

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO DE GRADO
Nº RADICADO: 21.201,413**

ESTUDIANTES:

NOMBRE: DIEGO ALEJANDRO RODRIGUEZ HERNANDEZ
CÓDIGO: 65081058
CEDULA: 1030578242
NÚMERO TELEFÓNICO: 4511928
NÚMERO CELULAR: 3133487638
CORREOS ELECTRÓNICOS: diegoa.rodriguez@unilibrebog.edu.co



NOMBRE: CÉSAR FERNANDO FORERO GUTIÉRREZ
CÓDIGO: 65081056
CEDULA: 1014215525
NÚMERO TELEFÓNICO: 4768831
NÚMERO CELULAR: 3124562119
CORREOS ELECTRÓNICOS: cesarf.forerog@unilibrebog.edu.co



TEMA: MATERIALES COMPUESTOS.
CAMPO DE INTERES: MATERIALES DE USO ESTRUCTURAL.

TÍTULO:

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE
MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADA CON FIBRAS DE GUADUA
OBTENIDO POR EL PROCESO DE ESTRATIFICACIÓN MANUAL.

DIRECTOR: MsC. ING. MAURICIO ALEJANDRO SIERRA CETINA
PROFESIÓN: INGENIERO MECÁNICO
MAT. PROFESIONAL:
DIRECCIÓN: CARRERA 70 # 53 - 40 BOGOTÁ - COLOMBIA
TELÉFONOS: 4232735/30
OFICINA: LABORATORIO DE INGENIERIA I-203
CORREO ELECTRÓNICO: mauricioa.sierrac@unilibrebog.edu.co

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

PROYECTO DE GRADO

TITULO

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE
MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADA CON FIBRAS DE GUADUA
OBTENIDO POR EL PROCESO DE ESTRATIFICACIÓN MANUAL.**

Presentado a la Universidad Libre para optar al título de ingenieros mecánicos

**ELABORADO POR: CÉSAR FERNANDO FORERO GUTIERREZ
DIEGO ALEJANDRO RODRIGUEZ HERNANDEZ**

DIRIGIDO POR: MsC. ING. MAURICIO ALEJANDRO SIERRA CETINA

**UNIVERSIDAD LIBRE
BOGOTÁ, COLOMBIA
2015**

AGRADECIMIENTOS

Por parte de Cesar Fernando Forero Gutiérrez.

En agradecimiento al creador, al gran arquitecto, quien pone el sol sobre mi cabeza cada día, quien llena mi vida de bendiciones, quien guía mis pasos, a él sea la gloria. A una guerrera incansable, Nancy Gutiérrez cuyo sacrificio y entrega hicieron de este sueño realidad, quien acompañó mis frías madrugadas y lleno mi desvelo con su cálido amor, a ti madre te debo la culminación de este gran paso y más que eso, te debo la vida misma, a Carolina Forero por su apoyo incondicional. A Yeny Robayo quien depositó su fe en mí y me ayudó a ver la salida, aun cuando las cosas se ponían difíciles, gracias por pintar mi vida de colores, sé que nos esperan este y muchos triunfos más. A César A. Forero por su sustento y apoyo. Agradezco también a la Universidad Libre por ser fuente de conocimiento y por dar las bases académicas para el ejercicio de mi labor como ciudadano de bien, a Mi compañero de tesis Diego Alejandro Rodríguez por su arduo trabajo para la realización de este sueño, por el sacrificio y acompañamiento en cada etapa.

Por parte de Diego Alejandro Rodríguez Hernández.

Principalmente el agradecimiento es a Dios, el dueño de mi vida, quien se me presenta en el apoyo de mi familia, en la compañía de mi amigo Cesar, en el compromiso y voluntad presente ante toda adversidad para poder llegar a celebrar tan valioso logro en mi vida.

Por parte de autores.

Queremos agradecer a la Universidad Libre de Colombia sede Bogotá, por la formación académica que nos brindó en ingeniería mecánica que es la base para el desarrollo de nuestro criterio. Al ingeniero Mauricio Sierra Cetina por ser el guidador y director del proyecto, esperamos haber colmado sus expectativas. A las asesorías de la ingeniera y docente Caori Patricia Takeuchi, al magister en ingeniería Martin Estrada Mejía, que por medio de ellos se logró resolver los obstáculos y darle rumbo a esta investigación.

RESUMEN

Debido a conocer los beneficios que puede otorgar un material compuesto reforzado con fibras naturales, este trabajo de grado estudiaron las fibras de guadua angustifolia (bambú) como refuerzo dentro de una matriz polimérica termoestable, con el fin de conocer sus propiedades mecánicas a la flexión y compresión para así ver sus características como un material estructural. Las fibras fueron evaluadas bajo un diseño experimental ya que se pretendió observar su resistencia a la tensión variado la edad del cultivo.

La extracción de las fibras de guadua del culmo, se realizó mediante un ataque alcalino en base de un hidromódulo generando así una digestión que proporcione un grado de delignificación y propiedades mecánicas adecuadas para favorecer el compuesto en la fase de refuerzo.

En la fabricación del material compuesto se utilizó la técnica de estratificación manual, se analizó el comportamiento de la variación de la configuración de refuerzo al 10%, 20% y 30% presente en el compuesto.

En los ensayos mecánicos efectuados bajo normas ASTM respectivamente, se registró un incremento en las propiedades mecánicas directamente proporcional al aumento del refuerzo, de igual manera, esto se vio reflejado en la disminución de la densidad al no exceder más de $1,35g/cm^3$. Se evidencio que un material compuesto reforzado con un 30% de fibra de guadua presento las mejores propiedades con respecto a la reforzada con 10%, con un aumento en su comportamiento a la flexión alrededor del 40% y en un 50% en compresión.

1. TABLA DE CONTENIDO

1. TABLA DE CONTENIDO	5
2. INTRODUCCIÓN	7
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACIÓN	10
5. OBJETIVOS	12
OBJETIVO GENERAL.	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	12
6. MARCOS	13
<i>MARCO TEÒRICO</i>	13
<i>MARCO CONCEPTUAL</i>	13
<i>ESTADO DEL ARTE</i>	23
<i>MARCO LEGAL Y NORMATIVO</i>	29
7. DISEÑO METODOLÒGICO	29
EXTRACCIÓN DE FIBRAS DE GUADUA.	32
CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA:	33
OBTENCIÓN DEL COMPUESTO:	33
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL COMPUESTO (ENSAYOS DE FLEXIÓN Y COMPRESIÓN).	34
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	34
CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.	35
SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE LA FIBRA.	35
DIGESTIÓN Y EXTRACCIÓN DE LA FIBRA.	36
ENSAYO DE TENSIÓN.	39
OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.	42
CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.	46
ENSAYOS DE FLEXIÓN.	47
ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	49
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
8.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.	50
DIGESTIÓN DE LA FIBRA.	50
ENSAYOS DE TENSIÓN	52
ÁREAS TRANSVERSALES	52
ESFUERZO Y DEFORMACIÓN A TENSIÓN.....	53
SELECCIÓN DE FIBRA COMO REFUERZO EN MATRIZ POLIMÉRICA.	55
DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES VOLUMÉTRICAS DE REFUERZO.	56
ENSAYO DE FLEXIÓN.....	58
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.	62
ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	63
DEFORMACIÓN A LA ROTURA.	67

SELECCIÓN DE LA CONFIGURACION DE REFUERZO CON MEJORES PROPIEDADES MECANICAS.....	69
9. CONCLUSIONES	72
10. RECOMENDACIONES.....	70
11. BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS	76
ANEXO A.....	76
PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO.....	76
ANEXO B.....	78
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FIBRAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA.	78
ANEXO C.....	81
DETERMINACION DEL PESO DE LA FIBRA Y SUS FRACCIONES VOLUMETRICAS.	81
ANEXO D.....	83
FORMULAS EMPLEADAS EN LOS ENSAYOS MECANICOS	83
1. ENSAYOS A FLEXION SEGUNA LA NORMA ASTM D-7264-07	83

2. INTRODUCCIÓN

El tema del uso de materiales compuestos en las últimas décadas ha tomado cada vez más importancia debido a la necesidad de obtener nuevos materiales, a medida de que esto avanza; la inclusión de fibras naturales como refuerzo ha sido tema de estudio a nivel mundial con en el fin de poder sustituirlos por las que son derivadas del petróleo, proporcionando beneficios al medio ambiente por sus propiedades renovables.

Las fibras naturales forman parte de una materia prima de bajo costo y de fácil obtención, la incorporación de estas como refuerzo busca de igual manera, que las sintéticas, propiedades del compuesto superiores a la de los materiales que lo constituyen, para así generar compuestos altamente competitivos, conservando una buena relación resistencia-peso. La producción de este tipo de fibras esta alrededor de los 30 millones de toneladas alrededor del mundo con aplicaciones como tapicería, vestidos y otros textiles de consumo.¹

Una de las fibras naturales Colombianas que muestra gran importancia como refuerzo es la fibra de guadua que hace parte de la familia de los bambús, abarcando un amplio campo en el territorio nacional principalmente en la región Andina, posee características mecánicas que se ha logrado denominar como “El acero vegetal”, de acuerdo a algunos estudios realizados por la Universidad de los Andes y la Universidad Nacional.² En nuestro país se registra una tradición importante en el uso de este recurso en regiones como el eje cafetero, siendo la guadua un elemento muy empleado en la construcción de viviendas alternas.

Frente a la trascendencia de los potenciales de la fibra de guadua angustifolia y sus posibles aplicaciones, se permite predecir que al combinar sus propiedades físicas y mecánicas con otro material como matriz, se obtendrá un compuesto liviano y resistente, con características superiores a las de los materiales individuales, para lograr de igual manera ampliar su aplicaciones en la industria. El tema de los materiales compuestos en Colombia brinda la oportunidad de ampliar los estudios relacionado a estas investigaciones y darle un mayor alcance, adicional darle un valor agregado a los productores de guadua, posibilitando abarcar un mayor mercado nacional e internacional, ya

¹ P. Potón, H.V Guerrero, OBTENCION DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRAS DE ABACÁ MEDIANTE ESTRATIFICACION MANUAL.

² ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

que en la exportación de este bambú se encuentran por debajo de países como Ecuador teniendo esta menos hectáreas cultivadas.³

Razón por la cual este proyecto tiene como finalidad obtener un material compuesto de matriz de resina poliéster reforzado con fibra de guadua angustifolia mediante el proceso de estratificación manual, analizando sus ventajas y desventajas para ser aplicado como un elemento estructural, basándose en una caracterización mecánica con el desarrollo de ensayos de flexión y tensión.

³ ESPINAL, Carlos. et al. *“La Cadena De La Guadua En Colombia”*. Bogotá D.C. 2005.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la necesidad de generar materiales nuevos que sustituyan los usados tradicionalmente y que posean menor peso y costo, pero que a su vez tengan igual o mayores propiedades mecánicas; se ha llegado hablar del interés de incorporar los materiales compuestos formados por polímeros y fibras naturales. En industrias tales como la automovilística lo han implementado para la fabricación de partes y piezas internas e incluso externas en continentes como Europa,⁴ generando para Colombia una desventaja en el área de fabricación y comercialización, ya que solo se logra una participación de Latinoamérica, Sur África y Medio Oriente de un 3% en conjunto, frente a la producción mundial⁵.

