VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

MAGÍSTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

TEMA: "CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO FABRICADO CON MATRIZ DE RESINA EPÓXICA Y REFUERZO DE FIBRA NATURAL DE TOTORA"

AUTOR: VILAÑEZ ESPINOZA, PABLO HUGO

DIRECTOR: GOYOS PÉREZ, LEONARDO PHD.

SANGOLQUÍ

2020

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO FABRICADO CON MATRIZ DE RESINA EPÓXICA Y REFUERZO DE FIBRA NATURAL DE TOTORA"** fue realizado por el señor **VILAÑEZ ESPINOZA PABLO HUGO**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos te6ricos, científicos, técnicos, metodol6gicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por lo cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de diciembre de 2019

GOYOS PÉREZ LEONARDO PHD.

C.C.: 1757783525

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA,** con cedula de identidad N°1001773389, declaro que este trabajo de titulación **"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO FABRICADO CON MATRIZ DE RESINA EPÓXICA Y REFUERZO DE FIBRA NATURAL DE TOTORA"**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 21 de enero de 2020



PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA

C.C.: 1001773389

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, **PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA,** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO FABRICADO CON MATRIZ DE RESINA EPÓXICA Y REFUERZO DE FIBRA NATURAL DE TOTORA"**,en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi nido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 21 de enero de 2020



PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA

C.C.: 1001773389

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, ***PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA*****,** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el Repositorio Institucional; el registro bibliográfico, el resumen y la dirección web indexada en la revista del artículo científico: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO FABRICADO CON MATRIZ DE RESINA EPÓXICA Y REFUERZO DE FIBRA NATURAL DE TOTORA"**.

Sangolquí, 21 de enero de 2020



PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA

C.C.: 1001773389



DEDICATORIA

A mi Dios, por la oportunidad de vivir y permitirme alcanzar objetivos en la vida.

A mis padres que me han apoyado constantemente en cada etapa de mi vida, gracias por su amor incondicional.

A mis hijos Alison, Daniel y Pablo, que con su luz llenan cada rincón de mi corazón, para ellos este esfuerzo, espero que algún día lo superen.

A mi esposa, por su apoyo y su amor.

PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA



AGRADECIMIENTO

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la participación de mis padres, mi esposa, mis hijos me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento.

A mi tutor Leonardo que por su apoyo y conocimiento me permitió superar las dificultades presentadas para la realización de este trabajo.

Al docente de la maestría Fernando Olmedo, que con su apoyo se pudo realizar con el presente trabajo.

Sobre todo, al Gran Todopoderoso, el autor del conocimiento y la sabiduría, por su amor incontable.

PABLO HUGO VILAÑEZ ESPINOZA

Índice de Contenidos

CARÀTULA

CERTIFICACIÓN i

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD..... ii

AUTORIZACIÓN..... iii

AUTORIZACIÓN.....iv

DEDICATORIA.....v

AGRADECIMIENTO.....vi

Índice de Contenidos..... vii

ÌNDICE DE TABLAS x

ÍNDICE DE FIGURAS.....xi

RESUMEN.....xiv

ABSTRACT.....xv

CAPÍTULO 1 1

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Planteamiento del problema.....1

1.2. Desarrollo del problema.....1

1.3. Formulación del problema a resolver 2

1.4. Hipótesis 2

1.5. Objetivos.....2

1.5.1. Objetivo General 2

1.5.2. Objetivos Específicos 3

1.6. Antecedentes 3

1.7. Justificación 5

1.8. Alcance 7

CAPÍTULO 2 8

2. MARCO REFERENCIAL 8

2.1. Marco Teórico 8

2.1.1. Fibras Naturales 8

2.1.2. Matrices 13

2.1.3. Material compuesto 17

2.2. Estado de Arte 24

2.3. Marco Metodológico 26

2.3.1. Proceso experimental totora 26

2.3.2. Normativa 27

2.3.3. Simulación del material compuesto 30

CAPÍTULO III 31

3. FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO 31

3.1. Proceso de extracción de la fibra de Totora 31

3.2. Proceso de fabricación de material compuesto 37

3.3. Materiales y Equipos 44

3.3.1. Materiales 44

3.3.2. Equipos 45

CAPÍTULO IV 46

4. CARACTERIZACION MACROESTRUCTURAL 46

4.1. Ensayos de Flexión y Tracción realizados a la fibra de Totora, resina epóxica y material compuesto 46
4.1.1. Ensayos de tracción y flexión realizados a la fibra de Totora 46
4.1.2. Ensayos de Tracción y flexión realizados a la resina epóxica y al material compuesto 48
4.2. Modelado con Ansys 51
4.3. Caracterización del material compuesto 52
4.3.1. Resultados de ensayos en la Fibra 52
4.3.2. Resultados de ensayos en la resina Epóxica 54
4.3.3. Resultados de ensayos en el material Compuesto 55
4.3.4. Simulación de los ensayos de tracción y flexión del material compuesto 56
CAPÍTULO V 60
5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS 60
5.1. Análisis de resultados 60
5.2. Estudio de la fibra de la Totora 61
5.3. Estudio del material compuesto 62
5.4. Estudio de adhesión con la matriz 67
5.5. Conclusiones 68
5.6. Recomendaciones 69
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70
ANEXOS 72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Dimensiones y composición química de algunas fibras naturales comunes* 12

Tabla 2. *Efecto de la fibra y la matriz en las propiedades mecánicas*.....19

Tabla 3. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de un material compuesto con matriz polimérica en la norma ASTM3039-14*.....28

Tabla 4. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión de un material compuesto con matriz polimérica en la norma ASTM7254-15*.....28

Tabla 5. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de polímeros en la norma ASTM D638-14*.....29

Tabla 6. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión para polímeros en la norma ASTM D790-15-e2* 29

Tabla 7. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de la madera en la norma ASTM D4761-02*.....30

Tabla 8. *Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión de la madera en la norma ASTM D4761-02*.....30

Tabla 9. *Dimensiones de la probeta de fibra de Totora para Ensayo a tracción* 52

Tabla 10. *Esfuerzos máximos resultantes del proceso experimental y de la simulación de los ensayos a tracción y flexión del material compuesto* 60

Tabla 11. *Deformaciones unitarias resultantes del proceso experimental y de la simulación de los ensayos a tracción y flexión del material compuesto* 61

Tabla 12. *Diámetros de las fibras de Totora*.....62

Tabla 13. *Esfuerzos máximos y Deformaciones Unitarias al esfuerzo máximo para ensayo a Tracción.* 65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de una fibra vegetal elemental(célula). La pared celular secundaria S2, constituye aproximadamente el 80% del espesor total.....10

Figura 2. Dibujo esquemático de moléculas de celulosa, incluyendo la intramolecular e intermolecular enlaces de hidrógeno.....11

Figura 3. Imagen de microscopio electrónico de barrido de la superficie de un preimpregnado de epóxi de fibra de carbono. 16

Figura 4. Lamina o laminado de fibra continua unidireccional 21

Figura 5. Influencia de la orientación de las fibras sobre la resistencia y el módulo.....22

Figura 6. Muestra la variación del módulo en función del porcentaje de volumen de fibra. 23

Figura 7. Totora en su estado natural 31

Figura 8. Cosecha de la totora.....32

Figura 9. Secado de totora bajo sombra. 32

Figura 10. Fibra de Totora obtenida por cepillado constante.....33

Figura 11. Selección de Tallos a la medida de 30cm de longitud.....34

Figura 12. Fibra de Totora tratada con 5 y 10% de concentración del Hidróxido de sodio, con una hora de hervido. 34

Figura 13. Fibra de Totora obtenida por método químico en una hora con 30 minutos. 35

Figura 14. Proceso de hervido con Hidróxido de sodio al 2%.....36

Figura 15. Proceso de lavado con alcohol etílico.....36

Figura 16. Proceso de secado de las fibras. 37

Figura 17. Elaboración del molde 37

Figura 18. Moldes para probetas de tracción y flexión para material compuesto y para la resina epóxica 38

Figura 19. Defectos presentados en las probetas con uso de moldes masillados en sus bordes ..38

Figura 20. Proceso de pesaje de resina y del endurecedor 39

Figura 21. Proceso de batido manual de la mezcla 39

Figura 22. Sujeción de las fibras de la Totora sobre los moldes con plastilina 40

Figura 23. Llenado de la resina en los moldes y nivelación de los moldes. 40

Figura 24. Reventado de burbujas de aire antes de cerrar el molde 41

Figura 25. Prensado de los moldes.....42

Figura 26. Salida de exceso de la resina.....42

Figura 27. Corte de probetas 43

Figura 28. Probetas del material compuesto para ensayo a tracción.....43

Figura 29. Probetas del material compuesto para ensayo a flexión. 44

Figura 30. Máquina de ensayos James Heal de la Universidad Técnica del Norte-Ibarra.....46

Figura 31. Probeta de Fibra de Totora montada en la Máquina de ensayos Universal James Heal 47

Figura 32. Máquina de ensayos universal Amsler de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 48

Figura 33. Probeta de resina epóxica montada en la Máquina de ensayos Universal Amsler 49

Figura 34. Máquina de ensayos universal MTS de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 50

Figura 35. Probeta del material compuesto montada en la Máquina de ensayos Universal MTS 50

Figura 36. Representación de la conformación del material compuesto en ansys 51

Figura 37. Representación de la malla computacional del material compuesto 52

Figura 38. Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora 53

Figura 39. Esfuerzo promedio vs Deformación promedio de la fibra de totora 53

Figura 40. Esfuerzo promedio vs Deformación Unitaria promedio de la resina Epóxica 54

Figura 41. Esfuerzo promedio vs Deformación Unitaria promedio del material compuesto 55

Figura 42. Esfuerzo máximo del material compuesto en tracción 56

Figura 43. Deformación máxima del material compuesto a tracción 57

Figura 44. Esfuerzo máximo del material compuesto en flexión.....58

Figura 45. Deformación máxima del material compuesto a flexión 58

Figura 46. Medición del diámetro de la fibra de Totora 62

Figura 47. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 90% Resina-10% Fibra 63

Figura 48. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 80% Resina- 20% Fibra 64

Figura 49. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 70% Resina-30% Fibra 64

Figura 50. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 60% Resina-40% Fibra 65

Figura 51. Comparación de los esfuerzos máximos de las diferentes concentraciones resina - fibra.....66

Figura 52. Deformación Unitaria al esfuerzo máximo de las diferentes concentraciones resina - fibra.....66

Figura 53. Fractura de la probeta del material compuesto en el ensayo a tracción.....67

Figura 54. Vista de la Totora-reina a un zoom 200x.....68

RESUMEN

Las fibras naturales son un recurso abundante y renovable, por lo que su costo es relativamente bajo en comparación con otras fibras convencionales, son ecológicas y biodegradables, y reducen el problema de los sólidos.

La Fibra de totora ha sido utilizada comúnmente en la fabricación muebles, artesanías y en la fabricación de ladrillos (proporcionando un aislamiento térmico, es flexible y su durabilidad es alta.

La investigación está basada en la fabricación de un material compuesto con matriz Epóxica y fibra de totora. La extracción de la fibra de Totora se realiza por el método químico usando el Hidróxido de sodio al 2% por ser una fibra suave. La probeta se elabora cumpliendo la proporción 60% en volumen de resina y 40% en volumen de fibra de Totora. A partir de los ensayos de Tracción y flexión se caracteriza las propiedades mecánicas basado en las normas ASTM para la matriz, fibra y material compuesto. Se obtiene las curvas de esfuerzo-deformación del material compuesto a partir del ensayo de tracción y de flexión del material compuesto, la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión deben validarse, se ve la influencia del Hidróxido de sodio en la resistencia de la fibra y del material compuesto. Las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso experimental se fueron analizado utilizando el software ANSYS.

Palabras claves:

- **MATERIAL COMPUESTO**
- **TOTORA**
- **RESINA EPÓXICA**
- **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA**
- **SIMULACIÓN**

ABSTRACT

Natural fibers are an abundant and renewable resource, so their cost is relatively low compared to other conventional fibers, they are ecological and biodegradable, and they reduce the problem of solids.

Totora fiber has been commonly used in the manufacture of furniture, handicrafts and in the manufacture of bricks (providing thermal insulation, it is flexible and its durability is high.

The research is based on the manufacture of a composite material with Epoxy matrix and cattail fiber. The extraction of Totora fiber is carried out by the chemical method using 2% Sodium Hydroxide because it is a soft fiber. The test piece is made complying with the proportion 60% by volume of resin and 40% by volume of Totora fiber. From the tensile and flexural tests, the mechanical properties based on the ASTM standards for the matrix, fiber and composite material are characterized. The stress-strain curves of the composite material are obtained from the tensile and flexural test of the composite material, the tensile strength and the flexural strength must be validated, the influence of sodium hydroxide on the resistance of the fiber and composite material. The mechanical properties obtained in the experimental process were analyzed using the ANSYS software.

KEYWORDS:

- **COMPOSITE MATERIAL**
- **TOTORA**
- **POLYESTER RESIN**
- **MECHANIC CHARACTERIZATION**
- **SIMULATION**.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Objeto de Estudio. Material compuesto fabricado con matriz de Resina Epóxica y refuerzo de fibra natural de Totora.

Campo de Acción. Caracterización del material, simulación y validación de las propiedades mecánicas.

La Caracterización del material compuesto fabricado con matriz de resina Epóxica y refuerzo de fibra natural de totora, mediante simulación de ingeniería asistida por computador, la cual permitirá obtener el análisis de esfuerzos que se someterá las probetas fabricadas que fueron ensayadas de manera experimental.

1.2. Desarrollo del problema

La evolución de la humanidad, desde diferentes aspectos, tanto sociales como culturales y técnicos, ha sido condicionada por el descubrimiento de nuevos materiales. En un mundo cada vez más centrado en las demandas del desarrollo sostenible, se ha prestado demasiada atención a los materiales compuestos ampliamente utilizados, principalmente a las estrategias para su reutilización y las características para considerarlos como materiales respetuosos con el medio ambiente.

Nuestro país posee una gran variedad de fibras naturales que por lo general se convierten en desperdicios ayudando aumentar la contaminación ambiental y en consecuencia afectando al ecosistema. Una de esas provincias que posee esta diversidad natural es la provincia de Imbabura, en la que existen muchas variedades de plantas que se podría usar para reducir el uso de materiales

sintéticos, a fin de reducir la contaminación y sin agotar los recursos naturales para las futuras generaciones.

El desconocimiento de los agricultores de la zona de San Rafael de la laguna en la provincia de Imbabura, solo usan la Totora en el área artesanal o simplemente lo incineran. Mediante este trabajo se pretende usar la fibra de la Totora como refuerzo en la fabricación de un material compuesto con matriz de resina epóxica, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Permitiendo de esta manera la sostenibilidad del medio ambiente y a los agricultores de la zona tener un mercado adicional en nuevos productos elaborados con este material compuesto.

1.3. Formulación del problema a resolver

Existe mucho desconocimiento de las propiedades mecánicas de un material compuesto fabricado con matriz de Resina Epóxica y refuerzo de fibra natural de Totora, impide desarrollar prototipos que deben sustentarse con el cálculo analítico utilizado en la resistencia de materiales.

1.4. Hipótesis

Mejorar el comportamiento mecánico del material compuesto fabricado con matriz de resina epóxica y refuerzo de fibra de Totora mediante la modelación de su comportamiento a tracción y flexión.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto fabricado con matriz de Resina Epóxica y refuerzo de fibra natural de Totora.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Establecer el método adecuado para la fabricar las probetas de resina epóxica y material compuesto con matriz Epóxica y fibra de Totora, que faciliten su estudio en los ensayos de tracción y flexión.
- Estudiar el efecto de la fracción de la fibra en el comportamiento mecánico del material compuesto.
- Determinar el comportamiento mecánico del material compuesto elaborado a partir de fibra de totora, realizando ensayos de tracción y flexión.

1.6. Antecedentes

Las aplicaciones comerciales e industriales de compuestos poliméricos reforzados con fibra, son tan variados que es imposible enumerarlos a todos.

Los compuestos constituyen una clase muy amplia e importante de materiales de ingeniería.

La producción anual mundial en los últimos años el mercado ha crecido, los compuestos se usan en una amplia variedad de aplicaciones, además, hay un margen considerable para adaptar su estructura a las condiciones del servicio.

La adaptación de estructuras compuestas fabricadas para diferentes propósitos de ingeniería requiere el aporte de varias ramas de la ciencia.

