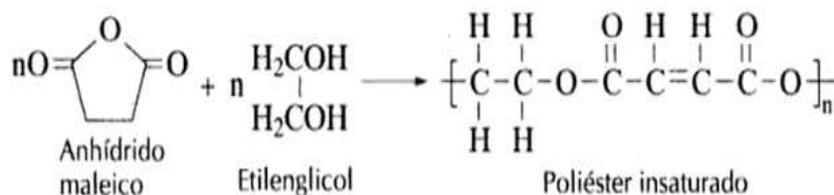


Figura 1.4. Obtención del poliéster insaturado.
(Fuente: (Seymour & Carraher, 2002))

1.3.1.2. Propiedades del poliéster insaturado

Las diferentes configuraciones y composiciones químicas de las resinas poliéster endurecidas o curadas, hacen que no sea posible conocer las propiedades genéricas de estas resinas. Sin embargo, estas resinas generalmente presentan una temperatura baja de transición vítrea, su resistencia y rigidez no son muy elevadas, tienden a contraerse durante su endurecimiento entre el 6% y 10%, su densidad aproximada es de 1.2 kg/dm³ (Besednjak, 2005).

1.3.1.3. Tipos de resina poliéster

Existen diferentes tipos de resinas poliéster según la naturaleza de los monómeros que las constituyen, entre las más utilizadas están:

Ortoftálicas: Son las de uso más frecuente y las de menor coste, tienen la capacidad de absorber hasta un 2.5% de agua durante inmersiones prolongadas.

Isoftálica: Presentan mejores propiedades mecánicas y son más resistentes al agua que las resinas ortoftálicas.

Bisfenolicas: Sus propiedades mecánicas y químicas son mejores que las resinas ortoftálicas e isoftálicas además, son ideales para medios corrosivos, tienen un elevado coste. (Besednjak, 2005). En la Tabla 1.4 se muestran algunas propiedades mecánicas de diferentes tipos de resina.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de resinas poliéster puras.

Tipo de resina poliéster	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de tracción (GPa)	Elongación (%)
Ortoftálica	100	65-75	3,2	2-4
Isoftálica	140	70-80	3,5	3,5

(Fuente: (Miravete, 2012))

En lo que se refiere al almacenamiento de las resinas poliéster, estas deben almacenarse en recipientes cerrados y en ambientes frescos que no excedan los 25°C. Su periodo de vida útil es máximo de seis meses, después de este tiempo, las características de la resina varían sensiblemente, alcanzando un estado de gel. (Miravete, 2012)

1.4. Estructura tejida para el reforzamiento de materiales compuestos

Existen algunas configuraciones en las que las fibras pueden disponerse dentro de una matriz, estas configuraciones pueden ser de fibras cortas, largas, tejida y no tejida. El tipo de configuración que se utilice influye de manera determinante en las características y propiedades finales que el material compuesto obtendrá. Además, se puede tener numerosas modificaciones según el entrelazamiento de las fibras para formar el tejido, elaborando diversos materiales compuestos con características y propiedades mecánicas diferentes. Los tejidos de fibras a diferencia de los arreglos de fibras largas o fibras no tejidas poseen una conformación más estable y mejor estructurada, además, una superficie rugosa, por lo que se consigue una interfaz más adecuada para la conformación del material compuesto.

“El principio básico de los tejidos consiste en entrelazar los filamentos fijos longitudinalmente, conocidos como urdimbre, con los filamentos horizontales, llamados trama, pasando estos últimos por encima y por debajo de los hilos de urdimbre en distintas configuraciones”, como se muestra en la Figura 1.5. (Pickering, 2008)

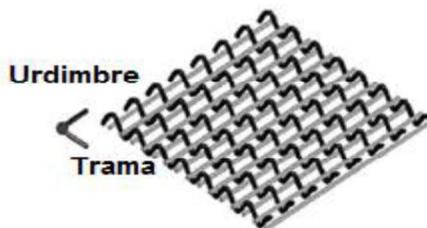


Figura 1.5. Esquema de un tejido y sus componentes.
(Fuente: (Pickering, 2008))

1.4.1. Tipos básicos de tejido

Existen tres tipos básicos de tejido; tipo plano, tipo satén o raso y tipo sarga o diagonal. Cada uno de estos tipos de tejido presentan variaciones, lo que también modifica las propiedades mecánicas del material compuesto

a. Tejido plano

Es el tipo de tejido más simple, consiste en pasar un filamento de fibra de trama sobre la primera fibra de la urdimbre, luego debajo de la segunda, encima de la tercera y así sucesivamente. Presenta un mayor número de entrelazamientos por unidad de área, por lo que la resistencia y rigidez del material compuesto pueden verse reducidas. En la Figura 1.6 se muestra la configuración del tejido plano.

b. Tejido sarga o diagonal

Consiste en pasar un filamento de fibra de trama sobre dos de urdimbre, luego uno debajo, nuevamente dos encima y así sucesivamente. Este tipo de tejido presenta una estructura compacta, además, tiene una buena resistencia al desgaste y a la abrasión. En la Figura 1.7 se muestra la configuración del tejido sarga.

c. Tejido satén o raso

Consiste en pasar un filamento de fibra de trama sobre 5 a 8 de urdimbre, luego uno debajo, nuevamente sobre 5 a 8 de urdimbre y así sucesivamente. A diferencia del tejido sarga, la urdimbre del satén tiene pocos enlaces con la trama, esto provoca que la superficie del satén tenga una apariencia brillante. En la Figura 1.8 se muestra la configuración del tejido satén.

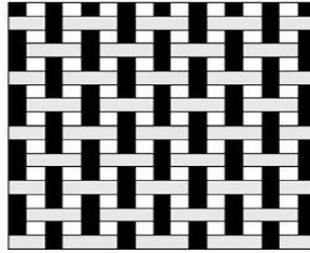


Figura 1.6. Configuración del tejido plano.
(Fuente: (Pickering, 2008))

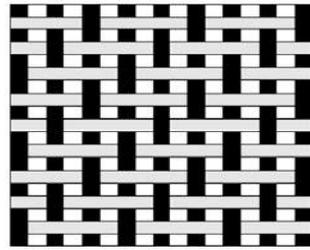


Figura 1.7. Configuración del tejido sarga.
(Fuente: (Pickering, 2008))

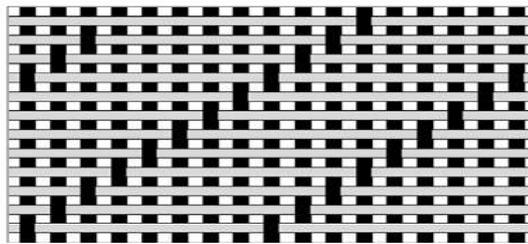


Figura 1.8. Configuración del tejido satén.
(Fuente: (Pickering, 2008))

En la Tabla 1.5 se muestra una comparación de propiedades de los diferentes tipos de tejido cuando se los utiliza como refuerzo en materiales compuestos.

Tabla 1.5. Comparación de propiedades de diferentes tipos de tejido utilizados como refuerzo.

Propiedad	Tejido plano	Tejido sarga	Tejido satén
Estabilidad	4	3	2
Conformado	2	4	5
Porosidad	3	4	5
Acabado	2	3	5
Equilibrio	4	4	2
Simetría	5	3	1
Ondulación baja	2	3	5
Total	22	24	25

(Fuente: (Levy, 2006))

1.5. Variables para la obtención del material compuesto

En esta sección se detalla el proceso a seguir para la obtención de un material compuesto reforzado con fibras, mediante moldeo por compresión, además, se muestran los factores que se deben tomar en cuenta para el curado de la resina poliéster.

1.5.1. Variables del procesamiento mediante compresión

El moldeo por compresión es el método más antiguo que existe para la elaboración de materiales de distintas geometrías. Para este tipo de moldeo se puede utilizar moldes del tipo hembra-macho como se muestra en la Figura 1.9, tienen un diseño sencillo de tal manera que se puede usar una presión adecuada para la parte estructural a conformar. Esta técnica se utiliza para moldear materiales termoestables o termoplásticos. Una cantidad adecuada del material compuesto es colocada dentro del molde la cual va cerrándose, aplicando una apropiada presión, obligando al material a ocupar toda la cavidad del molde para permitir la evacuación de gases que pueden quedar dentro del material compuesto. Proporcionando buenas propiedades mecánicas debido a que la fibra usada como refuerzo conservan su longitud y orientación iniciales en el componente fabricado.

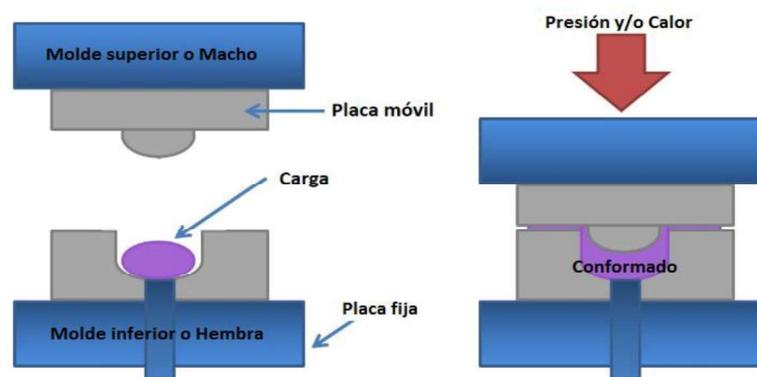


Figura 1.9. Moldeo por compresión.
(Fuente: (Reynoso, 2019))

En el moldeo por compresión se consideran algunos factores importantes para la fabricación del material, como son:

- a) La cantidad adecuada de material a conformar.
- b) El tipo de refuerzo a utilizar.
- c) La utilización de calor en el proceso.

d) La presión necesaria para asegurar la obtención del material.

e) El tiempo de solidificación del material. (Tecnología de plásticos, 2011)

Para la elaboración de un material compuesto es necesario cumplir con ciertos pasos importantes como se puede apreciar en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Etapas para la elaboración de un material compuesto.

N.	Etapa	Acciones	Imagen
1	Impregnación desmoldante	Facilita el desmoldeo después de la solidificación	
2	Estratificación	Orientación y humectación de las fibras vegetales	
3	Consolidación	Aplicación de la presión al molde. Asegurar la homogeneidad del compuesto.	
4	Solidificación	Esperar el tiempo propicio para el endurecimiento de la probeta y su desmoldeo.	

1.5.1.1. Ventajas y desventajas del procesamiento de compresión

El moldeo por compresión ha sido uno de los procesos estándar más utilizados por décadas, esto se debe a que el moldeo es un método muy simple, pero tiene un alto desarrollo en la fabricación de materiales compuestos, donde normalmente se utiliza para elaboración de piezas grandes planas y de formas levemente curvas.

Este proceso ofrece una serie de ventajas y desventajas que se deben tomar en cuenta para la manufactura de alguna pieza o material y están detalladas en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Ventajas y desventajas del moldeo por compresión.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de mantenimiento. Diseño simple del molde. Buen acabado superficial. Baja cantidad de residuo o desechos. Sufre deformaciones muy pequeñas. Facilidad de fluidez en compuestos con fibras de refuerzo.	No aconsejable para moldes de forma compleja. Correcta presión suministrada en el molde. Dificultad en el desmontaje de la pieza. Dificultad de controlar las dimensiones de la pieza.

(Fuente: (Tecnología de plásticos, 2011))

1.5.2. Variables del proceso de curado de la resina poliéster

Como las resinas son sustancias líquidas que por sí solas no presentan una resistencia deseable, mediante una reacción química inducida por agentes externos, estas pasan a un estado sólido, a este proceso se le denomina curado. Dependiendo del tipo de resina, cantidad de instauración, contenido y tipo del agente reticulador, se pueden obtener materiales curados con diferentes propiedades mecánicas térmicas y químicas.

1.5.2.1. Proceso de curado de la resina

Curado es el proceso en el cual la resina cambia de estado líquido a estado sólido. Para que se produzca este cambio de estado de la resina que se encuentra a temperatura ambiente, se le debe añadir unas sustancias llamadas acelerador o activador y un catalizador o iniciador. Generalmente se utiliza estireno como el encargado de formar entrecruzamientos entre las cadenas poliméricas durante el curado, además proporciona una viscosidad adecuada a la resina. Para que se realice el curado, se utiliza como acelerador generalmente octoato de cobalto, el cual se adiciona previo a la incorporación

del catalizador. Como catalizador o iniciador se utiliza peróxido de metil etil cetona (MEKP), el cual reacciona con el acelerador, produciendo radicales libres que provocan el inicio de una reacción de polimerización adicional. (Besednjak, 2005)

Factores que intervienen durante el proceso de curado:

- a) Tipo de resina poliéster utilizada.
- b) Temperatura de trabajo, se recomienda una temperatura ambiente.
- c) Humedad relativa del ambiente.
- d) Tipo y cantidad de acelerador y catalizador a emplear.
- e) Espesor del laminado a conformar.
- f) Aplicación o ausencia de presión.

1.5.2.2. Fases del proceso de curado

El proceso de curado consta de las siguientes fases:

i. Tiempo de gel

Tiempo transcurrido desde que se añade el último reactivo a la resina hasta el momento en que esta muestra un estado de gel conocido como 'punto de gel'. Pasado este tiempo, ya no se puede seguir impregnando los refuerzos en la matriz.

ii. Endurecimiento

Etapa en donde la resina pasa del estado de gel a un estado sólido, aquí se produce un aumento significativo de la temperatura de la mezcla, alcanzando una temperatura máxima conocida como 'punto exotérmico'. Dependiendo del tipo de resina, esta temperatura puede sobrepasar los 150 C.

iii. Gelificación

Sub etapa en donde se da la transición de la resina en estado de gel al estado sólido. Este periodo está entre el punto de gel y el primer cambio brusco de pendiente dentro de la etapa de endurecimiento.

iv. Enfriamiento

Una vez que se alcanza la temperatura máxima dentro de la etapa de endurecimiento, la temperatura de la resina empieza a descender hasta que esta alcanza la temperatura ambiente.

v. Curado final

El curado final se puede realizar a temperatura ambiente, la duración de esta etapa dependerá de las características de la resina utilizada, sin embargo, se conoce que la resina poliéster debe mantenerse entre 24 y 48 horas a temperatura ambiente, con lo cual se logra alcanzar un grado de curado del 90 %; el curado total se logra alcanzar después de aproximadamente 2 semanas. Este curado final se puede acelerar mediante la adición de calor, la intensidad y duración también dependerá de las características de la resina utilizada. (Besednjak, 2005). En la Figura 1.10 se encuentra la curva de todo el proceso de curado.

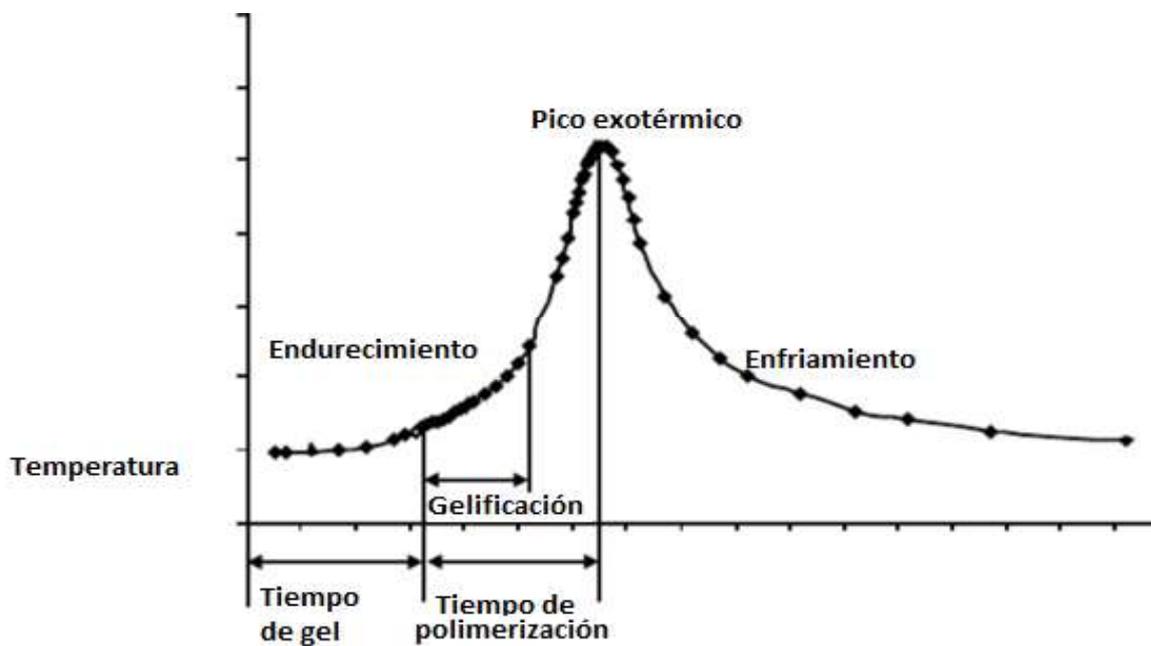


Figura 1.10. Fases del proceso de curado de una resina poliéster.
(Fuente: (Miravete, 2012))

1.6. Compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales

Los materiales compuestos más importantes desde un punto de vista tecnológico son aquellos que están reforzados por fibras. Estos materiales logran una mejor resistencia a la fatiga, rigidez y relación resistencia-peso cuando se incorporan fibras resistentes y rígidas, en una matriz más dúctil y blanda.

Los materiales compuestos pueden estar formados por matrices inorgánicas u orgánicas, las matrices inorgánicas pueden ser metálicas o cerámicas, mientras que las matrices

orgánicas pueden ser termoestables o termoplásticas. A continuación, se muestra la Tabla 1.8 con los diferentes tipos de matrices que se pueden utilizar en materiales compuestos.

Tabla 1.8. Tipos de matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos.

INORGÁNICAS	Cemento, yeso, geo polímeros Matrices cerámicas, matrices metálicas	
ORGÁNICAS	Termoestables	Poliéster, epoxi, polieteramida, viniléster, esteres cianato, poliimidias.
	Termoplásticas	Policloruro de vinilo (PVC) Copolímero de estireno (ABS, SAN) Polietileno (PE) Polipropileno (PP) Policarbonato (PC) Poliestireno (PS) Polimetacrilato de metilo (PMMA) Poliamida, nylon, polieterimida, PET.

(Fuente: (Miravete, 2012))

Las matrices termoestables se fabrican a partir de agentes precursores líquidos o semisólidos, los cuales endurecen de manera irreversible; esta reacción química se conoce como, polimerización, policondensación o curado, el objetivo es convertir la resina líquida en resina sólida. A diferencia de los termoplásticos, esta reacción es irreversible y el polímero no puede ser fundido. Sin embargo, si la temperatura se incrementa lo suficiente, el polímero termoestable se descompone y se degrada. En la Tabla 1.9 se presentan algunas de las resinas según las temperaturas producidas en el curado.

Tabla 1.9. Tipos de matrices termoestables según la temperatura de utilización.

Bajas temperaturas	Poliéster Isoftálicas Ortoftálicas Ácido caliente
Medias temperaturas	Viniléster Epoxi
Medias -altas temperaturas	Fenólica
Altas temperaturas	Bismaleimida Poliimida Ester cianato Polieterimida

(Fuente: (Miravete, 2012))

1.6.1. Mecanismo de adhesión de la interfaz fibra-matriz

Las características mecánicas y físicas de los materiales compuestos dependen mucho de la zona de interacción entre la matriz y el refuerzo, denominada interfaz. Una interfaz de calidad es una condición necesaria para la correcta transmisión de los esfuerzos que actúan sobre la matriz hacia la fibra utilizada como refuerzo. Para que la interfaz sea buena, la matriz debe impregnarse correctamente sobre el refuerzo, garantizando la unión entre constituyentes del material compuesto. En la Figura 1.11 se indican los componentes de los materiales compuestos.



Figura 1.11. Componentes de los materiales compuestos.
(Fuente: (Science Photo Lybray, 2011))

La unión entre la matriz y refuerzo puede atribuirse a los siguientes mecanismos:

Adsorción y humectación: Depende de la propiedad de mojabilidad o ángulo de contacto. La resina líquida debe humectar toda la superficie de la fibra, cubriendo cada rugosidad de la fase sólida sin que quede aire, humedad o gases atrapados.

Interdifusión o autoadhesión: Puede ser promovida por la presencia de agentes plastificantes y disolventes.

Atracción electrostática: Son fuerzas de atracción que se producen entre dos superficies, una con carga positiva y la otra con carga negativa.

Enlace químico: Se forma un enlace químico entre grupos químicos compatibles de la superficie de la fibra y de la matriz.

Adhesión mecánica: Interacción que se produce por la interpenetración mecánica de las superficies de la matriz y la fibra debido a la rugosidad presentes en las fibras de refuerzo. (Kim, 1998)

En la Figura 1.12 se puede observar el mecanismo de adhesión y humectación entre la matriz y la fibra de un material compuesto.

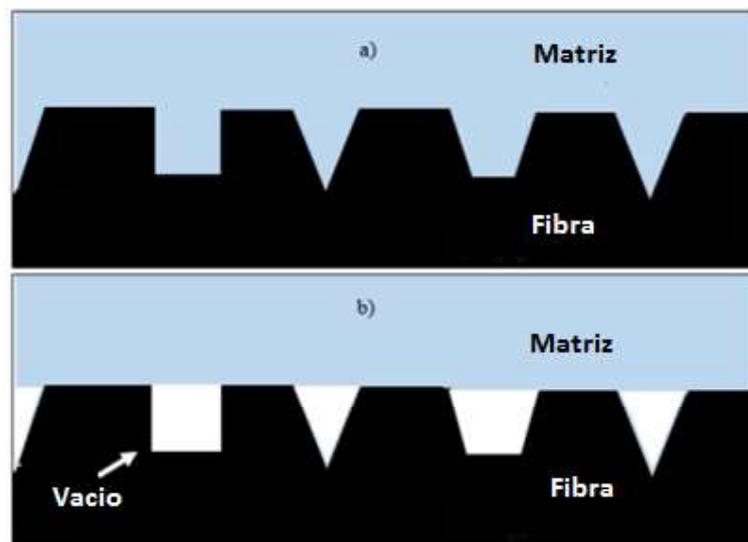


Figura 1.12. Mecanismo de adhesión adsorción y humectación. a) Buena adherencia. b) Falta de mojabilidad puede hacer que un polímero líquido no penetre en toda la superficie de la fibra, creando huecos interfaciales.

(Fuente: (Rajesh, 2015))

Los tratamientos superficiales se realizan a las fibras vegetales con el propósito de mejorar la adhesión en la interfaz fibra- matriz, además, para mejorar las propiedades mecánicas y físicas tanto en la fibra vegetal como en el material compuesto. Hay que tener en cuenta

que estos métodos encarecen la manufactura del material. (Delgado, 2012). En la Figura 1.13 se muestran algunas de estas modificaciones superficiales.