La caracterización de estos materiales compuestos es de gran importancia ya que por medio de esta se logra obtener una base para conocer a fondo las múltiples aplicaciones que se pueden llegar a tener, además de las ya conocidas por los materiales que forman la mezcla.

Por otro lado es trascendental desarrollar un material a base de una fibra natural colombiana, debido a que las fibras más utilizadas como refuerzo son de compleja obtención como lo es el vidrio, carbono y aramida. En Colombia es aun nuevo implementar este tipo de materiales, esto se debe al poco desarrollo y baja gestión tecnológica enfocada en el procesamiento industrial de fibras naturales como la guadua. Como este recurso presenta una escasa valoración de los usos alternativos y la falta de investigación, no se ve la relación costo-beneficio que esta fibra puede aportar por medio de su manejo, transformación y comercialización como una materia prima industrial⁶.

⁴ Andrezej K. Bledzki, Volker E. Sperber, COMPORTAMIENTO RECIENTES Y APLICACIONES DE POLIMEROS RELLENOS DE FIBRA NATURAL, Universität Kassel, Alemania. Institut Für Werkstofftechnik, Kunststoff-und Recyclingtechnik. Alemania.

⁵ Oscar F. Delgado, Jorge A. Medina, EXTRUSIÓN DE PERFILES ESPUMADOS DE MADERA PLASTICA, Universidad de los Andes. Colombia, 2010.

⁶ Hector J. Martinez, Carlos F. Espinal, LA CADENA DE LA GUADUA EN COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia, 2005.

4. JUSTIFICACIÓN

La elección de este tema como proyecto de grado, se debe al interés por el desarrollo de nuevos materiales que sustituyan a los tradicionales aportando iguales o mejores propiedades mecánicas y así generar nuevas líneas de investigación para designar aplicaciones específicas a los mismos. Por medio de este planteamiento se busca además generar un incentivo en la aplicación de materiales compuestos en proyectos de ingeniería para incentivar el desarrollo de iniciativas en el campo tecnológico e investigativo a Colombia frente a otros países.

En Colombia con el apoyo de varias entidades como el Centro de Investigación en Procesamiento de Polímeros (CIPP) de la universidad de los Andes, se logró crear un material único en el mundo con el fin de aplicarlo en la fabricación de viviendas de interés social, a partir de la extrusión de perfiles de una mezcla de PVC y cisco de café.⁷

Debido a tan valioso aporte se encuentra la guadua como posible refuerzo en matrices poliméricas ya que es conocido como el “Acero vegetal” por sus propiedades mecánicas y al amplio campo que abarca la fibra natural en la región Andina en la construcción de viviendas y estructuras alternativas⁸, se ha generado un gran interés por el desarrollo de involucrarlo en mezclas con otros materiales. Por este motivo surge esta investigación, con el fin de caracterizar mecánicamente un material compuesto de matriz polimérica y la fibra de guadua angustifolia.

El proyecto tendrá como alcance la caracterización mecánica de un material compuesto a base de una matriz polimérica termoestable reforzada con fibras de guadua angustifolia, obtenido por medio de las condiciones del proceso de estratificación manual. Se analizarán las diferentes propiedades mecánicas que tendrá el material a diferentes porcentajes del refuerzo y se determinará cual será el más óptimo para que la interface entre la matriz y el refuerzo proporcione las propiedades adecuadas para ser aplicado como un material estructural. A partir de un análisis previo a la fibra de guadua angustifolia frente a las variables principales que afectan sus características mecánicas, se realizarán ensayos de tensión donde se evidencie las propiedades viables para ser usado como refuerzo en el compuesto.

La fabricación del material implica el proceso de estratificación manual y las condiciones que en este se vean involucradas, la confiabilidad que proporciona

⁷ Oscar F. Delgado, Jorgue A. Medina, EXTRUSION DE PERFILES ESPUMADOS DE MADERA PLASTICA, Universidad de los Andes. 2010.

⁸ Hector J. Martinez, Carlos F. Espinal, LA CADENA DE LA GUADUA EN COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia, 2005.

el diseño de un modelo experimental y la correcta aplicación de los ensayos de flexión y compresión.

5. OBJETIVOS

Objetivo General.

Caracterizar mecánicamente un material compuesto de matriz polimérica termoestable y fibras de guadua angustifolia, para la aplicación como elemento estructural.

Objetivos Específicos.

- Caracterizar mecánicamente las fibras de guadua angustifolia por medio de ensayos de tensión basado en los parámetros de un modelo experimental.
- Analizar el comportamiento de las probetas del material compuesto obtenidas por el proceso de estratificación manual, con diferentes porcentajes de fibra de guadua angustifolia, por medio de los parámetros de los ensayos de flexión y compresión.
- Comparar las propiedades logradas en las probetas con los diferentes porcentajes de fibra de guadua como refuerzo en la matriz polimérica.

6. MARCOS

6.1 Marco Teórico.

Materiales compuestos.

A lo largo de los últimos años el número de aplicaciones de los materiales compuestos ha venido aumentando, aunque desde hace miles de años el hombre ha utilizado los materiales compuestos. La madera un ejemplo de origen natural contiene una matriz celulósica reforzada con fibras de lignina que le proporcionan características de elasticidad y deformación sin ruptura, la mayor parte de los materiales compuestos utilizados actualmente son diseñados y fabricados con la necesidad de encontrar una combinación de propiedades que no se logran en los cerámicos, los plásticos y/o metálicos.

Se entiende por material compuesto combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interface discreta y reconocible que los separa⁹. Están conformados de materiales continuos y discontinuos, los cuales se relacionan como matriz y refuerzo, el material que comúnmente es el más fuerte y duro se llama refuerzo y el medio continuo se le denomina matriz, por ende, son materiales donde sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. Este tipo de materiales proporciona propiedades superiores o probablemente únicas en algún aspecto específico frente a las propiedades de los componentes que lo conforman por separado.

Componentes de los materiales compuestos

Este tipo de materiales se caracteriza por que poseen dos fases denominadas matriz y refuerzo.

La característica del componente de la **matriz** en los materiales compuesto es que el refuerzo queda embebido en ella, las funciones principales de la fase continua es definir las propiedades físicas y químicas del material, transmitir las cargas al refuerzo, protegerlo y brindarle cohesión. Cuando es sometido el material a diversas cargas mecánicas la matriz cumple diferentes funciones, bajo cargas en tracción, traslada la carga a cada una de las fibras o partículas, de manera que estas sean las que soportan el esfuerzo aplicado, lo cual dependerá de la buena adhesión entre la matriz y el refuerzo.

Figura 1. Comportamiento de refuerzos a tensión y compresión



FUENTE: STUPENGO. Franco, “*Materiales Y Materias Primas: Materiales Compuestos*”. Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

⁹ Franco Stupengo, MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS: MATERIALES COMPUESTOS, Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

Frente a cargas compresivas es la que soporta el esfuerzo debido a su fase continua. También es la que determina la resistencia al impacto y brinda con una de sus funciones detener la propagación de fisuras.

Los compuestos de matriz metálica incluyen cobre, níquel, magnesio, aluminio y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas, la producción de una pieza de este tipo de material compuesto es más costosa que la de una pieza de matriz polimérica, por lo tanto, este tipo de matrices son las más utilizadas. Según la aplicación se puede llegar a usar tanto termoplásticos como plástico termoestables, que varían en la fase de mezclado, para los termoestables se presenta como líquido pero endurece cuando es calentado y presenta un proceso irreversible, mientras que para los termoplásticos al calentarlo se presenta en un estado fluidificador.¹⁰

También se pueden encontrar como matriz materiales cerámicos frágiles, los cuales presentan buenas propiedades a temperaturas elevadas y llegan a ser más livianos que los de la matriz metálica.

Las propiedades que le ofrece el **refuerzo** al compuesto es incrementar la resistencia mecánica, rigidez, dureza y se emplea en ocasiones para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión, por lo tanto, es un componente determinante para obtener las principales propiedades mecánicas¹¹. El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras, pero en cuanto menor sea el tamaño de la partícula y sean distribuidas homogéneamente en la matriz va tener resultados aún más efectivos, pero los más numerosos y ampliamente utilizados son aquellos reforzados con fibras.

Si el compuesto es sometido a temperaturas elevadas, la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Las principales características de las fibras de los materiales son la resistencia específica y el módulo específico.

Figura 2. Ecuaciones resistencia y módulo de materiales compuestos

$$\begin{aligned} \text{Resistencia específica} &= \frac{\sigma_y}{\rho} \\ \text{Módulo específico} &= \frac{E}{\rho} \end{aligned}$$

FUENTE: STUPENGO. Franco, “*Materiales Y Materias Primas: Materiales Compuestos*”. Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

¹⁰ Andrezej K. Bledzki, Volker E. Sperber, COMPORTAMIENTO RECIENTES Y APLICACIONES DE POLIMEROS RELLENOS DE FIBRA NATURAL, Universität Kassel, Alemania. Institut Für Werkstofftechnik, Kunststoff-und Recyclingtechnik. Alemania.

¹¹ A. Besednjak, MATERIALES COMPUESTOS. Alemania, 2009.

Dónde:

σ_y = esfuerzo de cedencia

ρ = la densidad

E = módulo de elasticidad.

Los tipos de fibras de refuerzo se pueden clasificar según su origen, ya sea de origen minera o de origen orgánico.

Tabla 1. Clasificación de las fibras según su origen.

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, Polietileno

FUENTE: STUPENGO. Franco, “*Materiales Y Materias Primas: Materiales Compuestos*”. Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

Las fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras aramidadas ocupan un papel resaltante como las más empleadas debido a que estas poseen una resistencia a la tracción extremadamente alta.

Las **fibras de vidrio** son las comúnmente utilizadas por tienen varias ventajas que presenta frente a las fibras de carbono y aramida, como la densidad, propiedades a la tracción y su costo, pero posee menor resistencia y módulo de tensión, aunque puede sufrir mayor elongación sin romperse. Este tipo de fibra está formada fundamentalmente por sílice, que va relacionada a diversos óxidos, como la alúmina, alcalinos y alcalinotérreos, y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias para ser posteriormente procesado en una operación de estirado.

En la práctica, los vidrios más utilizados son aquellos que contienen en disolución por lo menos dos silicatos: un silicato alcalino (p.e. silicato de sodio) y uno alcalinotérreo (p.e. silicato de calcio). El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso al bajar la temperatura de fusión de la sílice, como su viscosidad. Por el contrario, su presencia afecta a la resistencia química del vidrio y por ello se introduce un alcalinotérreo. Los principales tipos son¹²:

12-13 A. Besednjak, MATERIALES COMPUESTOS. Alemania, 2009.