Los componentes principales en un material compuesto reforzado con fibras son las fibras y una matriz, que actúa como aglutinante de las fibras.

Otros componentes que también se pueden encontrar son agentes de acoplamiento, recubrimientos y cargas. Los agentes de acoplamiento y los recubrimientos se aplican sobre las

fibras para mejorar su humectación con la matriz, así como para promover la unión a través de la interfaz fibra-matriz. Ambos a su vez promueven una mejor transferencia de carga entre las fibras y la matriz.

Los rellenos son usados con algunas matrices poliméricas principalmente para reducir costos y mejorar su estabilidad dimensional.

Como resultado de una creciente conciencia de la interconectividad de los factores ambientales globales, principios de sostenibilidad, ecología industrial, ecoeficiencia, y la química verde y la ingeniería se están integrando en el desarrollo de la próxima generación de materiales, productos y procesos.

El agotamiento de los recursos petroleros junto con el aumento de las regulaciones ambientales está actuando en concordancia para proporcionar el impulso para nuevos materiales y productos compatibles con el medio ambiente e independientes de combustibles fósiles.

Materiales compuestos, especialmente "compuestos verdes", encajan bien en este nuevo cambio de paradigma. En pocas palabras, los materiales de base biológica incluyen productos industriales para aplicaciones de bienes duraderos, hechos de productos agrícolas renovables, que incluyen madera, desechos agrícolas, pastos, etc.

En pocas palabras, los materiales de base biológica incluyen productos industriales para aplicaciones de bienes duraderos, hechos de productos agrícolas renovables, que incluyen madera, desechos agrícolas, pastos y fibras vegetales naturales compuestas de carbohidratos tales como azúcares y almidón, lignina y celulosa, así como aceites y proteínas vegetales.

Producir productos químicos y nuevos materiales a partir de recursos renovables no es una idea nueva. Sin embargo, el éxito y el tremendo crecimiento de la industria petroquímica en el siglo XX frenaron el crecimiento de los productos de base biológica. Actualmente los factores

ambientales y económicos están impulsando la tendencia hacia una mayor utilización de polímeros y materiales de base biológica. El desafío para los científicos e ingenieros es desarrollar la tecnología necesaria para hacer realidad la revolución de los materiales de base biológica. (Amar, Manjusri & Lawrence, 2005)

Existe una planta perteneciente a las ciperáceas que es la Schoenoplectus californicus conocida comúnmente como junco o Totora, es una planta acuática que crece en los lagos de la serranía ecuatoriana. Existen plantaciones de esta planta en los alrededores del Lago de San Pablo, ubicado en la Provincia de Imbabura.

Existen algunos estudios sobre la Totora, pero no se han encontrado estudios sobre la caracterización de las propiedades mecánicas de un material compuesto fabricado con matriz de resina epóxica y refuerzo de fibra de totora, a partir de ensayos experimentales y validada la simulación en el software de ingeniería.

1.7. Justificación

La utilización de fibras no naturales para la elaboración de materiales compuestos se ha difundido, pero la mayoría de estos se debe importar y además se tiene un gran impacto ecológico.

Con el avance en los métodos de investigación, la ciencia de materiales debe prestar atención en el área de los compuestos naturales. Sin olvidar los problemas ecológicos creados por el material sintético, es necesario buscar las alternativas para las cuales la naturaleza nos da una respuesta que nos proporcione una amplia variedad de materiales vegetales con propiedades extraordinarias que nos permitan explorar sus aplicaciones de ingeniería.

En la actualidad se está utilizando fibras naturales en la fabricación de los materiales compuestos tratando en cierta manera de disminuir la contaminación y evitar la utilización de fibras

sintéticas.

Cada vez surgen más materiales en todo el mundo. Es importante la utilización eficiente de las especies de plantas y la utilización de partículas y fibras más pequeñas obtenidas de diversos materiales de origen vegetal, incluidos los residuos agrícolas para desarrollar materiales ecológicos, es sin duda un enfoque racional y sostenible.

Los compuestos reforzados con fibra natural tienen buenas propiedades mecánicas y térmicas. Los polímeros sintéticos han sido reemplazados por materiales compuestos de fibra natural para automóviles, compuestos aeroespaciales y materiales de construcción. Las principales ventajas de los materiales compuestos con fibra natural son su alta disponibilidad, bajo costo, peso ligero, reciclabilidad, biodegradabilidad, falta de riesgos para la salud y posee un comportamiento no abrasivo.

Por otro lado, el aumento del interés en utilizando fibras naturales como refuerzo en plásticos para sustituir las fibras sintéticas convencionales en algunas aplicaciones estructurales se han convertido en una de las principales preocupaciones para estudiar el potencial de utilizar fibras naturales como refuerzo para polímeros. Se han realizado muchas investigaciones sobre compuestos de polímeros reforzados con fibra natural, pero la investigación sobre la Totora usada en material compuesto con matriz epóxica no existe.

Por esto, en este contexto, se ha emprendido el presente trabajo de investigación, con el objetivo de explorar el potencial del material compuesto de polímeros con fibra natural de Totora abundantemente y disponibles en la provincia de Imbabura y estudiar la Caracterización mecánica de dicho material. Las fibras naturales no solo son fuertes y ligeras, también relativamente son baratas.

1.8. Alcance

En este estudio, se propone la caracterización de las propiedades mecánicas de un material compuesto fabricado con matriz de resina epóxica y refuerzo de fibra de totora, a partir de ensayos experimentales de flexión y tracción de acuerdo a la norma seleccionada. Se conseguirá proponiendo la metodología experimental que permita conseguir las propiedades mecánicas del material compuesto con matriz epóxica y refuerzo de fibra de totora por medio de ensayo experimental. Utilizar el software de ingeniería para producir la malla del material compuesto a partir de los datos experimentales. Después de lograr la simulación de los ensayos se comparará los datos obtenidos en la simulación con los datos obtenidos en los ensayos experimentales. Finalmente se dará recomendación con respecto a su aplicabilidad de este material compuesto.

CAPÍTULO 2

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco Teórico

Los materiales se pueden clasificar como isotrópicos o anisotrópicos. Los materiales isotrópicos tienen las mismas propiedades de material en todas las direcciones, y las cargas normales solo crean deformaciones normales. En comparación, los materiales anisotrópicos tienen diferentes propiedades de material en todas las direcciones en un punto del cuerpo. No hay planos materiales de simetría, y las cargas normales crean tanto deformaciones normales como deformaciones de corte. Un material es isotrópico si las propiedades son independientes de la dirección dentro del material. La oferta mundial de recursos naturales está disminuyendo y la demanda de materias primas sostenibles y renovables sigue aumentando. (Blackburn, 2005)

2.1.1. Fibras Naturales

Las fibras naturales se están convirtiendo en alternativas viables a las fibras de vidrio, sea solas o combinadas en materiales compuestos para diversas aplicaciones como son: piezas de automóviles, estructuras de construcción y materiales de embalaje rígidos. Las ventajas de las fibras naturales sobre las fibras sintéticas, como el vidrio, son el bajo costo, baja densidad, propiedades mecánicas específicas aceptables, la concentración de dióxido de carbono, la sostenibilidad, la reciclabilidad y la biodegradabilidad.

Una dificultad que ha impedido una utilización más prolongada de las fibras naturales es la falta de buena adhesión a la mayoría de las matrices poliméricas. La naturaleza hidrófila de las

fibras naturales afecta de manera adversa a la adhesión a una matriz hidrófoba, dando como resultado propiedades de resistencia pobre.

A diferencia de las fibras convencionales como el vidrio, la aramida y el carbono que se pueden producir con un rango definido de propiedades, las fibras naturales variarán considerablemente.

Los biocompuestos ecológicos tienen el potencial de ser el nuevo material del siglo XXI y ser una solución parcial a muchos problemas ambientales globales. Los compuestos reforzados con biofibras representan una fuente potencial de ingreso no tradicional y de un valor agregado para la comunidad agrícola.

Todas las fibras naturales, son de naturaleza celulósica. La celulosa es un polímero de glucano hidrófilo, todas las fibras naturales son de naturaleza hidrófila. Aunque la estructura química de la celulosa de diferentes fibras naturales es la misma, el grado de polimerización varía. (Hull, 1996)

La celulosa de las fibras naturales contiene diferentes sustancias naturales como la lignina y las ceras. Las fibras están compuestas por microfibrillas de celulosa unidas por lignina. Las propiedades físicas de las fibras naturales están básicamente influenciadas por la estructura química, como el contenido de celulosa, el grado de polimerización, la orientación y la cristalinidad, que se ven afectadas por las condiciones durante el crecimiento de las plantas, así como por los métodos de extracción utilizados. Las propiedades de la fibra varían considerablemente dependiendo de dónde se toman de una planta, la calidad de la planta y la ubicación. Las diferentes fibras tienen diferentes longitudes y áreas de sección transversal, y también defectos diferentes, como las microcompresiones, grietas o hoyos. (Blackburn, 2005)

Las paredes celulares difieren en su composición, la proporción entre celulosa y lignina,

hemicelulosa, y en la orientación de las microfibrillas de celulosa. En la mayoría de las fibras de plantas, las microfibrillas de celulosa están orientadas en un ángulo con respecto al eje de la fibra normal llamado ángulo de microfibrillas (Figura 1).

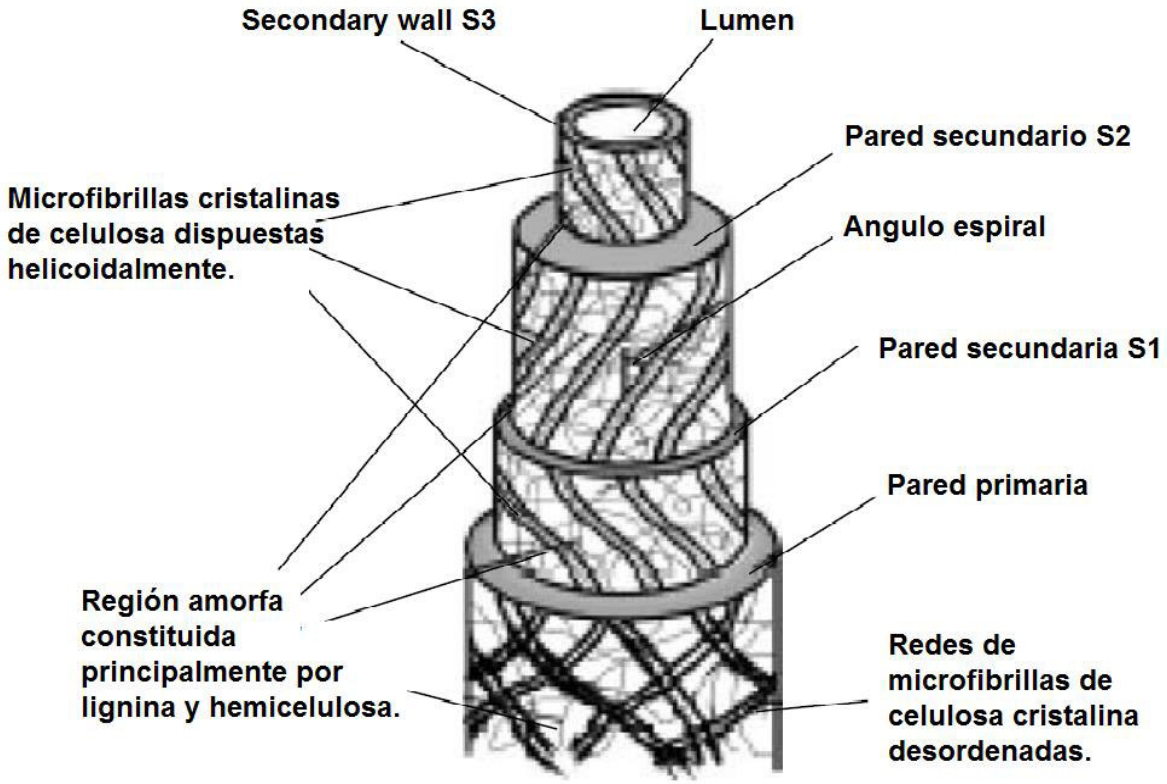


Figura 1. Estructura de una fibra vegetal elemental(célula). La pared celular secundaria S2, constituye aproximadamente el 80% del espesor total.
Fuente (Amar, y otros, 2005)

La celulosa es el componente principal de las fibras naturales, y la unidad elemental de una macromolécula de celulosa es anhidro-D-glucosa, que contiene tres grupos hidroxilo (OH). Estos grupos hidroxilo forman enlaces de hidrógeno dentro de la propia macromolécula (intramolecular) y entre otras macromoléculas de celulosa (intermolecular) (Blackburn, 2005).

En la Figura 2 se muestra un dibujo esquemático de las moléculas de celulosa, incluidos los enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares.

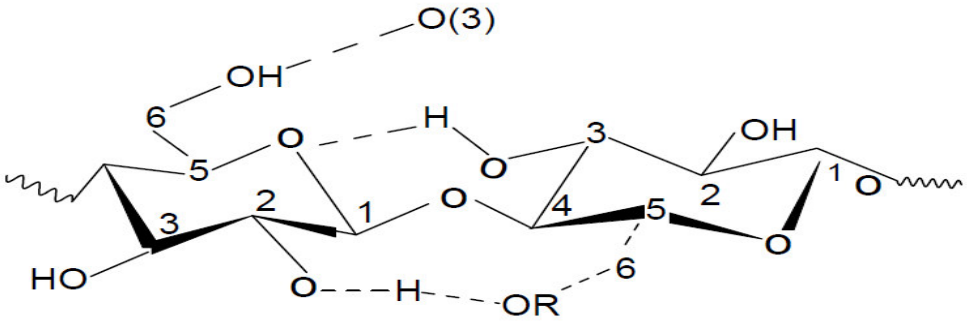


Figura 2. Dibujo esquemático de moléculas de celulosa, incluyendo la intramolecular e intermolecular enlaces de hidrógeno
Fuente (Amar, y otros, 2005)

En investigaciones actuales muestran que, en ciertas aplicaciones compuestas, las fibras naturales demuestran un desempeño competitivo frente a las fibras de vidrio. En términos generales, los biocompuestos son materiales compuestos hechos de fibra natural y polímeros no biodegradables derivados del petróleo como PP, PE y epoxis o biopolímeros como PLA y PHA.

Las propiedades mecánicas de las fibras vegetales son mucho menores en comparación con las de las fibras de vidrio de refuerzo de competencia más utilizadas. Sin embargo, debido a su baja densidad, las propiedades específicas (relación de propiedad a densidad), resistencia y rigidez de las fibras vegetales son comparables a los valores de las fibras de vidrio.

Los agricultores podrían beneficiarse de los cultivos de fibra debido a su rápido tiempo de respuesta. Los cultivos de fibra a menudo producen fibras muy largas. El consumo de energía para el cultivo de cultivos de fibra, la recolección y la separación de fibras es mucho menor que la energía necesaria para fabricar fibras sintéticas. Sin embargo, también hay algunos inconvenientes relacionados con el uso de fibras vegetales como refuerzo para polímeros. Las restricciones para la explotación exitosa son su alta absorción de humedad, baja resistencia microbiana y baja estabilidad térmica.

Durante los procesos de alcalinización, los componentes de cera se eliminan de la superficie

de la fibra. Las ceras que se adhieren a las superficies de las fibras influyen fuertemente en las propiedades superficiales de los materiales a base de celulosa. La mayoría de las fibras vegetales crudas están cubiertas con compuestos hidrófobos no celulósicos (como ceras). Por lo tanto, es necesario tratar las fibras originales para eliminar estos componentes no celulósicos. ((Blackburn, 2005)

Con respecto a la geometría de las fibras, las fibras artificiales son cilíndricas de una hilera, con un diámetro y un área específica aproximadamente constante. Este es el caso de las fibras celulósicas que se presentan en el apilamiento de las cadenas de celulosa. Pero existen defectos que son evidentes como "rodillas" en la superficie de la fibra y son puntos donde la fibra puede romper más fácilmente. Además, la relación de aspecto (longitud / diámetro), que influye en las propiedades mecánicas del material compuesto. Esta relación de aspecto está muy modificada por el desgaste durante el procesamiento (extrusión, inyección).