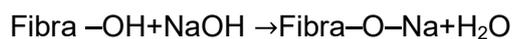


Figura 1.13. Métodos de modificación de superficie.
(Fuente: (Pickering, 2008))

1.6.2. Mercerización

La mercerización es uno de los métodos más empleados para modificar la estructura y composición química de las fibras vegetales mediante el uso de una solución acuosa llamada soda cáustica o hidróxido de sodio (NaOH). El objetivo principal de este tratamiento es mejorar la adhesión interfacial de la fibra-matriz y consecuentemente lograr un aumento en la resistencia del material compuesto.

La modificación más notoria al usar este método es la interrupción de los enlaces de hidrógeno en la estructura de la red celulosa de la fibra, lo que aumenta la rugosidad superficial. Además, se consigue que el tratamiento alcalino elimine cierta cantidad de lignina, aceites y ceras que se extienden sobre toda la superficie externa de la fibra. La adición de hidróxido de sodio acuoso (NaOH) a la fibra natural promueve la ionización del grupo hidróxilo al alcóxido. La siguiente reacción tiene lugar como resultado del tratamiento con álcali (Hashim, et al., 2012).



La efectividad de este tratamiento depende principalmente de las siguientes variables:

- a) Concentración de la solución de soda cáustica
- b) Temperatura de tratamiento

c) Tiempo o duración del tratamiento

Durante este tratamiento ocurren los siguientes mecanismos de modificación superficial: remoción de impurezas superficiales, fibrilación o separación de fibras elementales y el hinchamiento interfibrilar e intrafibrilar. Los efectos de estos mecanismos son deseables en las fibras naturales que se utilizan como refuerzo en materiales compuestos; ya que al tener las fibras una mayor área efectiva de contacto, su adhesión con la matriz es más fuerte, esto provoca un incremento de las propiedades mecánicas del material compuesto.



Figura 1.14. Fibras vegetales mercerizada.
(Fuente: (Culquichicon, 2016))

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla la metodología experimental empleada para la obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra tejida de banano. Se describen los materiales y equipos empleados detallando sus características y especificaciones. Se describen las pruebas y ensayos normalizados que se realizaron a los materiales obtenidos con el fin de caracterizarlos. Finalmente se indica el procedimiento y las técnicas empleadas durante el desarrollo del estudio, así como las diferentes configuraciones de materiales que se utilizaron.

2.1. Materiales y equipos utilizados

En esta sección se describen los principales materiales utilizados para la elaboración de las probetas, además, los equipos empleados para la realización de los ensayos de caracterización mecánica.

2.1.1. Materiales

A continuación, se indican los materiales empleados para la elaboración de las probetas del material compuesto

2.1.1.1. Resina poliéster

Para la matriz del material compuesto se empleó una resina poliéster insaturada del tipo ortoftálico cuya denominación comercial es SINTAPOL 437, esta resina fue suministrada por la empresa Pintulac. En la Tabla 2.1 se muestran algunas propiedades características de la resina SINTAPOL 437, además en la Figura 2.1 se puede observar el aspecto que presenta esta resina.

Tabla 2.1. Propiedades de la resina SINTAPOL 437.

Propiedades de la resina líquida:	
Apariencia:	Transparente, rosada, levemente turbia por el agente tixotrópico.
% No volátiles:	60+-2
Viscosidad Gardner	600 +-200
Índice de tixotropía	3+-1
Número acidez sobre sólidos	Max. 40
Propiedades de curado:	
Tiempo de gel (100g a 25°C, 1.5 ml MEK peróxido)	10 + - 3 min
Temperatura de Exotermia:	140 a 150 °C

(Fuente: (Pintulac, 2019))



Figura 2.1. Resina poliéster SINTAPOL 437.

Para el proceso de curado de la resina, es decir para su paso de estado líquido a estado sólido se utilizaron los siguientes agentes externos:

- a) Estireno que proporciona la viscosidad adecuada a la resina.
- b) Octoato de cobalto como acelerador del proceso de curado.
- c) Peróxido de metil-etil cetona (MEKP) como iniciador del proceso de curado.

2.1.1.2. Fibra de banano

Se utilizó fibra de banano proveniente del raquis de la planta como refuerzo del material compuesto, en la Figura 2.2 se indica la fibra del raquis suministrada por la empresa guayaquileña Inpadesa.



Figura 2.2. Fibra de banano.

2.1.1.3. Soda cáustica

La soda cáustica o hidróxido de sodio (NaOH) es una sustancia sólida blanca cristalina y muy versátil que se emplea para la fabricación de varios productos de uso cotidiano. Tiene cualidades corrosivas por lo que puede causar irritación cutánea y ocular. En la Figura 2.3 se muestra la soda cáustica empleada.



Figura 2.3. Soda cáustica empleada para la mercerización de la fibra.

2.1.1.4. Molde

Para la elaboración de las probetas de tracción, flexión e impacto se utilizó un mismo molde grande de acero con el fin de obtener la mayor cantidad posible de probetas en una sola moldeada. De este molde se obtiene una lámina de material de 260x260x4 mm del cual se pueden obtener aproximadamente 7 probetas para tracción, 7 probetas para flexión o 16 probetas para impacto en una sola moldeada. En la Figura 2.4 se muestra el molde empleado para la elaboración de las probetas.



Figura 2.4. Molde para elaboración de las probetas de tracción, flexión e impacto.

2.1.2. Equipos

A continuación, se detalla en la Tabla 2.2. los equipos que se utilizaron para la realización de los ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto; además de los equipos para inspeccionar y elaborar las probetas de material compuesto.

Tabla 2.2. Equipos utilizados.

N	Equipo	Descripción	Fotografía
1	Máquina de ensayos universal para tracción	<p>Marca: Instron Modelo: 3365 Capacidad máx. carga: 5 KN Frecuencia: 60 Hz Ubicación: CIAP</p>	
2	Máquina de ensayos universal para Flexión	<p>Marca: Tinius Olsen Modelo: H25K-S Capacidad max. Carga: 25 KN Velocidad de prueba y retorno: 0.0001 a 1000 [mm/min] Frecuencia: 60 Hz Ubicación: LANUM</p>	
3	Equipo para ensayo de impacto Caída de dardo	<p>Marca: Elcometer Modelo: 1615 Capacidad del dardo: 1 kg Ubicación: Laboratorio de metalografía</p>	

4	Balanza digital marca ADAM modelo PGL 6001	Capacidad máxima de 6000 g y una precisión de 0,1 g. Ubicación: LANUM	
5	Microscopio	Marca: Olympus Modelo: SZX7 Ubicación: Laboratorio de metalografía	

2.2. Mercerización de las fibras de banano

Debido a la dificultad que presentaron las fibras de banano crudas para la elaboración de los hilos y con el propósito de conseguir una mejor resistencia de los compuestos elaborados en este proyecto, se presentó la necesidad de utilizar fibras modificadas superficialmente. Es por esto por lo que para la elaboración de los tejidos se emplearon fibras modificadas mediante mercerización.

A continuación, en la Tabla 2.3 se muestra el procedimiento y variables empleadas para la modificación de las fibras mediante mercerización. (Culquichicon & Mendocilla, 2016)

Tabla 2.3. Procedimiento de mercerización de las fibras.

N	Proceso	Descripción	Imagen
1	Preparación de la solución	Concentración: 0.5 M NaOH en agua destilada (20 g NaOH/1L agua destilada) Relación fibra/solución: 20 g/L NaOH Tiempo: 30 min Temperatura: 2 a 5 °C	
3	Limpieza de la fibra mercerizada	Se lava la fibra con agua destilada	
4	Secado de la fibra mercerizada	Tiempo: 8 horas Temperatura: 60 °C	

Las fibras de banano se lavan con una solución de agua/alcohol en una relación en volumen de 1:1 durante 30 min a una temperatura de 80 °C, en una relación de fibra/solución de 20 g/L. Eliminando algunas grasas seguidamente secar las fibras a temperatura ambiente durante 2 días. Preparada la solución de mercerización con las variables indicadas en la Tabla 2.1, sumergir las fibras durante un periodo de 30 min a temperatura de 2 a 5°C.

Para remover el exceso de NaOH adherido en la superficie se utilizó agua destilada. Finalmente, las fibras se secan usando una estufa con los tiempos y temperatura

adecuada. En la Figura 2.5 se muestra la fibra de banano obtenida después de la mercerización.



Figura 2.5. Fibras de banano después de la mercerización.

2.3. Ensayos preliminares

El objetivo de esta fase preliminar es conocer las propiedades mecánicas de la resina poliéster utilizada, además, determinar entre la fibra tratada y no tratada, cuál de estas es la más adecuada para su utilización en la elaboración de las probetas con tejido.

2.3.1. Matriz de resina poliéster

Se realizaron probetas solo de resina poliéster SINTAPOL 437 con el objetivo de conocer las propiedades mecánicas de la matriz.

Para el curado de la resina poliéster se utilizó la formulación que se muestra en la Tabla 2.4. Primero se coloca la cantidad indicada de resina pura en un recipiente desechable, el cual debe estar totalmente limpio y seco; seguidamente se agrega el disolvente estireno para disminuir la viscosidad de la resina. A esta mezcla resultante se le adiciona la cantidad indicada de octoato de cobalto, el cual actúa como acelerador. Al momento de mezclar los componentes, estos deben ser mezclados lentamente y de manera continua hasta lograr una contextura homogénea, esto con el fin de evitar la formación de burbujas. Obtenida la mezcla de resina, estireno y octoato de cobalto; se agrega como último elemento constituyente el MEKP, con el fin de iniciar el proceso de curado. Se debe tener en cuenta que a medida que se aumenta la cantidad de MEKP, la resina tiende a solidificarse más rápido.

Debido al porcentaje en peso de MEKP que se utilizó en la realización de este proyecto de investigación, se tiene un tiempo límite de trabajo de 7 min a partir de que se agrega el MEKP a la mezcla; pasados los 7 minutos, la resina alcanza un estado de gel y se hace imposible impregnar los refuerzos en la matriz de resina.

Tabla 2.4. Fórmula utilizada para el curado de la resina SINTAPOL 437.

Componente	Porcentaje en peso
Estireno	10%
Octoato de cobalto	0.5%
MEKP	2.5%

En la Figura 2.6 se indica el procedimiento general para la formulación de la resina poliéster utilizada; mientras se van agregando los componentes se observa un cambio de tonalidad en su color.

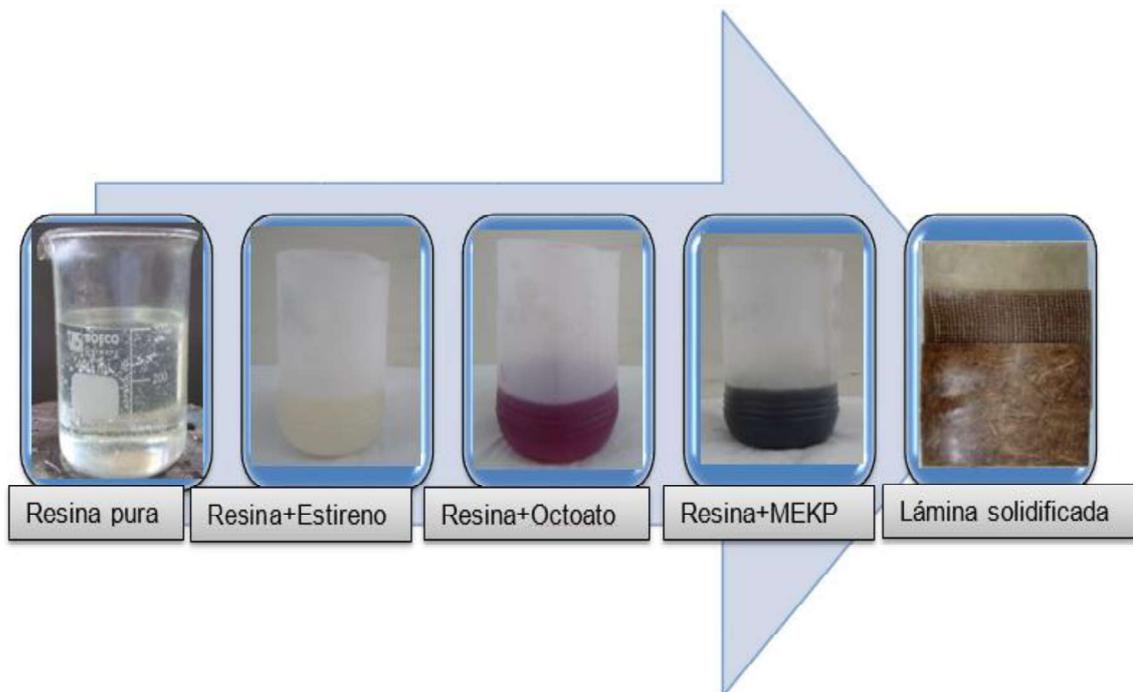


Figura 2.6. Proceso de curado de la resina poliéster.

En la Figura 2.7 se muestran las probetas obtenidas de resina poliéster para ensayo de tracción y flexión.

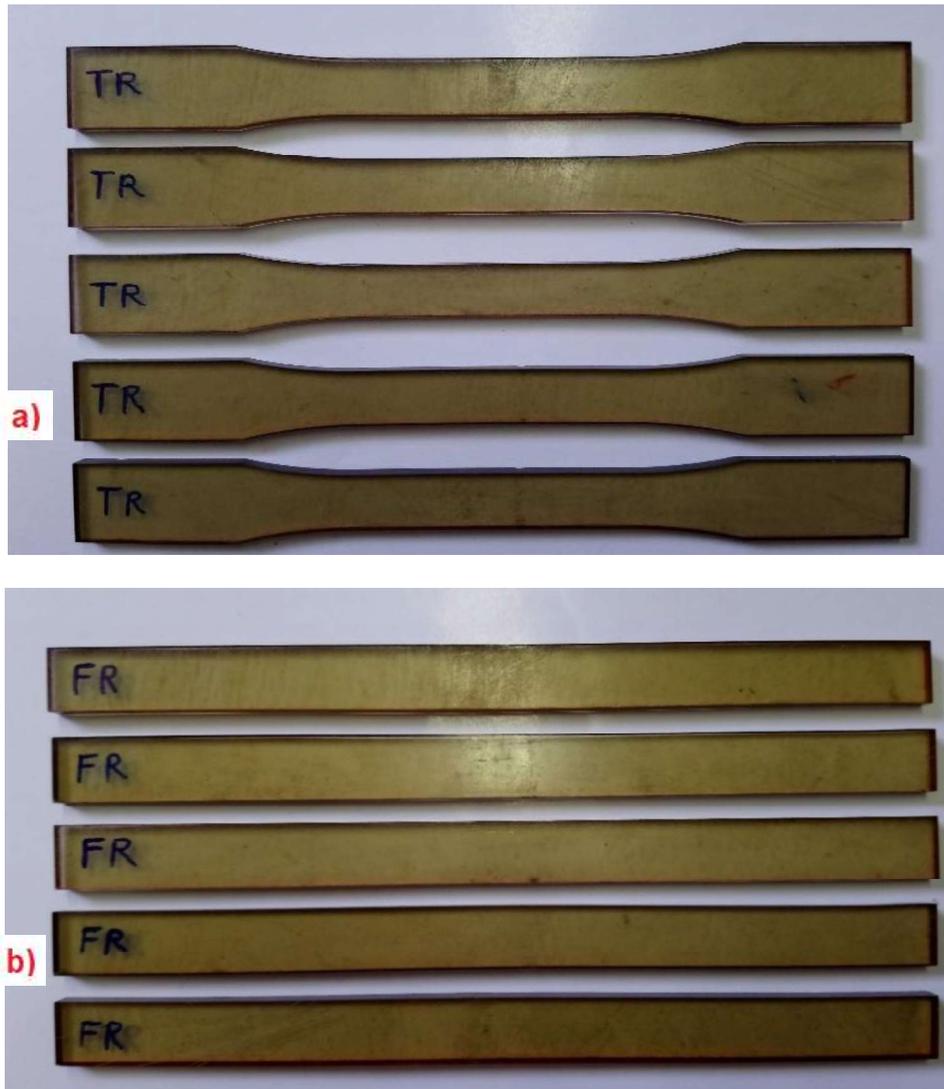


Figura 2.7. Probetas de resina poliéster para ensayo de: a) tracción, b) flexión.

2.3.2. Compuestos reforzados con fibra no tratada

Se elaboraron probetas con fibras cortas y fibras continuas como refuerzo. Se utilizaron fibras cortas de 3 cm de longitud distribuidas aleatoriamente, y fibras continuas de la longitud del molde distribuidas axialmente en la matriz de resina poliéster como se muestran en las Figuras 2.8 y 2.9. A estas probetas se les realizaron ensayos mecánicos de tracción y flexión.

Se ha designado una codificación para cada uno de los compuestos elaborados con el fin de poder identificarlos de manera rápida y sencilla. En la Tabla 2.5. se muestra la codificación para las configuraciones con fibra no tratada a tracción y flexión.

Tabla 2.5. Designación y significado de las probetas con fibra no tratada para ensayo de tracción y flexión.

Configuración	Designación	Significado
1	T.10%F3NT	Probeta de tracción con 10% de fibra corta (3 cm) no tratada, orientada aleatoriamente
2	T.10%FNT	Probeta de tracción con 10% de fibra continua longitudinal no tratada
3	F.10%F3NT	Probeta de flexión con 10% de fibra corta (3 cm) no tratada, orientada aleatoriamente
4	F.10%FNT	Probeta de flexión con 10% de fibra continua longitudinal no tratada



Figura 2.8. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra no tratada: a) continua longitudinal, b) corta aleatoria.



Figura 2.9. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra no tratada: a) continua longitudinal, b) corta aleatoria.

2.3.3. Compuestos reforzados con fibra tratada

Se realizaron probetas con las mismas configuraciones que se utilizaron en los ensayos preliminares de probetas con fibra no tratada. Es decir, se realizaron probetas con fibras cortas de 3 cm de longitud distribuidas aleatoriamente y probetas con fibras continuas de la longitud del molde distribuidas axialmente en la matriz de resina poliéster como se muestran en las Figuras 2.10 y 2.11. Estas probetas fueron ensayadas a tracción y flexión.

En la Tabla 2.6. se muestra la codificación para las configuraciones con fibra tratada a tracción y flexión.

Tabla 2.6. Designación y significado de las probetas con fibra tratada para ensayo de tracción y flexión.

Configuración	Designación	Significado
1	T.10%F3T	Probeta de tracción con 10% de fibra corta (3 cm) tratada, orientada aleatoriamente
2	T.10%FT	Probeta de tracción con 10% de fibra continua longitudinal tratada
3	F.10%F3T	Probeta de flexión con 10% de fibra corta (3 cm) tratada, orientada aleatoriamente
4	F.10%FT	Probeta de flexión con 10% de fibra continua longitudinal tratada



Figura 2.10. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra tratada: a) continua longitudinal y b) corta aleatoria.



Figura 2.11. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra tratada: a) continua longitudinal y b) corta aleatoria.

2.3.4. Refuerzo de fibra tejida de banano

Esta caracterización mecánica se realiza con el objetivo de conocer el comportamiento del tejido de fibra de banano bajo la aplicación de cargas a tracción. El ensayo mecánico fue realizado en el Centro Textil Politécnico bajo la norma ASTM D5035-11, "Standard test method for breaking force and elongation of textile fabric". Esta norma indica que se necesita 20 especímenes de tejido con las dimensiones descritas en Figura 2.12, para poder realizar el ensayo de tracción textil.

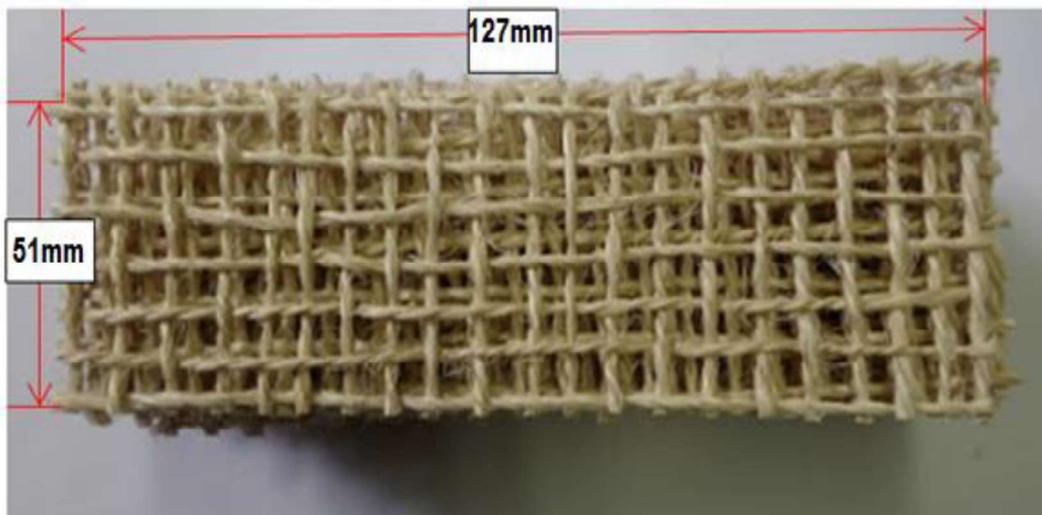


Figura 2.12. Probetas del tejido para el ensayo de tracción.

2.4. Procedimiento experimental

En esta sección se indica el procedimiento experimental empleado para alcanzar los objetivos planteados en el presente proyecto técnico-experimental. Se detallan los procedimientos para la elaboración del tejido de banano usado como refuerzo, y para la elaboración de las probetas del material compuesto reforzado con fibras longitudinal, corta y fibras tejidas de banano orientadas a 0° , 30° , 45° . Además, se describen los ensayos de caracterización mecánica empleados en base a las normas ASTM para tracción, flexión e impacto.

2.4.1 Estrategia metodológica empleada

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa se realizaron los ensayos preliminares en donde se caracterizaron a tracción, flexión e impacto la matriz de resina y compuestos reforzados con fibras tratadas y no tratadas; de esto se determinó el mejor tipo de fibra para su utilización en la elaboración del tejido sarga. Posteriormente en la segunda etapa se caracterizaron a tracción, flexión e impacto los compuestos reforzados con tejido sarga a diferentes orientaciones; de esto se determinó la mejor configuración. Finalmente se realizó una comparación de los materiales desarrollados en este proyecto con otros materiales estudiados en investigaciones previas. En la Figura 2.13 se muestra un diagrama de la metodología empleada.