- Vidrio E (Eléctrico): representa casi totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y tiene buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.
- Vidrio A (Alto contenido en álcali): es menos resistente u tiene un módulo más bajo que el vidrio E. presenta gran resistencia química.
- Vidrio B (Boro): de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido en álcali.
- Vidrio ERC (Eléctrico y Resistente químico): con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- Vidrio X: con base de Li₂O por su transparencia a los rayos X.

Las principales características de la fibra de vidrio son¹³:

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustible, materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- Imputrescibilidad. Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.

Las **fibras de carbono** utilizadas en la actualidad como refuerzo de materiales compuestos se fabrican a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo (PaN), a través de un complicado proceso de calentamiento. Estos filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro que oscila entre 5 y 8 mm y están combinados en mechas que contienen entre 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos¹⁴.

Este tipo de fibras es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido

¹⁴ Franco Stupengo, MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS: MATERIALES COMPUESTOS, Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de alto modulo como en las de alta resistencia.

Su densidad es baja alrededor de 1.6 kg/dm^3 , lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas.

Entre las fibras de carbono de bajo costo de uso actual se pueden mencionar: Fortafil 510-80K, Toray S400-70K, Zoltek Panex 3348K, Toray T700-24K, Toray T600-24K, Tenaz HTS 5631-24K y Tenax 5631-24K. Como se aprecia en la nomenclatura de estas fibras, las mechas están compuestas por un numero muy elevado de filamentos, desde 24000 hasta 80000, valores muy superiores a las mechas estándar que suelen tener entre 5000 y 12000 este es el motivo del bajo costo¹⁵.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibra de carbono:

- La fibra de carbono de alto modulo (HM) es la más rígida y requiere de mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a la tensión.
- La fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la asistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Este tipo de fibras se distinguen por sus características específicas elevadas. Las fibras HM tiene un módulo específico 70 veces superior a l de las aleaciones de aluminio.

¹⁵ Franco Stupengo, MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS: MATERIALES COMPUESTOS, Colección encuentro Inet. Argentina. 2011.

Tabla 2. Propiedades de fibras para refuerzo.

Designación	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	III
Diámetro de hilo (μm)	8	7	7-8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2,6-5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,56	2,56

FUENTE: LIBRO MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS.

5.1.2. Fibras naturales.

Como se sabe desde épocas remotas el hombre se ha valido de la naturaleza para su sustento, desde la obtención de alimentos para su supervivencia, hasta el desarrollo de armas y herramientas; por eso en algunos textos se hace alusión al uso de las fibras naturales y a la gran importancia que el hombre le ha dado desde sus orígenes¹⁶. A pesar de que se ha visto desplazado su uso por la aparición de otros materiales tales como los metales, cerámicos y polímeros las fibras naturales han ganado nuevamente espacio gracias a la versatilidad que ofrecen para poder ser mezclados con los polímeros.

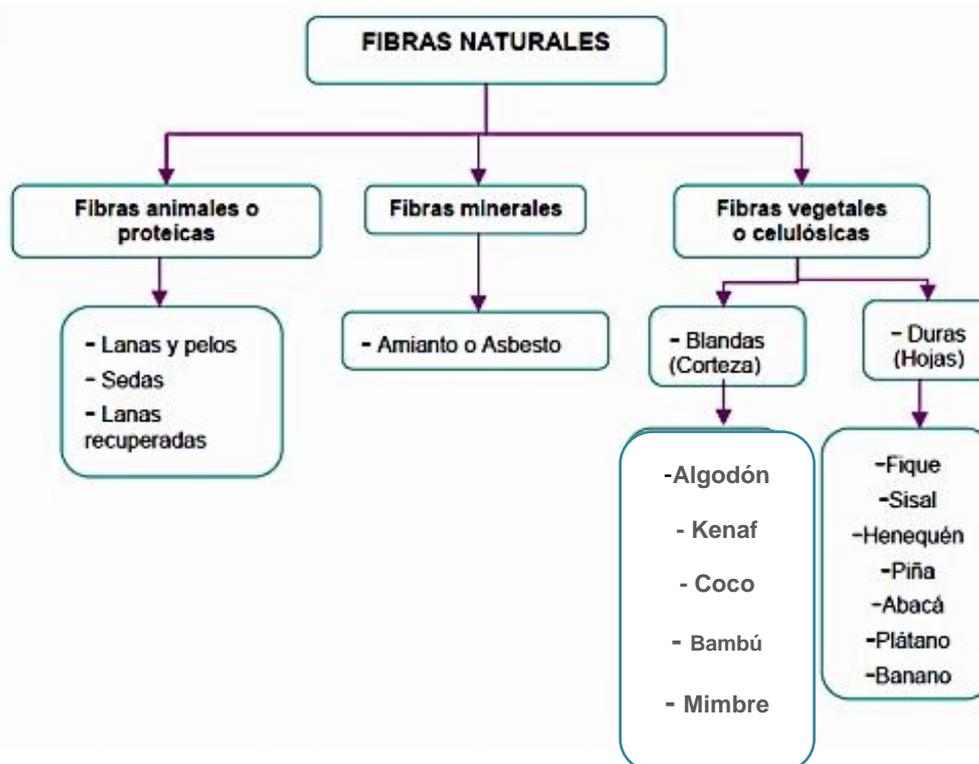
Hoy por hoy las **fibras orgánicas** se han convertido en una alternativa importante como refuerzo de matrices poliméricas, debido a la resistencia mecánica que muchas de ellas aportan al compuesto y al bajo impacto ambiental que estas generan.

Para conocer el uso que puede presentar la fibra en una matriz polimérica, es importante conocer su clasificación para que exista una interfase perfecta, y que de esta manera el compuesto tenga unas propiedades mecánicas apropiadas. Por este motivo se presenta una clasificación de las fibras orgánicas que se pueden encontrar¹⁷.

¹⁶ VAN DE WEYENBERG I, et al. "Influence And Chemical Treatment of Flax Fibres On Their Composites". 2003

¹⁷ VILLAREAL, Andrés. "Fibras Naturales: Alternativa Para el Desarrollo Social". 2005.

Figura 3. Clasificación de las fibras naturales.



FUENTE: VILLAREAL, Andrés. *"Fibras Naturales: Alternativa Para el Desarrollo Social"*. 2005.

De la anterior clasificación se resalta una fibra que es muy común del territorio nacional y que posee una resistencia mecánica excelente; tanto así que es considerado el acero vegetal, esta es la *Guadua Angustifolia kunth*, la cual hace parte de la familia de los bambús.

Hasta hace aproximadamente una década en comercio del bambú en el mundo era un fenómeno informal, ya que se cuenta con poca información sobre el mismo. El productor y exportador más importante del bambú es China, el cual posee grandes extensiones cultivadas y cuenta con altos recursos financieros para la transformación e investigación en este campo. A nivel Latinoamérica, México fue el principal país exportador con 52 mil dólares siendo Estados Unidos el principal importador¹⁸. Colombia se encontraba por debajo de países como Ecuador teniendo esta menos hectárea cultivadas de bambú o guadua. A pesar de estos datos se nota un crecimiento de Colombia teniendo exportaciones de US\$ 19.340 a Estados Unidos, esto se presenta debido al crecimiento en la investigación enfocada a esta fibra y su implementación en procesos alternos a los convencionalmente usados¹⁹.

Debido a este crecimiento los guaduales se han convertido en un recurso para el desarrollo social, económico y ambiental de varias regiones del país.

¹⁸ ESPINAL, Carlos. et al. *"La Cadena De La Guadua En Colombia"*. Bogotá D.C. 2005

¹⁹ CORPEI-CBI. *Bamboo. Project "Exportable supply expansion of Ecuador"*. 2001.

Colombia registra una tradición importante en el uso de este recurso en regiones como el eje cafetero, siendo la guadua un elemento muy empleado en la construcción de viviendas alternas.

5.1.3. Guadua Angustifolia Kunth.

CARACTERÍSTICAS BOTANICAS DE LA GUADUA

La guadua se clasifica como un bambú espinoso que pertenece específicamente a la familia Poaceae, a la sub-familia Bambusoideae y a la tribu Bambuseae. En el año 1820, el botánico Kunth constituye este género utilizando el vocablo “guadua” con el que los nativos de Colombia y Ecuador se referían a este bambú. Este género se puede distinguir principalmente por sus tallos robustos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y además por las hojas caulinares en forma triangular²⁰. En la siguiente tabla se presenta las características químicas de diferentes tipos de bambúes correspondientes a este género.

Tabla 3. Composición química de diferentes especies de bambúes.

Especie	Lignina (%)	Celulosa (%)	Holo celulosa (%)
Guadua Angustifolia (Van Soest)	15.21	60.83	71.39
Guadua Angustifolia (ASTM)	23.75	-	24.97

FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

Una especie particular que se presenta como una planta nativa es la Guadua Angustifolia la cual sobresale en este género debido a sus propiedades físico-mecánicas y por el tamaño de sus culmos, ya que estos alcanzan hasta 30 metros de altura y 25 centímetros de diámetro. La Guadua Angustifolia ha sido seleccionada como una de las mejores 20 especies de bambúes del mundo debido a su capacidad para absorber energía y admitir una mayor flexión, estas características la convierten en el material ideal para ser construcciones sismorresistentes²¹.

La Guadua obtiene su altura definitiva en los primeros seis meses de vida y su madurez se logra entre los 3 y 5 años. La guadua carece de tejido decambium, esta deficiencia explica porque no hay un incremento de diámetro con el paso del tiempo en su estructura. El ciclo de vida de la guadua tiene cuatro fases:

²⁰ POSSO, Andrés. “*Diversidad Genética Y Estructura Poblacional De Guadua angustifolia Kunth En El Eje Cafetero Colombiano*”. 2011.

²¹ ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

- Renuevo en donde el culmo está cubierto totalmente por las hojas cualinares.
- Joven o “biche” en donde se inicia el desarrollo de las ramas laterales que van a sostener las hojas de follaje, se reconoce por el color verde intenso del culmo.
- Madura o “hecha” en donde el culmo es de color verde claro, con evidencia de hongos, en esta etapa la guadua es apta para ser aprovechada y con edad entre 4 hasta 6 o siete años.
- Seca; esto ocurre cuando el culmo se torna amarillo después de los siete años.

UBICACIÓN DE LA GUADIA ANGUSTIFOLIA EN COLOMBIA

En Colombia la guadua se encuentra distribuida a lo largo de la cordillera central y en la zona céntrica del país en departamentos tales como Antioquia, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca²².

En la siguiente tabla se puede observar la distribución de las áreas de guaduales naturales y establecidos en el territorio nacional.