Tabla 1.
Dimensiones y composición química de algunas fibras naturales comunes

			Dimensión de la fibra (mm)	
Tipo de fibra	**Celulosa (%)**	**Lignina (%)**	**Longitud media**	**Ancho medio**
Algodón	85–90	0.7–1.6	25.0	0.02
Lino de Semilla	43–47	21–23	30.0	0.02
Cáñamo	57–77	9–13	20.0	0.022
Abacá	56–63	7–9	6.0	0.024
Madera de coníferas	40–45	26–34	4.1	0.025
Sisal	47–62	7–9	3.3	0.02
Bambú	26–43	21–31	2.7	0.014
Kenaf	44–57	15–19	2.6	0.02
Yute	45–63	21–26	2.5	0.02
Esparto	33–38	17–19	1.9	0.013
Papiro	38–44	16–19	1.8	0.012
Bagazo de caña de azúcar	32–37	18–26	1.7	0.02
Paja de cereal	31–45	16–19	1.5	0.023
Paja de maíz	32–35	16–27	1.5	0.018
Paja de trigo	33–39	16–23	1.4	0.015
Paja de arroz	28–36	12–16	1.4	0.008
Madera de hoja caduca	38–49	23–30	1.2	0.03
Palma de coco	35–62	30–45	0.7	0.02

Fuente: (Amar, y otros, 2005)

En la tabla 1, muestra las dimensiones y composición química de algunas fibras naturales comunes. Los grupos de hidroxilo son accesibles para la reacción, pero algunos de estos elementos de hinchamiento pueden quedar atrapados en la estructura celulósica.

2.1.2. Matrices

Los compuestos han abarcado casi todos los dominios materiales (muebles para la casa, empaques, automóviles, aeroespacial, transporte, deportes, ocio, etc.). Todos los polímeros sintéticos (termoplásticos, termoestables y elastómeros) se pueden usar como matrices.

Varios tipos de polímeros se han utilizado como matrices para materiales compuestos de fibra natural. Los más comúnmente utilizados son polímeros termoestables tales como poliéster, epoxi y resinas fenólicas. Termoplásticos como el polietileno (PE), poliestireno (PS) y polipropileno (PP) también han sido utilizados.

La mayoría de los polímeros por sí mismos no son adecuados para aplicaciones de soporte de carga debido a su falta de resistencia, rigidez y estabilidad dimensional suficientes. Sin embargo, las fibras poseen una gran resistencia y rigidez, pero son difíciles de usar en aplicaciones de carga por sí mismas debido a su estructura fibrosa. En los materiales compuestos reforzados con fibra, las fibras sirven como refuerzo al dar resistencia y rigidez a la estructura, mientras que la matriz plástica sirve como adhesivo para mantener las fibras en su lugar de modo que se puedan hacer los componentes estructurales adecuados.

Estos polímeros tienen una afinidad diferente hacia la fibra debido a la diferencia en su estructura química.

Los termoestables (especialmente epoxi) se han utilizado durante mucho tiempo como matrices poliméricas para compuestos de fibra de carbono. Durante el curado, generalmente

realizado en presencia de calor y presión, una resina termoestable se endurece gradualmente debido a la finalización de la polimerización y la reticulación asociada de las moléculas de polímero. Los polímeros termoplásticos se han vuelto importantes debido a su mayor ductilidad y velocidad de procesamiento en comparación con los termoestables, y la reciente disponibilidad de termoplásticos que pueden soportar altas temperaturas. La mayor velocidad de procesamiento de los termoplásticos se debe al hecho de que los termoplásticos amorfos se ablandan inmediatamente después de calentar por encima de la temperatura de transición vítrea (Tg), por lo que el material ablandado puede moldearse fácilmente. El enfriamiento posterior completa el procesamiento. En contraste, el curado de una resina termoestable es una reacción que ocurre gradualmente. (Blackburn, 2005):

Los materiales compuestos de fibra corta o partículas generalmente se fabrican mezclando las fibras o partículas con una resina líquida para formar una suspensión, y luego moldeándolas para formar un material compuesto.

La resina líquida es el material matriz no polimerizado o parcialmente polimerizado en el caso de un termoestable. Los métodos de moldeo para los termoplásticos son moldeo por inyección (calentamiento por encima de la temperatura de fusión del termoplástico y forzar la suspensión a una abertura de matriz cerrada mediante el uso de un mecanismo de tornillo), extrusión (forzar la suspensión a través de una abertura de matriz a través de un mecanismo de tornillo), calandrado (vertido de la lechada en un conjunto de rodillos con una pequeña abertura entre los rodillos adyacentes para formar una lámina delgada) y termoformado (calentamiento por encima de la temperatura de ablandamiento del termoplástico y formación sobre un troquel usando troqueles coincidentes, vacío o presión de aire, o sin una matriz con rodillos móviles). Para los termoestables, se usa comúnmente el moldeo por compresión o el molde de matriz coincidente (aplicando una

alta presión y temperatura a la suspensión en una matriz para endurecer el termoestable). La fundición de la suspensión en un molde no suele ser adecuada porque la diferencia de densidad entre la resina y las fibras hace que las fibras floten o se hundan a menos que la viscosidad de la resina se ajuste cuidadosamente. (Rong, M.Z, 2001)

También se usa una suspensión de fibra sobre la resina, o en vez de este método las fibras cortas en forma de hilo de fibra continua pueden impregnarse con una resina y conformarse utilizando métodos comúnmente utilizados para compuestos de fibra continua.

Los compuestos unidireccionales sufren de pobres propiedades mecánicas en la dirección transversal (es decir, perpendicular a la dirección de la pultrusión). Por lo tanto, los compuestos estructurales generalmente no son unidireccionales. Los compuestos con fibras continuas en varias orientaciones se fabrican comúnmente mediante la colocación manual de cintas de fibra unidireccionales o telas tejidas y la impregnación con una resina. Un preimpregnado es una lámina de fibras de orientación continua que se han impregnado con un polímero o precursor de polímero. Un ejemplo de un precursor de polímero es una resina epóxica, que al curarse posteriormente (generalmente bajo calor y presión) forma un polímero epóxica, un termo endurecido.

La figura 3 muestra una imagen de microscopio electrónico de barrido de la superficie de un preimpregnado de epoxi de fibra de carbono. Las fibras no se pueden discernir porque están cubiertas con la resina.

Los epóxicos son el material matricial más común para compuestos y adhesivos de alto rendimiento. Tienen una excelente combinación de resistencia, adhesión, baja contracción y versatilidad de procesamiento.

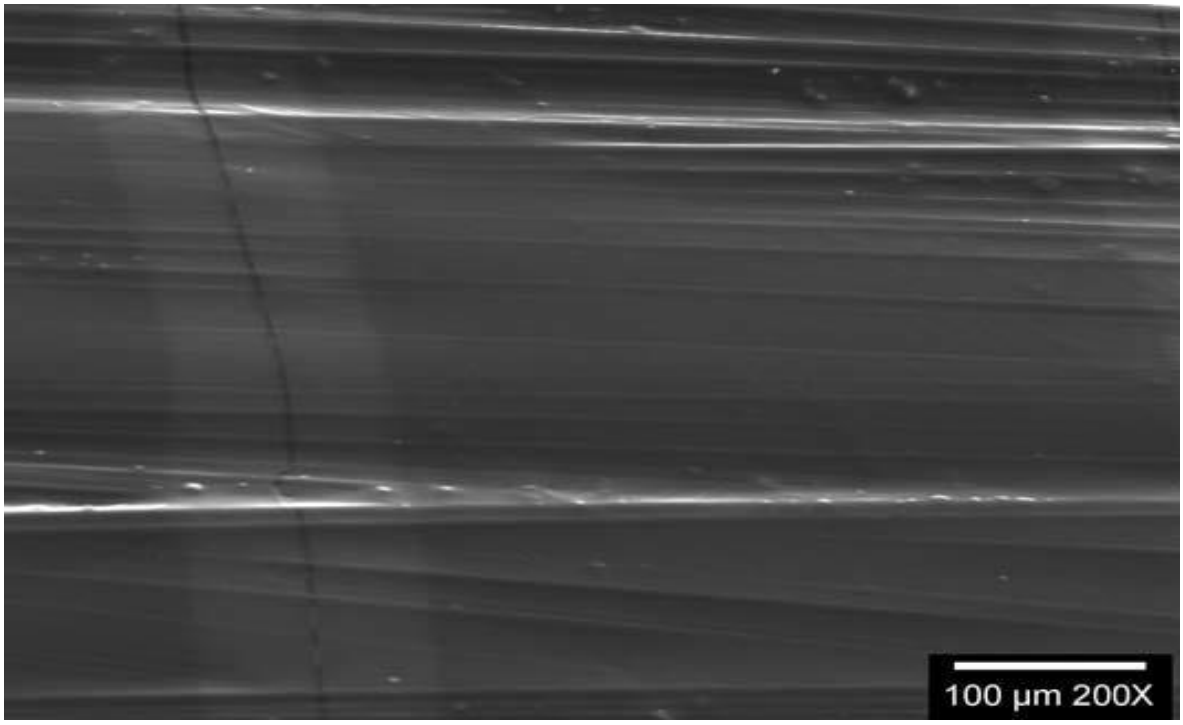


Figura 3. Imagen de microscopio electrónico de barrido de la superficie de un preimpregnado de epóxi de fibra de carbono.
Fuente (Deborah, 2010)

Las matrices y adhesivos epóxicos comerciales pueden ser tan simples como un epóxico y un agente de curado; sin embargo, la mayoría contiene un epóxico mayor, uno a tres epóxicos menores y uno o dos agentes de curado. Los epóxicos menores se agregan para proporcionar un control de la viscosidad, impartir propiedades de temperatura elevada más alta, proporcionar una menor absorción de humedad o mejorar la tenacidad. Dos grandes epóxicos principales se utilizan en la industria aeroespacial. El primero es el diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), que se usa ampliamente en el devanado de filamentos y algunos adhesivos. El segundo es el tetraglicidil metilendianilina (TGMDA), también conocido como tetraglicidil-4,40-diaminodifenilmetano

(TGGDM), que es el principal epóxica utilizado para una gran cantidad de los sistemas de matriz compuesta comerciales. (Deborah, 2010)

2.1.3. Material compuesto

La palabra material compuesto significa que dos o más materiales se combinan en una escala macroscópica para formar un tercer material útil. La clave es el examen macroscópico de un material en el que los componentes pueden identificarse a simple vista. Se pueden combinar diferentes materiales en una escala microscópica, como en la aleación de metales, pero el material resultante es, para todos los propósitos prácticos, macroscópicamente homogéneo, es decir, los componentes no pueden distinguirse a simple vista. La ventaja de los materiales compuestos que, si están bien diseñados, exhiben las mejores cualidades de sus componentes y algunas cualidades que ninguno de los constituyentes posee. Algunas de las propiedades que pueden mejorarse formando un material compuesto son: la rigidez, comportamiento dependiente de la temperatura, resistencia a la corrosión, conductividad térmica, aislamiento acústico, etc. Naturalmente, no todas estas propiedades se mejoran al mismo tiempo ni hay un requisito para hacerlo. De hecho, algunas de las propiedades están en conflicto entre sí, por ejemplo, el aislamiento térmico frente a la conductividad térmica. El objetivo es simplemente crear un material que tenga solo las características necesarias para realizar la tarea de diseño. Los materiales compuestos tienen una larga historia de uso. Los materiales compuestos de matriz de resina reforzados con fibra que tienen una alta relación de resistencia a peso y de rigidez a peso se han vuelto importantes en aplicaciones sensibles al peso, como aviones y vehículos espaciales. (Amar, Manjusri & Lawrence, 2005)

2.1.3.1 Clasificación y características de los materiales compuestos

Existe cuatro tipos de materiales compuestos comúnmente aceptados, los cuales son

(Blackburn, 2005):

(1) Materiales compuestos fibrosos que consisten en fibras en una matriz

(2) Materiales compuestos laminados que consisten en capas de varios materiales

(3) Materiales compuestos particulados que están compuestos de partículas en una matriz

(4) Combinaciones de algunos o todos los primeros tres tipos

Las fibras largas en varias formas son inherentemente mucho más rígidas y fuertes que el mismo material en forma masiva, la geometría y la composición física de una fibra son de alguna manera cruciales para la evaluación de su resistencia y deben considerarse en aplicaciones estructurales.

Una fibra se caracteriza geométricamente no solo por su alta relación longitud-diámetro sino por su diámetro casi del tamaño de un cristal. Sin embargo, una comparación directa entre las fibras y los metales estructurales no es válida porque las fibras deben tener una matriz circundante para funcionar en un miembro estructural, mientras que los metales estructurales se usan directamente. Tenga en cuenta que la densidad de cada material se enumera debido a que las relaciones de resistencia a densidad y de rigidez a densidad se usan comúnmente como indicadores de la efectividad de una fibra, especialmente en aplicaciones sensibles al peso, como son las aeronaves.

Los roles relativos de la fibra y la matriz en la determinación de las propiedades mecánicas se resumen en la Tabla 2, debido a que la orientación de la fibra afecta directamente las propiedades mecánicas

Los materiales compuestos de polímero reforzado con fibra natural ofrecen una amplia gama de propiedades que son adecuados para una gran cantidad de aplicaciones de ingeniería.

Tabla 2.

Efecto de la fibra y la matriz en las propiedades mecánicas

	Constituyente compuesto dominante	
Propiedades Mecánicas	**Fibra**	**Matriz**
Unidireccional		
Tracción 0º	√	…
Comprensión 0º	√	√
Corte	…	√
Tracción 90º	…	√
Laminado		
Tracción	√	…
Comprensión	√	√
Corte en el plano	√	√
Corte interlaminar	…	√

Fuente: (Campbell, 2010)

La tracción de transferencia en la interfase entre dos fases diferentes se determina por el grado de adherencia. Una adherencia fuerte en las interfaces es necesario para una transferencia efectiva de distribución de tracción y carga a lo largo de la interfaz. Esta situación llama para el desarrollo de estrategias para la modificación superficial de superficies celulósicas, de tal modo un control efectivo sobre el interfaz del polímero de la fibra. Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de materiales compuestos, se aplica una capa, que generalmente consiste en agentes de acoplamiento o compatibilizándolo a agentes que introducen enlaces químicos entre la fibra y la matriz.

Es bien sabido que el rendimiento de los compuestos depende de las propiedades de los

componentes individuales y su compatibilidad interfacial. Para las aplicaciones, las fibras vegetales deben prepararse o modificarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Homogeneización de las propiedades de las fibras.
- Grado de desgomado.
- Grado de polimerización y cristalización.
- Buena adherencia entre fibra y matriz.
- Repelente a la humedad.
- Propiedades ignífugas es decir que el material no es inflamable.

Los estudios sugieren que la superficie de la fibra debe modificarse ya sea recubriendo o lixiviando la capa de la cutícula de la fibra y mejorando así la compatibilidad entre las fibras y la matriz de polímero. Mejía Cosme en su estudio de la caracterización del material compuesto con matriz polimérica y Fibra de Totora hace un tratamiento superficial de lijado a la Totora para mejorar su adherencia entre la matriz y la fibra, y consigue fabricar un material compuesto.

2.1.3.2 Ley de las mezclas

Esta ley de mezclas la utilizaremos para el estudio de la micromecánica. Cuando una lámina o laminado de fibra continua unidireccional (Figura 4) se carga en una dirección paralela a sus fibras (dirección de 0° o 11 dirección), el módulo longitudinal $\mathbf{E_{11}}$ puede estimarse a partir de sus propiedades constitutivas utilizando lo que se conoce como la regla de las mezclas (Campbell, 2010):

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{(Ec 1.1)}$$

donde: E_f es el módulo de fibra

V_f es el porcentaje de volumen de fibra

E_m es el módulo de matriz

V_m es el porcentaje de volumen de matriz.

La resistencia a la tracción longitudinal σ_{11} también se puede estimar mediante la regla de las mezclas:

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{(Ec. 1.2)}$$

donde: σ_f y σ_m son las fuerzas máximas de fibra y matriz, respectivamente.