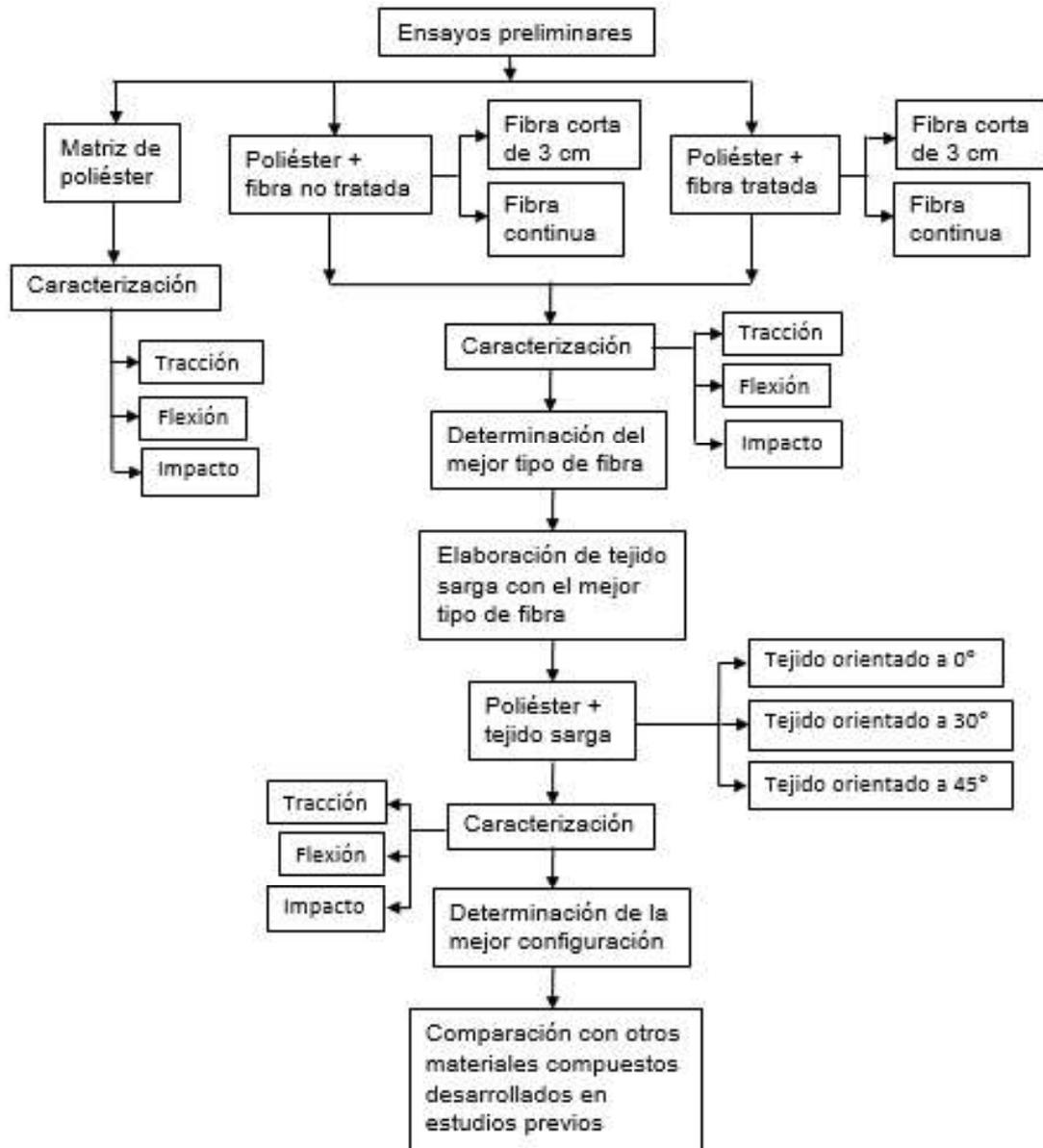


Figura 2.13. Estrategia metodológica usada en el proyecto.

2.4.2. Elaboración del tejido tipo sarga

Las fibras fueron desenredadas, seleccionando las mejores hebras que no presenten impurezas. Seguidamente se utilizó un peine para realizar el alisado y limpieza de la fibra consiguiendo los mejores especímenes, los cuales son clasificados dependiendo la longitud. Todo esto se hace para conseguir que la fibra sea más dócil y manejable. La fibra formará un hilo de dos cabos con sentido de torsión equivalentes al unirlos y aplicar torsión

inversa ayudará a obtener el hilo del grosor deseado, necesaria para seguir con el proceso de tejido. Se debe tener en cuenta que si la torsión es muy alta contribuirá que el hilo sea rígido y difícil de tejer, pero si es muy baja las fibras que conforman el hilo tenderán a deslizarse unas sobre otras. (Hollen,2012)

Utilizando solamente los hilos de mayor uniformidad se elabora tejido del tipo sarga confeccionado con la fibra natural. Se utilizó un marco rectangular de dimensiones 300x300 mm, hecho de cinta doble faz que facilitó el proceso de tejido, sujetándolas contra el marco y tensando los hilos en la dirección de la urdimbre y trama. El procedimiento descrito se detalla en la Figura 2.14.

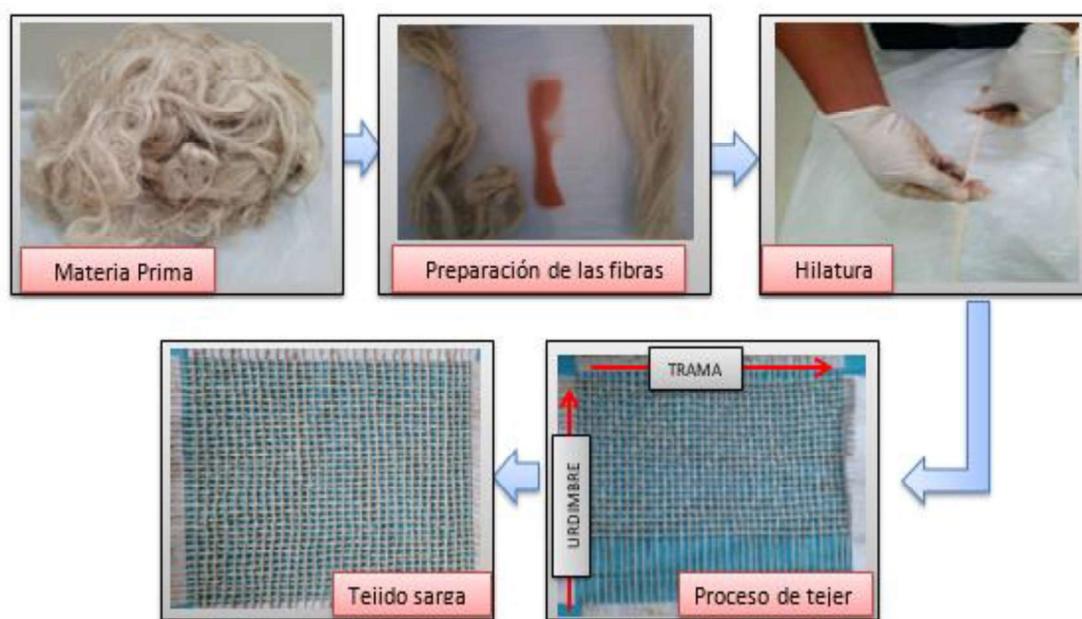


Figura 2.14. Proceso para la obtención del tejido de fibra de banano.

Las características del tejido artesanal son las siguientes:

- Diámetro promedio del hilo: 2 mm
- Longitud de hilo: 300 mm
- Dirección de torsión: S
- Torsión: 27 tpm
- Título: 1372.76 tex
- Tipo de tejido: sarga
- Número de hilos en el tejido: 7 por cada 51 mm de longitud en la dirección longitudinal y transversal.
- Paso de los hilos: 4 mm

2.4.3. Elaboración de las probetas

En la Tabla 2.7. se detalla el proceso para la elaboración de las probetas de material compuesto. Inicialmente debe aplicarse al molde una cera desmoldante para facilitar el proceso del desmolde, luego se prepara la resina con los porcentajes de los componentes mostrados en la Tabla 2.4. La mezcla resultante se agrega sobre el tejido previamente colocado en el molde mediante estratificación procurando distribuir la resina sobre todo el tejido para tener una adecuada humectación. Antes que la resina ingrese en la fase de gelificación, se cierra el molde para evitar que el tejido se distorsione al aplicar la presión. El tiempo estimado para la solidificación de la lámina del compuesto es de 120 minutos. Posteriormente se procede al desmoldeo y se realiza el respectivo curado de 15 días a temperatura ambiente para permitir que el material alcance sus mejores propiedades mecánicas. Finalmente se cortan las probetas a láser según las dimensiones detalladas en las correspondientes normas ASTM para la realización de los ensayos mecánicos.

Tabla 2.7. Proceso de elaboración de las probetas.

	Proceso	Acciones	Imagen
1	Preparación del tejido de banano	Limpieza y dimensionamiento del tejido según el tamaño del molde.	
2	Preparación del molde	Limpieza del molde Aplicación cera desmoldante.	

3	Preparación de la mezcla para el curado de la resina	<p>Mezcla del poliéster con el estireno y el octoato de cobalto.</p> <p>A la mezcla obtenida se le añade el MEKP.</p>	
4	Colocación del refuerzo y la matriz en el molde	<p>Colocación de la fibra tejida en la hembra.</p> <p>Distribución de la resina sobre la fibra.</p>	
5	Aplicación de presión	La presión se aplica al cerrar el molde mediante el ajuste de los pernos.	
6	Solidificación	Moldeo durante 120 minutos a presión constante.	
7	Desmoldeo	Retirar el macho y posteriormente el laminado obtenido	

8	Curado final del laminado.	Temperatura ambiente durante 15 días	
9	Obtención de las probetas	Corte de las probetas a láser según las dimensiones especificadas en normas	

El número total de probetas obtenidas para los ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto se detallan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Cantidad y tipo de probetas elaboradas.

Material	Configuración de la fibra	Número de probetas para ensayo de:		
		Tracción	Flexión	Impacto
Resina poliéster	-	7	7	8
Poliéster con 10% de fibra no tratada	Fibra corta de 3 cm	7	7	8
	Fibra continua longitudinal	7	7	8
Poliéster con 10% de fibra tratada	Fibra corta de 3 cm	7	7	8
	Fibra continua longitudinal	7	7	8
Poliéster con 20% de fibra tratada	Tejido sarga orientado a 0°	7	7	8
	Tejido sarga orientado a 30°	7	7	8
	Tejido sarga orientado a 45°	7	7	8
Número total de probetas		176		

2.4.4. Compuestos reforzados con tejido tipo sarga

A continuación, se presentan los materiales compuestos elaborados con fibra tejida de banano tipo sarga.

2.4.4.1. Probetas para ensayo de tracción

Se elaboró 3 diferentes configuraciones que son el resultado de variar las orientaciones del tejido tipo sarga elaborado con fibra natural de banano tratada químicamente. Estas probetas fueron elaboradas con el 20%wt en fibra de banano, mientras que la matriz se formuló con las cantidades adecuadas previamente presentadas en la Tabla 2.1.

A continuación, en la Tabla 2.9 se muestra una codificación para identificar a las probetas a tracción reforzadas con fibra tejida a diferentes orientaciones.

Tabla 2.9. Designación y significado de las probetas con tejido sarga para ensayo de tracción.

Configuración	Designación	Significado
1	T.20%FT.0°	Probeta de tracción con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 0°
2	T.20%FT.30°	Probeta de tracción con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 30°
3	T.20%FT.45°	Probeta de tracción con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 45°

Las probetas del compuesto reforzado con tejido obtenidas para tracción se muestran en la Figura 2.15.



(Continúa en la siguiente página)



Figura 2.15. Probetas del material compuesto para ensayo de tracción con fibra tejida: a) orientada 0°, b) orientada 30° y c) orientada 45°.

2.4.4.2. Probetas para ensayo de flexión

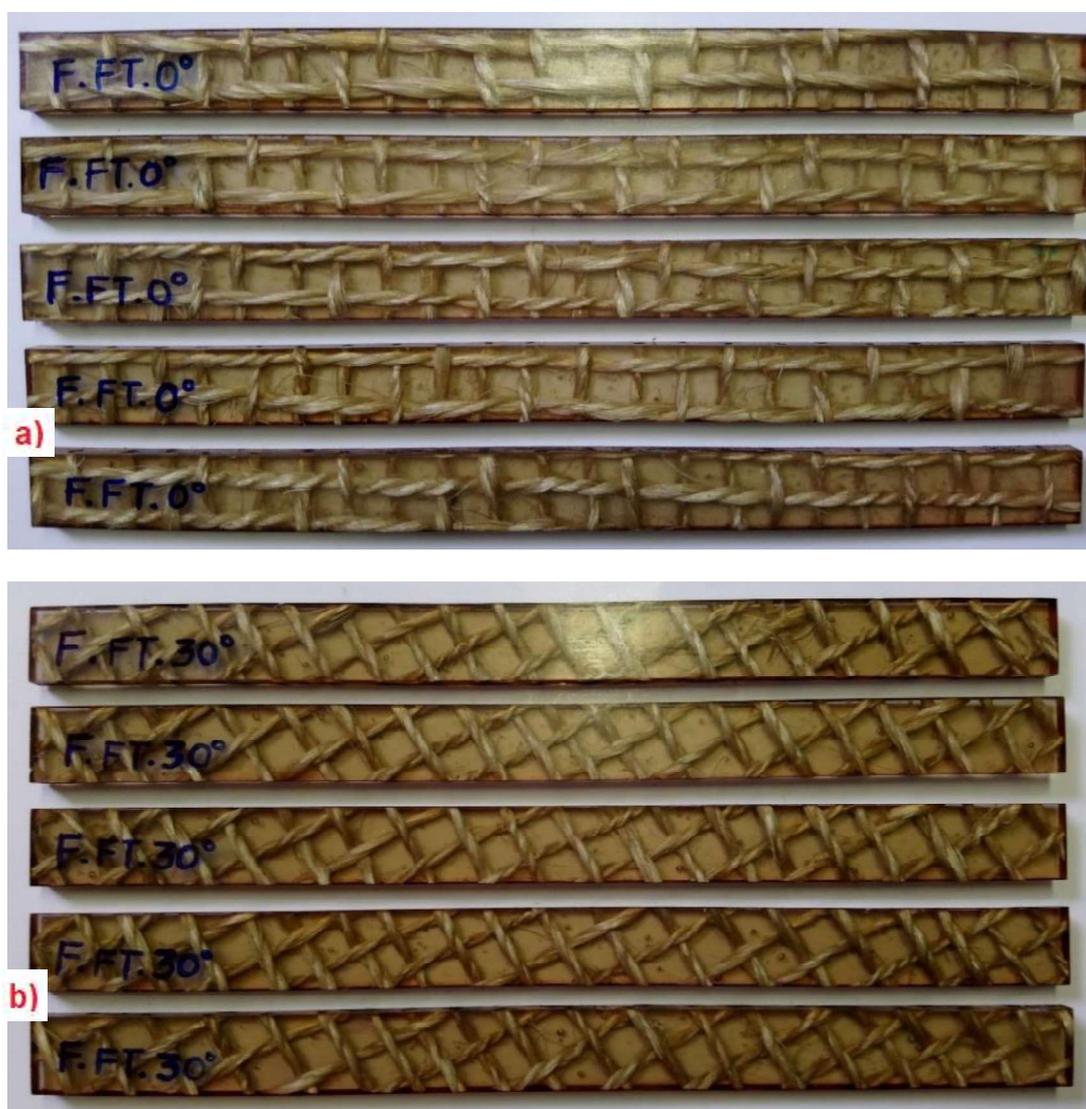
Se elaboró 3 diferentes configuraciones que son el resultado de variar las orientaciones del tejido tipo sarga elaborado con fibra natural de banano tratada químicamente. Estas probetas fueron elaboradas con el 20% wt en fibra de banano, mientras que la matriz se formuló con las cantidades adecuadas previamente presentadas en la Tabla 2.1.

A continuación, En la Tabla 2.10. se muestra una codificación para identificar las probetas a flexión reforzadas con fibra tejida a diferentes orientaciones.

Tabla 2.10. Designación y significado de las probetas con tejido sarga para ensayo de flexión.

Configuración	Designación	Significado
1	F.20%FT.0°	Probeta de flexión con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 0°
2	F.20%FT.30°	Probeta de flexión con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 30°
3	F.20%FT.45°	Probeta de flexión con 20% de fibra tratada y tejido sarga orientado a 45°

Las probetas del compuesto reforzado con tejido obtenidas para flexión se muestran en la Figura 2.16.



(Continúa en la siguiente página)



Figura 2.16. Probetas del material compuesto para ensayo de flexión con fibra tejida: a) orientada 0°, b) orientada 30° y c) orientada 45°.

2.4.4.3. Probetas para ensayo de impacto

Se ensayaron a impacto la matriz de resina, los compuestos reforzados con fibra corta y longitudinal, además, los compuestos reforzados con tejido. Las probetas reforzadas con fibra corta y longitudinal fueron elaboradas con el 10% wt en fibra de banano, mientras que las probetas reforzadas con tejido se elaboraron con el 20% wt en fibra de banano.

Las probetas obtenidas para el ensayo de impacto se muestran en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Probetas del material compuesto para ensayo de impacto con fibra: a) corta tratada, b) longitudinal tratada, c) corta no tratada, d) longitudinal no tratada e) tejida orientada a 0°, f) resina.

2.4.5. Ensayos de caracterización mecánica

En este apartado se detallan los ensayos mecánicos que se realizaron a todas las probetas obtenidas con el fin de determinar el comportamiento que presentan cuando son sometidas a diferentes tipos de carga; para esto se realizaron ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto. Esta caracterización mecánica se realizó después de 15 días de obtenidas las probetas ya que es recomendable esperar este periodo de tiempo para tener un curado adecuado de los materiales.

2.4.5.1. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en base a la norma ASTM D-638 [14] “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, esta norma sugiere ensayar mínimo 5 probetas por cada configuración del material. Para esto se empleó la máquina universal de ensayos Instron de donde se obtuvo los valores de esfuerzos de tracción, porcentajes de deformación y el módulo de elasticidad. La velocidad de ensayo utilizada fue de 5 [mm/min] según indica la norma, las dimensiones de la probeta normalizada se muestran en la Figura 2.18.

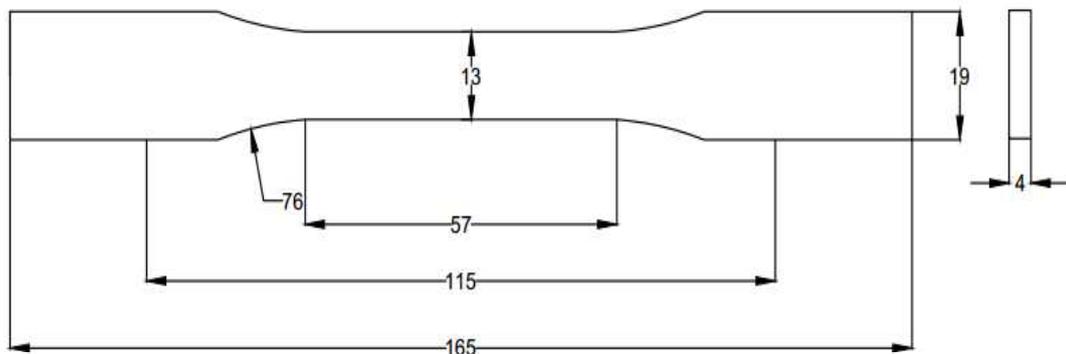


Figura 2.18. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de tracción según la norma ASTM D-638 [14].

2.4.5.2. Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión se realizaron en base a la norma ASTM D-7264/D-7264M [15] “Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, esta norma sugiere ensayar mínimo 5 probetas por cada configuración de material. Para esto se empleó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25K-S de donde se obtuvo los valores de esfuerzos a flexión, porcentajes de deflexión y módulo a la flexión. La velocidad de ensayo utilizada fue de 1 [mm/min], la relación espesor-distancia entre apoyos fue 1:32, las dimensiones de la probeta normalizada se muestran en la Figura 2.19.

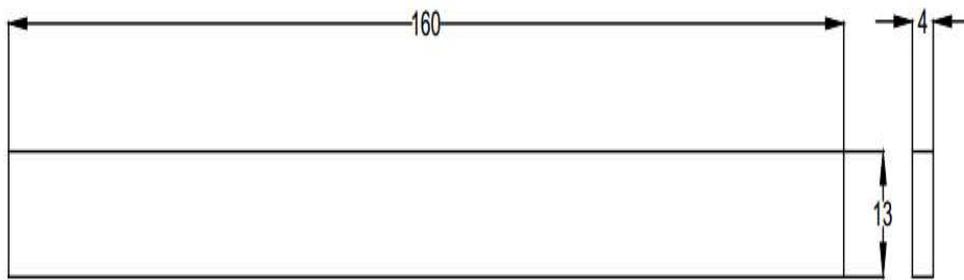


Figura 2.19. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de flexión según la norma ASTM D-7264/D-7264M [15].

2.4.5.3. Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto se realizaron en base a la norma ASTM D-5420 [04] “Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact)”. Las dimensiones de la probeta normalizada se muestran en la Figura 2.20.

Las probetas de material compuesto reforzado con fibras de banano se ensayaron con la máquina de impacto por caída de dardo marca Elcometer 1615. Se coloca la probeta del material compuesto en la máquina y se deja caer un dardo con un peso definido de 1 Kg desde las siguientes alturas 25,50,75 y 100 [mm]. Mediante el peso del dardo, las alturas de ensayo y las respectivas áreas de la zona de impacto en las probetas, se calculó la energía y resistencia de impacto.

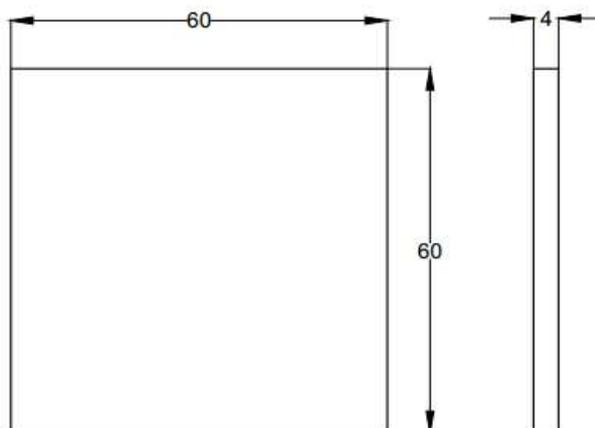


Figura 2.20. Dimensiones en milímetros de la probeta para ensayo de impacto según la norma ASTM D-5420 [04].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de los ensayos preliminares concernientes a la caracterización de la resina empleada, del tejido de fibra de banano y de los compuestos de fibra tratada y no tratada. Seguidamente, se realiza una comparación de estos resultados para poder determinar el mejor tipo de fibra. La discusión se centra en la interpretación y análisis de los resultados de la caracterización mecánica realizada a las diferentes configuraciones de material compuesto. En base a estos resultados, se determina la mejor configuración de material compuesto. Finalmente se realizan comparaciones con otros materiales compuestos obtenidos en investigaciones y estudios previos.

3.1. Resultados

En esta sección se muestran y analizan los diagramas generales de esfuerzo vs deformación construidos utilizando una probeta representativa de cada configuración, probeta que presenta la mayor resistencia de entre la muestra. Además, se analizan tablas con los incrementos de los esfuerzos máximos y módulos elásticos de los diferentes compuestos respecto a la matriz de resina poliéster. Cabe recalcar que las probetas de ensayos preliminares tienen 10% wt de refuerzo y las probetas reforzadas con tejido tienen 20% wt.