Tabla 4. Distribución De Los Guaduales Naturales Y Establecidos En Colombia

Departamentos	Área Natural (Ha.)	Área Plantada (Ha.)	Total área en Ha.
Caldas	5875	320	6195
Quindío	7708	640	8348
Risaralda	3515	615	4130
Tolima	2895	1326	4221
Valle del Cauca	6992	1400	8392
Subtotal eje Cafetero	26985	4301	31286
Cundinamarca	378	228	606
Antioquia	489		489
Putumayo y Caquetá	2000		2000
Cauca	1500	300	1800
Subtotal otros departamentos	4367	528	4895
Total país	31352	4829	36181

FUENTE: ESPINAL, Carlos. Et al. “*La Cadena De La Guadua En Colombia*”. Bogotá D.C. 2005.

²² ESPINAL, Carlos. et al. “*La Cadena De La Guadua En Colombia*”. Bogotá D.C. 2005

5.2. Marco Conceptual.

En el tema de materiales compuestos es de gran importancia conocer conceptos que son muy utilizados en el proceso de mezcla de matrices poliméricas con fibras naturales y algunas definiciones relacionadas con este tópico.

Materiales compuestos: un material compuesto es aquel que se compone de dos o más materiales los cuales se conocen también como fases, estas fases pueden ser la matriz y el refuerzo²³.

Matriz: como se mencionaba anteriormente es una fase que hace parte fundamental de un material compuesto, ya que esta se define como el elemento que proporciona la forma al compuesto²⁴.

Refuerzo: conocido también como segunda fase del material compuesto es la que se encuentra embebida en la matriz y que generalmente aporta un incremento en cuanto a propiedades mecánicas se trata²⁵.

Fibras largas: Conocidas También como continuas son aquellas que se ubican en una sola dirección en la matriz debido a su longitud que por lo general es de más de diez centímetros, estas fibras tienen un comportamiento anisotrópico.

Fibras cortas: son las que presentan longitudes más cortas, estas pueden orientarse de diversas direcciones, haciendo que se comporten de manera isotrópica. Además estas fibras presentan la facilidad de que el compuesto pueda ser fabricado de maneras tradicionales.

Comportamiento Anisotrópico: es cuando las propiedades de un material cambian dependiendo de la dirección en donde se evalúe, un ejemplo aplicado a los materiales compuestos es que si se aplica una carga de tracción en dirección paralela a unas fibras unidireccionales, sus propiedades van a ser diferentes si se evalúan perpendiculares a dichas fibras.

Comportamiento isotrópico: es aquel que sin importar la dirección en donde se evalúe el material sus propiedades mecánicas van a ser las mismas; esto sucede en materiales que tienen una disposición de fibras multidireccional²⁶.

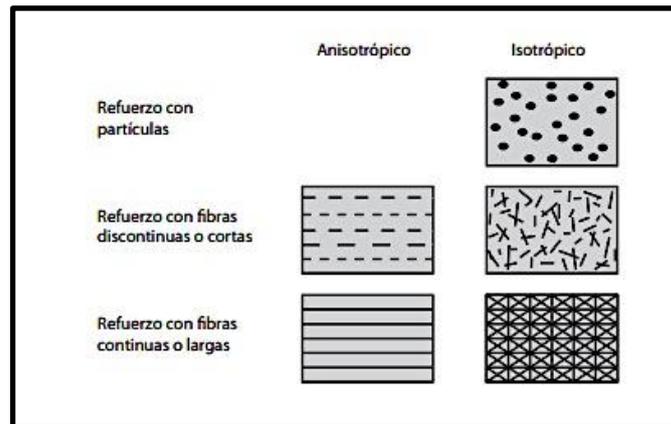
²³ BLEDZKI. Andrzej, SPERBER. Volker. "Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural".

²⁴ ESTRADA. Martin. "Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos". 2010.

²⁵ ESTRADA. Martin. "Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos". 2010.

²⁶ ESTRADA. Martin. "Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos". 2010.

Figura 4. Clasificación de materiales compuestos por tipo, orientación y geometría del refuerzo.



FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

Las fibras naturales: son aquellas que se encuentran en materiales vegetales fibrosos (plantas) y son el resultado del proceso de fotosíntesis.

Plantas fibrosas: no todas las plantas se consideran fibrosas, dentro de esta clasificación se encuentran tres grupos que son las maderas latifoliadas, las maderas coníferas y las plantas no maderables o bambúes, este último grupo, objeto de estudio de esta investigación.

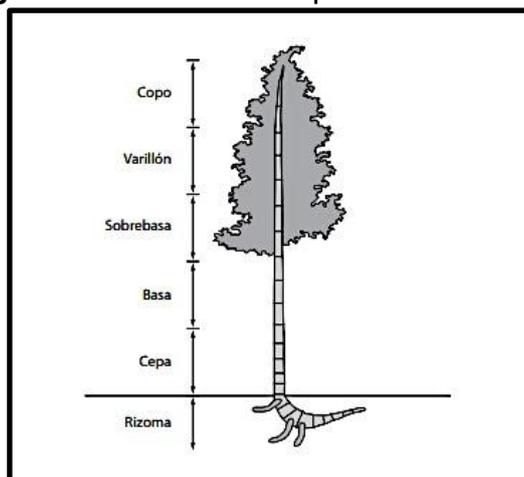
Las plantas no maderables o bambúes: son plantas que pertenecen a la familia de los pastos *Poaceae* y de la misma manera al género *Bambusoidae*; esta pertenece a la familia de las gramíneas, como el arroz, el trigo y el maíz.

La Guadua Angustifolia: es una de las más abundantes del país y presenta las mejores propiedades físico-mecánicas entre los bambúes del mundo y además de eso presenta una durabilidad muy buena²⁷.

A continuación se muestra en la figura 5 las partes que conforman una planta de bambú.

²⁷ GONZALES, Luis. “*Elementos Para La Caracterización Mecánica De La Guadua Angustifolia Kunth*”.

Figura 5. Partes de una planta de bambú.



FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

El varillón: es la parte alta de la guadua, esta es descartada en la actualidad debido a su diámetro pequeño porque genera cierta dificultad para la realización de uniones con pernos; pero a pesar de esta dificultad es la parte de la planta que más posee porcentaje de fibra y bajo de lignina, lo cual es un aspecto favorable para la extracción de fibras de refuerzo.

El nodo es la parte que produce la unión entre internodos, estos poseen células en sentido transversal, lo que facilita el transporte de nutrientes y demás sustancias²⁸.

Los internodos son partes huecas en cuyas paredes se encuentran las fibras, a diferencia de los nodos sus células se encuentran orientadas axialmente.

Los polímeros son macromoléculas que se forman de la unión de monómeros (carbonos e hidrógenos)²⁹.

Termoestables: Son aquellos que al aplicarles temperatura para producir una deformación en ellos cambia su estructura química, esto sucede a que tienen una estructura entrecruzada³⁰.

Termoplásticos: Son los polímeros que al aplicarles temperatura pasan al estado líquido para dejarse moldear y se endurecen sin presentar cambios en su estructura química³¹.

²⁸ ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

²⁹ BLEDZKI. Andrzej, SPERBER. Volker. “*Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural*”.

³⁰ BLEDZKI. Andrzej, SPERBER. Volker. “*Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural*”.

Elastómeros: esta clase de polímeros se deja deformar sin que se modifique su estructura ya que son materiales muy elásticos.

La estratificación manual o “*lay up*” es un proceso de conformado en el cual se aplica una resina y fibras en un molde para después aplicar una presión sobre esta mezcla con el fin de generar una adherencia entre sus dos fases. Este proceso tiene una ventaja enorme ya que facilita la orientación de las fibras produciendo materiales con grandes propiedades mecánicas.

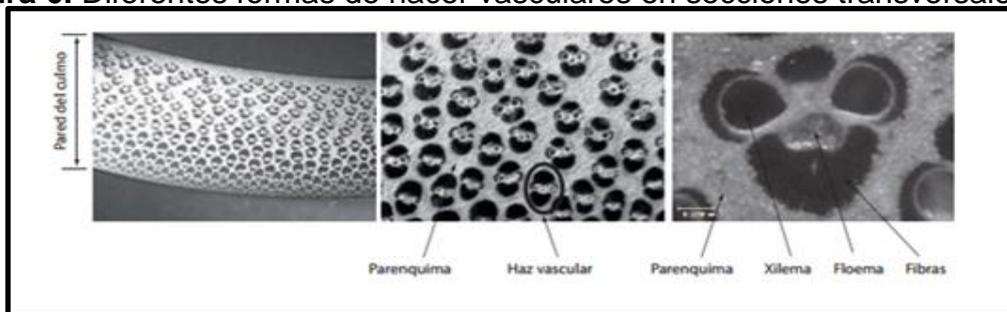
5.3. Estado Del Arte.

En la última década ha sido abordado en diferentes estudios de investigación el tema de la mezcla de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos alrededor del mundo; por lo que se hace importante resaltar investigaciones que aporten práctica y/o teoría para el desarrollo del presente proyecto.

En el 2010 se presentó una investigación realizada por el ingeniero Martin Estrada Mejía para optar el título de Magister en Ingeniería en la Universidad de los Andes bajo el título de “**Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua Angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos**”. En el cual se plantea como objetivo principal de investigación el interés de estudiar el potencial de las fibras de la *Guadua* como refuerzo en materiales compuestos poliméricos.

El enfoque realizado por el investigador fue determinar el procedimiento de separación de fibras de *Guadua* más eficiente en términos de grado de lignificación y propiedades mecánicas de las fibras. Para la extracción de las fibras de *Guadua* utilizó varillones cortados durante la madurez de la planta que oscilan entre los 4 a 6 años con diámetros externo de 4,5 cm a 10cm, y el espesor de la pared del culmo era de 0,4 cm a 1,8 cm.

Figura 6. Diferentes formas de hacer vasculares en secciones transversales



FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010.

³¹ BLEDZKI. Andrzej, SPERBER. Volker. “*Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural*”.

Para la caracterización química llevada a cabo por el ingeniero Martin Estrada, implemento los métodos: Van Soest y normas ASTM para determinar la cantidad de contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa. Con un proceso tratado al culmo con un secado al aire libre durante tres semanas aproximadamente, seguido de ser molidas y tratadas por un tamiz para retirar los pedazos grandes. El método Van Soest parte de los residuos obtenidos y se hace un digestión en detergente ácido (ADF), para solubilizar la hemicelulosa y otras sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas

La segunda caracterización la realizo utilizando las normas ASTM D1106-07 y ASTM D1109-07, determinado en grado de solubilidad del material en una solución caliente de hidróxido de sodio concentrado al 1%, así mismo con el contenido de lignina insoluble en ácido que se encuentra en el culmo. Adicionalmente determino el contenido de agua del culmo y las fibras extraídas con el procedimiento de la norma ASTM D4442-07, determinando la humedad por la diferencia de peso.

Ya que el bambú no clasifica como una madera no presenta un proceso de extracción de sus fibras estandarizado, sin embargo en la presente investigación tomaron como punto de arranque los métodos alcalinos ya que estos son utilizados para deshacer la lignina que contiene el material bruto y separar las fibras. Los métodos de digestión alcalino y kraft por ser métodos que su resultado son satisfactorios en términos de propiedades mecánicas. El método alcalino rompe los enlaces entre las moléculas de lignina por medio de una solución líquida de hidróxido de sodio (NaOH), mientras que el Kraft adiciona el sulfuro de sodio (Na₂S) para diferir la guadua. Este segundo reactivo estabiliza la celulosa en función de catalizador en la reacción, acelerando el proceso de digestión y reduce el ataque de un ambiente tan corrosivo a las fibras de celulosa.