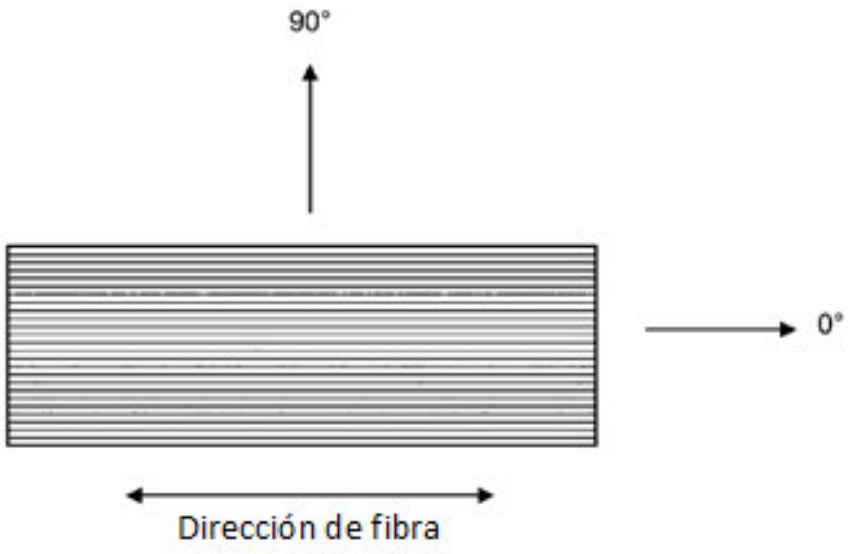


Figura 4. Lamina o laminado de fibra continua unidireccional

Fuente:(Campbell, 2010)

Porque las propiedades de la fibra dominan para todos los porcentajes de volumen prácticos, los valores de la matriz pueden a menudo ser ignorado; por lo tanto:

$$E_{11} \approx E_f V_f \quad \text{(Ec. 1.3)}$$

$$\sigma_{11} \approx \sigma_f V_f \quad \text{(Ec. 1.4)}$$

La figura 5 muestra el papel dominante de las fibras en la determinación de la resistencia y la rigidez. Cuando las cargas son paralelas a las fibras (0 °), la capa es mucho más fuerte y rígida que cuando las cargas son transversales (90°) a la dirección de la fibra. Hay una disminución dramática en la resistencia y la rigidez resultante de solo unos pocos grados de desalineación de 0°.

Cuando la lámina que se muestra en la figura 5 se carga en la transversal (90° o 22 dirección), las fibras y la matriz funcionan en serie, y ambas llevan la misma carga.

El módulo de elasticidad transversal E22 se da como:

$$1/E_{22} = V_f /E_f + V_m/E_m \quad \text{(Ec. 1.5)}$$

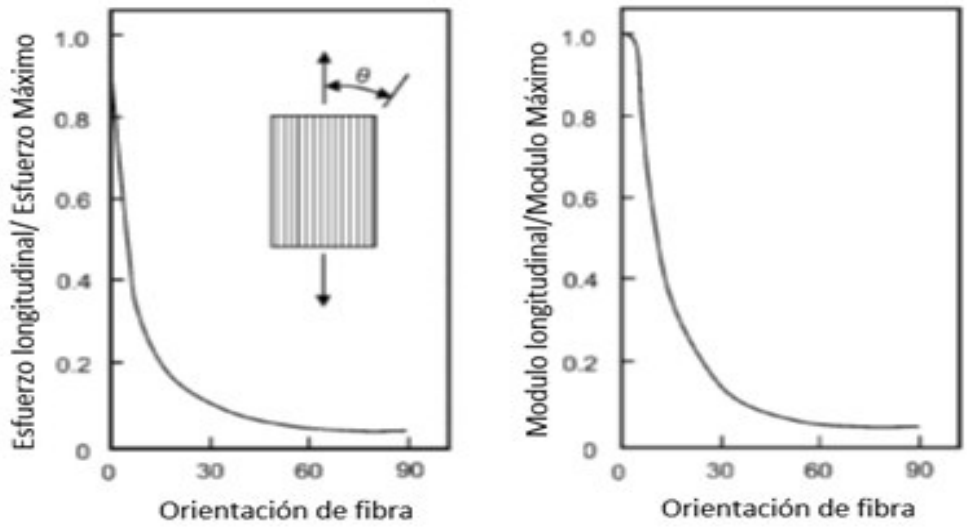


Figura 5. Influencia de la orientación de las fibras sobre la resistencia y el módulo
Fuente:(Campbell, 2010)

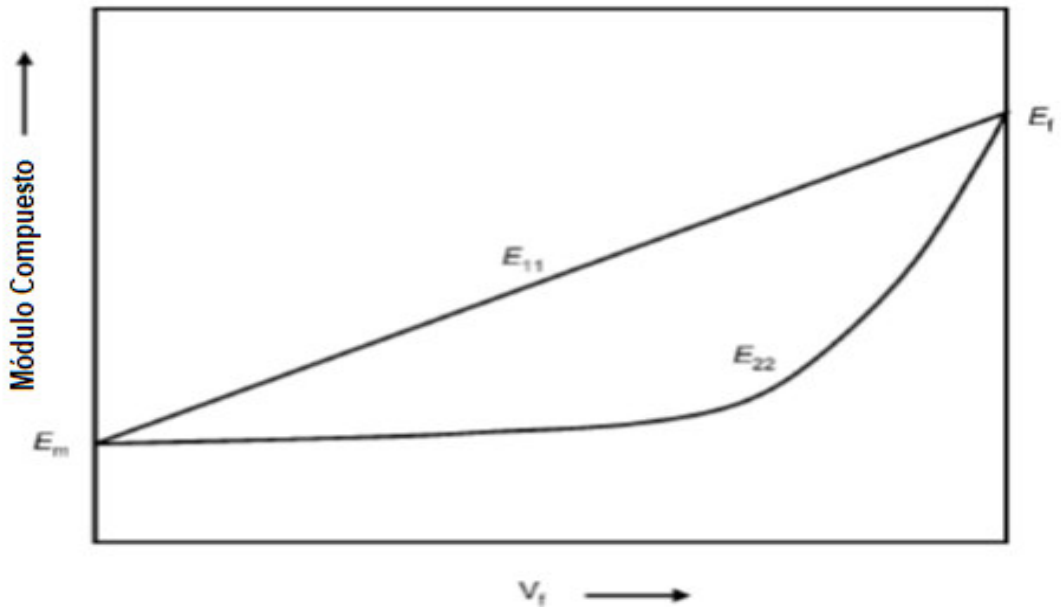


Figura 6. Muestra la variación del módulo en función del porcentaje de volumen de fibra.
Fuente: (Campbell, 2010)

Cuando el porcentaje de fibra es cero, el módulo es esencialmente el módulo del polímero, que aumenta hasta el 100 por ciento (donde es el módulo de la fibra). En todos los demás volúmenes de fibra, el módulo E_{22} o 90 ° es más bajo que el módulo E_{11} o cero grados, porque depende de la matriz mucho más débil.

Otras reglas de expresiones de mezcla para las propiedades de la lámina incluyen aquellas para la relación de Poisson ν_{12} y para el módulo de corte G_{12}:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \qquad \text{(Ec. 1.6)}$$

$$1/G_{12} = V_f/G_f + V_m/G_m \qquad \text{(Ec. 1.7)}$$

Estas expresiones son algo menos útiles que las anteriores, porque los valores de la relación de Poisson (vf) y el módulo de corte (G_f) de las fibras generalmente no están disponibles.

Las propiedades físicas, como la densidad (ρ), también se pueden expresar utilizando la regla de las relaciones de mezcla:

$$\rho r_{12} = \rho r_f V_f + \rho_m V_m \quad \text{(Ec. 1.8)}$$

Si bien estas ecuaciones micromecánicas son útiles para una primera estimación de las propiedades de la lámina cuando no hay datos disponibles, generalmente no producen valores suficientemente precisos para fines de diseño.

Para fines de diseño, las propiedades básicas de la lámina y el laminado deben determinarse utilizando pruebas de propiedades mecánicas reales.

2.2. Estado de Arte

Existen varios estudios de fibras naturales con matrices poliméricas, la gran mayoría analizan las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Se detallan a continuación varios estudios correspondientes a materiales compuestos con fibras naturales:

Sathishkumar y otros describen el proceso de extracción de las fibras naturales, la caracterización de las fibras naturales y la preparación de compuestos naturales reforzados con fibra. Determinaron que las propiedades mecánicas tales como las propiedades de tracción, flexión, impacto y dinámicas, así como las propiedades térmicas y de maquinabilidad de los compuestos con y sin fibras tratadas químicamente. (Sathishkumar, Navaneethakrishnan, Shankar, Rajasekar & Rajini, 2013)

Maged y Tammam estudian las características de curación y algunas propiedades físicas de

hinchamiento, mecánicas y térmicas de materiales compuestos de terpolímero de etileno-propileno-dieno y las fibras de cáscara de trigo. Encontrando que al mayor contenido de fibra natural se produce una mayor restricción al movimiento molecular de las macromoléculas con una distribución de tracción uniforme de las fibras.(Maged & Tammam, 2009)

Taweesak y otros analizan el problema de la ondulación de las fibras que afectan las propiedades mecánicas del material compuesto. Determinan que la ondulación de la fibra afecta las propiedades de tracción del material compuesto. Dicha ondulación de la fibra es una fluctuación en la orientación de la fibra que es inherente a la morfología de las fibras naturales de origen vegetal. (Taweesak, Akira, Baosheng & Koichi, 2015)

Sweety y otros en su estudio utilizan fibras de yute en diferentes porciones con la finalidad de caracterizar sus propiedades. Encontraron que al no tener uniformidad en sus propiedades mecánicas, físicas, químicas y la fibra de yute largo se cortó en tres porciones diferentes y posteriormente se caracterizó utilizando pruebas de tracción, calorimétrico de barrido diferencial, la difracción de rayos X y la microscopía electrónica de barrido según las partes superior, media y de corte. Encontrándose que la porción media tenía mejores propiedades mecánicas, térmicas, químicas y cristalinas en comparación con las otras dos porciones de la fibra de yute. (Sweety, Mahbub, Qumrul, Dilip & Saiful, 2015)

Amit y otros fabricaron un material utilizando fibras sintéticas como el vidrio con fibras naturales de yute, tratado químicamente reduciendo costos de producción y mejorando las propiedades mecánicas. Los resultados revelaron que la hibridación del compuesto con fibras naturales y sintéticas muestra una mayor resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto. La presencia del refuerzo natural estaba en el rango del 25 a 33.3% para obtener mejores resultados. El yute fue tratado químicamente, disminuyendo la absorción de agua,

donde los resultados fueron comparables a los compuestos de poliéster reforzado con fibra de vidrio. (Amit, Satnam, Batra & Rajesh Khanna. 2013)

Anu conjuntamente con otros investigadores proponen el estudio del efecto de varios parámetros en el rendimiento mecánico y desgaste por erosión de los compuestos epóxicos reforzados con fibra de bambú y el potencial de la utilización de la fibra natural. (Anu, Ajit, Amar & Sandhyarani, 2011)

Mejía Cosme en su investigación de la caracterización mecánica de un material compuesto en base matriz de resina poliéster con el tallo de Totora aplastado y lijado en la superficie, a partir de ensayos de Tracción y flexión bajo las normas ASTM, encontrando la curva esfuerzo-deformación del material compuesto, obteniendo un esfuerzo máximo a la tracción de 70,942 MPa y una deformación unitaria de 0,0472 mm/mm, con un módulo de elasticidad de 1503,81 MPa, Además encuentra un esfuerzo máximo a la flexión de 89,13MPa. Concluyendo que el tallo de Totora mejora el comportamiento a la tracción y flexión del material compuesto de matriz polimérica con fibra de Totora. (Cosme, 2017)

2.3. Marco Metodológico

2.3.1. Proceso experimental totora

La totora fue adquirida en los terrenos que se ubican en los alrededores de la Laguna de San Pablo ubicada en la provincia de Imbabura, a la cual se procedió hacer secar durante 4 semanas. A continuación, se selecciona los mejores tallos que no presenten imperfecciones en su superficie.

Se procederá a cortar en diferentes longitudes para poder extraer la fibra, se retirará del tallo la parte interna de la totora dejando la parte externa, con la parte externa del tallo se aplicará el método químico de cocción con Hidróxido de sodio. Se realizó este tratamiento de cocción con

NaHO, mientras que Mejía lija la superficie del tallo para tener mejor adherencia entre la matriz polimérica y la fibra de Totora. Al utilizar reactivos peligrosos se debe preparar la solución en laboratorio y la extracción de la fibra, se debe realizar en un lugar bien ventilado, ya que los gases son tóxicos que se presentan durante el proceso.

El método químico de cocción con NaOH se procederá a aplicar a las totoras en diferentes concentraciones al 10%, 5% y 2%, el Hidróxido de sodio NaOH. Se colocaron en los vasos de precipitación la Totora y el hidróxido de sodio y se hará hervir a diferentes tiempos. Se elegirá el método y la concentración que no resulte tan abrasiva con las fibras.

La resina que se utilizara es la resina epóxica de marca Samhwa Paints Epocoat1100 parte A y parte B, según la información técnica por parte del fabricante recomienda mezclar en la proporción 3:1 de relación en peso.

Se procederá a fabricar las probetas conforme a la norma ASTM, para la resina y para el material compuesto, las cuales serán utilizadas en las pruebas de tracción y flexión, para encontrar las curvas características de estos materiales.

2.3.2. Normativa

La norma utilizada es la ASTM, para las diferentes pruebas mecánicas que se aplicaran a la fibra, a la resina epóxica y al material compuesto.

Para el material compuesto se utilizó la norma ASTM 3039-14 para el ensayo a tracción y la norma ASTM 7254-15 para el ensayo a flexión. EN cambio, con la resina se aplicó ASTM D638-14 para el ensayo a tracción y ASTM D790-15-e2 para flexión. Con la fibra se emplea la norma ASTM D4761-02 tanto en la prueba de tracción como la de tracción. Las dimensiones de las probetas se muestran en tablas que están a continuación:

Tabla 3.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de un material compuesto con matriz polimérica en la norma ASTM3039-14

# Probetas a ensayar	5
Longitud	250mm
Ancho	18mm
Espesor	3.62mm
Velocidad del ensayo	2mm/min

Tabla 4.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión de un material compuesto con matriz polimérica en la norma ASTM7254-15

# Probetas a ensayar	5
Longitud	128mm
Ancho	13mm
Espesor	4mm
Velocidad del ensayo	1mm/min

Tabla 5.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de polímeros en la norma ASTM D638-14

# Probetas a ensayar	5
Longitud	165 mm
Longitud sección delgada	57 mm
Ancho	15 mm
Espesor	3.2 mm
Distancia entre sujeciones	115mm
Velocidad del ensayo	5mm/min

Tabla 6.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión para polímeros en la norma ASTM D790-15-e2

# Probetas a ensayar	5
Longitud	127 mm
Ancho	12.7 mm
Espesor	3.2 mm
Velocidad del ensayo	2mm/min

Tabla 7.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a tracción de la madera en la norma ASTM D4761-02

# Probetas a ensayar	5
Longitud	250mm
Ancho	25mm
Espesor	3mm
Velocidad del ensayo	100mm/min

Tabla 8.

Dimensiones de la probeta para Ensayo a flexión de la madera en la norma ASTM D4761-02

# Probetas a ensayar	5
Longitud	128mm
Ancho	13mm
Espesor	3mm
Velocidad del ensayo	1mm/min

2.3.3. Simulación del material compuesto

Con el uso del software ANSYS, se construirá un modelo tridimensional del material compuesto reforzado con fibra de Totora, para encontrar valores de los esfuerzos presentes en los ensayos de tracción y flexión, luego compararemos con los obtenidos experimentalmente.

CAPÍTULO III

3. FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

3.1. Proceso de extracción de la fibra de Totora

Para la selección correcta de la Totora se tomó en cuenta la madurez del tallo que debe ser de 6 a 7 meses, su altura debe ser de más de 2 metros de altura y su diámetro de 20 a 25mm.



Figura 7. Totora en su estado natural



Figura 8. Cosecha de la totora

En el proceso de cosecha se debe seleccionar que el tallo tenga la edad correcta y que su corte debe ser de aproximadamente 15 cm del suelo, se debe hacer secar por lo menos unos 30 días y que se ubiquen en un lugar donde no absorba humedad.



Figura 9. Secado de totora bajo sombra.

Se realizó la extracción de la fibra de totora por dos métodos: el método mecánico de cepillado constante con un cepillo de alambre y la extracción por el método químico que es poner a hervir con hidróxido de sodio a la Totora, en un recipiente de precipitado.



Figura 10. Fibra de Totora obtenida por cepillado constante

Al aplicar el método mecánico las fibras eran de longitudes cortas y se rompían con facilidad al presionar con el cepillo de alambre, su superficie estaba maltratada por el cepillado, por lo que descarte este método.