3.1.1. Ensayos preliminares

A continuación, se detallan los ensayos preliminares desarrollados.

3.1.1.1. Caracterización mecánica del refuerzo de tejido tipo sarga

Para el ensayo de tracción se usaron 20 especímenes del tejido las propiedades promedias se las detallan en la Tabla 3.1. Los resultados individuales de la carga de rotura y deformación máxima se detallan en el ANEXO X.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas a tensión del tejido de fibra de banano tipo sarga.

Probetas	Carga [N]	Extensión carga máxima [mm]	Deformación carga máxima [%]
Promedio	383.2	4.2	5.5
S.D.	55.4	0.7	0.9

En la Figura 3.2 se indica el comportamiento lineal frágil de cada una de las probetas evaluadas.

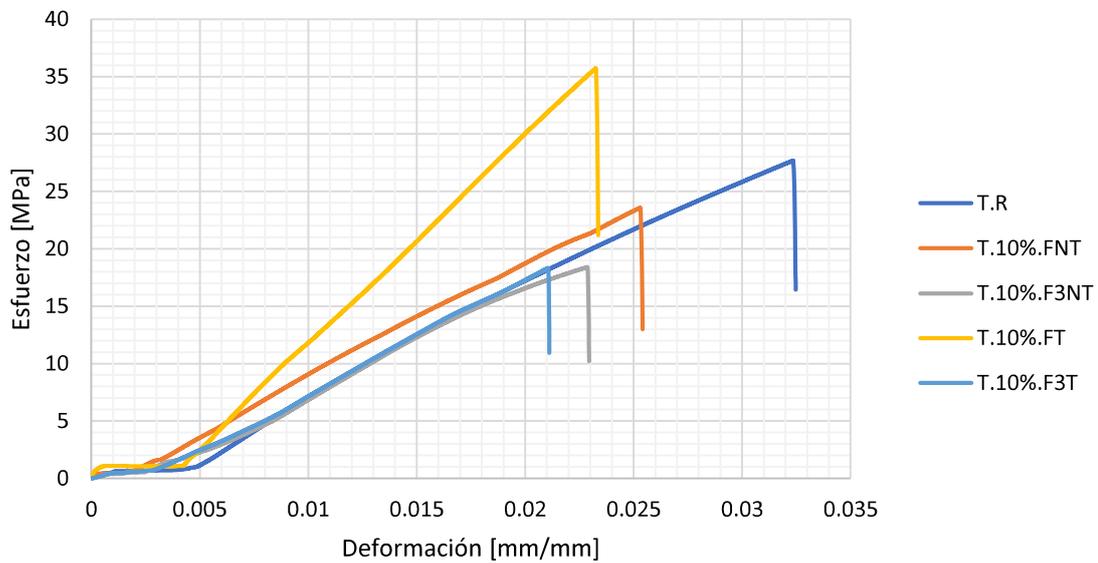


Figura 3.2. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra corta y continua longitudinal.

3.1.1.2.2. Ensayo de flexión

En todas las probetas disminuyó el esfuerzo máximo y módulo de elasticidad al emplear las fibras tratadas y no tratadas como refuerzo del material compuesto elaborado. Sin embargo, la configuración reforzada con fibra tratada longitudinalmente presenta la mínima reducción en su resistencia del 30.41% pero su módulo de rigidez presentó un aumento del 26.79%, todos estos resultados son relacionados a la matriz de resina poliéster. En la Tabla 3.3 se muestran las características mecánicas e incrementos de las diferentes configuraciones sometidas a flexión.

Tabla 3.3. Características mecánicas e incrementos del material compuesto con fibra tratada y no tratada obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de Flexión.

Configuración	Esfuerzo máximo [Mpa]	Incremento [%]	Módulo elástico [Mpa]	Incremento [%]
F.R	72.65	0.00	2898.80	0.00
F.10%FNT	47.88	-34.09	2841.86	-1.96
F.10%F3NT	29.84	-58.93	2543.93	-12.24
F.10%FT	50.56	-30.41	3675.47	26.79
F.10%F3T	38.15	-47.49	3112.90	7.39

En la Figura 3.3 se indica el comportamiento lineal frágil de cada una de las probetas evaluadas.

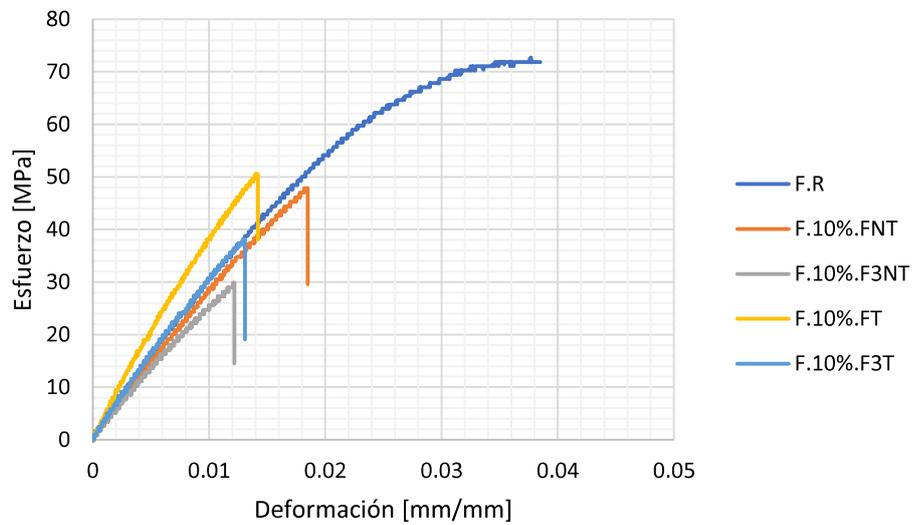


Figura 3.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra corta y continua longitudinal.

3.1.1.2.3. Módulo de elasticidad

En lo que respecta al módulo de elasticidad de las distintas configuraciones con fibra tratada y no tratada indicada en la Figura 3.4 se puede observar de mejor manera el comportamiento que presentan cada probeta.

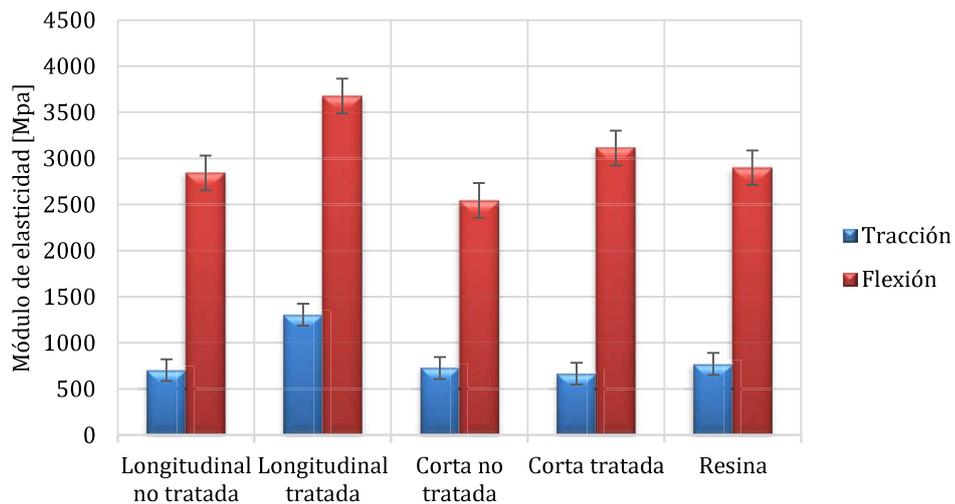


Figura 3.4. Módulo de elasticidad a tracción y flexión de las configuraciones con fibra corta y continua longitudinal.

Se observa que la probeta reforzada con fibra continua longitudinal tratada consigue los mejores resultados a los módulos de elasticidad de tracción y flexión. Siendo el material compuesto más rígido de todas las configuraciones, incluida la matriz de resina poliéster.

Además, se observa que al realizar el tratamiento superficial a las fibras de banano si ayuda a incrementar la rigidez del material compuesto empleando fibra longitudinal en un 46.12% a tracción mientras que la rigidez a flexión aumento en 22.68%.

3.1.2. Compuestos reforzados con fibra tejida

A continuación, se detallan los ensayos elaborados a los compuestos reforzados con fibra tejida.

3.1.2.1. Ensayo de tracción

Como se observa en la Tabla 3.4, la resistencia a la tracción de los tres compuestos disminuye con respecto a la matriz de resina.

El compuesto reforzado con tejido orientado a 45° presentó el mayor esfuerzo a la tracción, sin embargo, su módulo de rigidez es menor respecto a las configuraciones con fibra tejida orientadas a 0° y 30°.

De los resultados obtenidos por Asabe & Bhosale y Callister, se obtienen mayores resistencias a tracción en el material compuesto con fibra orientada a 0° respecto a la carga aplicada y además estos esfuerzos disminuyen al aumentar el ángulo de orientación. Sin embargo, los esfuerzos obtenidos en el presente estudio para el material compuesto reforzado con tejido orientado a 0° son bajos. Una de las razones del resultado conseguidos es debido a la reducida cantidad de hilos presentes en la longitud calibrada de las probetas del material compuesto; esto en comparación a los materiales compuestos con tejido orientados a 30° y 45°.

Tabla 3.4. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de los compuestos reforzados con tejido respecto a la matriz de resina poliéster.

Configuración	Esfuerzo [Mpa]	Incremento [%]	Módulo elástico [Mpa]	Incremento [%]
T.R	27.69	0.00	769.92	0.00
T.20%FT.0°	15.84	-42.80	789.55	2.55
T.20%FT.30°	17.87	-35.46	777.98	1.05
T.20%FT.45°	18.93	-31.64	764.51	-0.70

En la Figura 3.5 se indica el comportamiento lineal frágil de cada una de las probetas evaluadas.

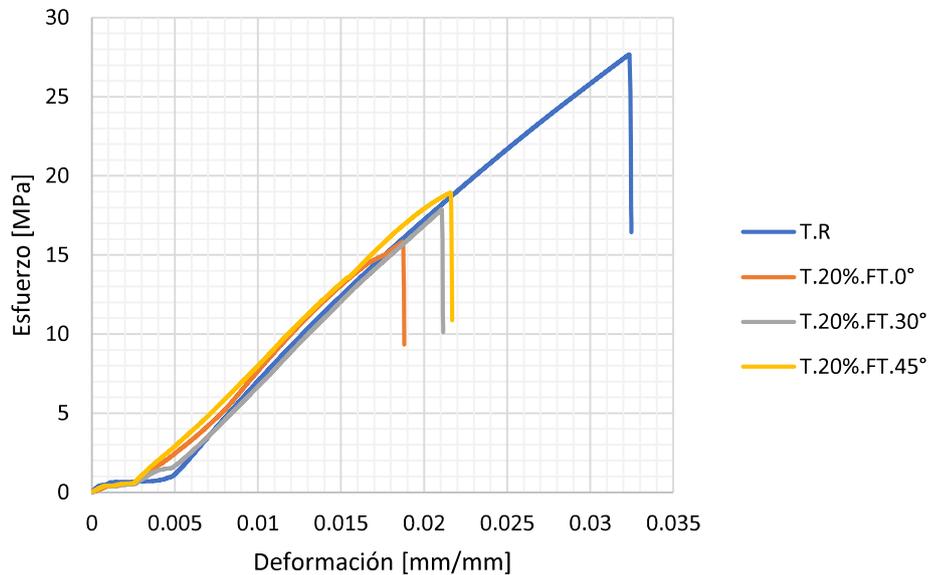


Figura 3.5. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con tejido.

3.1.2.2. Ensayo de flexión

En la Tabla 3.5 se indica que las resistencias máximas obtenidas de todos los materiales compuestos reforzados con fibra tejida disminuyen en comparación a su matriz de resina poliéster. El material compuesto que presenta el mayor esfuerzo de flexión es la orientada a 30°. Sin embargo, el módulo de rigidez obtenido es menor en relación con los compuestos con tejido orientados a 0° y 45°.

Tabla 3.5. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de los compuestos reforzados con tejido respecto a la matriz de resina poliéster.

Configuración	Esfuerzo máximo [Mpa]	Incremento [%]	Módulo elástico [Mpa]	Incremento [%]
F.R	72.65	0.00	2898.80	0.00
F.20%FT.0°	28.17	-61.23	2885.31	-0.47
F.20%FT.30°	49.08	-32.44	2644.56	-8.77
F.20%FT.45°	33.82	-53.45	3409.87	-13.19

En la Figura 3.6 se indica el comportamiento lineal frágil de cada una de las probetas evaluadas.

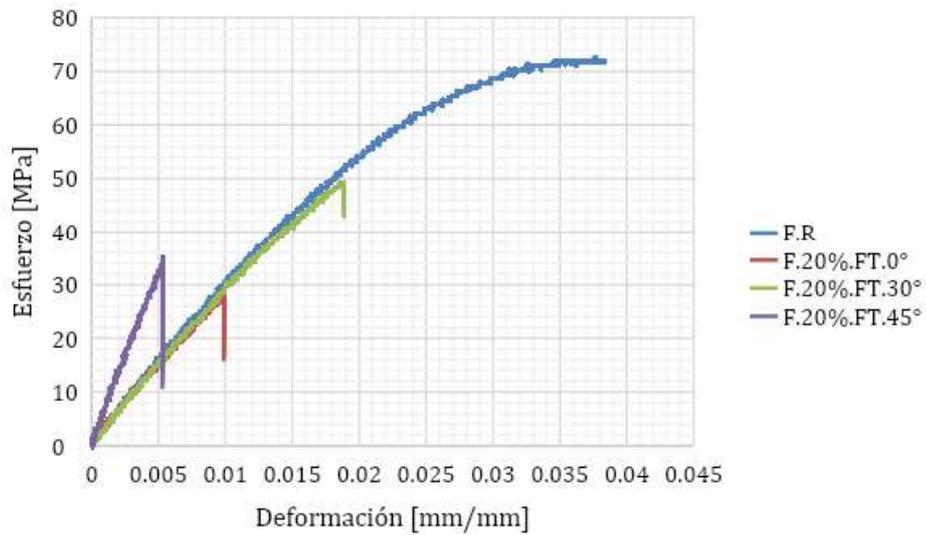


Figura 3.6. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con tejido.

3.1.2.3. Módulo de elasticidad

En la Figura 3.7 se aprecian los incrementos y decrementos del módulo a tracción y flexión de los compuestos respecto a la resina, además, se puede apreciar el error asociado a estos resultados. Cabe mencionar que para el análisis se utilizaron los valores promedio del módulo elástico para cada configuración.

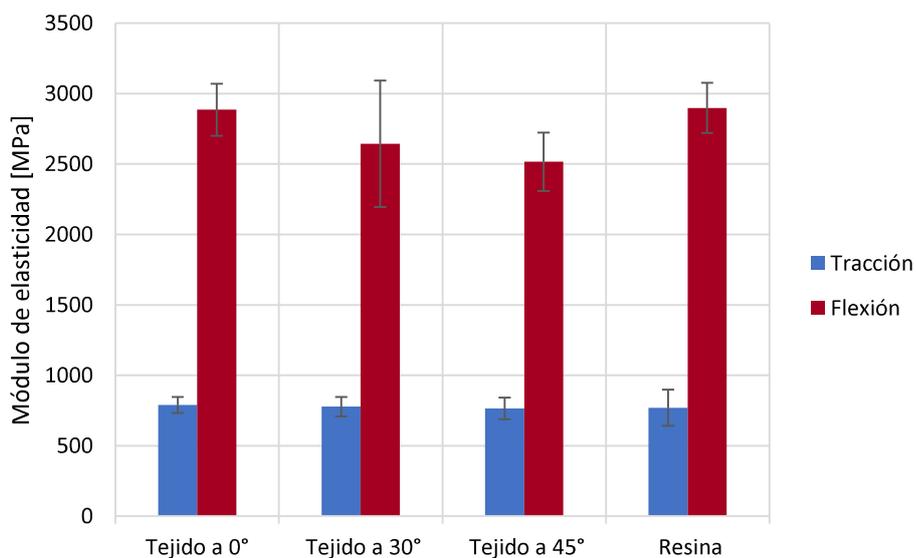


Figura 3.7. Módulo de elasticidad a flexión y tracción de las configuraciones con tejido.

En lo que respecta al módulo elasticidad a tracción y flexión, no se observa una variación considerable por lo tanto la rigidez es prácticamente similar a la matriz de resina. Por consiguiente, el usar fibra tejida orientada no mejora la rigidez del material compuesto en este estudio, al menos con las variantes usadas para la obtención de este material compuesto. Es importante indicar que todas las configuraciones se elaboraron con el mismo porcentaje en peso de fibra.

3.1.3. Ensayo de impacto

En el ensayo de impacto la energía es producida por el potencial del dardo a distintas alturas. En donde las áreas de rotura en las probetas se verán afectadas por la absorción de esta energía. A continuación, en la Tabla 3.6 se muestra el área aproximada de las probetas ensayadas en función de la energía potencial correspondiente a la altura del impactador.

Tabla 3.6. Características mecánicas del material compuesto con fibra tratada continua, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de impacto

Energía [J]	Altura [mm]	Resina	Fibra no tratada		Fibra tratada		
		Área [mm ²]	Corta Área [mm ²]	Continua Área [mm ²]	Corta Área [mm ²]	Continua Área [mm ²]	Tejida Área [mm ²]
9.81	100	213.21	506.37	416.56	499.10	547.81	475.71
7.35	75	252.84	379.71	390.31	367.58	386.32	387.79
4.90	50	173.79	329.99	423.06	292.92	343.83	377.13
2.45	25	98.00	422.70	403.00	312.60	295.75	408.31

3.2. Discusión

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados al refuerzo de tejido de banano, matriz de resina poliéster y a las diferentes configuraciones de materiales compuestos elaborados en este proyecto.

3.2.1. Caracterización mecánica del tejido de banano

Debido al diámetro de los hilos, existe dificultad para la elaboración del tejido artesanal tipo sarga. Este hilo grueso genera excesivo paso de la trama y urdimbre. En la elaboración del tejido se requiere la máxima uniformidad para ser utilizado como refuerzo en el material

compuesto con el fin que todas las cargas aplicadas al compuesto se transmitan directamente al tejido.

Con la configuración indicada en la sección 2.3.2 el tejido tiene 20%wt en el nuevo material, el cual se obtuvo de manera artesanal debido a que en el mercado local no existe distribución con este tipo de hilo o tejido elaborada con la fibra natural de banano.

Del ensayo de tensión se obtuvieron resultados promedios de 383 N y 5.5% para la carga a la rotura y deformación, respectivamente. Además, se tiene una alta desviación estándar de 55.4 debido a la variación de diámetro, tipo de torsión, número de vueltas por pulgada, paso del hilo y las propias características de la fibra con la que se elaboró las probetas de tejido. En la Figura 3.8 se puede observar una muestra del tejido elaborado.

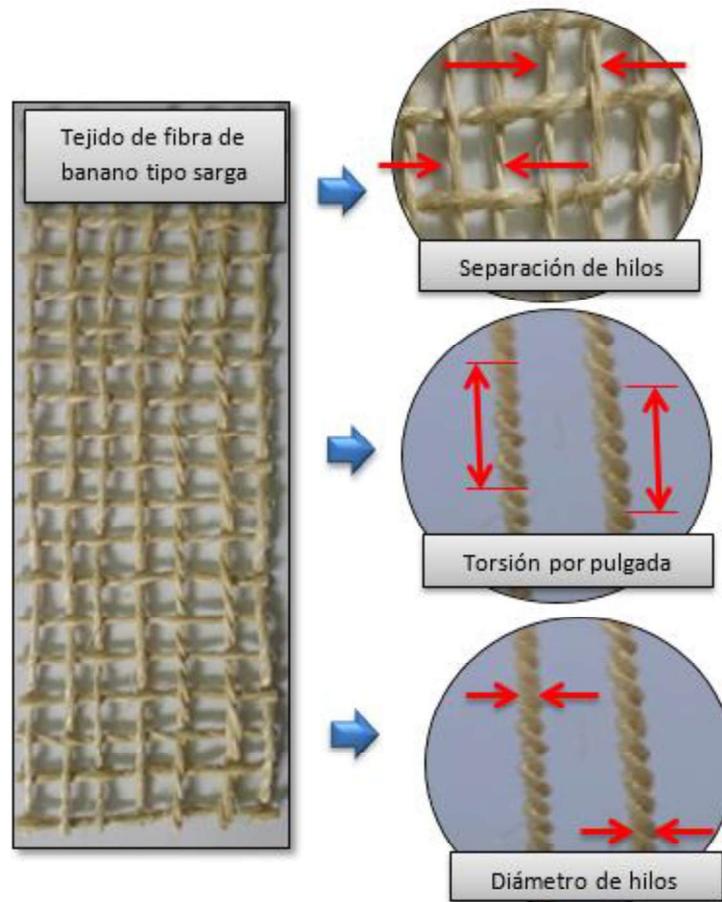


Figura 3.8. Tejido de fibra de banano para ensayo de tracción mediante norma D5035-11.

El tejido elaborado no soporta altas cargas de rotura, esto a pesar de estar compuesto de hilos de mayor diámetro en comparación a los hilos de tejidos de otros estudios previos.

En algunos de estos estudios se encontraron cargas de rotura del tejido de 314 N con un diámetro de hilo del 0.9 mm (Tamayo,2012) y en otra investigación la carga a la rotura es de 885.26 N con un diámetro promedio del hilo 0.5 mm (Cunalata,2019), estos resultados se observan en la Figura 3.9.

Las cargas máximas serán significativas al usar los tejidos como refuerzo y son reflejados en los esfuerzos máximos obtenidos al momento de elaborar el material compuesto en cada uno de los estudios respectivos.

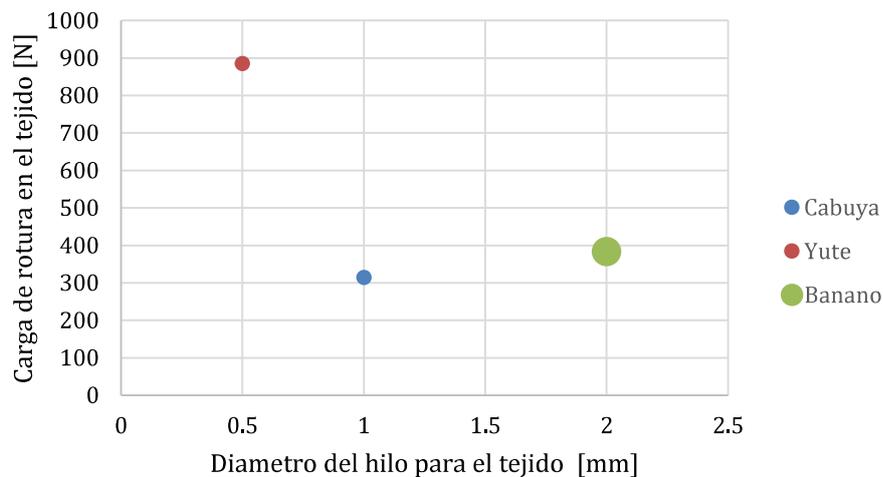


Figura 3.9. Carga de rotura para tejidos con fibra natural

3.2.2. Comparación de los compuestos reforzados con fibra

Finalmente se compara los resultados presentados en la Tabla 3.2 y 3.3 mediante un gráfico radial en donde se colocan las variables más importantes de los ensayos preliminares. Cabe señalar que la configuración que tiene más área en la figura representa el mejor tipo de material compuesto.