Tabla 5. Condiciones de cocción para la extracción de haces de fibra de Guadua.

Digestión	AE (%)	S (%)	HM (l/kg)	κ	Micrografías
F-01	15	0	4	17.6	
F-02	15	0	15	18.7	
F-03	15	15	4	12.1	
F-04	15	15	15	10.8	
F-05	20	20	4	24.9	
F-06	20	20	3	19.5	
F-07	20	50	4	23.6	
F-08	20	50	3	19.6	

FUENTE: ESTRADA, Martin. “Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos”. 2010

El numero K con valor más pequeño que obtuvieron para la digestión se dio con un S de 15% y AE de 15%, mostrando que los valores contantes de AE, el incremento de S causa una relación en el numero kappa lo que significa un mejor proceso de digestión. El numero kappa es afectado si se incrementa la temperatura en la extracción logrando así afectar las propiedades mecánicas de la fibra.

El contenido obtenido de humedad del culmo de guadua y de las fibras extraídas fue de 4.12% y 9.71% en la investigación se compara con los resultados de otras investigaciones y por otro tipo de métodos.

Tabla 6. Composición química de diferentes especies de bambú.

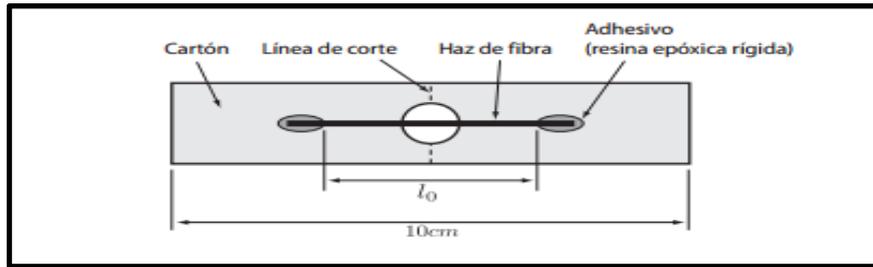
Especie	Lignina (%)	Celulosa (%)	Holocelulosa (%)	Ref.
<i>Bambusa pervariabilis</i>	23.63	52.14	-	[62]
<i>B. pervariabilis + D. latiflorus</i>	22.05	-	67.83	[62]
<i>Bambusa procerca</i>	25.8	-	68.6	[63]
<i>Bambusa vulgaris</i>	26.9	66.5	-	[14]
<i>Dendrocalamus latiflorus</i>	21.03	44.59	-	[62]
<i>Gigantochloa aspera</i>	25.5	61.3	-	[14]
<i>Gigantochloa levis</i>	24.2	62.9	-	[14]
<i>Phyllostachys pubescens</i>	24.7	54.1	-	[14]
<i>Whangec</i>	23.22	52.45	70.23	[64]
<i>Yunnanicus</i>	25.52	52.7	70.28	[64]
Indian species	22.0 - 32.2	-	-	[14]
Other species	19.8 - 26.6	61.9 - 70.4	-	[14]
(Unknown)	32.2	60.8	-	[65]
(Unknown)	37	-	63	[16]
(Unknown)	32.2	60.8	-	[66]
<i>Guadua angustifolia</i> (Van Soest)	15.21	60.83	71.39	
<i>Guadua angustifolia</i> (ASTM)	23.75	-	24.97	

FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010

Para las propiedades mecánicas se ensayaron haces de fibra obtenidos por el proceso de digestión por medio de ensayos de tensión para encontrar la resistencia a la tensión (σ) y el módulo de elasticidad en tensión (E). Basado en las normas ASTM D1557-03 y ASTM D3822-07. Estos ensayos se basaron sobre haces vasculares y no sobre una única fibra por la dificultad asociada a realizar estos procedimientos en elementos muy pequeños.

El montaje se realizó en una base de cartón para evitar dañar la fibra, este proceso lo realizaron 24 horas antes del ensayo con una resina epóxica rígida. Montaron la probeta en una maquina TRITECH, alineando la fibra con el eje de acción de la máquina. Por ultimo fijaron la probeta y se cortó sin hacer contacto con el haz, para que evitaran deterioro.

Figura 7. Probeta para ensayos de tensión de fibras de Guadua.



FUENTE: ESTRADA. Martin. “Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos”. 2010

La resistencia a la tensión (σ) de los haces se determinó bajo la relación entre la carga de fractura y el área transversal de cada muestra. Para determinar esta área de los haces tomaron micrografías con un microscopio electrónico de barrido (SEM), las cuales se procesaron para obtener el contorno de la sección transversal y medir el área requerida. El módulo de elasticidad lo determinaron con el cálculo de la pendiente de la región lineal de la curva esfuerzo-deformación de cada probeta.

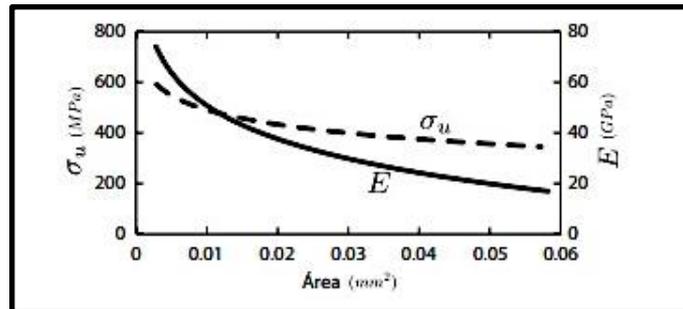
Tabla 7. Valores estadísticos de la resistencia y módulo de elasticidad de haces de fibra de guadua.

Digestión	$\bar{\sigma}_u$ (MPa)	$\sigma_{u(min)}$ (MPa)	$\sigma_{u(max)}$ (MPa)	COV_{σ_u} (%)	E (GPa)	E_{min} (GPa)	E_{max} (GPa)	COV_E (%)
F-01	607.46	281.42	846.06	41	21.92	15.03	28.74	27
F-02	420.04	242.54	711.55	46	23.80	18.98	31.43	26
F-03	592.06	223.82	995.21	48	22.44	14.34	25.27	20
F-04	568.28	206.02	1151.91	77	20.27	10.22	32.01	49
F-05	485.29	187.61	1031.58	56	24.23	7.89	59.72	71
F-06	427.38	218.76	814.88	46	52.31	14.61	128.23	60
F-07	420.31	215.98	836.66	42	81.58	14.22	150.23	48
F-08	407.70	234.30	768.71	42	45.70	15.83	87.36	50
Todas	461.79	187.61	1151.91	49	44.04	7.89	150.23	75

FUENTE: ESTRADA. Martin. “Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos”. 2010.

Determinaron que existe una relación inversa entre el área transversal de los haces vasculares y sus propiedades mecánicas, de manera que σ y E aumentando a medida que el área decrecía. Este comportamiento coincide ya que el área transversal pequeña posee menos defectos que aquellos más grandes, lo que deteriora las propiedades mecánicas, por ende, los haces delgados poseen mayor capacidad estructural.

Figura 8. Líneas de tendencia entre el área transversal y la resistencia y módulo de elasticidad de los haces de fibra.



FUENTE: ESTRADA. Martin. “*Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos*”. 2010

El módulo de elasticidad promedio de las fibras de guadua es de 44GPa, resaltándola frente a otra tipo de fibras, excepto por el lino y el cáñamo, mientras que la resistencia se encuentra dentro del mismo orden de magnitud de las fibras naturales de otras plantas. El módulo de elasticidad varía entre 8GPa y 150 Gpa y la resistencia entre 187MPa y 115 MPa. Esta gran dispersión entre los resultados que obtuvieron indico al autor a definirlo a una aproximación probabilística que determinística. Utilizando al final una distribución lognormal como pdf debido a sus parámetros y curva.

Como principal conclusión que aporta este trabajo de investigación frente a nuestro proyecto es la formulación del proceso de digestión más adecuada para extraer las fibras de guadua angustifolia (Hidromodulo 31/kg, Alkali efectivo 15% y Sulfidez 20%) y así lograr obtener un mayor aprovechamiento de las propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de las fibras de guadua son más altas que las fibras utilizadas, tienen un potencial para ser uno de los mejores refuerzos naturales de materiales compuestos.

Como se mencionaba la Guadua Angustifolia es una fibra predilecta para ser usada como refuerzo en matrices poliméricas, por este motivo en el año 2008 se realizó un estudio una investigación titulado “**Fibra De Guadua Como Refuerzo De Matrices Poliméricas**”, cuyos autores fueron Alneira Cuéllar del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Manizales e Ismael Muñoz de la Universidad Nacional sede Medellín, el cual tenía como objeto realizar un estudio del efecto que tiene en las propiedades mecánicas de una matriz polimérica la fibra de Guadua angustifolia con y sin tratamiento químico para la eliminación de lignina, empleando hidróxido de sodio con porcentajes de 5 y 10%; esta matriz polimérica fue reforzada con 10 y 20% de fibra en peso.

Para el desarrollo del material compuesto en esta investigación se utilizaron fibras de Guadua Angustifolia obtenidas de la basa y sobrebasa, que para los autores fueron las partes de la planta de Guadua que mejor resistencia mecánica tenían según estudios consultados en su bibliografía; como matriz polimérica utilizaron poliéster insaturado ortoftálico que presentaba las características que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Propiedades físicas del P.I.O

Apariencia	Verdosa transparente
Color Apha	100 máximo
Valor ácido	42 máximo
Viscosidad Brookfield a 25 °C, cp (aguja 3, 10 rpm)	1500 - 2500
Porcentaje de sólidos	68 - 72
Tiempo de gel a 25 °C, min	7 - 10
Temperatura de exoterma, °C	130 - 145
Tiempo de exoterma, min	15 - 25

FUENTE: CUELLAR. Alneira, MUÑOZ. Ismael.

“Fibra De Guadua Como Refuerzo De Matrices Poliméricas”. 2008.

Para las propiedades mecánicas que se evaluaron, se realizaron pruebas de compresión, flexión e impacto, y como resultados se pudo notar un aumento en la resistencia mecánica en los ensayos de impacto y compresión, en las probetas que tenían una presencia del 10% de fibra atacada químicamente con la solución de hidróxido de sodio al 5%, respecto a las propiedades de la resina sin refuerzo.