Para la eliminar varios componentes no celulósicos y para asegurar la compatibilidad de las fibras de la Totora con la matriz polimérica circundante, el proceso químico que consiste en hervir los tallos vegetales en solución de hidróxido de sodio, se realizó varias pruebas para separar las fibras en concentraciones al 2%, 5% y al 10% de NaHO,

Se detalla a continuación la metodología usada para la extracción de la fibra de totora:

Se elige tallos que no tenga defectos en su superficie y se procede a cortarlos a la dimensión de 30 cm, luego se extrae la parte interna del tallo, dejando solo parte externa para trabajar y poder

fabricar las probetas de 25cm de longitud.



Figura 11. Selección de Tallos a la medida de 30cm de longitud

En el método químico se utilizó el Hidróxido de sodio fue aplicado a diferentes concentraciones 10% de 5% y 2%.

La apariencia de esta fibra de totora aplicando el método químico con el Hidróxido de sodio con una concentración del 5% y 10%, la fibra estaba muy deteriorada, se debía manipularse con suavidad ya que se rompía con facilidad con la mínima fuerza que se aplique. Por esta razón se descartó realizar el tratamiento con estas concentraciones.



Figura 12. Fibra de Totora tratada con 5 y 10% de concentración del Hidróxido de sodio, con una hora de hervido.

Con la Totora se decidió bajar la concentración del Hidróxido de sodio al 2% y se ensayó a diferentes tiempos de duración haciéndolo hervir desde 5 hasta 90 minutos.

Al hacer hervir 1 hora 30 minutos las fibras resultantes son como las mostradas en la figura 3.7, estas presentaron menor resistencia a la tracción con las manos, que las que hirvieron en 30minutos.



Figura 13. Fibra de Totora obtenida por método químico en una hora con 30 minutos.

La Totora resulto ser de fibra suave, finalmente se determinó que el de Hidróxido de Sodio debía ser del 2% y el tiempo de hervido de la totora era solo de 10 minutos sumergidas los tallos seleccionados en el recipiente de precipitación a una temperatura de 83ºC.



Figura 14. Proceso de hervido con Hidróxido de sodio al 2%

Inmediatamente se debe lavar en alcohol industrial es decir Alcohol etílico con una concentración del 94% de alcohol, para frenar la acción del hidróxido de sodio. Si no se realiza dicho proceso el hidróxido de sodio continuara con su proceso abrasivo con las fibras.



Figura 15. Proceso de lavado con alcohol etílico

A continuación, se hizo secar horizontalmente bajo techo las fibras por lo menos durante unas 72 horas.



Figura 16. Proceso de secado de las fibras.

3.2. Proceso de fabricación de material compuesto

Se diseño y se fabricó los moldes para la elaboración de las probetas a partir de las normas mencionadas en las tablas 3,4,5 y 6, a continuación, se muestran los moldes cuyos planos se encuentran en el anexo A.



Figura 17. Elaboración del molde

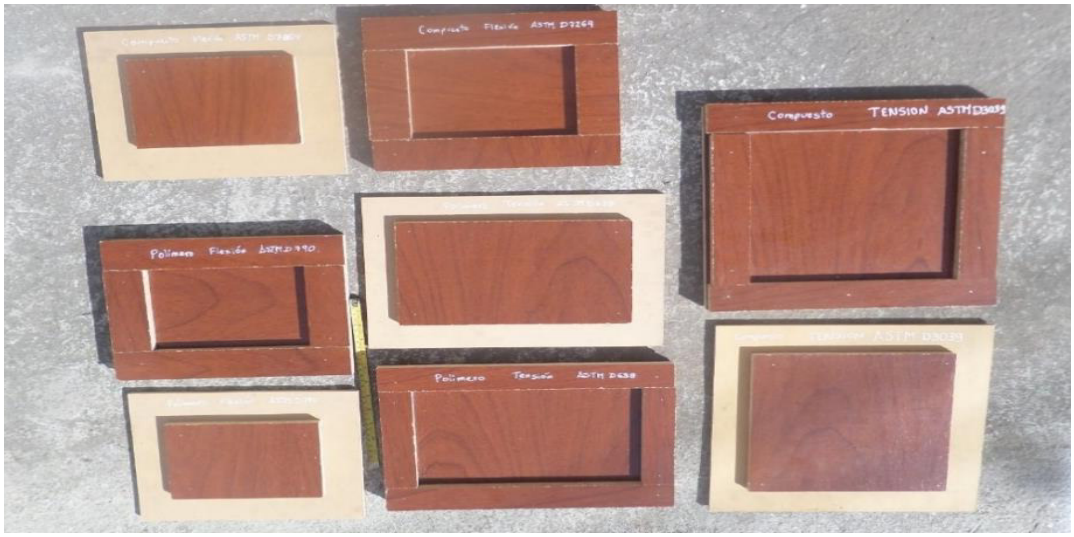


Figura 18. Moldes para probetas de tracción y flexión para material compuesto y para la resina epóxica

Luego se procede a encerar los moldes con betún neutro de zapatos y cepillo en todas las superficies que tendrá contacto con la resina para no tener problemas en el proceso de desmoldeo, ya que al usar moldes recubiertos con masillas en las partes ásperas tuve muchos problemas con las probetas presentando muchas burbujas de aire, ya que el aire no escapaba con facilidad.



Figura 19. Defectos presentados en las probetas con uso de moldes masillados en sus bordes

La matriz polimérica utilizada es la resina epóxica de marca Samhwa Paints Epocoat1100

parte A y parte B, según la información técnica por parte del fabricante recomienda mezclar en la proporción 3:1 de relación en peso.

Se procede a pesar la resina epóxica (Epocoat1100 parte A) y el endurecedor (Epocoat1100 parte B) y a se coloca primero colocando la resina en un 75% del peso total de la mezcla y luego el 25% en peso del endurecedor en el recipiente.



Figura 20. Proceso de pesaje de resina y del endurecedor

A continuación, se bate durante unos 5 minutos manualmente, lentamente y uniformemente; evitando que se genere burbujas.



Figura 21. Proceso de batido manual de la mezcla

Se monta las fibras en el molde con la ayuda de la plastilina se las sujeto sobre la cavidad del molde en relación de volúmenes 60/40 (Gay, Hoa, & Tsai, 2003), es decir 40% de volumen de Totora y 60% en volumen de resina.



Figura 22. Sujeción de las fibras de la Totora sobre los moldes con plastilina

Se procede a llenar todos los moldes con la resina epóxica, considerando en la cantidad preparada de la resina un porcentaje de absorción, considerando un desperdicio del 10%, los moldes se encuentran a nivel.



Figura 23. Llenado de la resina en los moldes y nivelación de los moldes.

Antes de cerrar el molde se procede a reventar las burbujas de aire que se van presentando.



Figura 24. Reventado de burbujas de aire antes de cerrar el molde

Un factor muy importante a considerarse es la temperatura se debe trabajar en el rango de 20ºC a 25ºC ya que puede afectar el gelatinado y curado de la resina.

A continuación, se cierra el molde, se lo prensa y se deja secar por lo menos unos 15 días, para así garantizar su proceso normal de secado.



Figura 25. Prensado de los moldes



Figura 26. Salida de exceso de la resina

Después de este tiempo se procede a desmoldar, cortar y lijar las probetas según las dimensiones propuestas según la norma ASTM.



Figura 27. Corte de probetas



Figura 28. Probetas del material compuesto para ensayo a tracción.



Figura 29. Probetas del material compuesto para ensayo a flexión.

Cabe indicar que se realizaron dos pruebas anteriores que permitieron optimizar dicho proceso y mejorar los tiempos de procesamiento y encontrar las cantidades para no tener mucho desperdicio, ya que también al cerrarse el molde ocasionaba que se quede aire dentro del molde, provocando imperfecciones en las probetas.

3.3. Materiales y Equipos

3.3.1. Materiales

- Hidróxido de Sodio al 10% de concentración
- Agua destilada
- Totora
- Betún para encerar moldes

- Guantes de látex
- Resina epóxica de marca Samhwa Paints Epocoat1100 parte A y parte B
- Alcohol etílico
- Vasos de precipitación
- Aglomerado de 15mm de espesor
- Lijas
- Espátulas
- Gafas
- Mascarillas
- Envases plásticos

3.3.2. Equipos

- Horno eléctrico
- Quemador eléctrico
- Balanza marca Yamato modelo DKS-3002
- Sierra circular manual
- Lijadora eléctrica
- Máquina de ensayos universal Amsler de Universidad ubicada en la ESPE.
- Máquina de ensayos Universal de marca MTS ubicada en la ESPE.
- Máquina de ensayos Universal, marca James Heal ubicada en la UTN.
- Microscopio ubicado en la ESPE

CAPÍTULO IV

4. CARACTERIZACION MACROESTRUCTURAL

4.1. Ensayos de Flexión y Tracción realizados a la fibra de Totora, resina epóxica y material compuesto

4.1.1. Ensayos de tracción y flexión realizados a la fibra de Totora

Para los ensayos mecánicos a la fibra natural de Totora se utilizó la máquina de ensayos Universal Modelo Titan 5 de 5000N, marca James Heal ubicada en la universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra, en el laboratorio de textil, la cual utilizan para ensayos de fibras tejida.



Figura 30. Máquina de ensayos James Heal de la Universidad Técnica del Norte-Ibarra

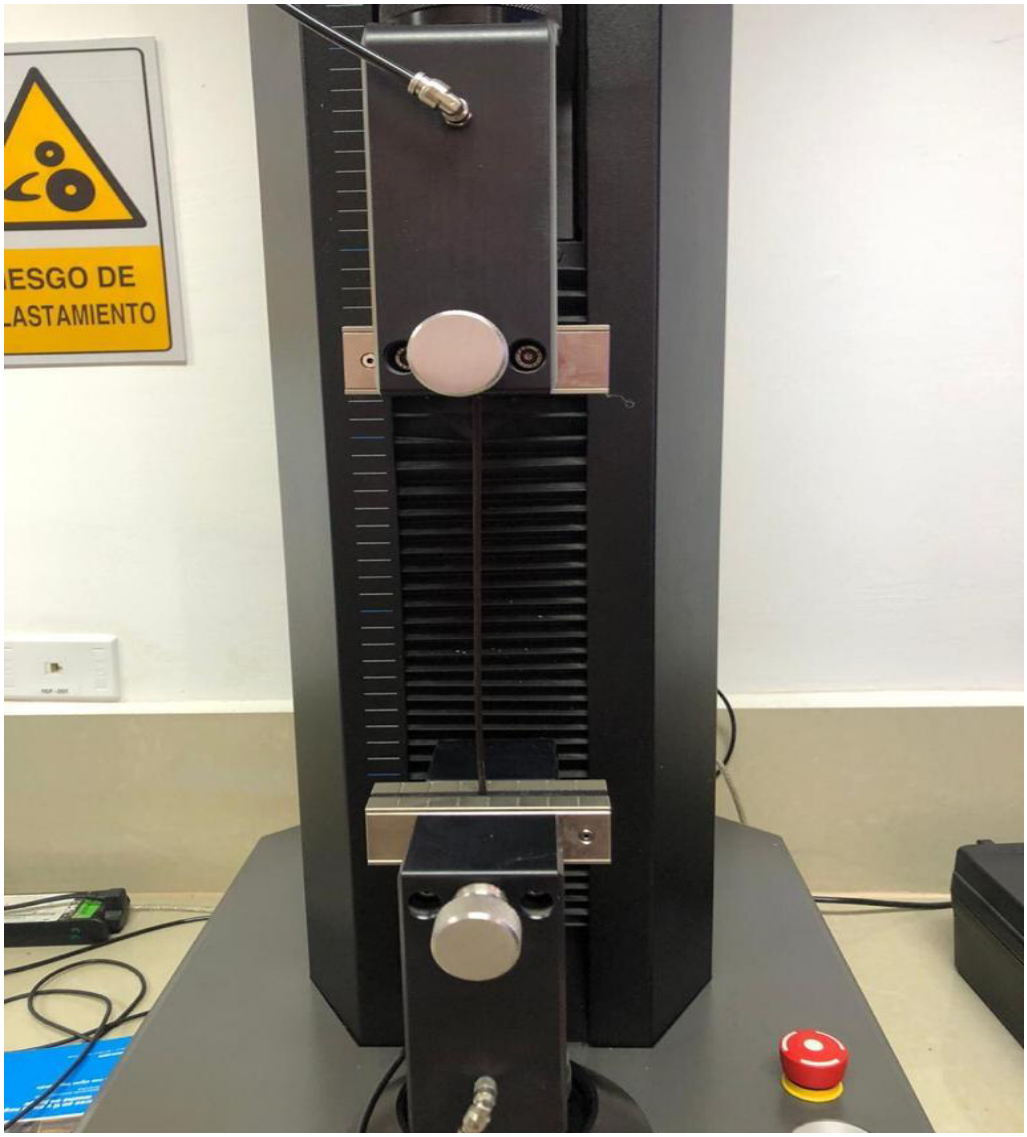


Figura 31. Probeta de Fibra de Totora montada en la Máquina de ensayos Universal James Heal

Cabe indicar que se realizó solo el ensayo a tracción y de flexión de la fibra con las probetas, bajo la norma ASTM D4761-02a

4.1.2. Ensayos de Tracción y flexión realizados a la resina epóxica y al material compuesto

Para los ensayos de tracción de la resina y el material compuesto se utilizó la maquina universal AMSLER, modelo FM-1033, ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el laboratorio de Resistencia de Materiales.



Figura 32. Máquina de ensayos universal Amsler de Universidad De las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 33. Probeta de resina epóxica montada en la Máquina de ensayos Universal Amsler

En los ensayos de flexión de la resina y el material compuesto se utilizó la máquina de ensayos universal MTS, modelo T 5002, ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el laboratorio de Resistencia de Materiales.



Figura 34. Máquina de ensayos universal MTS de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 35. Probeta del material compuesto montada en la Máquina de ensayos Universal MTS

4.2. Modelado con Ansys

La fibra de totora luego del tratamiento con el hidróxido de sodio y secado su forma aproximada es de un cilindro cuyo diámetro medio es de 2,59mm de forma regular, en la se tiene una sección circular, se modelo en el ansys en la que tenga relación de volúmenes 60-40, 60% de volumen de matriz epóxica y 40% de volumen de fibra.

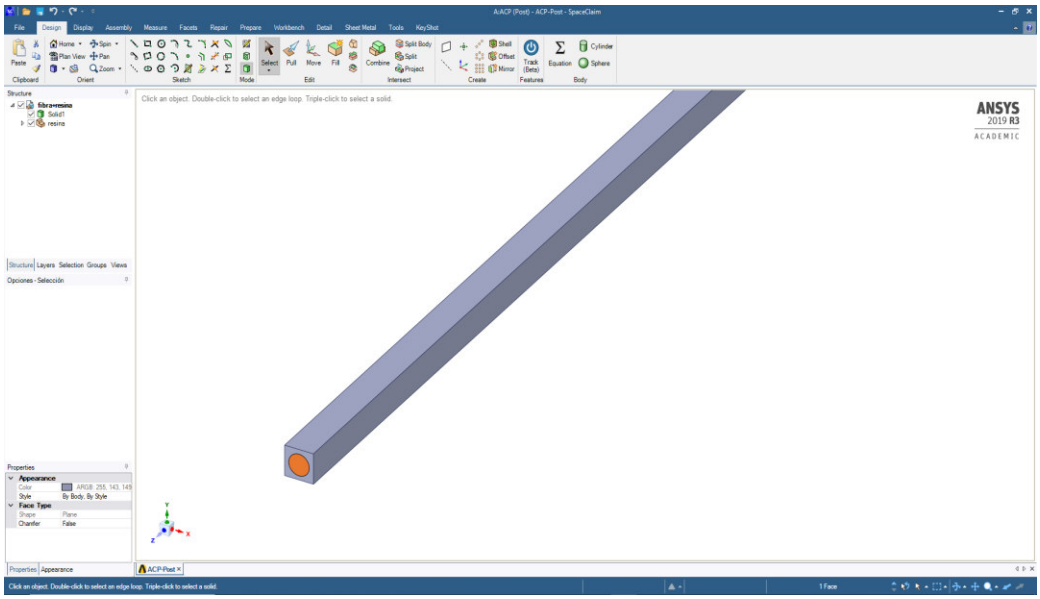


Figura 36. Representación de la conformación del material compuesto en ansys

La sección de la probeta del material compuesto es cuadrada, a continuación, se modelo en el ansys, se procede a encontrar el mejor mallado tanto de la matriz epóxica como de la fibra de Totora, se hace el simulado del comportamiento tanto para el ensayo a tracción como de flexión. Los resultados obtenidos en los ensayos tanto de flexión como de tracción se usarán para simular su comportamiento en el Ansys y evaluarlos muy próximos a la realidad.