De la Figura 3.10 se observa un aumento del 48.04% en el área del material reforzado con fibra continua longitudinal tratada, con lo cual indica aumento en las características mecánicas con relación al compuesto reforzado con fibras no tratadas.

Mientras para la configuración con fibra corta tratada el aumento del área es del 12.42% con relación al compuesto reforzado con fibra cruda. Para estos compuestos no se puede apreciar ningún cambio significativo en las características mecánicas, con lo cual no es conveniente realizar el tratamiento superficial a las fibras usando esta configuración.

En general las propiedades mecánicas registran un aumento utilizando fibra tratada especialmente usándola de manera longitudinal. Aparte de conseguir unas fibras más limpias, blancas con baja humedad, tienen una mejor manipulación que ayuda en la elaboración de los hilos de fibra de banano para posteriormente conformar el tejido sarga con el cual se acerca al cumplimiento del objetivo del proyecto.

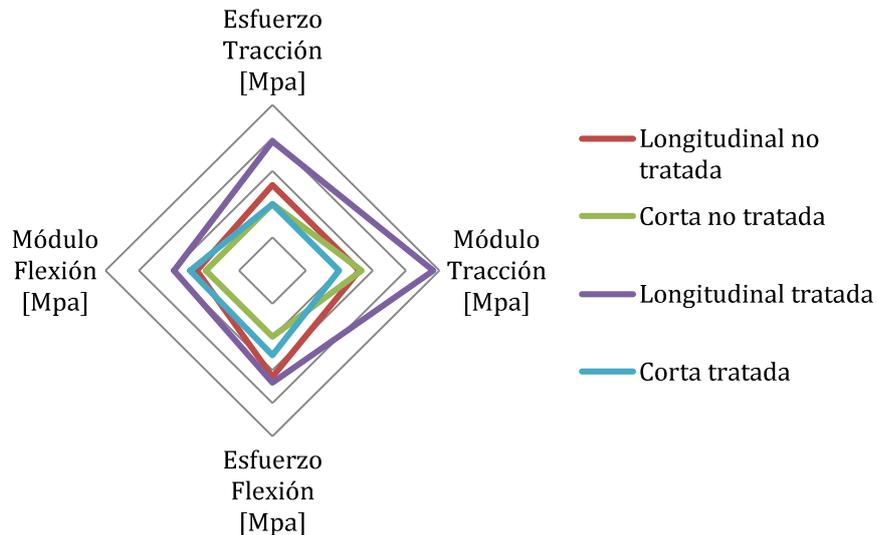


Figura 3.10. Esfuerzo máximo, módulo de elasticidad de las configuraciones con fibra corta y continua.

En síntesis, la buena distribución longitudinal del refuerzo para los materiales compuestos ayudó a conseguir buenos resultados. Si las fibras no se encuentran totalmente longitudinal van a perjudicar el comportamiento del material porque estas fibras mal direccionadas actuarán como un concentrador de esfuerzo.

Para los compuestos reforzados con fibra corta al azar se trató de obtener una distribución uniforme y aleatoria para conseguir un material compuesto cuasi-trópico. Al ser un proceso de conformado manual la distribución del refuerzo de banano no fue homogénea en el material compuesto, quedando partes sin rellenar u otras con mucha aglomeración.

3.2.3. Comparación de los compuestos reforzados con tejido

Los resultados de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad a tracción y flexión mostrados en las Tablas 3.4. y 3.5 se representan mediante un gráfico multiteje como se muestra en la Figura 3.11, este gráfico permite a simple vista determinar cuál compuesto reforzado con tejido presenta la mejor combinación de propiedades, tanto para tracción como para flexión.

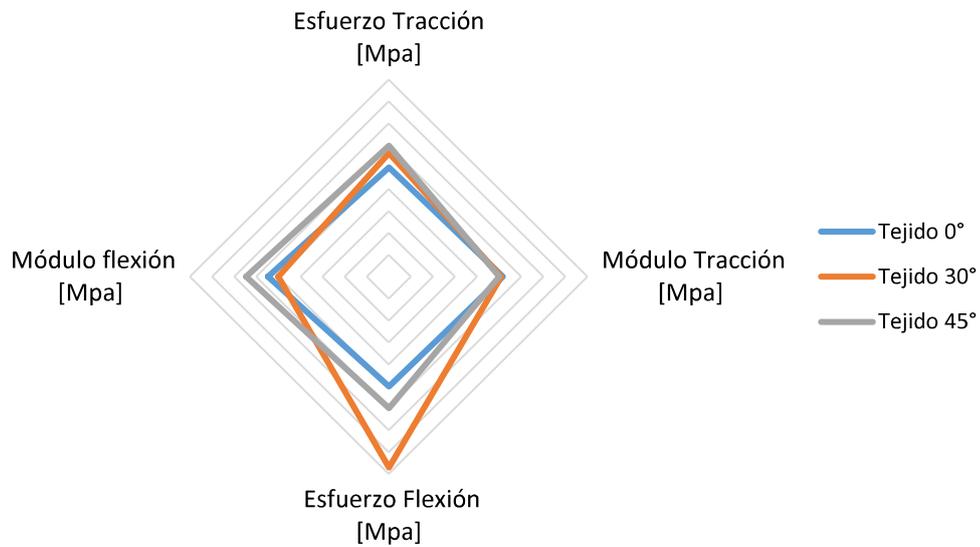


Figura 3.11. Esfuerzo máximo, módulo de elasticidad de las configuraciones con tejido.

De la Figura 3.11 se puede observar que el compuesto con fibra tejida orientada a 30° ocupa la mayor área del 29.85% en relación a los materiales compuestos con fibra tejida orientada a 0°. Mientras que los compuestos con fibra tejida orientada a 30° y 45° presentan una desviación 3 % en las áreas por tanto tendrán semejante comportamiento mecánico.

Debido al proceso de fabricación de las probetas del material compuesto, el poco tiempo de trabajo hasta que se gelifique la resina, no es suficiente para humedecer de manera completa al tejido, produciendo aire atrapado y la aparición de las porosidades en el compuesto.

Una de las principales razones para las bajas resistencias obtenidas es la distribución de los hilos que forman el tejido, estos no se encuentran en la dirección de la carga aplicada, provocando que el refuerzo actúe como concentrador de esfuerzo.

Otro inconveniente es el diámetro de los hilos, al ser hilos gruesos, hace que se dificulte la elaboración de un tejido más compacto y cada probeta contenga pocos hilos longitudinales, entre 2 y 3 hilos; es decir, hay poca superficie de refuerzo para soportar las cargas de tracción, provocando una mayor concentración de esfuerzos bajo carga.

3.2.4. Ensayo de impacto de los compuestos elaborados

El mejor comportamiento al impacto se encontró en el material reforzado con fibras cortas, ya que por su distribución aleatoria esta configuración absorbe de mejor manera la energía potencial asociado al dardo, es así que el área de rotura generado por el impacto es menor para esta configuración en relación a las demás probetas como se puede observar en la Figura 3.12.

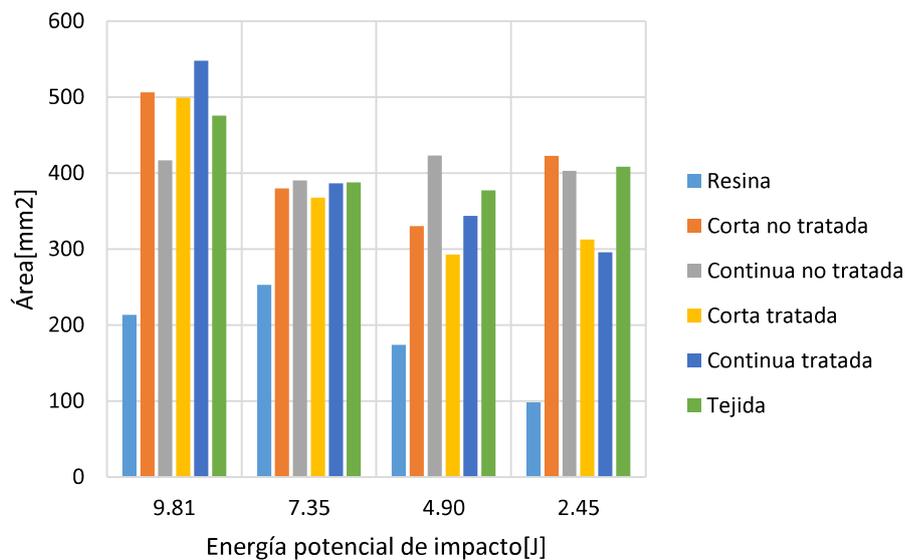


Figura 3.12. Diagrama área vs energía potencial de los diferentes compuestos elaborados.

Cabe indicar que, para este tipo de ensayo, las fibras tratadas presentan mejor resistencia al impacto en un pequeño porcentaje con relación a las probetas que son elaboradas con fibras no tratadas como se puede observar en la Figura 3.13. Este comportamiento también se reportó en el trabajo de (Culquichicon & Mendocilla, 2016) que al realizar el tratamiento de mercerización a la fibra de banano aumentó la resistencia del material en un alto valor de 37.07% con respecto a las fibras crudas sin tratamiento. Además, en el material compuesto reforzado con fibra tejida se observa un comportamiento uniforme lo que indica que una distribución más uniforme ayuda a obtener resultados más lineales.

Sin embargo, al utilizar las fibras de banano como refuerzo en el material compuesto existe una disminución considerable en la resistencia al impacto en comparación a la matriz de resina poliéster, algunos factores que intervinieron a esta reducción son los métodos de elaboración y adherencia fibra-matriz que serán evaluadas en la sección 3.2.4.

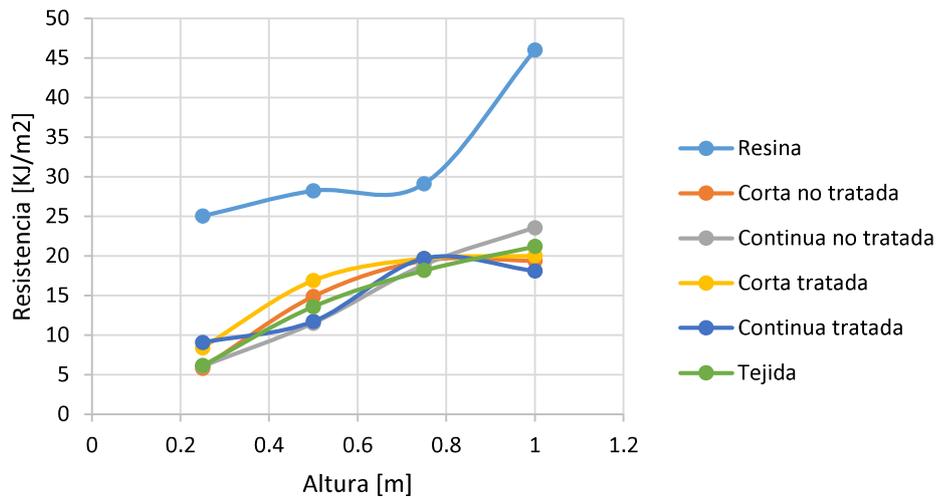


Figura 3.13. Diagrama resistencia - altura de los diferentes compuestos elaborados.

Recalcando que el aumento del refuerzo y el tratamiento superficial a las fibras promueven una mejor absorción de energía. Esto favorece a obtener una mejor resistencia al impacto, la cual no se obtuvo en los materiales reforzados con fibra cruda por su comportamiento hidrofílico, esto provoca que en la interfaz fibra-matriz se originen puntos de propagación de grietas, similares observaciones se encontraron en el estudio de (Balasuriya, Ye, Mai, & Wu, 2002).

3.2.5. Morfología de los compuestos elaborados

En esta sección se muestran microfografías de las diferentes configuraciones de compuestos elaborados en este proyecto, esto con el objetivo de observar de una manera clara las discontinuidades presentes y posibles causas que provocaron la baja resistencia de estos compuestos.

Por la reacción exotérmica de la resina la cual evapora la humedad contenidas en las fibras de banano, origina gran cantidad de poros al momento de la conformación del material compuesto. Además, presentan aglomeraciones de fibra y capas de impurezas o restos de células parenquimáticas como se observa en la Figura 3.14.

Todas estas discontinuidades pueden comportarse como concentradores de esfuerzos, originando fracturas que afectan al comportamiento del material por transferencia de carga no uniforme al realizarse cualquier tipo de ensayos mecánicos.

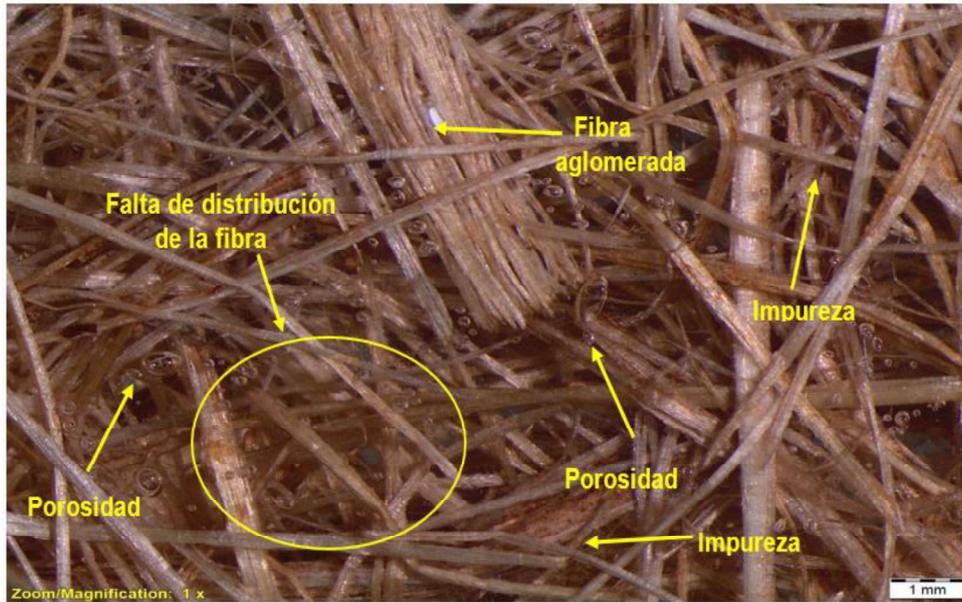


Figura 3.14. Microscopía del compuesto reforzado con fibra no tratada.

En la Figura 3.15. se puede observar una pobre humectación de la resina en las fibras de banano; debido a la existencia de fibras desprendidas. La mala adhesión en la interfaz que presenta el material compuesto reforzado con fibra no tratada produce un frente de grieta, donde se origina una fractura con un patrón radial. Después al propagarse la grieta, esta da origen a una topología más rugosa. Este comportamiento característico en los materiales frágiles también ha sido reportado en el estudio de (Rodríguez, 2013).

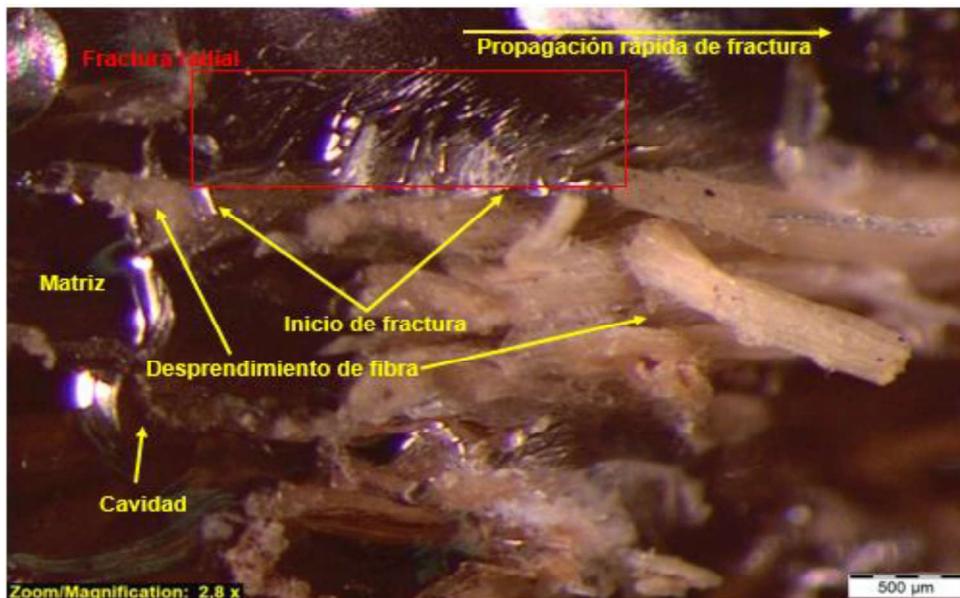


Figura 3.15. Microscopía del compuesto reforzado con fibra no tratada.

Después del tratamiento superficial a la fibra de banano se evidenció la eliminación de impurezas como cenizas, ceras, aceite natural que contenían las fibras crudas, además se aprecia fibras más secas con un color claro; de esta manera se logró disminuir el comportamiento hidrófilo de la fibra. Características físicas que también son registradas en la investigación de (Zhou Cheng y Jiang,2013) quienes indican que la superficie de la fibra es más rugosa por la eliminación de los constituyentes celulósico como la lignina, hemicelulosa y pectina, ayudando a mejorar el anclaje en la interfaz fibra-matriz.

En la Figura 3.16, debido a las características de las fibras, se observa la disminución de las porosidades e impurezas en un alto porcentaje en el material compuesto reforzado con fibra tratada. Cabe señalar que existen otros factores como cantidad de refuerzo y orientación que también influyen en el comportamiento mecánico de los materiales compuestos.

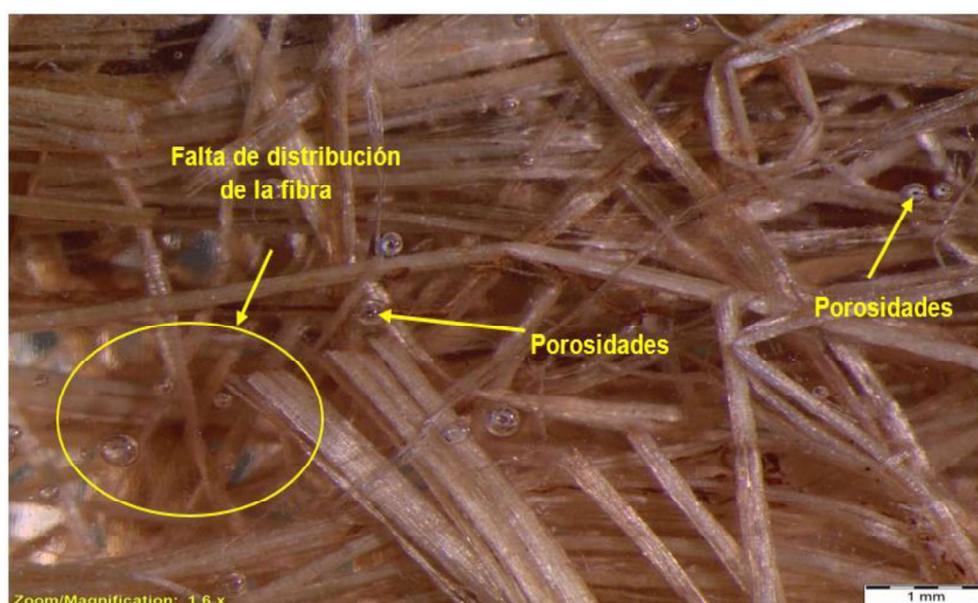


Figura 3.16. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tratada.

De la Figura 3.17 se observa una menor cantidad de fibras naturales desprendidas de la matriz. Por tal motivo se corrobora una mejor adherencia de la resina en la fibra de banano. Sin embargo, de manera similar al análisis de la Figura 3.15, el punto de inicio de la falla se produce desde la fibra desgarrada; formando un patrón de fractura radial, según la propagación, esta avanza formando una superficie rugosa hasta producir la rotura total del material. Por tal motivo, el tratar la fibra natural ayuda al material compuesto elaborado con fibra tratada de banano a obtener un mejor anclaje del refuerzo-matriz.

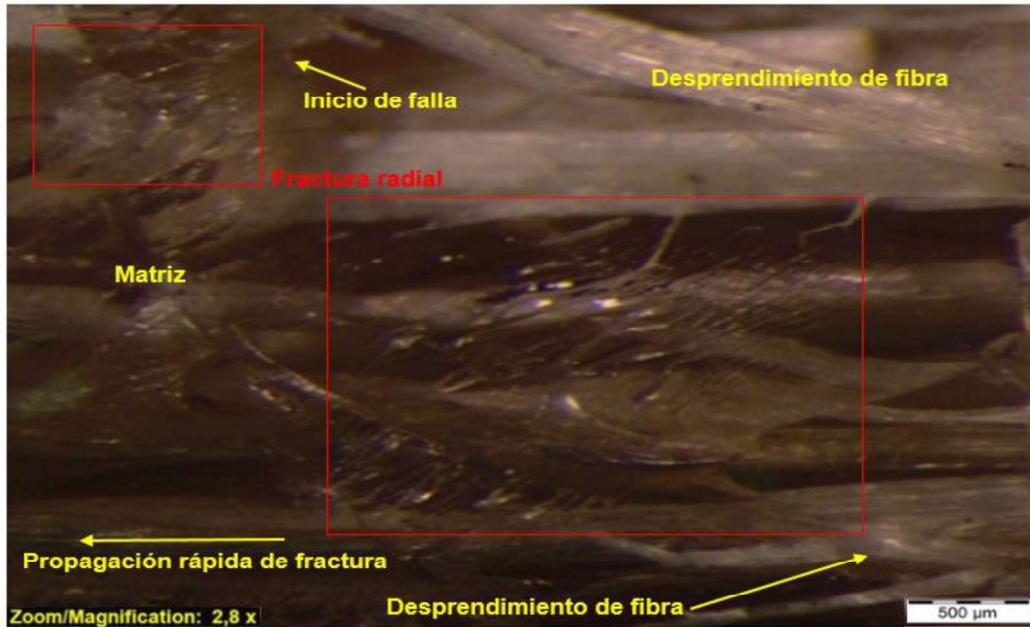


Figura 3.17. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tratada.

3.2.6. Morfología de los compuestos reforzados con tejido

En las Figuras 3.18 y 3.19 se muestran las micrografías del compuesto reforzado con tejido sarga. Aquí se puede observar la existencia de un mayor número de pequeñas porosidades superficiales y subsuperficiales en comparación con los compuestos reforzados con fibras cortas y longitudinales; estas porosidades se formaron debido a las inclusiones de aire que no pudieron escapar durante el curado, esto a pesar de aplicar una presión adecuada de moldeo.