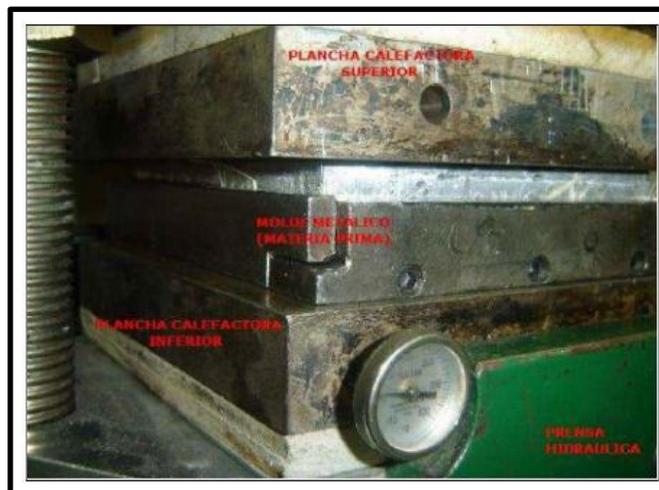
Como conclusiones fundamentales de esta investigación se destaca el hecho de que las fibras de Guadua Angustifolia son un potencial refuerzo en matrices poliméricas debido a que presenta resistencia mecánica y un módulo de elasticidad altos, además se resalta las ventajas que tienen las fibras naturales frente a la sintéticas ya que poseen una menor densidad; lo que abre el campo de estudio para caracterizar nuevas fibras.

Un aspecto importante en la obtención de un material compuesto es el proceso de conformado con el cual se desarrollara dicha obtención, este aspecto fue motivo de investigación para el Ingeniero Mecánico Luis Eduardo Valarezo Jaramillo, quien realizo una tesis llamada ***“Obtención Experimental De Un Material Biocompuesto A Base De Una Matriz Polimérica Y Reforzada Con Fibras Naturales De Guadua Angustifolia Proveniente Del Ecuador”***, este proyecto tenía como finalidad la obtención de un material compuesto por una matriz polimérica y fibras cortas de Guadua Angustifolia, realizando en primera instancia un estudio profundo en este campo y luego la obtención de las fibras cortas para la realización del compuesto. Como segunda medida el autor procedió a realizar la obtención implementando diversos procesos de conformado como fueron la compresión en caliente, extrusión en inyección

manual, estratificación manual e inyección manual y finalmente extrusión e inyección automática.

Durante el desarrollo del proyecto se realizó una exhaustiva selección tanto de matriz polimérica como de proceso de conformado, tomando como conclusión que los procesos de compresión en caliente dan una excelente adherencia, lo que es de gran importancia ya que este proceso de prensado es muy parecido al de estratificación manual; además de esto el autor confirma una vez más que las fibra de Guadua Angustifolia es un refuerzo potencial en dichas matrices poliméricas. En la siguiente imagen se puede ver el proceso de prensado en caliente al que fue sometido el compuesto en dicho proyecto.

Figura 9. Compresión En Caliente Material Compuesto.



FUENTE: (*Obtención Experimental De Un Material Biocompuesto A Base De Una Matriz Polimérica Y Reforzada Con Fibras Naturales De Guadua Angustifolia Proveniente Del Ecuador*).

5.4 Marco Legal y Normativo.

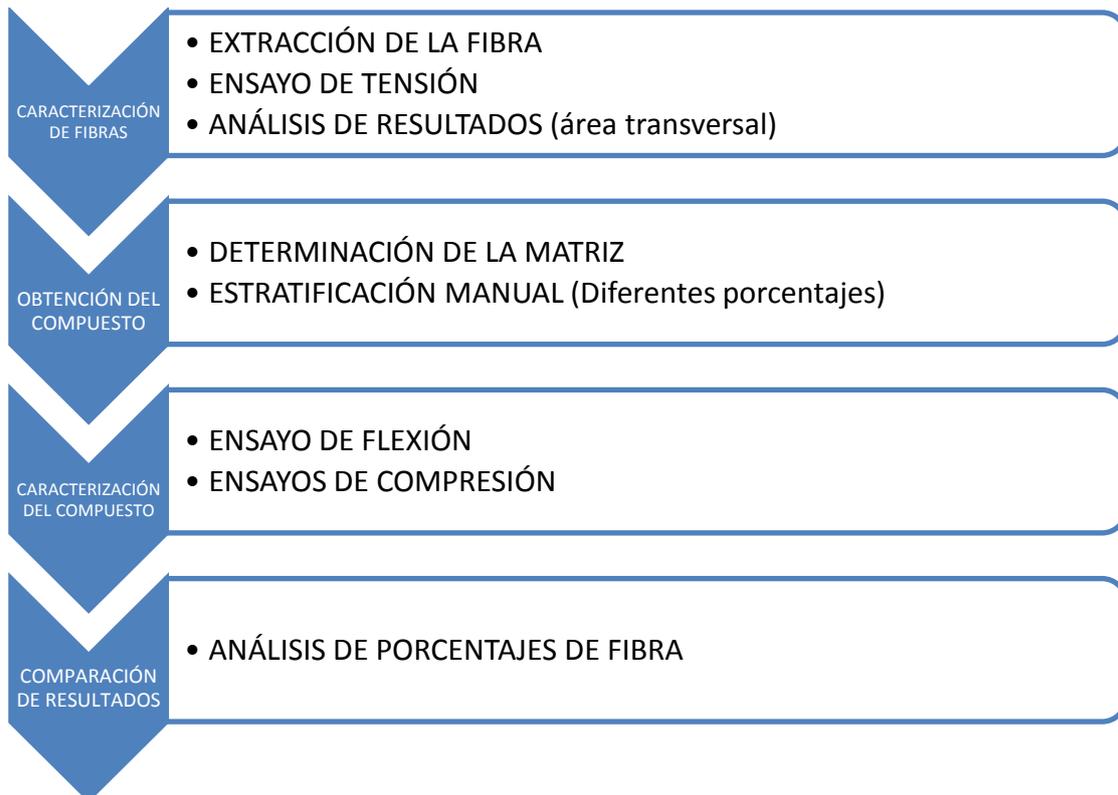
Para el desarrollo de este proyecto se tendrán en cuenta las normativas vigentes, las que se han encontrado hasta el momento son:

- ASTM Standard D3822. Standard test method for tensile properties of single textile fibers. In Annual book of ASTM standards, volume 07.01 of 59.060.01 (Textile fibres in general), test method Yarns and fibers. American Society for Testing and Materials, 2007.
- TAPPI T236. Kappa number of pulp, Test Method. TAPPI/ANSI.
- ASTM Standard C1557. Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers. In Annual book of ASTM standards, volume 15.01 of 81.060.30 (Advanced Ceramix), test method Ceramic matrix composites.
- ASTM D-7264. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

- ASTM D695 – 10: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- Normas ICONTEC, 1486, 4490, 5613. De 2008.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

A continuación se muestra los procedimientos que se llevaron a cabo para el desarrollo de la caracterización del material compuesto con el fin de llegar al análisis de resultados, con sus respectivas metodologías de investigación.



6.1. Materiales Y Equipos.

Se describen a continuación los materiales y equipos empleados en la clasificación de la fibra, obtención y caracterización de las propiedades mecánicas del material compuesto.

Extracción de fibras de guadua.

Para la extracción de las fibras de guadua y su correspondiente eliminación de lignina se utilizaron los siguientes materiales y equipos.

- Culmos de *Guadua Angustifolia Kunth* Madura
- Culmos de *Guadua Angustifolia Kunth* Sobre-madura.
- Autoclave, para controlar las variables de la digestión de la astilla de guadua.
- Microscopio, para el análisis del área transversal de las fibras.
- 1500 gramos de Hidróxido de Sodio (NaOH)

- Desecador, para la absorción de la humedad restante presente las astillas de la guadua.
- Báscula digital modelo SP2001 y marca OHAUS, controlar los pesos de astillas de guadua y suministros de químicos para la digestión.
- Papel Filtro, retener las fibras durante la separación del licor negro.
- Indicador de Ph, verificar el ambiente alcalino presente en las astillas de guadua procesadas.

Las fibras de guadua empleadas en el proyecto se extrajeron de bazas maduras y sobre-maduras suministradas por la empresa **INDUGUADUA** ubicada en Quindío. Se clasificaron bajo las características entregadas por la entidad y se seleccionaron las bazas sin presencia de mohos, y sin contaminantes de residuos externos, para así dar una mayor confiabilidad en los resultados.

Caracterización de la fibra:

Para la evaluación y selección de la fibra de mayores propiedades mecánicas se emplearon los siguientes materiales y equipos.

- Fibras de guadua *Angustifolia kunth* madura.
- Fibras de guadua *Angustifolia kunth* sobre-madura.
- Microscopio, para el análisis del área transversal de las fibras.
- Resina epóxica rígida, para la fijación y adaptación de las muestras en equipo de ensayos.
- Máquina universal de ensayos SHIMADZU AG-IS, para ensayos tensión de fibras de guadua, según normas ASTM.

Obtención del compuesto:

En la elaboración del material compuesto y las probetas de matriz poliéster reforzadas con fibra de guadua se emplearon lo siguientes materiales y equipos:

- Fibras de guadua *Angustifolia kunth* madura.
- Resina epóxica, EPOXI Q500, como matriz para el desarrollo del material compuesto.
- Catalizador MEK-PERÓXIDO, acelerador del curado de la resina.
- Será desmoldante DIVERQUIMICOS, para facilitar la obtención del compuesto posterior a la aplicación de la presión.
- Gramera digital modelo SP2001 y marca OHAUS con apreciación de 0,1 g, para el pesado de las fibras y otros materiales.
- Molde de aluminio 316 para obtención de paneles del material compuesto según configuración del refuerzo.

- Peso de cemento de **300 kg** y de 70 cm x 70 cm para suministrar la presión de moldeo en la elaboración de paneles del compuesto.

Las fibras seleccionadas para ser refuerzo en el compuesto presentaron un promedio de longitud de **7.2 cm** y un diámetro promedio de **0.25mm**. La resina epóxica de referencia Q-500 de laboratorio **DIVERQUIMICO** se utilizó como matriz del compuesto con las características presentadas en la tabla 9.

Tabla 9. Características mecánicas de la resina epóxica.

	CARGA A LA ROTURA (N)	MODULO YOUNG (MPa)	ESFUERZO DE TRACCION A LA ROTURA	% DEFORMACION
PROMEDIO	3794.26	2837.52	32.63	5.72
DESVIANCION ESTANDAR	763.43	187.07	6.12	0.39

FUENTE: OVANDO, Enrique. “Análisis De Transferencia De Refuerzo En Modelo De Fibra Simple Utilizando Fotomecánica”. México. 2010.

Caracterización mecánica del material compuesto (ensayos de flexión y compresión).

Para el desarrollo de la evaluación y caracterización del material obtenido a base de fibra de guadua y una resina epóxica como matriz, se utilizaron los siguientes equipos y materiales.

- Probetas de flexión a base del material compuesto.
- Probetas de compresión a base del material compuesto.
- Maquina universal de ensayos Modelo UH-A, fabricante SHIMADZU CORPORATION, para ensayos de compresión y flexión de probetas, según normas ASTM, respectivamente.

Metodología De La Investigación.