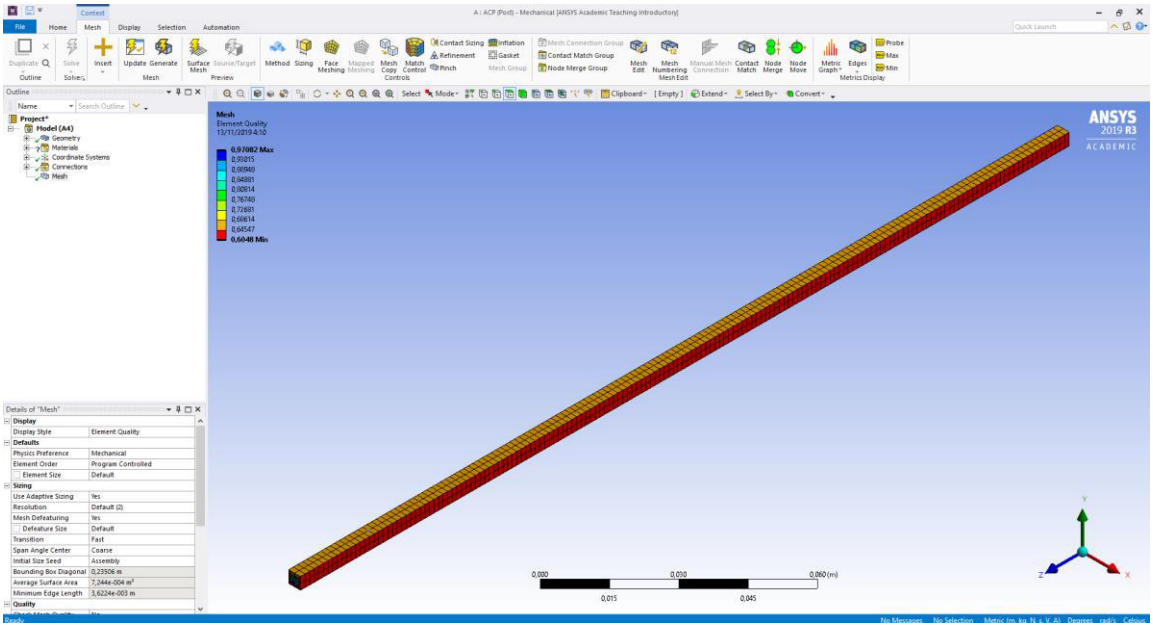


Figura 37. Representación de la malla computacional del material compuesto

4.3. Caracterización del material compuesto

4.3.1. Resultados de ensayos en la Fibra

A continuación, se muestra las dimensiones de las probetas de la fibra y los resultados del ensayo a tracción.

Tabla 9.

Dimensiones de la probeta de fibra de Totora para Ensayo a tracción

Probeta	Diámetro (mm)	Área (mm^2)	Longitud (mm)
F1	2,60	5,31	30,00
F2	2,58	5,23	29,90
F3	2,59	5,25	29,80
F4	2,59	5,25	29,90
F5	2,61	5,35	30,00
Promedio	2,59	5,28	29,92

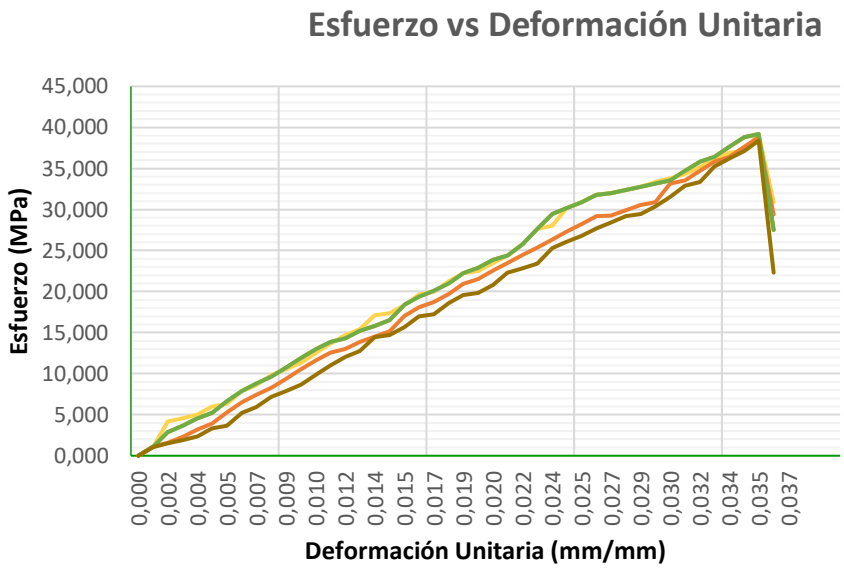


Figura 38. Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora

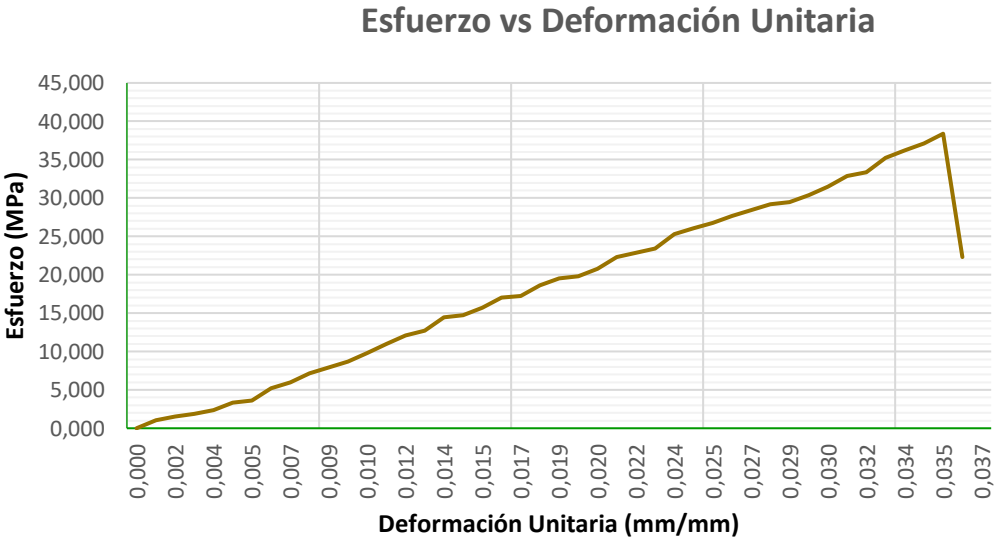


Figura 39. Esfuerzo promedio vs Deformación promedio de la fibra de totora

Se puede observar que el esfuerzo promedio es de 38,99MPa y la deformación unitaria promedio es de 0,035 mm/mm, además la fibra de totora tiene un comportamiento lineal, por lo que se puede obtener el módulo de elasticidad de 1128,51 MPa.

El esfuerzo máximo a flexión es de 97,678MPa y una deformación unitaria del 0,0536 mm/mm.

4.3.2. Resultados de ensayos en la resina Epóxica

Se muestra el grafico esfuerzo – deformación de la resina Samhwa Paints Epocoat 1100, resultante del ensayo de tracción de 5 probetas.

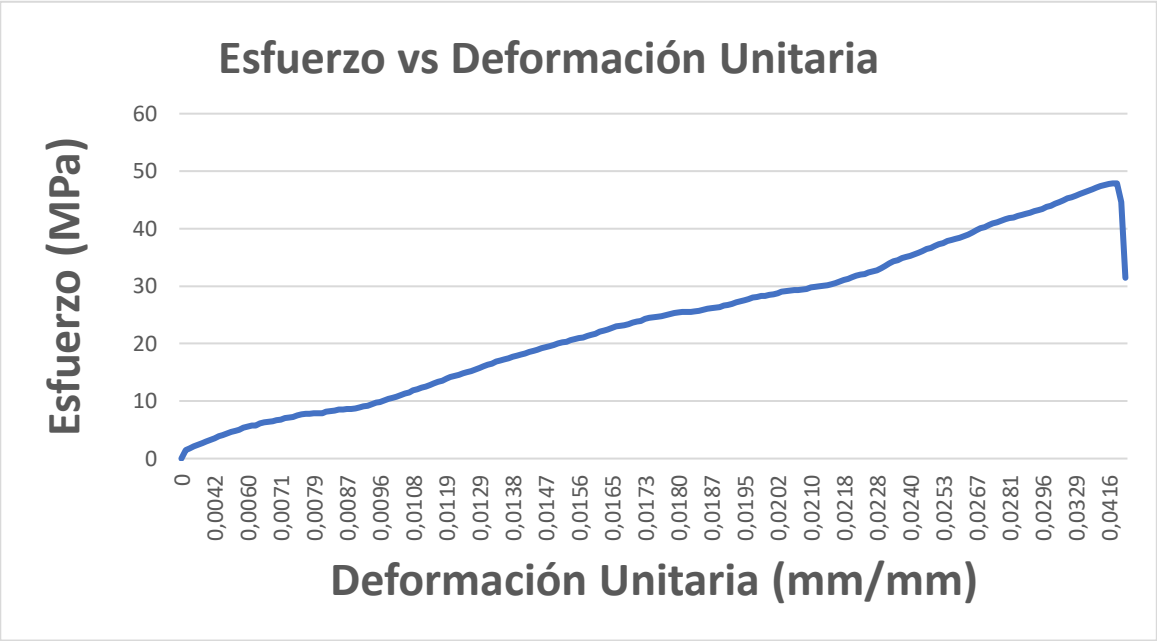


Figura 40. Esfuerzo promedio vs Deformación Unitaria promedio de la resina Epóxica

Se puede observar que el esfuerzo máximo promedio es de 47,869MPa y la deformación unitaria promedio es de 0,0436 mm/mm, además se observa que permite encontrar el módulo de elasticidad igual a 1123,68 MPa. El esfuerzo máximo a flexión es de 67.52MPa y una deformación unitaria del 0,065 mm/mm.

4.3.3. Resultados de ensayos en el material Compuesto

Se presenta a continuación el grafico esfuerzo – deformación del material compuesto, del ensayo a tracción utilizando 5 probetas en la parte experimental.

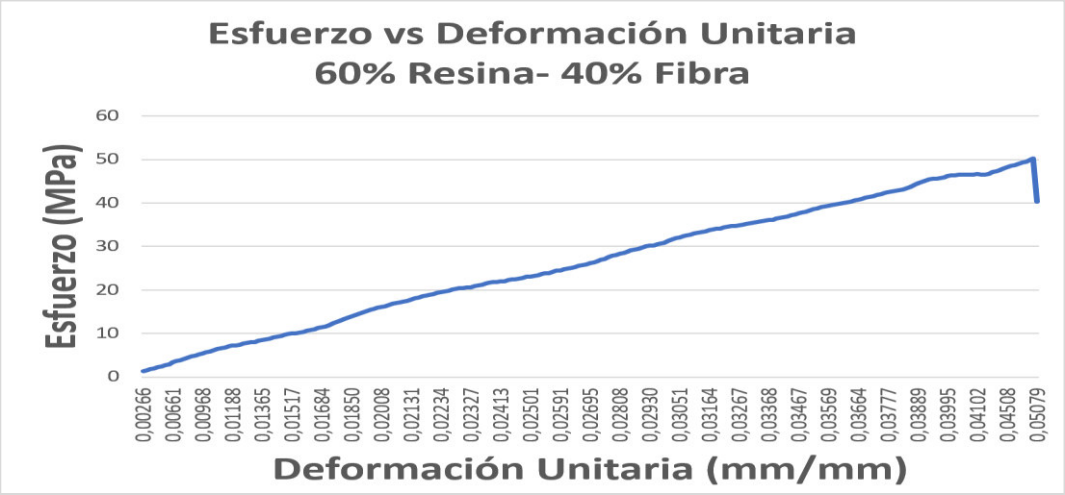


Figura 41. Esfuerzo promedio vs Deformación Unitaria promedio del material compuesto

Se puede observar que el esfuerzo máximo promedio es de 50,169MPa y la deformación unitaria promedio es de 0,050 mm/mm, además permite encontrar el módulo de elasticidad igual a 1012,08 MPa.

El esfuerzo máximo a flexión es de 41,74MPa y una deformación unitaria del 0,0634 mm/mm.

4.3.4. Simulación de los ensayos de tracción y flexión del material compuesto

4.3.4.1 Ensayo de tracción

A continuación, se simula el comportamiento que va a tener el material compuesto en el ensayo de tracción con el uso del ANSYS, con una proporción de volumen de la probeta con la relación 60% de resina y 40% de fibra.

En la figura 42 se observa el esfuerzo máximo soportado por el material compuesto.

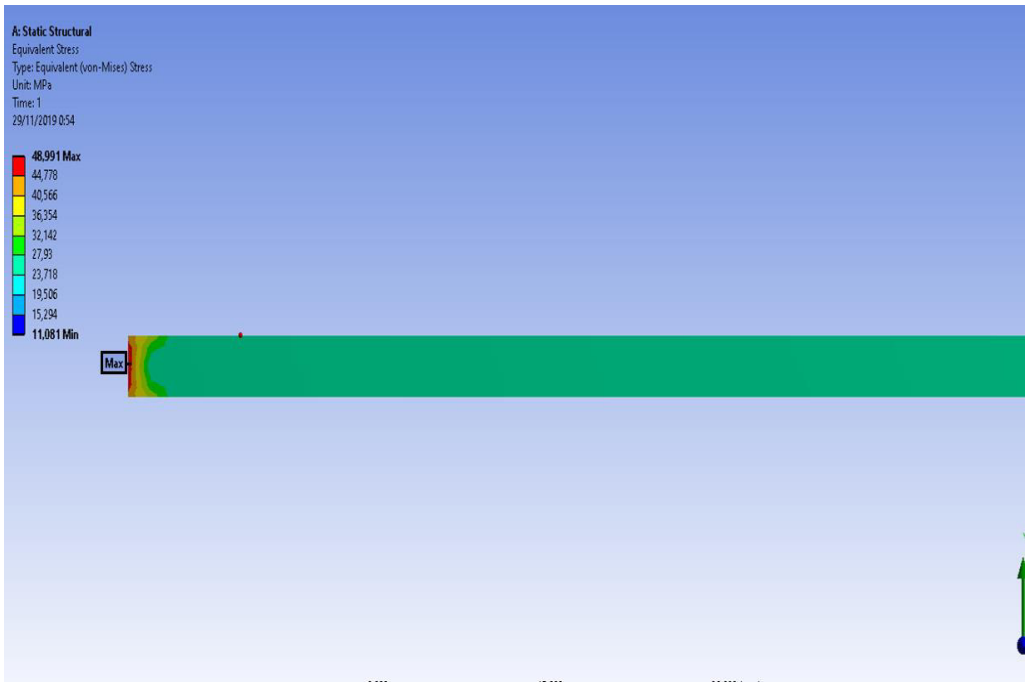


Figura 42. Esfuerzo máximo del material compuesto en tracción

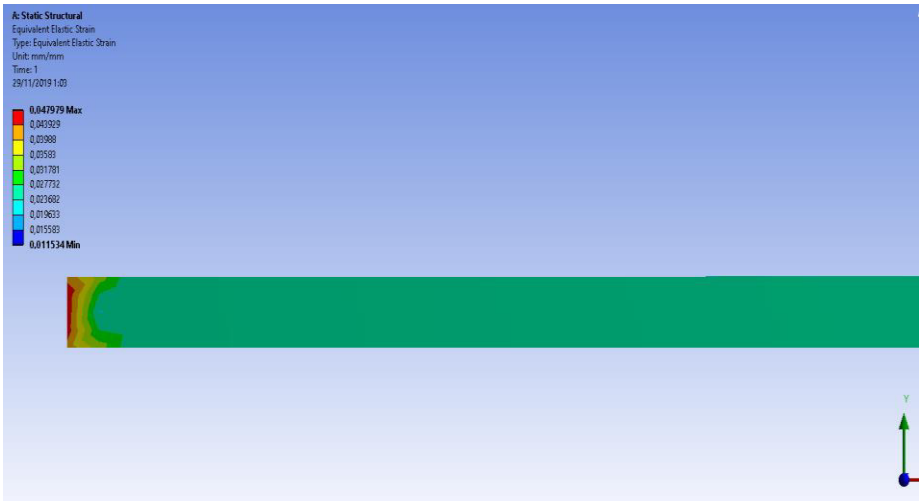


Figura 43. Deformación máxima del material compuesto a tracción

De las figuras 42 y 43 se observa que el esfuerzo máximo del material compuesto es de 48,974MPa y la deformación unitaria es del 0,0479 para el ensayo a tracción de un material compuesto.