La micrografía de la Figura 3.18 muestra la sección transversal del compuesto reforzado con tejido. Se puede apreciar claramente que el tejido no está tensionado adecuadamente, motivo por el cual las cargas no se transmiten de forma directa desde la matriz hacia el refuerzo. Es decir, las cargas que se aplican al material compuesto son soportadas en primera instancia y en mayor porcentaje por la matriz de resina.

La falta de torsión y el diámetro no uniforme del hilo provocan que exista una distribución no uniforme de los esfuerzos a través del tejido. Además, provocan la aparición de espacios irregulares entre las fibras. Si bien estos espacios son 'camino' que facilitan la distribución de la resina a través del interior del hilo, el escaso tiempo que se tiene antes que la resina alcance el estado de gel, provoca que esta no alcance a humectar completamente al hilo.

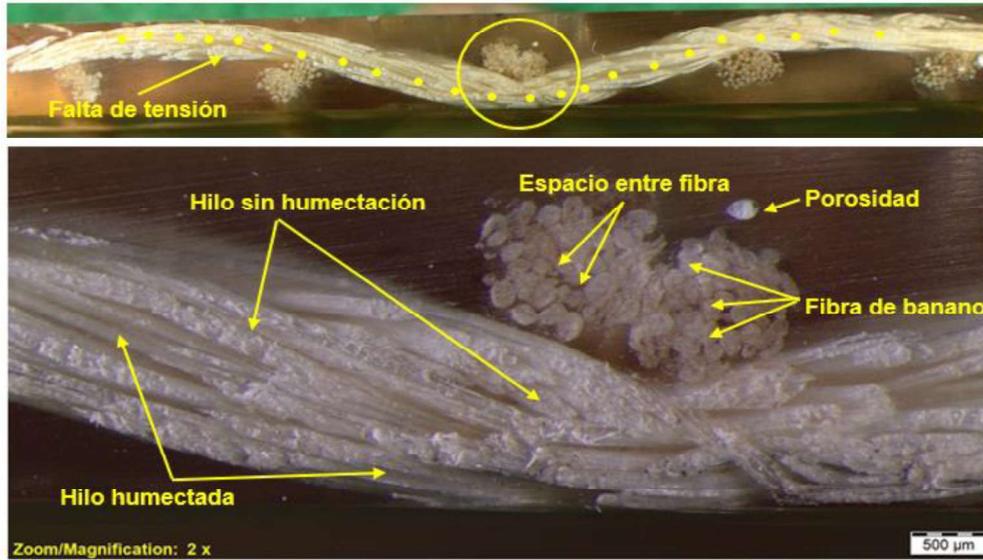


Figura 3.18. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tejida.

En la Figura 3.19 se puede apreciar que internamente no hay rastro de humectación de los hilos con la resina. En el material compuesto, el tejido utilizado como refuerzo actúa como cavidad interna, relleno o simplemente discontinuidad. Por tal motivo, los materiales compuestos elaborados con este tejido presentan bajos valores de resistencia en este proyecto de titulación.

El inicio de falla se origina en el interior del hilo, atravesando las fibras superficiales humectadas y produciendo desprendimiento de estas fibras, hasta llegar a la matriz en donde comienza la fractura radial. Comportamiento que es típico de un material frágil.

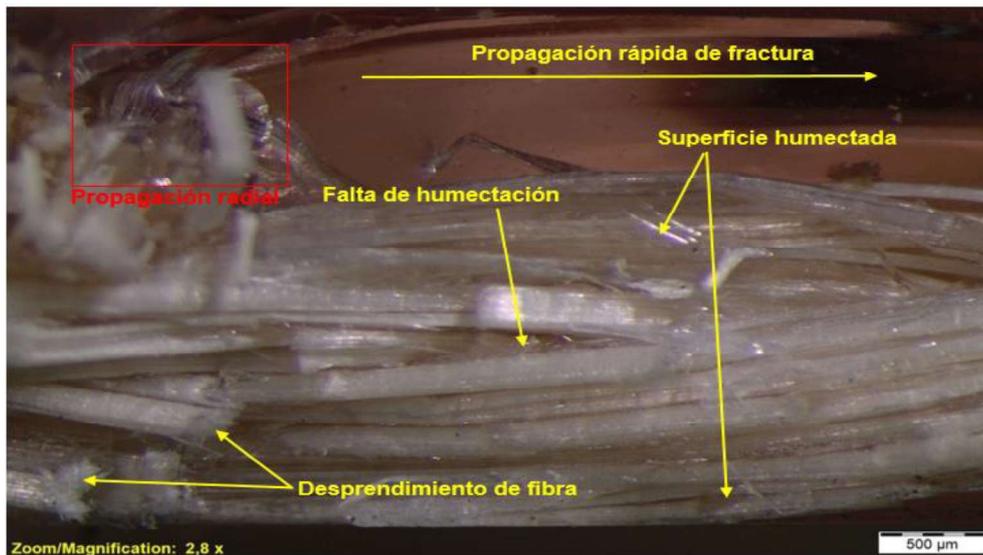


Figura 3.19. Microscopía del compuesto reforzado con fibra tejida.

3.3. Comparación del material compuesto desarrollado frente a otros materiales

En esta sección se comparan los resultados conseguidos del material compuesto matriz poliéster reforzado con fibra de banano. Con el fin de evaluar el comportamiento físico y mecánico de tracción, flexión e impacto de los resultados del presente estudio de titulación frente a otros compuestos estudiados en investigaciones anteriores.

3.3.1. Compuestos de matriz poliéster con diferentes refuerzos naturales

Se realizó una revisión bibliográfica para recopilar las distintas características mecánicas de los materiales que presenten condiciones aproximadas a las establecidas en esta investigación.

Según la Tabla comparativa 3.7, los materiales compuestos de configuración reforzada con fibra longitudinal y tejidas tienen características mecánicas superiores a los compuestos elaborados con fibra corta aleatoria.

Por otro lado, al comparar los compuestos reforzados con fibra tejida se puede observar que el material elaborado con tejido de cabuya presenta mejores propiedades que el tejido de banano. Resultado debido a que el tejido de cabuya tiene una mejor uniformidad además de ser obtenido mediante un proceso semiautomático. Adicionalmente se ha incluido un compuesto con fibra de yute precargada que presenta muy buenos resultados además de ser elaborado con baja fracción volumétrica.

Tabla 3.7. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster con diferentes refuerzos naturales.

Matriz	Refuerzo	Fracción en peso	Esfuerzo máximo a tracción [Mpa]	Esfuerzo máximo a flexión [Mpa]	Energía de impacto [KJ/m ²]	Referencia
Poliéster	Banano Continua longitudinal	10%	35.73	50.56	18.08 ^b	(Farinango & Moya, 2019)

Poliéster	Banano Tejido orientado a 30	20%	17.87	49.08	21.18 ^b	(Farinango & Moya, 2019)
Poliéster	Banano tratada corta al azar 3mm	10%	18.41	38.15	19.98	(Farinango & Moya, 2019)
Poliéster	Banano corta al azar	10%	12.84	25	6.08 ^a	(Ezeh, Onukwuli & Odera, 2016)
Poliéster	Banano corta al azar	20%	15.4	31.67	6.87 ^a	(Ezeh, Onukwuli & Odera, 2016)
Poliéster	Banano corta al azar	25%	43.5	92	10	(Chand & Fahim, 2008)
Poliéster	Banano corta al azar	40%	74	80	18	(Alavudeen et al, 2015)
Poliéster	Sisal corta al azar	25%	34.5	86.4	30	(Chand & Fahim, 2008)
Poliéster	Sisal unidireccional	40%	129	192	98	(Chand & Fahim, 2008)
Poliéster	Coco al azar	25%	14	31.2	11	(Chand & Fahim, 2008)

Poliéster	Coco unidireccional	30%	45	56	44	(Chand&Fahim,2008)
Poliéster	Bambú	16.23%	25.15	84.40	104.21 ^a	(Taborda et al,2018)
Poliéster	Vidrio	19.19%	38.42	106.62	461.03 ^a	(Taborda et al,2018)
Poliéster	Yute	22%	84	125	-	(Chand&Fahim,2005)
Poliéster	Tejido 0 cabuya	0.34/0.30*	67.7	69.8	-	(Tamayo,2012)
Poliéster	Tejido alternado cabuya	0.34/0.30*	60.6	76.3	-	(Tamayo,2012)
Poliéster	Tejido plano de yute precargado	4.78* 9V	34.64	61.86	-	(Cunalata&Jiménez,2019)

^a Impacto izod [J/m]. ^b Impacto evaluado a 1 metro de altura. * Porcentaje en volumen

En la Figura 3.20 se muestran los valores de resistencia a la tracción vs resistencia a la flexión de los distintos materiales compuestos matriz poliéster reforzado con distintas fibras naturales con el fin de observar la resistencia combinada que cada compuesto presenta.

Matriz poliéster-refuerzo natural

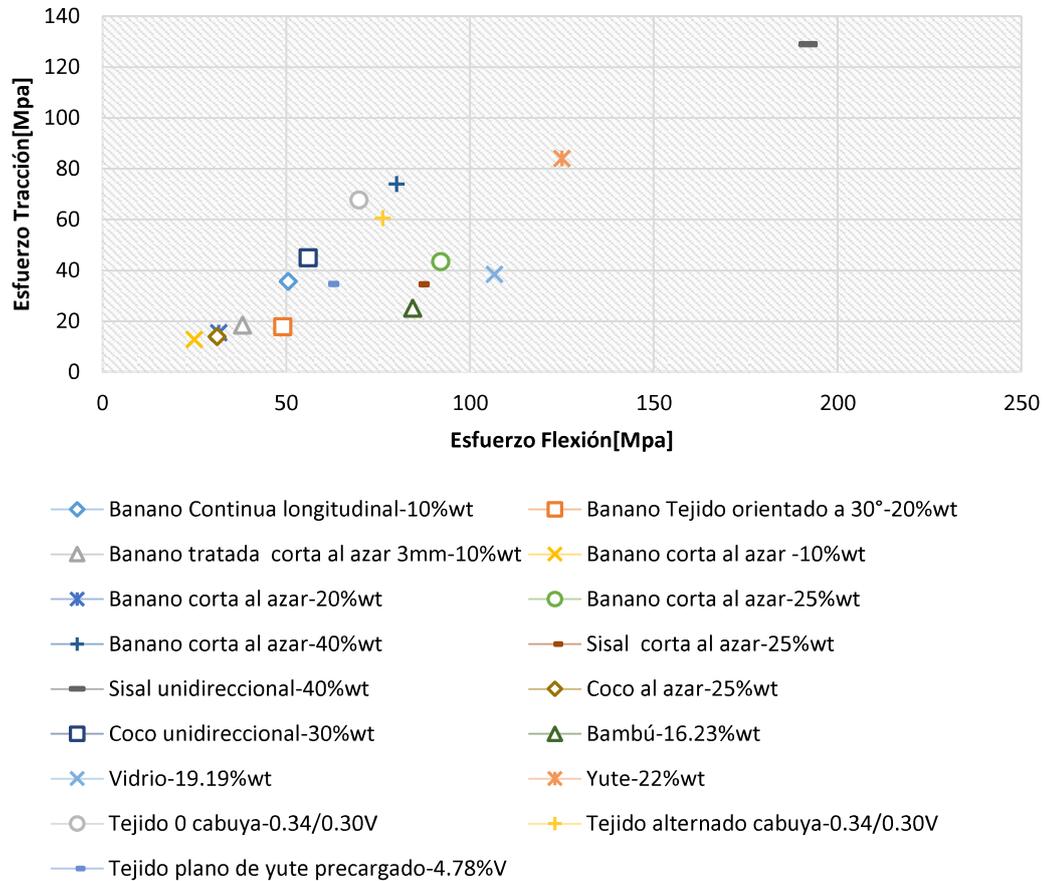


Figura 3.20. Resistencia combinada de tracción y flexión de materiales compuestos matriz poliéster reforzado con distintas fibras naturales.

3.3.2. Compuestos de diferente matriz reforzados con fibra de banano

El objetivo es conocer relativamente las características que pueden presentar los compuestos reforzados con fibra de banano en distintas matrices. La Tabla 3.8 muestra toda la recopilación de las propiedades mecánicas de los materiales. Donde se observa que al usar resina epóxica como matriz, las propiedades finales del compuesto son relativamente más bajas en comparación a los resultados obtenidos con la matriz de poliéster.

Sin embargo, aquí se puede apreciar claramente que a menor ángulo de orientación (0°, 30° y 45°) el esfuerzo tiende a disminuir (Callister, 2016). Lo que en el presente estudio no se obtuvo el mismo comportamiento.

Tabla 3.8. Propiedades mecánicas de compuestos de diferente matriz reforzados con fibra de banano.

Matriz	Refuerzo	Fracción en peso	Esfuerzo máximo a tracción [Mpa]	Esfuerzo máximo a flexión [Mpa]	Energía de impacto [KJ/m2]	Referencia
Resina epoxi	Banano corta al azar de 3mm	45%	24.70	45.362	0.30 ^c	(Sathish et al,2015)
Resina epoxi	Banano corta al azar de 30 mm	40%	45.57	73.58	6.95	(Maleque& Belal,2006)
Resina epoxi	Banano y sisal corta al azar de 3mm	22.5%	18.796	39.942	0.35 °	(Sathish et al,2015)
Resina epoxi	Banano orientado a 0°	30%	15.21	19.83	-	(Asabe&Bhosale,2018)
Resina epoxi	Banano orientado a 30°	30%	6.95	14.72	-	(Asabe&Bhosale,2018)
Resina epoxi	Banano orientado a 90°	30%	5.11	10.99	-	(Asabe&Bhosale,2018)
Polipropileno	Banano tejida sarga	30%	33.27	43.76		(Kamal&Faizzaty,2017)
Polipropileno	Banano continua longitudinal	30%	66.26	33.72	-	(Kamal&Faizzaty,2017)

^c Energía de impacto [J]

En la Figura 3.21 se muestran los valores de resistencia a la tracción vs resistencia a la flexión de los distintos materiales compuestos de distinto tipo de matriz reforzado con fibras naturales de banano con el fin de observar la resistencia combinada que cada compuesto presenta.

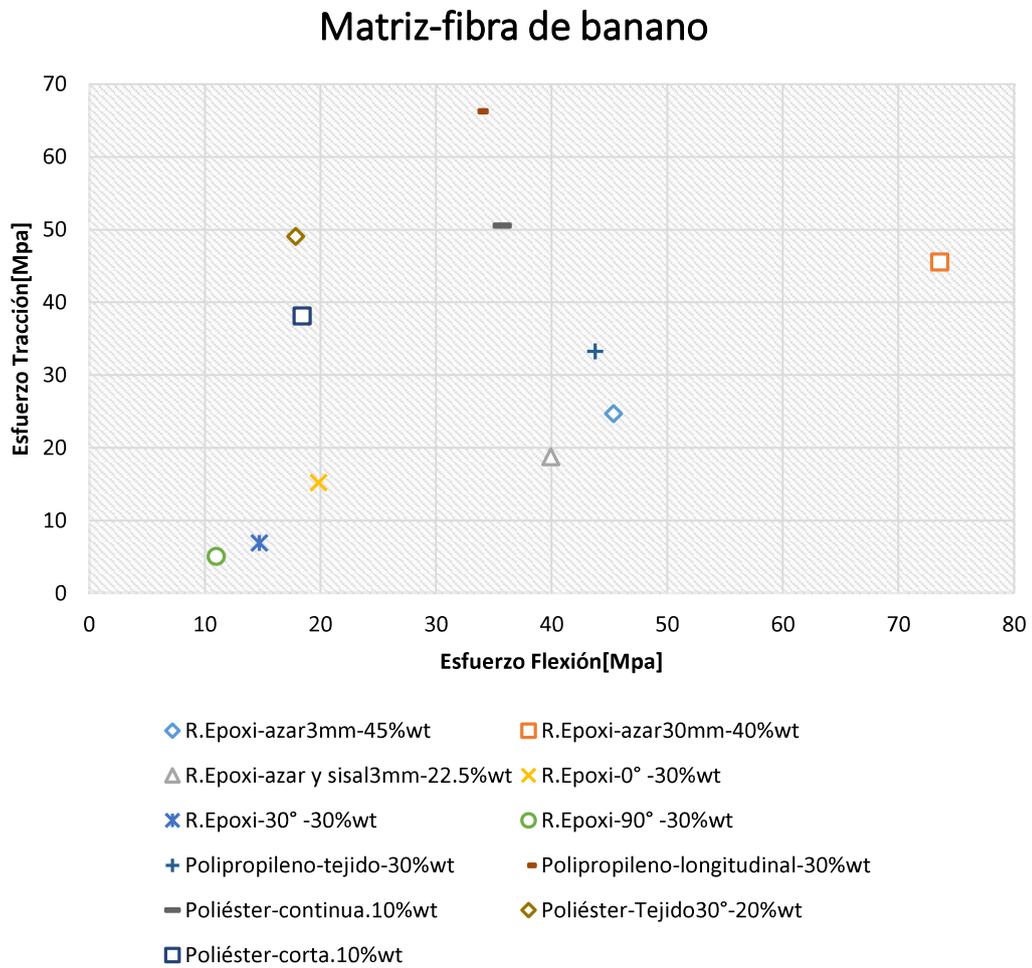


Figura 3.21. Resistencia combinada de tracción y flexión de materiales compuestos diferentes matrices poliéster reforzado con fibra de banano.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se obtuvo y caracterizó el material compuesto reforzado con fibra tejida de banano satisfactoriamente, cumpliendo con los objetivos planteados en esta investigación.

Se logró minimizar los defectos en las probetas elaboradas utilizando cantidades de 10% estireno, 0.5% de octoato de cobalto y 2.5% de catalizador MEKP para el curado de la resina. Sin embargo, con estos porcentajes, el tiempo de trabajo aproximado antes que la resina entre en la etapa de gelificación es de 7 min, lo cual es un tiempo insuficiente para lograr humectar los refuerzos adecuadamente.

La utilización de calor sobre el molde macho-hembra ayuda a obtener probetas curadas al 100%, con bajas cantidades de defectos superficiales además se encontró tiempo de solidificación de las probetas fue de 120 min para todas las probetas del compuesto.

El tratamiento superficial empleado a las fibras de banano permitió hilar con mayor facilidad debido a que se eliminó impurezas haciendo a la fibra más manejable, esto permitió una significativa reducción en el tiempo, energía y mano de obra para la elaboración del tejido.

Se observa una mejora en la interfaz fibra-matriz al tratar la fibra de banano, sin embargo, debido a la elaboración artesanal del refuerzo tejido para material compuesto no se obtuvo una correcta humectación debido al grosor y la torsión del hilo. Por tal motivo el refuerzo tejido se comportó como relleno; el cual redujo las características mecánicas del material compuesto.

La falta de uniformidad en la distribución de los refuerzos tejidos en el material compuesto originó que las cargas aplicadas al material sean soportadas en mayor porcentaje por la matriz de resina poliéster.

La incorporación del tejido sarga a diferentes orientaciones como refuerzo del material compuesto, no mejoró las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto. Esto principalmente debido al número de hilos integrados en las probetas, falta de torsión, diámetro no uniforme de los hilos, y pobre humectación del tejido.

El compuesto reforzado con fibra tratada orientada longitudinalmente es la única configuración de los ensayos preliminares que presentó buenos resultados a tracción con un valor a la resistencia de 35.73 MPa, el cual representa un incremento del 29.08%; además ofreció el mayor módulo de elasticidad con 1304.84 Mpa, esto registro un aumento

del 69.48% respecto a la matriz de resina poliéster.

El material compuesto reforzado con fibra tejida orientada a 45° es la mejor configuración a tracción el cual obtuvo una resistencia de 18.93 Mpa, obtuvo incrementos del 16.32% y 5.59% en comparación al tejido orientada a 0° y 30° respectivamente. Sin embargo, en comparación al compuesto reforzado con fibra continua longitudinal, esta presentó una disminución del 47.01%.

Se obtuvo una disminución del esfuerzo máximo a flexión en los materiales compuestos reforzados con tejido orientados 0°,30° y 45° en relación a la matriz de resina poliéster. El mayor esfuerzo lo obtuvo el compuesto orientado a 30° con una resistencia de 49.08 Mpa representando una reducción del 32.44%. Sin embargo, el módulo elástico se incrementó solo para la probeta con tejido orientada a 45° en donde el aumento fue de 17.63%.

El área de impacto del material compuesto con fibras cortas tratadas es menor que las áreas de los compuestos con fibra continua y con tejido, esto debido a que estas probetas tienen mayor comportamiento isotrópico; las cuales presentaron las mejores resistencias al impacto.

Los compuestos reforzados con fibra de banano desarrollados en este proyecto presentan en general propiedades mecánicas inferiores en comparación a los materiales compuestos reforzados con diferentes fibras naturales como las de yute, cabuya, coco, bambú y sisal analizados en estudios anteriores.

4.2. Recomendaciones

Disminuir el porcentaje de catalizador MEKP para lograr obtener un mayor tiempo de trabajo y así poder humectar de mejor manera el refuerzo que se utilice.

Se recomienda investigar el comportamiento de los compuestos reforzados con tejido de fibra de banano cuando son pre tensionados biaxialmente.

Estudiar el efecto que causa en las propiedades mecánicas, la incorporación adicional de otro tipo de fibra vegetal o de vidrio en los compuestos elaborados en este proyecto.

Se recomienda realizar un estudio empleando el tejido basket, ya que con este tipo de tejido se reduce la separación entre hilos logrando un tejido más compacto lo que posiblemente mejoraría las propiedades mecánicas del material compuesto.

Buscar métodos de manufactura eficientes para la elaboración del hilado y tejido, esto con el objetivo de obtener hilos uniformes de menor diámetro y un tejido más compacto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tecnología de plásticos. (2011). Moldeo por compresión. Retrieved from <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-compresion.html>
- [2] Mohanty, M. M. (2009). Natural fibers, biopolimers and biocomposites. Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
- [3] Besednjak, A. (2005). Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. Barcelona: UPC.
- [4] Bhatnagar, R., Gupta, G., & Yadav, S. (2015, Mayo). A Review on Composition and Properties of Banana Fibers. International Journal of Scientific & Engineering Research.
- [5] Blanco, M. L. (2008). Papel de raquis de banano en Costa Rica: historia y aspectos técnicos, periodo de 1976 a 2002. Costa Rica: UCR.
- [6] CALVOSEALING. (n.d.). Clasificación de fibras. Barcelona, España: CALVOSEALING. Retrieved from http://calvosealing.com/sites/default/files/clasificacion_de_fibras.pdf
- [7] Mancía, M. (2006). Las plantas de fibra. Retrieved from [http://www.beisa.dk/Publications/BEISABook pdfer/Capitulo 23.pdf](http://www.beisa.dk/Publications/BEISABook%20pdf/Capitulo%2023.pdf)
- [8] Delgado, F. (2012). Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzado con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros. Quito, Ecuador: Tesis EPN.
- [9] Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). (2006). Balance de Alimentos.
- [10] Explored. (2000, Marzo 21). Explored . Retrieved from <http://hoy.tawsa.com/noticias-ecuador/25-fibras-vegetales-son-el-potencial-del-ecuador-5688.html>
- [11] Fibrenamics. (n.d.). Retrieved from <https://www.web.fibrenamics.com/es/conocimiento/las-fibras/fibras-naturales/>
- [12] Groover, M. P. (1997). Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. Prentice Hall.
- [13] Guerrero, V. H. (2011). Nuevos Materiales: Aplicaciones estructurales e industriales. Quito: imprefepp.
- [14] Kim, J. (1998). Engineered interfaces in fiber reinforced composite. Elsevier Science, 13.