Se describirán los procedimientos empleados para la digestión de las astillas de la guadua, la extracción de la fibra, obtención del material compuesto y su respectiva elaboración de probetas a diferentes fracciones volumétricas del refuerzo, caracterización mecánica en base a los ensayos de flexión y compresión para la selección de la disposición con mejores propiedades.

Caracterización de la fibra.

- Selección del método de extracción de la fibra.

Para el desarrollo de la extracción de la *Guadua Angustifolia Kunth* fue necesario realizar un análisis detallado de los métodos existentes para la obtención de estas fibras. Existen métodos de extracción de fibras naturales tales como los procesos mecánicos que emplean herramientas para la obtención de las fibras, o los procesos semi-mecánicos, químico-mecánicos, termo-mecánicos y químicos; esta gama de métodos nos ofrecen la opción de extraer fibras de diferentes longitudes, los procesos mecánicos, semi-mecánicos y químico-mecánicos se usan preferentemente para extraer fibras de longitud corta y por otro lado para la extracción de fibras largas se emplean los métodos termo-mecánicos y químicos.

Además de la longitud es importante determinar en qué nivel el proceso de extracción afecta las propiedades mecánicas de las fibras, por esta razón el método químico de extracción tiene gran preferencia, ya que afecta en un nivel muy bajo sus propiedades. Los métodos químicos más empleados para la delignificación y extracción de fibras son el alcalino y el kraft; estos procesos se emplean principalmente para eliminar de la madera la lignina y usar su pulpa como refuerzo de matrices poliméricas debido a las propiedades mecánicas y físicas con las que cuentan las fibras extraídas.

Tabla 10. Productos para digestión en fibras Naturales.

Fibras	Producto utilizado	Ref.
Yute	$NaOH$	[47]
Bambú	$NaOH$	[48]
Fique	$NaOH$	[4]
Banano	A mano	[20]
Yute	$NaOH$	[49]
Yute	$NaOH$	[50]
Yute	C_6H_5OH	[51]
Yute	$C_6H_5OH + NaOH$	[26]
Yute	$NaOH$	[52]
Palma de aceite	$NaOH$	[53]
Palma de aceite	$NaOH$	[54]

FUENTE: ESTRADA. Martín. "Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos". 2010.

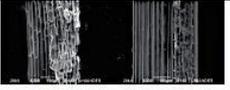
Debido a la semejanza del bambú con la *Guadua Angustifolia* y estudios realizados previamente en otras investigaciones³², se optó por realizar la extracción de las fibras mediante el método alcalino; en el cual se emplea como reactivo el Hidróxido de Sodio ($NaOH$). Este proceso nos permitió romper los

³² ESTRADA. Martín. "Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (*Guadua Angustifolia*) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos". 2010.

enlaces entre moléculas de lignina sin que se afectaran gradualmente las propiedades de la fibra. Como aceleradores del proceso de digestión se utilizaron catalizadores como calor y presión, controladas por una AUTOCLAVE suministrada por la universidad LIBRE. Se emplearon estos parámetros de temperatura y calor con el fin de no afectar el proceso de digestión; ya que si se emplea una temperatura mayor y una presión elevada en la autoclave se tendría como resultado el desgaste de las fibras por las condiciones extremas a las cuales se someterían.

El procedimiento de la digestión se desarrolló basado en la formulación de licor blanco (tabla 11) desarrollada y evaluada por el Magister en Ingeniería Martín Estrada en su tesis “EXTRACCION Y CARACTERIZACION MECANICA DE LAS FIBRAS DE BAMBU (GUADUA ANGUSTIFOLIA) PARA SU USO POTENCIAL COMO REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS” en la cual garantiza unos porcentajes de relaciones entre la cantidad de reactivos y el nivel de lignina resultante para un mejor aprovechamiento de las propiedades mecánicas de la guadua al ser extraída, con la finalidad de aumentar la adherencia entre la matriz polimérica y el refuerzo.

Tabla 11. Evaluación de la influencia del ataque químico en propiedades mecánicas de la fibra de *Guadua Angustifolia Kunth*.

Digestión	AE (%)	S (%)	HM (l/kg)	κ	Micrografías
F-01	15	0	4	17.6	
F-02	15	0	15	18.7	
F-03	15	15	4	12.1	
F-04	15	15	15	10.8	
F-05	20	20	4	24.9	
F-06	20	20	3	19.5	
F-07	20	50	4	23.6	
F-08	20	50	3	19.6	

FUENTE: ESTRADA. Martín. “Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos”. 2010.

- **Digestión y extracción de la fibra.**

Las fibras de guadua empleadas en el proyecto se extrajeron de bazas maduras y sobre-maduras suministradas por la empresa INDUGUADUA de la región Quindío como se muestra en la figura 10. Se clasificaron bajo las características entregadas por la entidad y se seleccionaron las bazas sin presencia de mohos, y sin contaminantes de residuos externos, para así dar una mayor confiabilidad en los resultados; de ahí se obtuvieron astillas las

cuales fueron destinadas para el proceso de digestión y extracción de la fibra, para así ser luego ensayadas para su caracterización mecánica.

Figura 10. Culmos de *Guadua Angustifolia Kunth*; (a) Fibras de *Guadua Angustifolia Kunth* Madura ;(b) Fibras de *Guadua Angustifolia Kunth* sobre-madura.



FUENTE: Autores del proyecto.

Las astillas obtenidas de los culmos de *Guadua angustifolia Kunth* contaban con una longitud promedio de 15 cm y una sección transversal de 0.9 cm en promedio, con el fin de facilitar la penetración del hidromódulo en su estructura y facilitar la extracción de las fibras, estas astillas fueron separadas por edad del culmo y puestas a disposición para su delignificación.

Figura 11. Astillas de *Guadua Angustifolia Kunth*.



FUENTE: Autores del Proyecto.

La formulación del hidromódulo empleada para el proceso de digestión se presenta en la tabla 12. Los parámetros para la selección de esta formulación se explican en el anexo A.

Tabla 12. Formulación de licor blanco

Químico	%	Relación Agua/Fibra
Hidróxido de Sodio (NaOH)	15	3 L/Kg

FUENTE: Autores del proyecto.

Las astillas se sumergen en el hidromódulo como se evidencia en la Figura 12, la acción de este químico y el ambiente al que será sometido serán suficientes para realizar la separación de los enlaces naturales que componen el culmo.

Figura 12. Astillas de Guadua sumergidas en Hidromódulo.



FUENTE: Autores del proyecto.

Con la utilización del equipo AUTOCLAVE las astillas fueron sometidas a una temperatura de 270° F y una presión de 20 PSI para acelerar su proceso de eliminación de lignina.

Figura 13. Astillas en autoclave.



FUENTE: Autores del proyecto.

Previo a ser colocadas las astillas en el desecador se extrajo el licor negro y se dejaron al redor de 3 días con el fin de eliminar el porcentaje de agua absorbida durante el proceso. Se le realizo un lavado con abundante agua para que no quedara con un ambiente altamente alcalino, para lo cual se emplearon tiras indicadoras de pH, seguido se dejó secar un día a temperatura ambiente (17°c) para la posterior extracción manual de las fibras como se muestra en la figura14. Este procedimiento se desarrolló para los tipos de guadua, madura y sobre-madura.

Figura 14. a) Fibras de Guadua en Desecador; fibras extraídas de guadua.



FUENTE: Autores del proyecto.

A este proceso de digestión se le determinó el grado de delignificación por medio de la medición del volumen de permanganato de potasio que consumió la pulpa debido a que la lignina no se elimina por completo, este método de medición se denomina *número Kappa*; este número se puede utilizar para cuantificar el grado de delignificación que se logró mediante el proceso de digestión empleado. Como se presenta en la tabla 13, el número Kappa obtenido en esta investigación fue de 12.6. Se realizaron vistas microscópicas garantizando que la fibra no sufrió daño significativo en su estructura a causa del hidromódulo.

Tabla 13. Condiciones de digestión para las fibras extraídas.

Químico	%	Relación Agua/Fibra	k Número Kappa	Micrografías
Hidróxido de Sodio (NaOH)	15	3 L/Kg	12.6	

FUENTE: Autores del proyecto.

Ensayo de tensión.

Para realizar la elección de las fibras con mejores propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tensión, con el fin de utilizar las de mayor resistencia como refuerzo en la matriz polimérica.

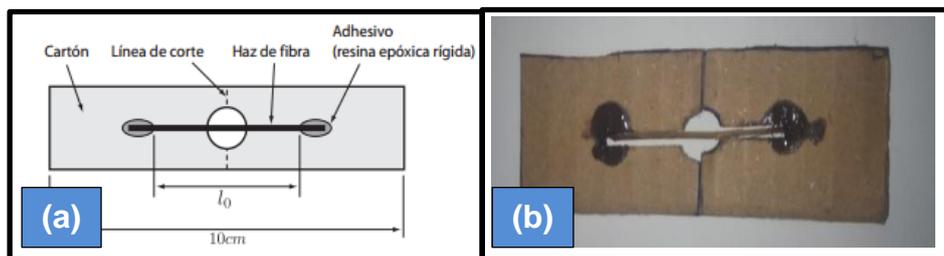
Las fibras extraídas de la guadua madura y sobre-madura que se obtuvieron de los procesos de digestión fueron ensayadas bajo un diseño experimental, para

encontrar su resistencia a la tensión (σ) y módulo de elasticidad (E) en tensión. Las pruebas se basaron bajo la norma ASTM D1557-03 y ATSM D3822-07.

Para obtener la máxima resistencia de la fibra se le aplicó una fuerza con una celda de carga de capacidad de 2.3 kg y se manejó una velocidad constante del cabezote de 0,5mm /min, con el fin de manejar un tiempo promedio de falla de 30 segundos tiempo el cual es recomendado por la norma ASTM C1557. Seguido de la ruptura de la fibra se registra el desplazamiento del cabezote y la carga aplicada, para calcular la curva de esfuerzo-deformación de cada probeta.

El montaje para la ejecución de este ensayo se realizó en una base de cartón para evitar dañar la fibra, este proceso se llevó a cabo 24 horas antes del ensayo con una resina epóxica rígida, como se puede apreciar en la figura15. La probeta fue montada en una maquina shimadzu AG-IS, alineando la fibra con el eje de acción de la máquina. Por último se fijó la probeta y se cortó la base para así no afectar el ensayo.

Figura 15. Probeta para ensayos de tensión en fibras de Guadua Angustifolia; a) Modelo basado en antecedentes; b) Modelo desarrollado en la investigación.