4.3.4.2 Ensayo de Flexión

Se simula el comportamiento que va a tener el material compuesto en el ensayo de flexión en el ANSYS, con una proporción de volumen de la probeta, con una relación 60% de resina y 40% de fibra.

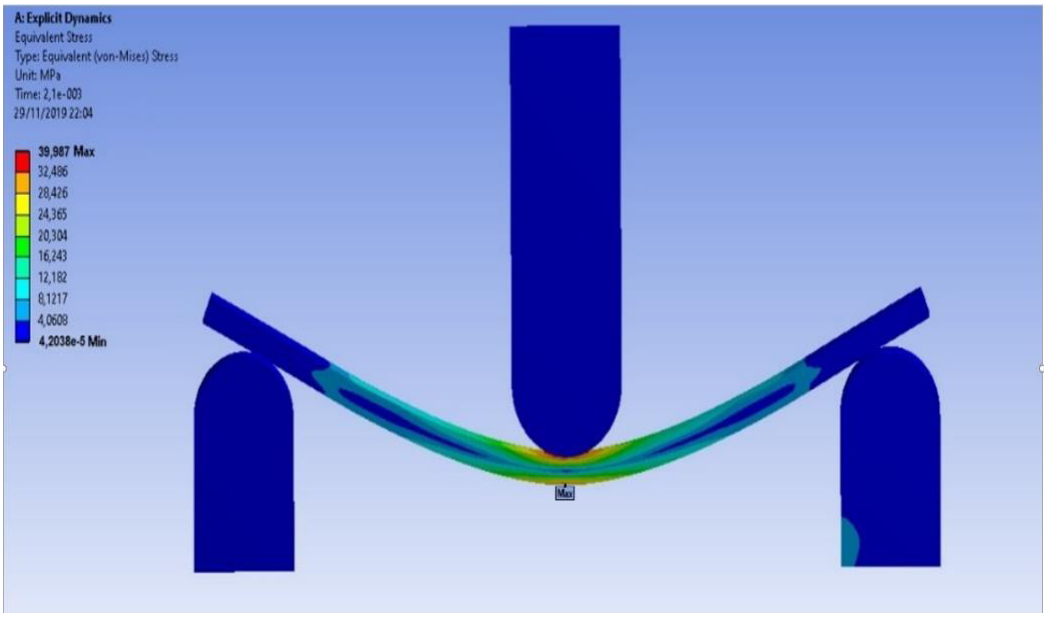


Figura 44. Esfuerzo máximo del material compuesto en flexión

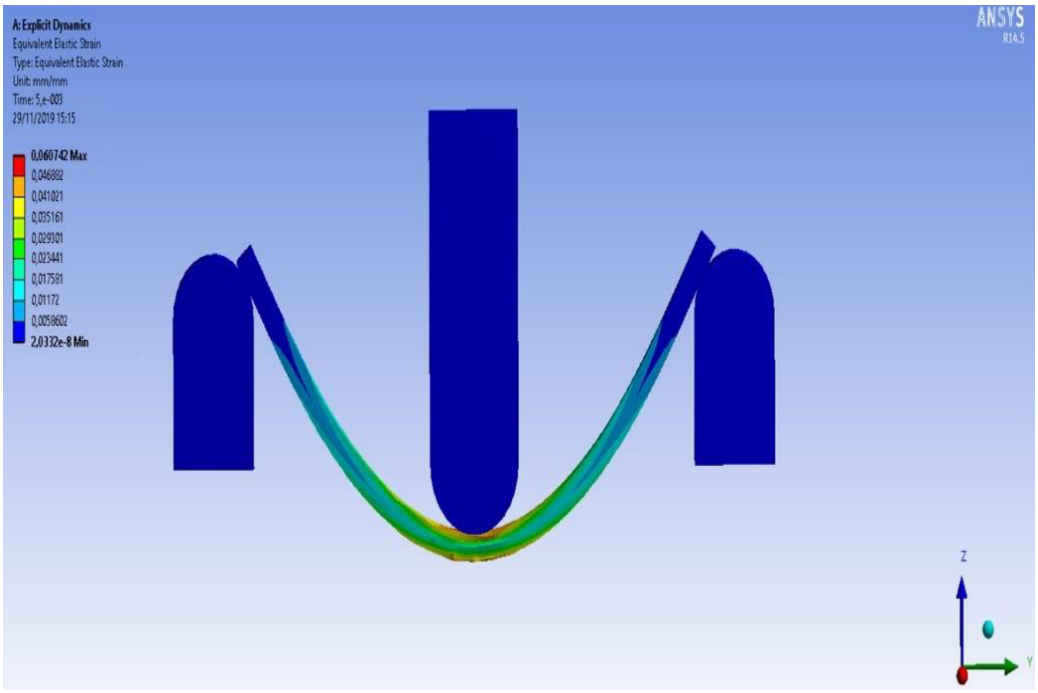


Figura 45. Deformación máxima del material compuesto a flexión

De las figuras 44 y 45 se observa que el esfuerzo máximo del material compuesto es de 39.98MPa y la deformación unitaria es del 0,060742 para el ensayo a tracción de un material compuesto.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados

Tabla 10.

Esfuerzos máximos resultantes del proceso experimental y de la simulación de los ensayos a tracción y flexión del material compuesto

ENSAYO	Esfuerzo Máximo		ERROR
	Experimental	Simulación	
TRACCIÓN	50,169MPa	48,991MPa	2,04%
FLEXION	41,74 MPa	39,99MPa	4,19%

Al comparar los resultados del esfuerzo máximo obtenidos tanto en la parte experimental como de la simulación asistida por computador, y calcular el error entre los dos procesos, se observa que existe un error del 2,04%, lo que no sucede con el cálculo del error del esfuerzo máximo en el ensayo a flexión que dio un error del 4,19% que puede depender a varios factores uno de ellos al tamaño del malla en la simulación, o que entre las fibras existieron algunas que poseían una mayor resistencia que influyo en el cálculo del esfuerzo máximo a flexión, o también puede deberse que algunas fibras fueron atacadas con mayor agresividad que otras con el Hidróxido de sodio.

Se debería realizar más estudios para estandarizar la extracción de la fibra de Totora.

Tabla 11.

Deformaciones unitarias resultantes del proceso experimental y de la simulación de los ensayos a tracción y flexión del material compuesto

ENSAYO	Deformación Unitaria		ERROR
	Experimental	Simulación	
TRACCIÓN	0,050	0,0479	4,20%
FLEXION	0,063	0,061	3,17%

En los resultados obtenidos de la deformación unitaria tanto de la parte experimental como de la simulación asistida por computador, y calcular el error entre los dos procesos, se observa que existe un error del 4,20% para tracción y del 3,17% para flexión, que pudo deberse a los factores descritos en el análisis de los esfuerzos máximos. Siendo estos erros aceptables.

5.2. Estudio de la fibra de la Totora

La mayoría de las fibras de Totora según la experimentación realizada, la sección de la fibra se acerca a una forma circular. La separación de la fibra de Totora se realizó por el método mecánico usando un Cepillo de Alambre se realizó cepillado constante y por el método químico haciéndolo hervir con el hidróxido de sodio.

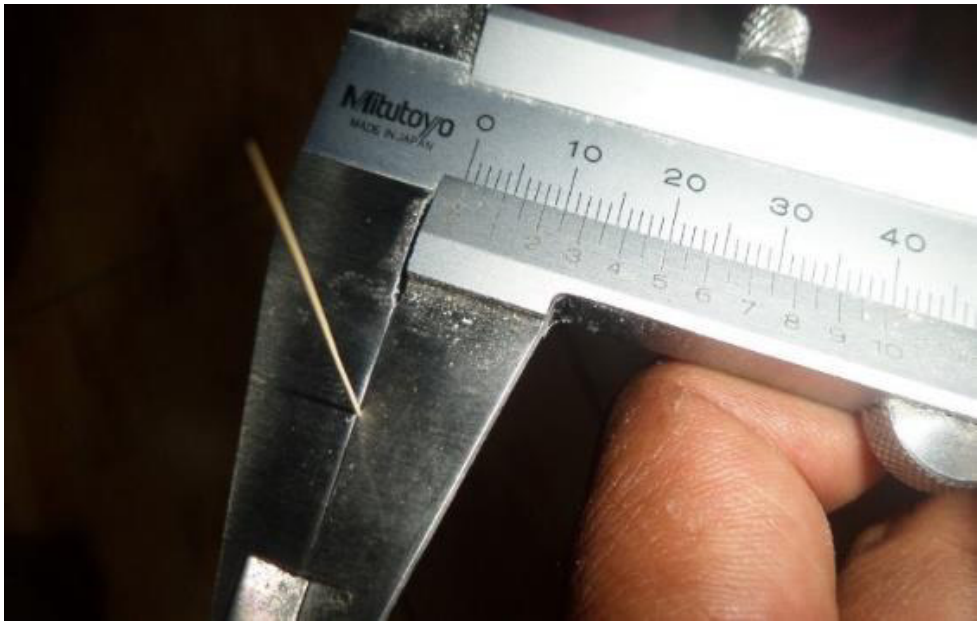


Figura 46. Medición del diámetro de la fibra de Totora

Tabla 12.

Diámetros de las fibras de Totora

	Totora No	**Totora**
Diámetro mm	0.251	0.205
Desviación	±0.038	±0.03
Densidad g/cm^3	1.11	1.01

5.3. Estudio del material compuesto

Se elaboró 3 probetas de cada concentración de volumen entre la resina y la Totora, estas fueron:

1. 60% de Volumen de resina y 40% de volumen de fibra,

2. 70% de Volumen de resina y 30% de volumen de fibra
3. 80% de Volumen de resina y 20% de volumen de fibra
4. 90% de Volumen de resina y 10% de volumen de fibra

A continuación, se presenta el comportamiento del material compuesto obtenido en el ensayo a Tracción en sus diferentes concentraciones de volumen,

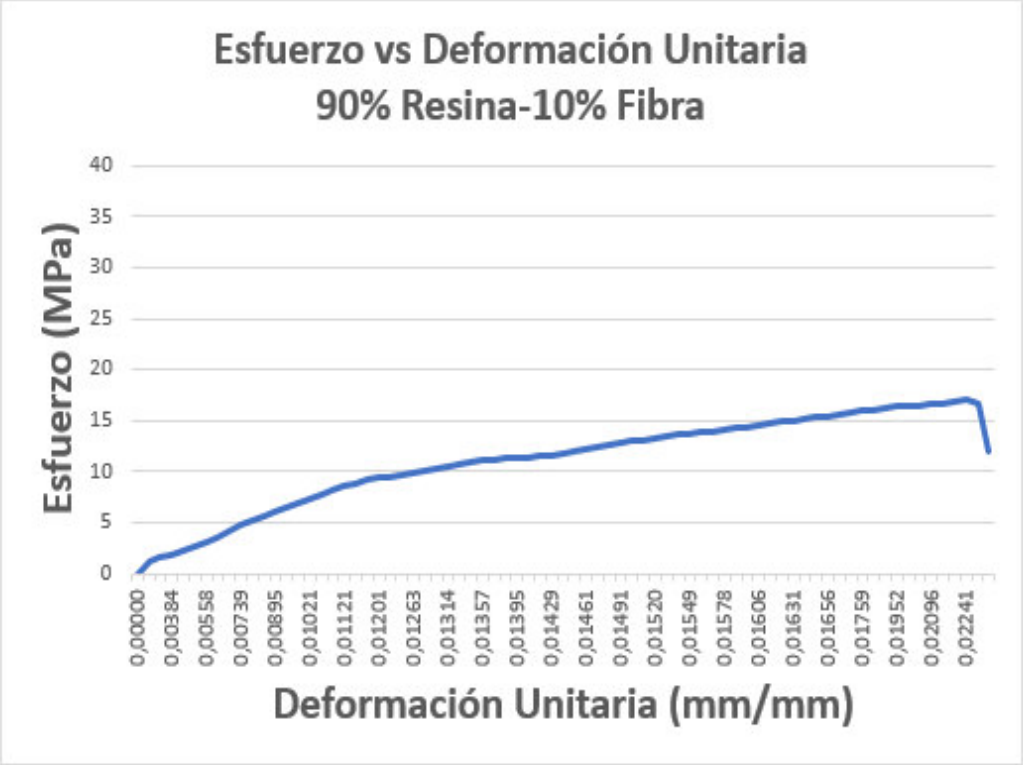


Figura 47. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 90% Resina-10% Fibra

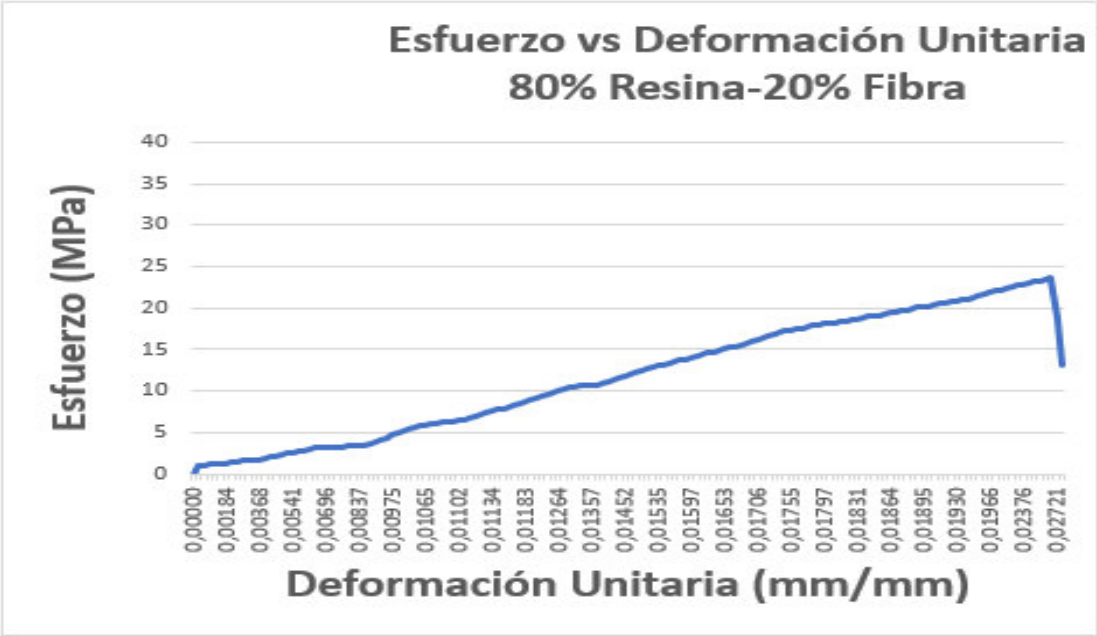


Figura 48. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 80% Resina- 20% Fibra

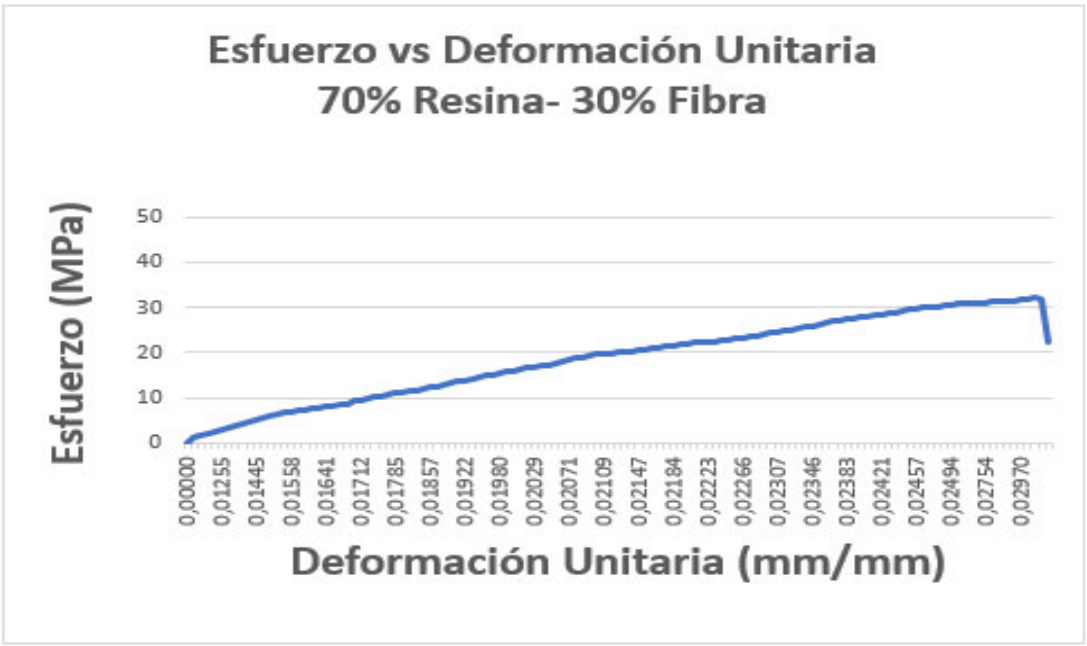


Figura 49. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 70% Resina-30% Fibra