- [15] Levy, F. (2006). *Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia*. 1ra. ed. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher.
- [16] Lu, Y., & Sun, Q. (2012). Fabrication of mesoporous lignocellulose aerogels from wood via cyclic liquid nitrogen freezing–thawing in ionic liquid solution. *Journal of Materials Chemistry*.
- [17] Miravete, A. (2012). *Materiales Compuestos*. Barcelona: Reverté.
- [18] Muscio, E. (2018, Marzo 26). Va de fibras. Retrieved from <http://eugeniamuscio.blogspot.com/2018/03/tejidos-con-fibra-de-banano-en-ecuador.html>
- [19] Páez, J. C. (2007, Junio). Obtención de compuestos de polidropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión. Quito, Ecuador: Tesis EPN.
- [20] Pickering, k. (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Estados Unidos: Woodhead Publishing Limited.
- [21] Rajesh, k. (2015). Free vibration characteristics of banana/sisal natural fibers reinforced hybrid polymer composite beam. *Science direct*, 1055-1059.
- [22] Reynoso, S. (2019). *Todo en polímeros-moldeo por compresión*. Mexico: Revista ambiente plástico.
- [23] Science Photo Lybray. (2011, Noviembre). Science photo lybray. Retrieved from http://www.sciencephoto.com/image/10002/530wm/A8500256-Reinforced_
- [24] Seymour, R. B., & Carraher, C. E. (2002). *Introducción a la química de los polímeros*. Barcelona: Reverté.
- [25] Torres, A. E., & Vera, A. J. (2015). Análisis de la utilización del tallo del banano como fuente de fibra, para potencializar la producción de artesanías del cantón el triunfo y su futura exportación. Guayaquil, Ecuador: Tesis UG.
- [26] Cunalata, F., & Jiménez. (2019). Caracterización de un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute precargada mediante moldeo por compresión. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
- [27] Taborda, J., et al. (2017). Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio. *DYNA*, 84(202), pp 35-41.

- [28] E.M.Ezeh, O.D.Onukwuli and R.S.Odera. (2016). Development of banana peduncle fibre reinforced polyester composite for structural applications. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1119-8109.
- [29] Tamayo,N.(2012).Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación.Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
- [30] Chand,N,Fahim,N.(2008).Tribology of natural fiber composite.Woodhead publishing.
- Sathish S, Murugesan C K, Ramkumar R. (2015). Study of Mechanical Characteristics on Hybrid Composites Using Sisal Fiber and Banana Fiber. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 3, 2321-9653.
- [31] Asabe,B,Bhosale S.B. (2018). Development and Analysis of Natural Banana Fiber Composite. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5, 1384-1386.
- [32] Kamal,A,Faizzaty,B. (2017). Effects of Fibre Configuration on Mechanical Properties of Banana Fibre/PP/MAPP Natural Fibre Reinforced Polymer Composite. *ScienceDirect*, 1, 573-580.
- [33] Maleque,M,Belal F.(2006). The mechanical properties of pseudo-stem banana fiber reinforced epoxy composite. *The Arabian Journal for Science and Engineering*,32(2B) 359-364.
- [34] Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Molera Solà, P., & Ballesteros, N. S. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales (Vol. 1)*. Reverté.
- [35] Culquichicon, L., & Mendocilla, H. (2016). Efecto del porcentaje en peso de fibra de pseudotallo de plátano y d ellos tratamientos de mercerización y silanización sobre la resistencia al impacto de un compuesto de matriz poliéster.

ANEXOS

Anexo I. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión de la matriz de resina poliéster.....	78
Anexo II. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal tratada.....	81
Anexo III. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada.....	84
Anexo IV. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra corta tratada	87
Anexo V. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra corta no tratada	90
Anexo VI. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°	93
Anexo VII. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientada a 30°	96
Anexo VIII. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientada a 45°	99
Anexo IX. Ficha técnica de la resina poliéster.....	102
Anexo X. Ensayo de tensión del tejido tipo sarga	103
Anexo XI. Características del hilo de fibra de banano	104
Anexo XII. Codificación del tipo de falla para ensayos de tracción y flexión.....	105
Anexo XIII. Probetas de material compuesto después del ensayo de impacto mediante caída de dardo.....	106

Anexo I. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión de la matriz de resina poliéster.

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla I.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas de resina poliéster insaturada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura I.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas de resina, así mismo en la Figura I.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla I.1. Propiedades mecánicas a tracción de la matriz de resina poliéster. (T.R.)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	25.46	2.70	944.39	MGM
2	27.69	3.37	822.30	OMV
3	24.96	3.15	793.56	OMV
4	25.51	3.88	655.96	MWB
5	21.40	3.37	633.37	LGT
Promedio	25.00	3.29	769.92	
S.D.	2.27	0.43	127.84	
C.V.	9.09	13.02	16.60	

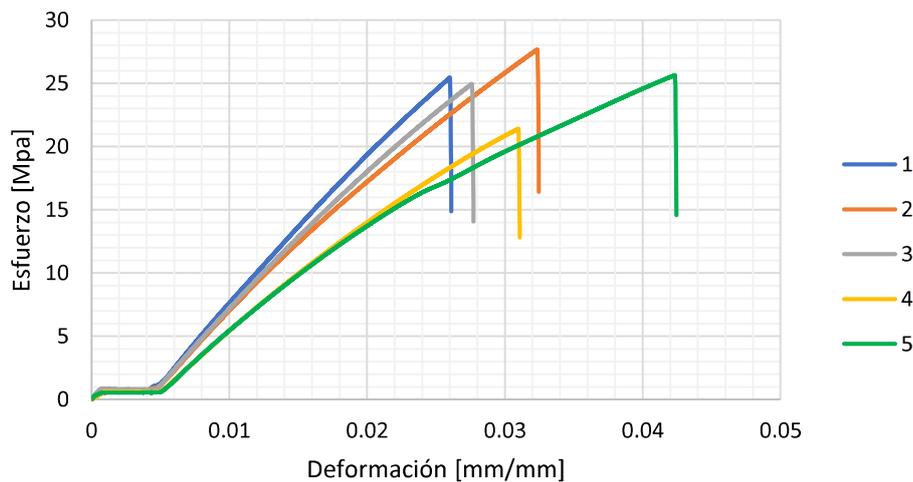


Figura I.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción de la matriz de resina poliéster.



Figura I.2. Probetas de resina poliéster ensayadas a tracción.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla I.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas de resina poliéster insaturada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura I.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas de resina, así mismo en la Figura I.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla I.2. Propiedades mecánicas a flexión de la matriz de resina poliéster.

Probetas de resina poliéster (F.R.)				
Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	60.98	2.81	2661.43	M(TC)LV
2	69.76	3.08	2979.47	M(TC)AV
3	68.45	2.70	3143.04	M(TC)AL
4	72.65	3.82	2845.89	M(TC)LV
5	67.76	3.18	2864.17	M(TC)LV
Promedio	67.92	3.12	2898.80	
S.D.	4.31	0.44	177.84	
C.V.	6.34	14.05	6.13	

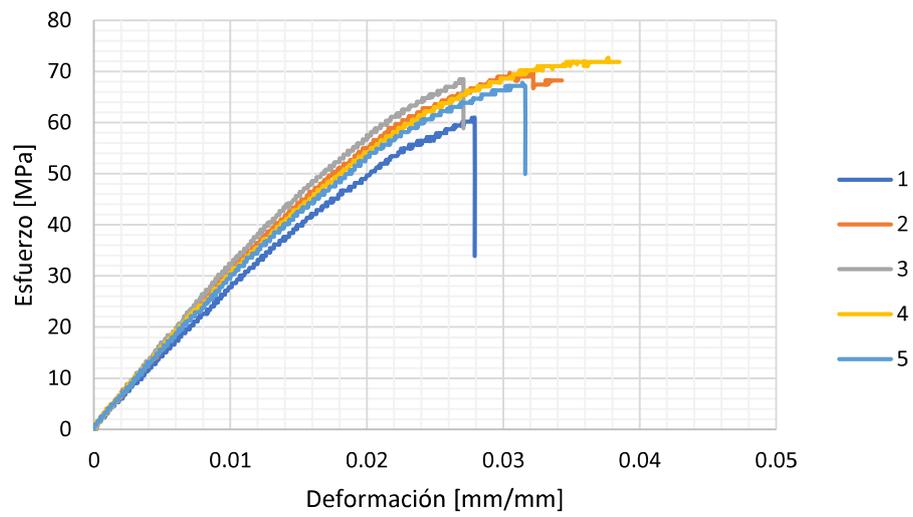


Figura I.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión de la matriz de resina poliéster.

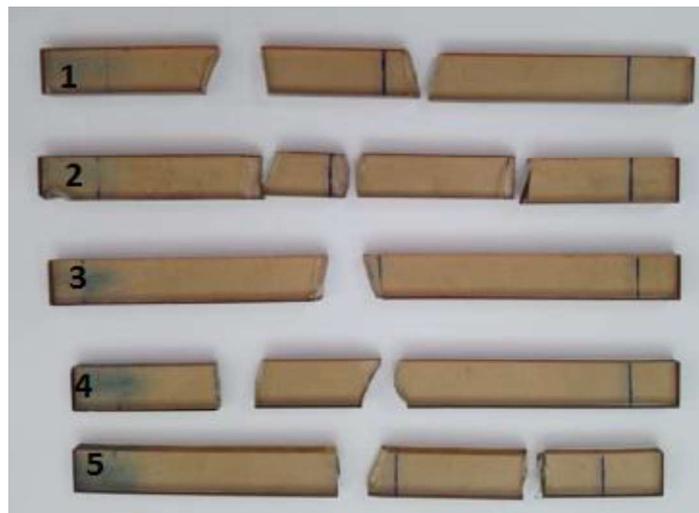


Figura I.4. Probetas de resina poliéster ensayadas a flexión.

Anexo I. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal tratada

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla II.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura II.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura II.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla II.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal tratada. (T.10%FT)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	28.41	1.81	1570.06	AGB
2	31.07	3.84	808.25	LWT
3	35.73	2.33	1536.19	MWT
4	21.08	1.89	1114.93	AGT
Promedio	31.74	2.47	1257.36	
S.D.	16.15	0.95	364.02	
C.V.	50.90	38.38	28.95	

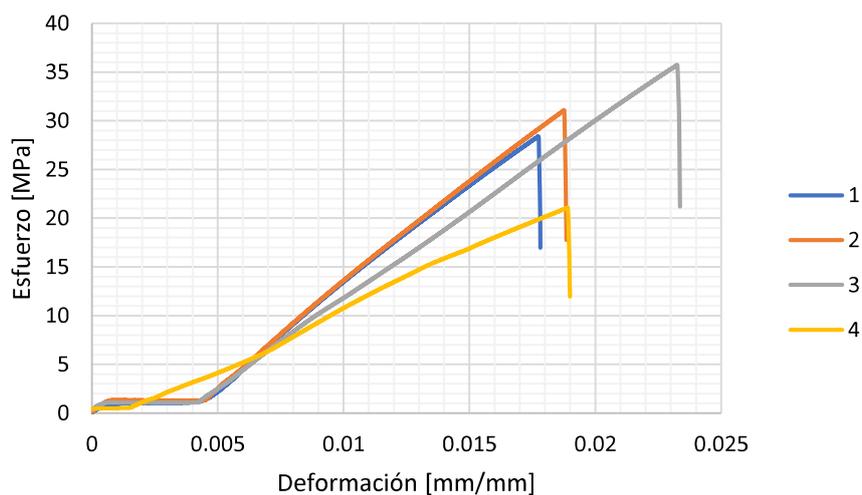


Figura II.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra continúa longitudinal tratada.



Figura II.2. Probeta ensayada a tracción del compuesto reforzado con fibra longitudinal tratada.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla II.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura II.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura II.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla II.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal tratada. (F.10%FT)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	47.52	1.47	3477.80	M(TC)AR
2	50.56	1.43	3878.01	M(TC)AL
3	46.23	1.36	3556.91	M(TC)LR
4	46.60	1.34	3749.77	M(TC)AR
5	49.65	1.51	3714.85	M(TC)AR
Promedio	48.11	1.42	3675.47	
S.D.	1.91	0.07	159.08	
C.V.	3.96	5.06	4.33	

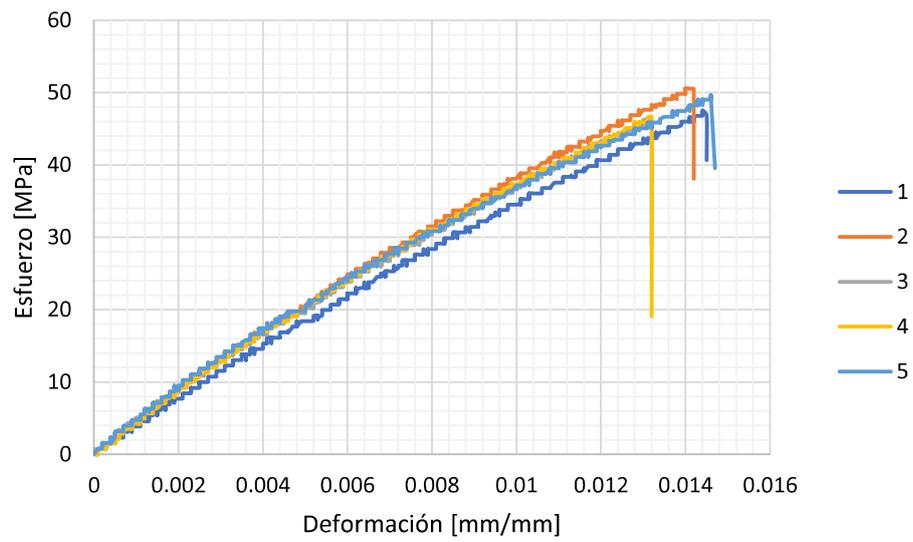


Figura II.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra continua longitudinal tratada.



Figura II.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal tratada.

Anexo II. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla III.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal no tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura III.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura III.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla III.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada. (T.10%FNT)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	20.77	2.68	773.38	AGT
2	19.31	2.25	858.55	LGT
3	21.46	3.45	622.54	AWT
4	23.17	2.82	820.42	AGM
5	23.59	5.36	440.34	LWT
Promedio	21.66	3.31	703.04	
S.D.	1.76	1.22	172.05	
C.V.	8.12	36.88	24.47	

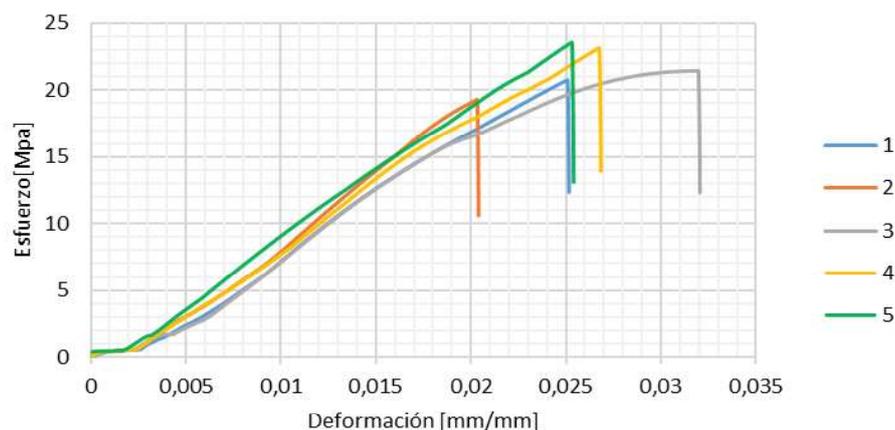


Figura III.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra continua longitudinal no tratada.



Figura III.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla III.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra continúa longitudinal no tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura III.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura III.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla III.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada. (F.10%FNT)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	46.14	1.72	2787.53	M(TC)LV
2	40.47	1.49	2812.08	M(TC)AR
3	47.88	1.85	2758.95	M(TC)AL
4	34.58	1.21	2912.27	M(TC)AL
5	37.09	1.29	2938.49	M(TC)LV
Promedio	41.23	1.51	2841.86	
S.D.	5.71	0.27	79.07	
C.V.	13.84	18.07	2.78	

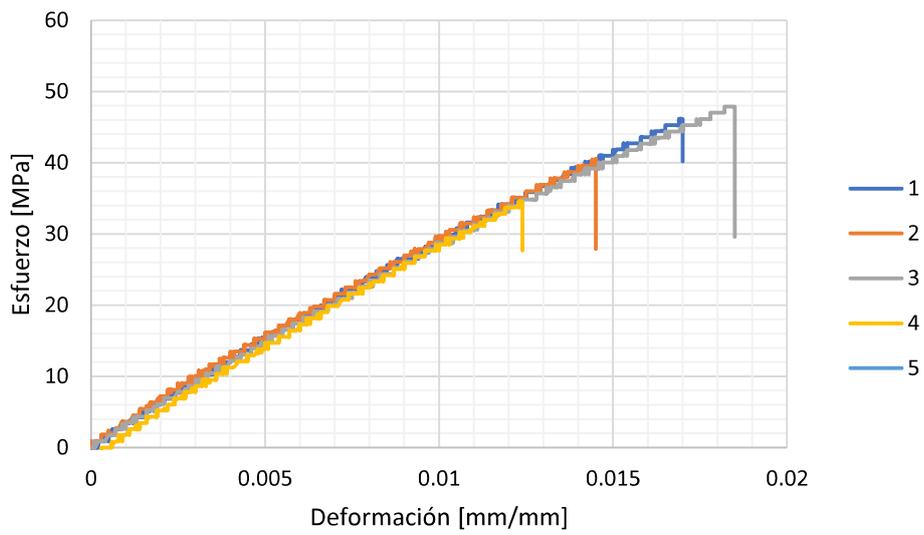


Figura III.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra continua longitudinal no tratada.



Figura III.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con fibra continua longitudinal no tratada.

Anexo III. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra corta tratada

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla IV.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra corta tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura IV.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura IV.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla IV.1 Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con fibra corta tratada. (T.10%F3T)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	15.20	2.07	734.37	LGM
2	16.01	4.56	351.09	AGM
3	18.33	2.25	815.62	AGT
4	13.80	1.82	758.85	LGM
Promedio	15.84	2.68	664.98	
S.D.	1.90	1.27	212.01	
C.V.	11.98	47.45	31.88	

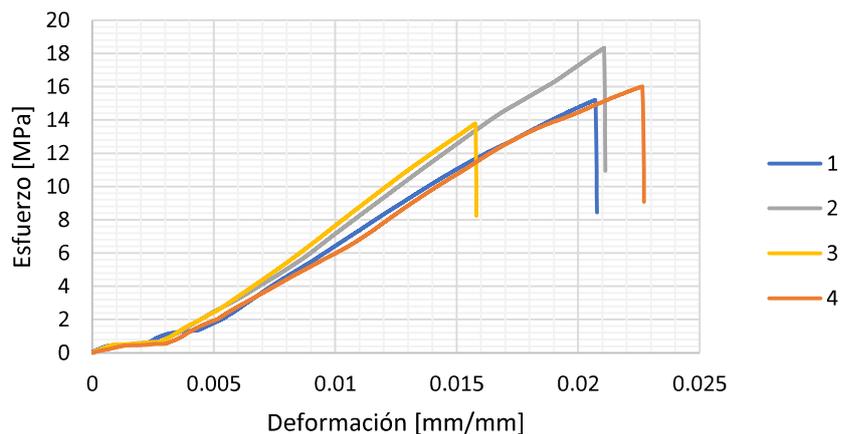


Figura IV.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra corta tratada.



Figura IV.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con fibra corta tratada.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla IV.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra corta tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura IV.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura IV.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla IV.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con fibra corta tratada. (F.10%F3T)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	31.37	1.02	3081.47	M(TC)AR
2	36.03	1.23	3148.51	M(TC)LR
3	38.15	1.33	2954.19	M(TC)LL
4	34.52	1.15	3049.79	M(TC)AL
5	32.79	1.02	3330.54	M(TC)AM
Promedio	34.57	1.15	3112.90	
S.D.	2.66	0.13	140.35	
C.V.	7.70	11.71	4.51	

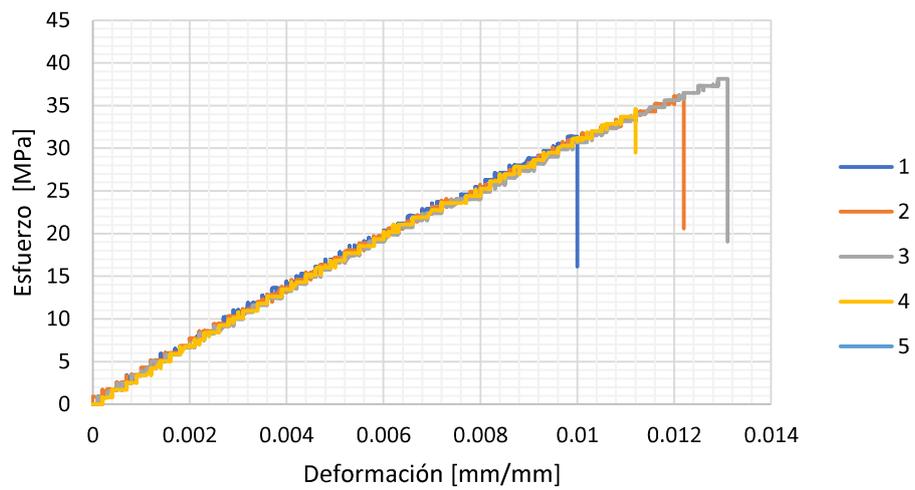


Figura IV.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra corta tratada.



Figura IV.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con fibra corta tratada.

Anexo IV. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con fibra corta no tratada

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla V.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra corta no tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura V.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura V.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla V.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con fibra corta no tratada. (F.10%F3T)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	16.11	2.19	735.57	LGB
2	13.72	1.82	753.28	LWB
3	18.41	2.46	748.35	MGM
4	15.16	2.27	667.16	AGM
Promedio	15.85	2.19	726.09	
S.D.	1.97	0.27	39.99	
C.V.	12.42	12.26	5.51	

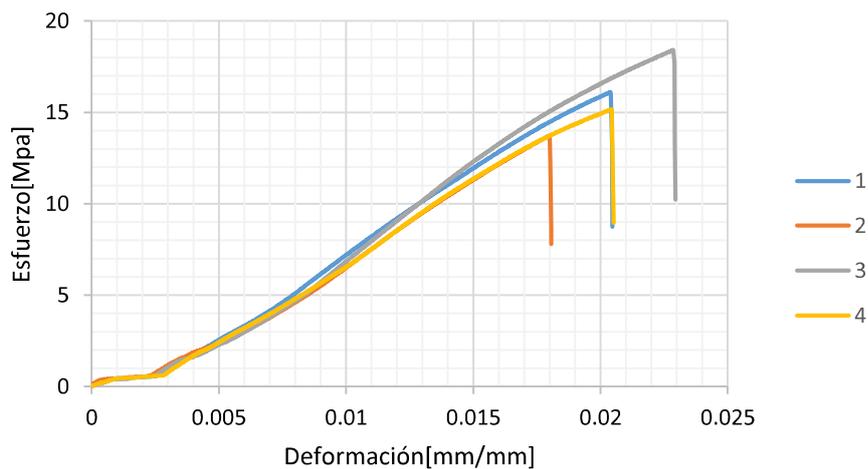


Figura V.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con fibra corta no tratada.



Figura V.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con fibra corta no tratada.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla V.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra corta no tratada, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura V.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura V.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla V.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con fibra corta no tratada. (F.10%F3NT)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	28.49	1.20	2454.4	M(TC)AM
2	27.62	1.20	2488.76	M(TC)LR
3	29.84	1.24	2496.63	M(TC)LL
4	29.61	1.14	2704.69	M(TC)LR
5	26.33	1.03	2575.15	M(TC)LR
Promedio	28.38	1.16	2543.93	
S.D.	1.45	0.08	100.14	
C.V.	5.12	7.05	3.94	

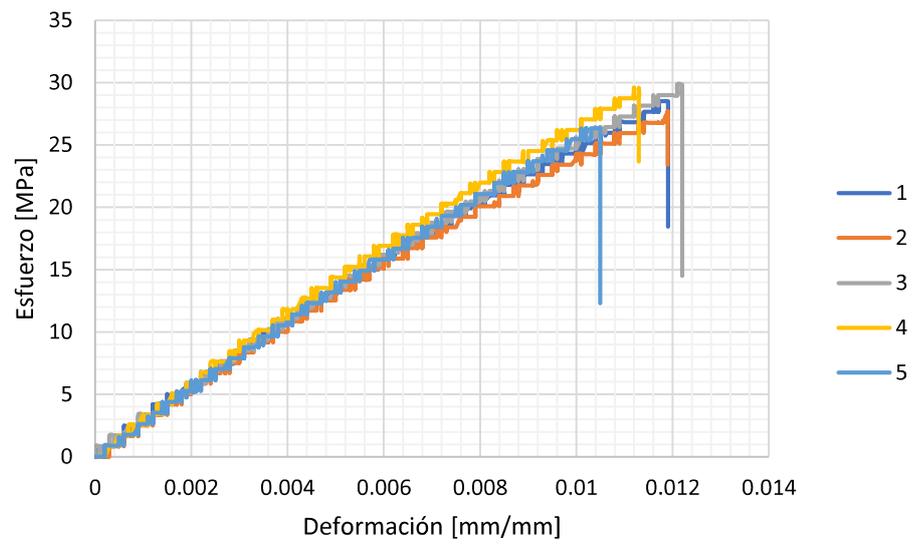


Figura V.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con fibra corta no tratada.



Figura V.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con fibra corta no tratada.

Anexo V. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla VI.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 0°, estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VI.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VI.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VI.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°. (T.20%FT0°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	13.79	1.80	766.43	LGT
2	14.85	1.67	890.69	AGM
3	13.21	1.79	738.40	LWT
4	12.07	1.55	778.89	LWT
5	15.84	2.12	747.34	LWT
6	13.85	1.70	815.55	LGT
Promedio	13.94	1.77	789.55	
S.D.	1.30	0.19	56.48	
C.V.	9.35	10.93	7.15	

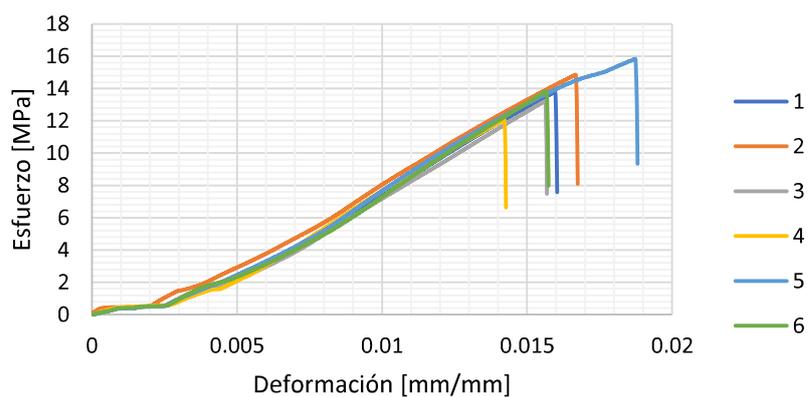


Figura VI.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 0°.



Figura VI.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla VI.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 0° estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VI.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VI.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VI.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°.(F.20%FT0°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	24.92	0.79	3152.48	M(TC)AM
2	23.75	0.82	2889.57	M(TC)AM
3	22.32	0.75	2952.48	TAM
4	28.17	1.02	2754.08	TAM
5	22.45	0.84	2677.93	M(TC)LR
Promedio	24.32	0.84	2885.31	
S.D.	2.40	0.10	184.48	
C.V.	9.86	12.33	6.39	

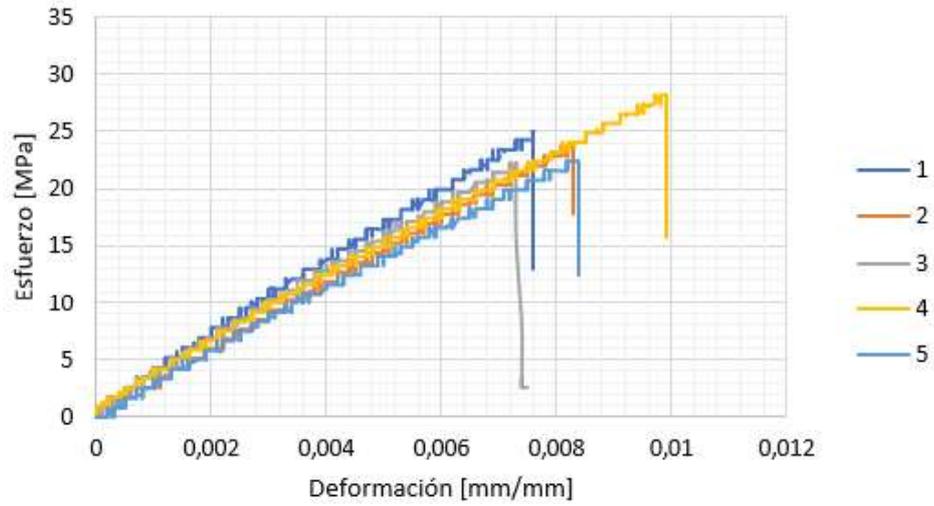


Figura VI.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 0°.



Figura VI.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 0°.

Anexo VI. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientada a 30°

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla VII.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 30° estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VII.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VII.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VII.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 30°. (T.20%FT30°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	15.05	1.95	770.51	LWB
2	17.54	2.50	700.30	LGB
3	17.87	2.32	771.77	LGW
4	17.18	1.98	869.35	OVV
Promedio	16.91	2.19	777.98	
S.D.	1.27	0.27	69.47	
C.V	7.51	12.27	8.93	

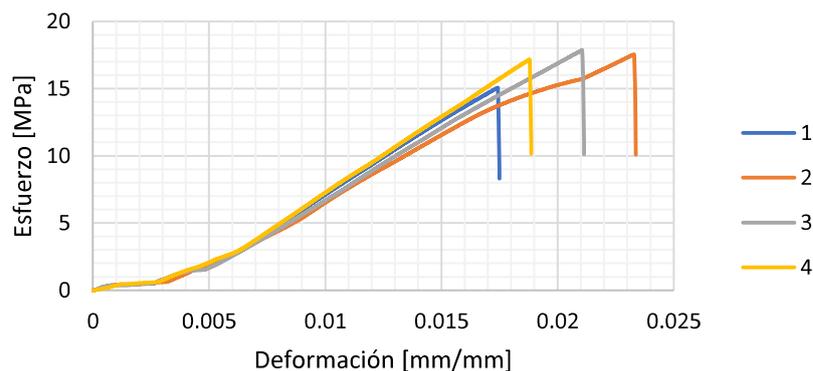


Figura VII.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 30°.



Figura VI.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 30°.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla VII.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 30° estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VII.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VII.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VII.2. Propiedades mecánicas a flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 30°.(F.20%FT30°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	49.08	1.88	2826.79	M(TC)LL
2	49.00	1.87	2874.19	M(TC)LL
3	43.07	2.51	1973.06	M(TC)LV
4	42.94	1.55	2904.18	M(TC)LL
Promedio	46.02	1.95	2644.56	
S.D.	3.48	0.40	448.80	
C.V.	7.57	20.59	16.97	

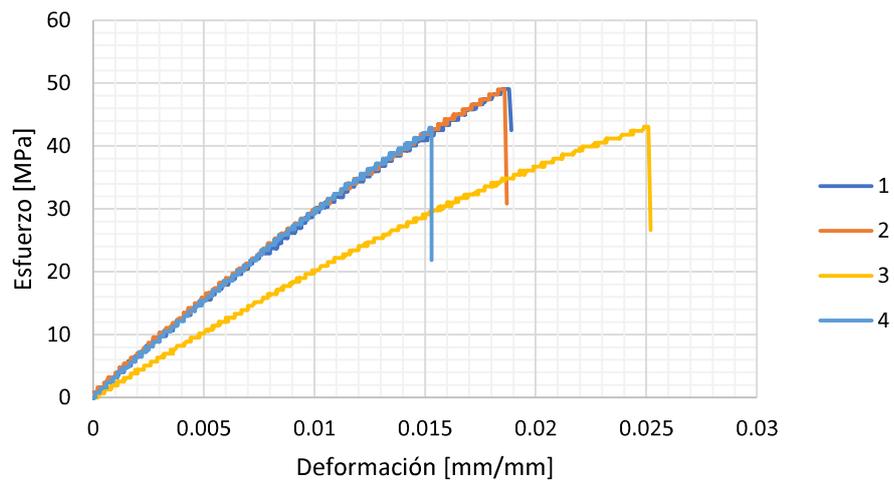


Figura VII.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 30°.



Figura VII.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 30°.

Anexo VII. Caracterización mecánica del ensayo de tracción y flexión del compuesto reforzado con tejido orientada a 45°

a) Ensayo de Tracción

En la Tabla VIII.1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 45° estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VIII.1 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a tracción las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VIII.2 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VIII.1. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 45°. (T.20%FT45°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a tracción (MPa)	Tipo de falla
1	18.54	2.84	652.44	LGW
2	16.27	1.97	824.34	AWB
3	16.36	2.08	786.97	LAB
4	18.93	2.38	794.31	LWB
Promedio	17.53	2.32	764.51	
S.D.	1.41	0.39	76.44	
C.V.	8.03	16.78	10.00	

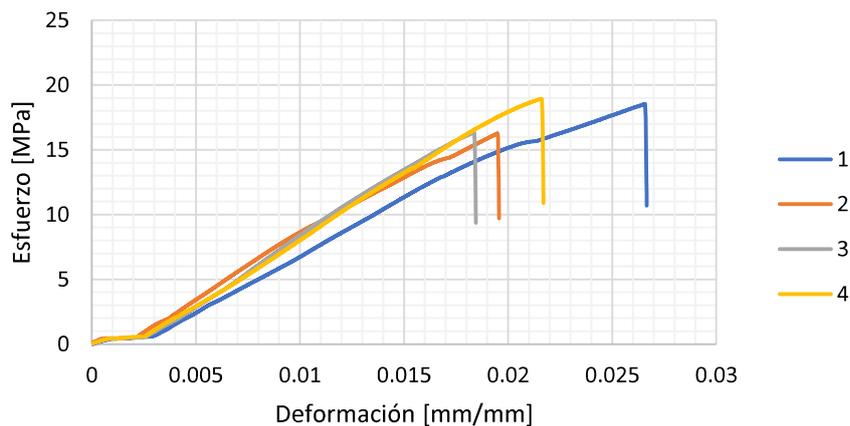


Figura VIII.1. Diagrama esfuerzo - deformación a tracción del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 45°.



Figura VIII.2. Probetas ensayadas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 45°.

b) Ensayo de Flexión

En la Tabla VIII.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de flexión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibra tejida orientado a 45° estos resultados servirán posteriormente como base de comparación con las diferentes configuraciones de los materiales compuestos realizados. En la Figura VIII.3 se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación obtenidas al ensayar a flexión las probetas del material compuesto, así mismo en la Figura VIII.4 se observa el estado de las probetas después de realizar el ensayo mecánico.

Tabla VIII.2. Propiedades mecánicas a tracción del compuesto reforzado con tejido orientado a 45°.(T.20%FT45°)

Muestra No.	Resistencia última (MPa)	Deformación a la rotura (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)	Tipo de falla
1	19.03	0.72	2619.37	M(TC)AM
2	28.96	1.25	2307.14	M(TC)LL
3	18.10	0.76	2383.11	TLL
4	33.82	0.53	6329.84	M(TC)LL
Promedio	24.98	0.82	3409.87	
S.D.	7.68	0.31	1951.18	
C.V.	30.73	37.65	57.22	

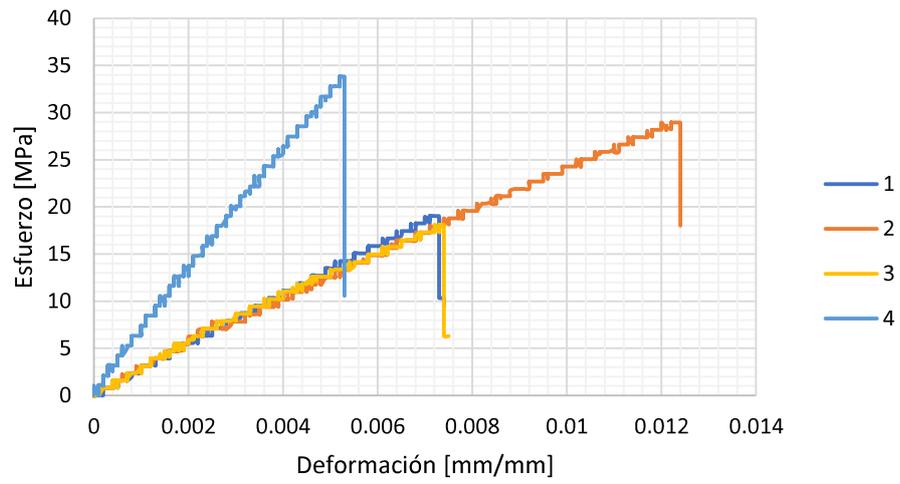


Figura VIII.3. Diagrama esfuerzo - deformación a flexión del compuesto de resina poliéster con tejido orientado a 45°.



Figura VIII.4. Probetas ensayadas a flexión del compuesto reforzado con tejido orientado a 45°.

Anexo VIII. Ficha técnica de la resina poliéster



SINTAPOL 437

SINTAPOL 437 es una resina de poliéster insaturado tipo ortoftálico, transparente para uso general.

Características:

- Facilidad de uso por su carácter préacelerada El agente tixotrópico reduce la tendencia de escurrimiento.
- Muy buen balance entre dureza y flexibilidad. Excelente resistencia al impacto.
- Exotérmico moderado que evita distorsiones por exceso de calor. Reducida contracción.
- Muy buena humectación de fibra de vidrio. Muy buena compatibilidad con cargas minerales.

Aplicaciones:

SINTAPOL 437 es recomendada para todo tipo de productos reforzados con fibra de vidrio para uso industrial o artesanal, con laminado manual o con spray.

También se aplica con el proceso de enrollado de Filamentos para productos como tubos y tanques y postes de fibra de vidrio.

Propiedades de la resina líquida:
--

Apariencia:	Transparente, rosada, levemente turbia por el agente tixotropico.
% No volátiles:	60+-2
Viscosidad Gardner	600 +-200
Índice de tixotropía	3+-1
Numero acidez sobre solidos	Max. 40

Propiedades de curado:	
Tiempo de gel (100g a 25°C, 1,5ml MEK peróxido)	10 +- 3 min
Temperatura de Exotermia:	140 a 150 °C

Suministro: SINTAPOL 437 se envasa en tambores metálicos de 225kg neto.

Almacenamiento: La resina de poliéster debe almacenarse en tambores cerrados, bajo techo y a una temperatura máxima de 25°C. Bajo estas condiciones la resina tiene una estabilidad de 3 meses desde la fecha de venta. En condiciones más calientes (alrededor de 30°C) se debe usar el producto preferiblemente hasta los 2 meses de la misma fecha.

Figura IX.1. Catálogo de la resina poliéster SINTAPOL 347.

(Fuente: (Pintulac, 2019))

Anexo IX. Ensayo de tensión del tejido tipo sarga

Probeta #	Carga	Extensión	Deformación
	N	carga máxima mm	carga máxima %
1	374	4,45	5,9%
2	315	3,15	4,1%
3	443	4,10	5,4%
4	351	3,95	5,2%
5	406	3,85	5,1%
6	424	3,95	5,2%
7	347	3,55	4,7%
8	371	5,70	7,5%
9	411	3,90	5,1%
10	275	3,05	4,0%
11	331	3,65	4,8%
12	450	4,65	6,1%
13	392	4,25	5,6%
14	361	3,30	4,3%
15	462	4,35	5,7%
16	301	5,11	6,7%
17	398	4,87	6,4%
18	491	4,70	6,2%
19	368	4,85	6,4%
20	392	4,61	6,1%
PROMEDIO	383,2	4,2	5,5%
DESV. EST.	55,4	0,7	0,9%

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO

Centro Textil
Politécnico

Página 1 de 1

RESULTADOS ORDEN DE TRABAJO INTERNA No. DQ-OTI0001-2019

SOLICITADO POR : Ing. Carlos Díaz – Profesor FIM
TRABAJO SOLICITADO: Resistencia a la tracción, ASTM D5035-2C
MUESTRA: Probetas de tejido artesanal, 2 pulgadas de ancho

Ing. Omar Bonilla H.
Director Centro Textil

Fecha: 17 de junio de 2019

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

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

Figura X.1. Orden de trabajo del ensayo de tensión a la fibra tejida de banano.

Anexo X. Características del hilo de fibra de banano

Tabla XI.1. Características físicas del tejido artesanal de banano tipo sarga.

N. Probetas	L(m)	Peso(mg)	Título(Tex)	Diámetro del hilo	Directo tpm
1	0.30	509.30	1697.67	2.60	33.00
2	0.30	400.80	1336.00	1.75	25.00
3	0.30	448.60	1495.33	2.05	24.00
4	0.30	455.70	1519.00	1.90	27.00
5	0.30	360.00	1200.00	2.05	29.00
6	0.30	337.80	1126.00	2.00	27.00
7	0.30	350.50	1168.33	1.95	30.00
8	0.30	507.60	1692.00	1.95	28.00
9	0.30	371.80	1239.33	1.85	23.00
10	0.30	376.20	1254.00	1.85	24.00
Promedio	0.30	411.83	1372.77	2.00	27.00
S.D	0.00	64.01	213.35	0.23	3.13

Anexo XI. Codificación del tipo de falla para ensayos de tracción y flexión

a) Tipos de falla para ensayo de tracción según norma ASTM D 3039/D 3039M – 00

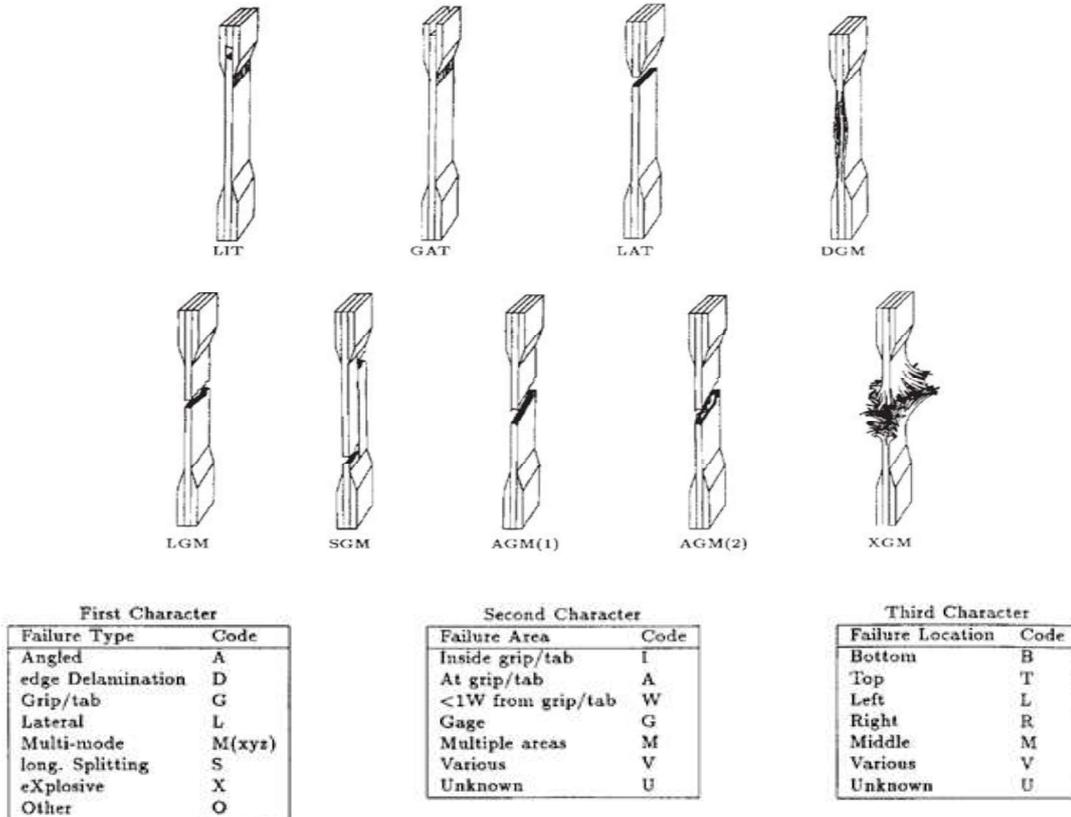


Figura XII.1. Modos típicos de falla para ensayo de tracción.

b) Tipos de falla para ensayo de flexión según norma D 7264/D 7264M – 07

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 XII.2. Modos típicos de falla para ensayo de flexión.

Anexo XIII. Probetas de material compuesto después del ensayo de impacto mediante caída de dardo.

Configuración	Altura [mm]			
	1000	750	500	250
Continua longitudinal no tratada				
Continua longitudinal tratada				
Corta tratada				

Corta no tratada				
Tejida				
Resina				

Figura XIII.1. Área de la ruptura de las probetas de material compuesto en el ensayo mecánico de impacto mediante caída de dardo.