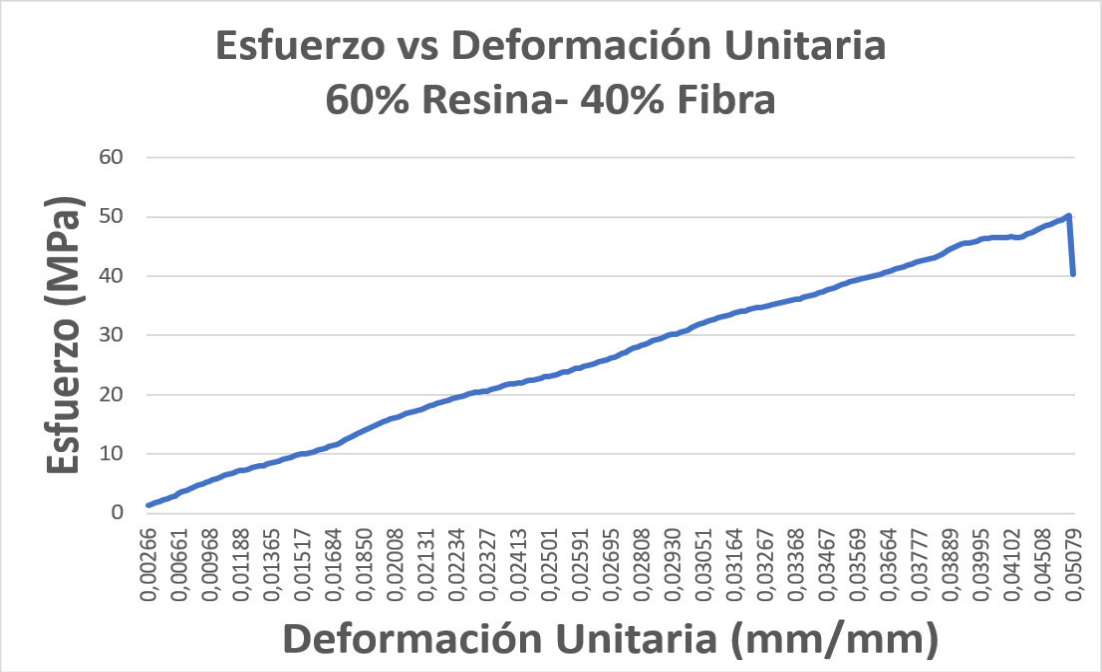


Figura 50. Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria con 60% Resina-40% Fibra

Tabla 13.

Esfuerzos máximos y Deformaciones Unitarias al esfuerzo máximo para ensayo a Tracción.

Relación	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Unitaria (mm/mm)
60% R- 40% F	50,170	0,050
70% R- 30% F	32,187	0,031
80% R- 20% F	23,733	0,028
90% R- 10% F	17,019	0,023

En la Tabla 13 se presenta el comportamiento mecánico del material compuesto en sus diferentes concentraciones resina- fibra Totora en volumen.

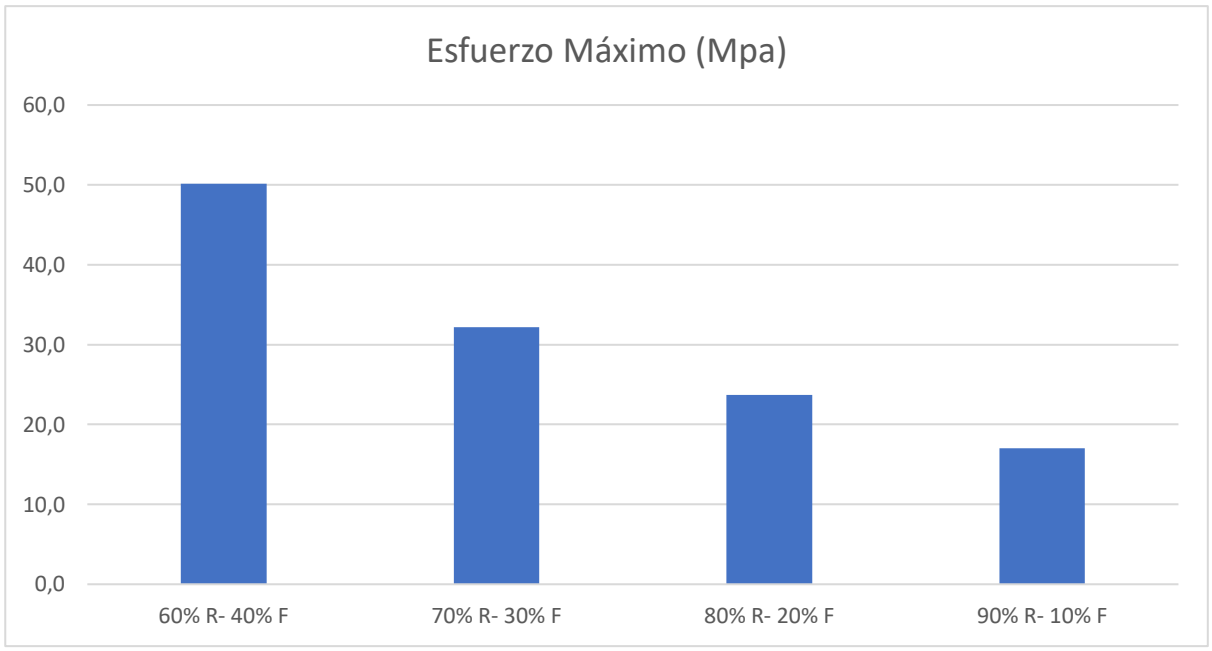


Figura 51. Comparación de los esfuerzos máximos de las diferentes concentraciones resina - fibra

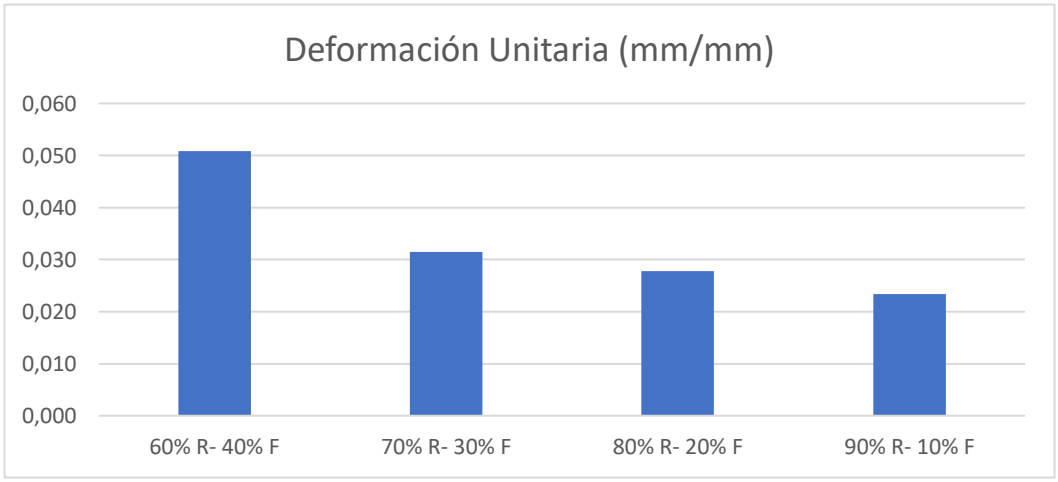


Figura 52. Deformación Unitaria al esfuerzo máximo de las diferentes concentraciones resina - fibra

El compuesto elaborado con la concentración 60% de resina y 40% de fibra de totora, presento el mejor comportamiento mecánico.

En términos generales, se pudo ver que el material compuesto reforzado con fibras de Totora al 40% y 60% de resina con tratamiento mercerizado al 2% de concentración del Hidróxido de sodio presentó el mejor de los comportamientos mecánicos, y es con el cual se va a realizar la caracterización.

5.4. Estudio de adhesión con la matriz

Al determinar el compuesto con mejores características mecánicas, se observó que las fibras se fracturaron en vez de desprenderse de la matriz ver Figura 5.8, además se pudo observar en el microscopio, ver la figura 5.9, donde se puede verificar que con el tratamiento químico usando el Hidróxido de sodio presenta una mejor adherencia la fibra con la matriz epóxica, sin la necesidad de lijarla como en otros trabajos realizados con la Totora, cabe recalcar que la dirección de las fibras es perpendicular a la superficie de corte de la probeta.

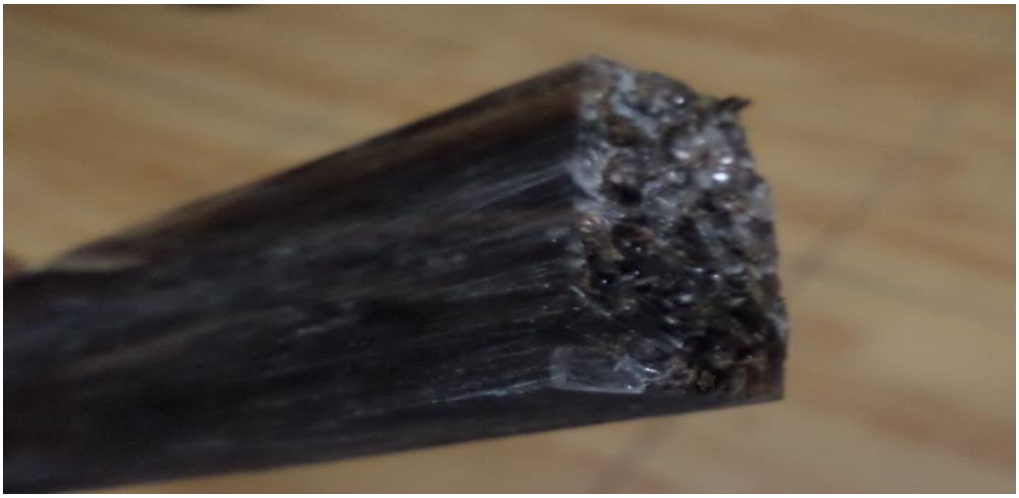


Figura 53. Fractura de la probeta del material compuesto en el ensayo a tracción.

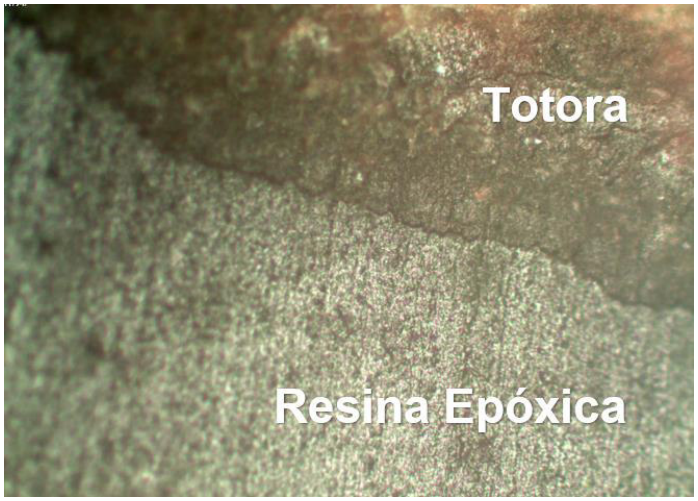


Figura 54. Vista de la Totora-reina a un zoom 200x

5.5. Conclusiones

- Se logró encontrar la metodología para la extracción de la fibra de totora y utilizando la fracción de fibra-resina 40/60 que fue la más adecuada porque permitió determinar las propiedades mecánicas del material compuesto de matriz epóxica y fibra de totora.
- Se encuentra la caracterización del material compuesto con matriz epóxica y fibra de totora conforme a la norma ASTM 3039-14 para el ensayo a tracción y la ASTM254-15 para el ensayo de flexión.
- El mejor tratamiento químico para la extracción de la fibra fue con el hidróxido de sodio, además aumento la adhesión entre la fibra y el polímero, se evidencia que la totora presenta deterioro con este tratamiento y cambio las propiedades mecánicas en comparación con las propiedades obtenidas en la investigación de Mejía Cosme.
- En la elaboración de las probetas es necesario que la presión del molde sea uniforme y se

debe tener cuidado al momento de colocar la resina en el molde para que no se formen burbujas dentro de la probeta.

- La fibra presenta muy buena adherencia que fue evidenciada realizar los ensayos de tracción y flexión donde después de la fractura de la probeta se procedió a halar la fibra, pero no se pudo conseguir su extracción de la probeta.
- Se incrementa la capacidad de separación de la fibra con un mayor tiempo de cocción con el hidróxido de sodio, pero su desventaja es el deterior de las propiedades mecánicas de la fibra.

5.6. Recomendaciones

- La fibra de Totora se debería utilizar como refuerzo para compuestos verdes, ya que estos se utilizan en muchas aplicaciones que no involucren tensiones altas, por ejemplo, en piezas no estructurales para la industria automotriz.
- Debido a la geometría de la fibra, debería modelarse volúmenes discretos a orientaciones de 0º, 45º y 90º.
- Los productos de fibra de totora al ser ecológicos, deberían hacerse otras aplicaciones para que su uso sea cada vez más popular, así se tendría un impacto positivo en los ingresos de los agricultores, productores de fibras y fabricantes de materiales. Un aumento en las aplicaciones con la fibra de totora sería beneficioso para futuras generaciones del sector donde se siembra la Totora.
- Deberían hacerse más investigación sobre la fibra de Totora, pero con el cumplimiento de estándares de alta calidad, para obtener propiedades homogéneas, como se requiere para aplicaciones de alto valor agregado y alta tecnología.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amar K. & Manjusri M. (2005). Natural Fibers Biopolymers and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

Amit Bindal, Satnam Singh, N. K. Batra, and Rajesh Khanna. (2013). Development of Glass/Jute Fibers Reinforced Polyester Composite. Indian Journal of Materials Science Research Article , 6 páginas.

Anu Gupta, Ajit Kumar, Amar Patnaik, and Sandhyarani Biswas. (2011). Effect of Different Parameters on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites. International Journal of Polymer Science Research Article, 10.

Campbell, F. (2010). Structural Composite Materials. ASM International Materials.

Chung, D. (2010). Composite Materials. Science and Applications, Second Edition.

Guerrero, V. (2011). Nuevos Materiales: aplicaciones Estructurales e Industriales (1ra. ed.). Quito, Ecuador.

Hull D. & Clyne T. (1996). An Introduction to composite materials (Vol. Second Edition). New York, USA: Cambridge Solid State Science Series.

Jones , R. M. (1999). Mechanics of composite materials. Taylor & Francis.

Jyoti Prakash Dhal and S. C. Mishra. (2013). Processing and Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite. Journal of Materials, Research Article , 6 pages.

Maged S. Sobhy and M. T. Tammam. (2010). The Influence of Fiber Length and Concentration on the Physical Properties of Wheat Husk Fibers Rubber Composites. International Journal of Polymer Science Research Article, 8 pages.

Mallick, P. (2007). Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Desing. Boca Raton: CRC.

Mejia, C. (2017). Caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (schoenoplectus californicus), mediante simulación a partir de microfotografía. Mejia C., Caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (schoenoplectus californicus), mediante simulación a partir de microfotografía.,2017.

Nasim Uddin and Rahul R. Kalyankar . (2011). Manufacturing and Structural Feasibility of Natural Fiber Reinforced Polymeric Structural Insulated Panels for Panelized Construction. International Journal of Polymer Science Research Article, 7 pages.

Sweety Shahinur, Mahbub Hasan, Qumrul Ahsan, Dilip Kumar Saha, and Md. Saiful Islam. (2015). Characterization on the Properties of Jute Fiber at Different Portions. International Journal of Polymer Science Research Article(Article ID 262348, V), 6 pages.