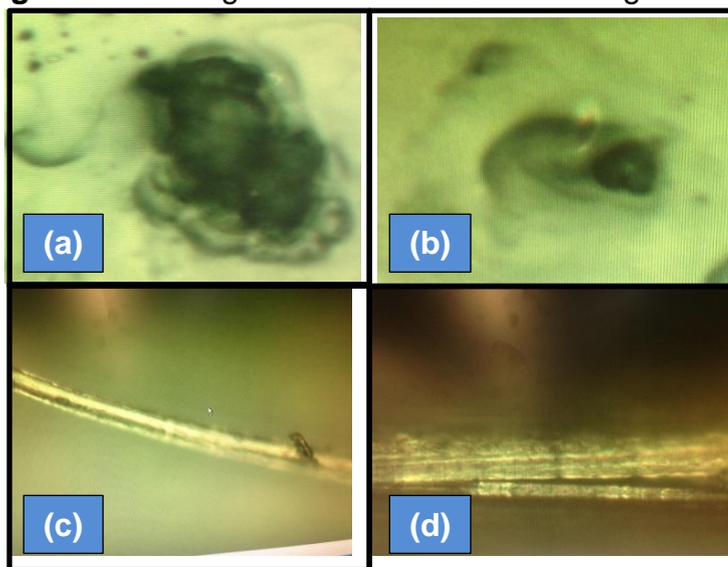


FUENTE: ESTRADA. Martin. “Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos”. 2010.

La resistencia a la tensión (σ) se calculó bajo la relación de la fuerza (N) aplicada que se registraron en los ensayos y el área promedio transversal de las fibras (m^2).

Para la determinación de las áreas transversales promedio se utilizó el microscopio, proporcionado por la Universidad Libre, para de esta manera hallar la resistencia a la tensión de cada una de las fibras. Mediante las microfotografías se determinó un diámetro promedio de **0,25 mm**. En la figura16 se puede detallar las microfotografías tomadas a las fibras de Guadua.

Figura 16. Micrografías fibras de Guadua Angustifolia.



FUENTE: Autores del proyecto.

Determinación de la matriz.

Para la elección de la matriz polimérica se tuvieron en cuenta aspectos de resistencia mecánica, fácil acceso y costos, tal como se presenta en la tabla 14.

Tabla 14. Tabla comparativa matrices termoestables.

Resinas	Características
Epóxicas	Bajo, media y alto costo, presentan alto rendimiento, usadas en compuesto de fibra larga. Tienen mejor rendimiento a temperaturas elevadas que el poliéster y el vinil.
Vinil éster	Similar al Poliéster pero con mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia a la humedad y al fuego. Son de elevado costo.
Poliéster	Utilizado ampliamente en aplicaciones comerciales, de bajo costo y flexibilidad en procesamiento. Empleada con bajas temperaturas.
Fenólicas	Resinas de alta temperatura, usadas en aeronaves. La resistencia al fuego es excelente. Son de difícil procesamiento.
Poliamidas	Resinas usadas a muy altas temperaturas en un rango de 280-316°C. Difíciles de procesar
Bismaleimida	Usadas a temperaturas de 135-177°C. Requiere post-curado a alta temperatura.

FUENTE: Autores del proyecto.

Además de aspectos generales como los anteriormente señalados se tuvieron en cuenta las propiedades mecánicas específicas de las matrices en estudio como se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15. Propiedades mecánicas de matrices termoestables.

Matriz	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación a la Rotura (%)	Temperatura de curado (°C)	Absorción de Agua (%)
Epoxi	1200-1250	48-90	1.5-8.0	150-220	2.0-6.0
Esteres cianato	1100-1350	69-90	2.0-2.5	177-250	1.3-2.5
Bismaleimida	1200-1300	35-90	1.5-3.0	220-300	4.0-4.5

Fuente: Autores del proyecto.

Obtención del material compuesto.

Para la selección del método de fabricación del material compuesto del presente proyecto se evaluaron los cuatro procesos que predominan en el conformado de los materiales compuestos a base de resinas termoestables, los cuales son: estratificación manual o moldeo manual, moldeo por compresión, aspersión y proceso del compuesto para moldeo de placas.³³

El último se refiere netamente a la fabricación de paneles frontales y se realiza para grandes volúmenes de producción, es un proceso altamente automático lo que requiere maquinaria especializada para ello. De manera semejante, el método de aspersión al utilizar una pistola automatizada para suministra las fibras y la resina dentro de un molde abierto, genera que los costos de producción de estos procesos alcancen un mayor nivel. En el método de aspersión el proceso de curado puede acelerarse aplicando calor pero puede darse a temperatura ambiente.³⁴

El moldeo por compresión es un proceso que permite alcanzar grandes volúmenes de producción, su contenido de refuerzo es bajo (20-30%) y se requiere equipos especializados que suministren presión y calor al molde.³⁵

Basado en estos aspectos, la elaboración del material compuesto a base de fibra de guadua se desarrolló bajo el método de estatificación manual, debido a que su principal ventaja al usar un molde abierto nos permite posicionar el

³³ Mazumdar, K. COMPOSITES MANUFACTURING. FLORIDA, USA: CRC-PRESS. (2002)

³⁴ Mazumdar, K. COMPOSITES MANUFACTURING. FLORIDA, USA: CRC-PRESS. (2002)

³⁵ Campbell, F. MANUFACTURING PROCESS FOR ADVANCED COMPOSITES. Oxford, Gran Bretaña: Elsevier-(2004).

refuerzo manualmente y así darle múltiple dirección a la fibra. El proceso de curado puede darse a temperatura ambiente, lo cual reduce significativamente los costos de su fabricación.

En el desarrollo del compuesto se utilizó un molde macho- hembra de espesor de 1" y de 70cm x 70cm de longitud interna para la obtener paneles de estas dimensiones, mostrada en la figura16, lo que permitió un alcance superior de producción de probetas comparado al hacer individualmente cada una de ellas.

Figura 16. Molde macho-hembra.



FUENTE: Autores del proyecto

Previo al desarrollo de los paneles, fue necesario obtener probetas piloto para determinar la densidad promedio del compuesto, así por medio de la configuración dada del refuerzo se obtiene las fracciones volumétricas de la matriz, la masa de las fibras empleadas y la fracción real del refuerzo. Se emplearon las siguientes ecuaciones respectivamente.

Ecuación 1. Masa fibra de guadua.

$$mfg = X * \rho fg * Vpt$$

Ecuación 2. Fracción volumétrica de la matriz.

$$Xvm = \left[\frac{\rho c - mfg}{vp} \right] x \frac{1}{\rho m}$$

Dónde:

X = configuración del refuerzo.

ρfg = densidad de la guadua.

Vpt = volumen del panel.

ρc = densidad del compuesto.

mfg = masa de la fibra de guadua.

ρ_m = densidad de la matriz.

V_p = volumen de la probeta.

Los valores de densidad de la fibra de guadua se obtuvieron basados en un estudio desarrollado en la Universidad Industrial de Santander.³⁶

Las cantidades de peso de fibra utilizadas para la fabricación de los paneles se presentan en la tabla 16. Los cálculos de la masa de la fibra para cada una de las configuraciones empleadas se presentan en el Anexo D.

Tabla 16. Masas de fibras empleadas en el compuesto según su configuración.

TIPO DE ENSAYO	CONFIGURACIÓN DEL REFUERZO (%)	MASA DE LA FIBRA (gr)
FLEXIÓN	10	86,4
	20	151,2
	30	216
COMPRESIÓN	10	507
	20	1015
	30	1540

FUENTE: Autores del proyecto

Figura 17. Pesado de fibras maduras de guadua.



FUENTE: Autores del proyecto

Una vez pesado en gramos las cantidades de fibra de guadua necesarias para cada configuración de refuerzo (figura 17), se prepara la matriz con la **resina epóxica** y el catalizador el cual fue añadido y agitado para luego dejar reposar

³⁶ E. Torres, "Análisis De La Densidad De Fibra En La Guadua Angustifolia Kunth Por Procesamiento De Imágenes De Alta Resolución Y Profundidad De Campo Extendido". Universidad Industrial De Santander. BUCARAMANGA.(2011)

alrededor de 5 minutos. Posterior a preparar los materiales se procede a montarlos en el molde.

Debido al espesor del molde fue necesario demarcar un nivel no menor a 4 mm para obtener probetas que serán sometidas a flexión, esto se repitió para cada configuración de refuerzo, por el contrario, las probetas que serán sometidas a compresión fue necesario ocupar todo el espesor del molde, y todo lo anterior se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se aplica en el fondo y en la paredes internas del molde hembra cera desmoldante, con el fin que al terminar el proceso de estratificación se facilite la extracción del material.
- b) Se adiciona la resina pre acelerada al molde hembra de tal manera que este cubra toda la superficie interior del molde.
- c) Incorporamos las fibras de guadua según la configuración a emplear en sentido multi-direccional manualmente y se distribuye en el molde.
- d) Posteriormente se remojan las fibras de guadua con la resina aplicando la última capa y distribuyéndola por toda el molde para así obtener un espesor óptimo.
- e) Finalmente, se incorpora el molde macho aplicando cera desmoldante previamente, para sellar el molde hembra y así aplicar presión.

Figura 18. Procedimiento de la elaboración del material compuesto.



FUENTE: Autores del proyecto

Debido a las limitaciones tecnológicas para proveer una presión a este tamaño, se optó por la fabricación de pesos de sementó que suministro alrededor de 300 kg como se presenta en la figura18, literal (e). Se definió este peso como

presión de moldeo en base los estudios realizados en la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito, Ecuador. Los cuales emplearon la obtención de probetas por la técnica de estratificación manual a diferentes presiones de molde³⁷. El Curado o proceso por el cual la resina pasa de un estado líquido a solido se realizó a temperatura ambiente (Bogotá) de entre 17 y 18°C y un tiempo de alrededor de 48 horas para alcanzar un curado superior al 90%, sin embargo, el curado total se garantiza a lo largo de 2 semanas después de ser prensado.

Figura 19. Panel de material compuesto a base de matriz epóxica y fibras de guadua.



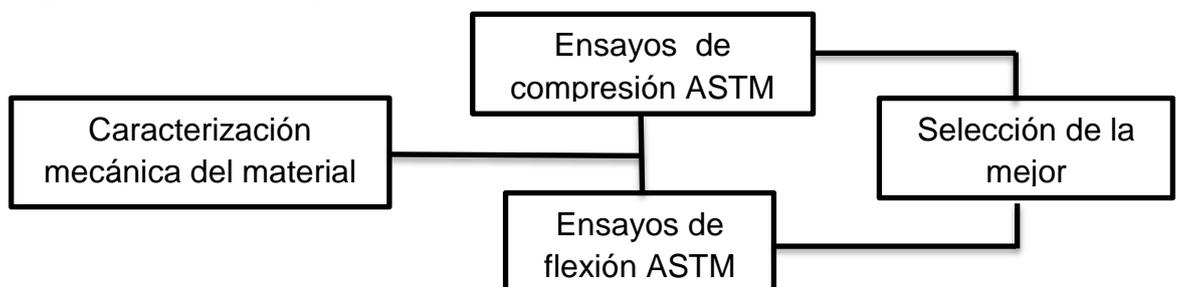
FUENTE: Autores del proyecto.

Fabricados los tres paneles a diferentes configuraciones del 10%, 20% y 30% de refuerzo de fibra de guadua, se prepararon las probetas para ejecutar los ensayos de Flexión y Compresión de acuerdo a las normas ASTM respectivamente.

Caracterización del material compuesto.

Para el desarrollo de la evaluación de las propiedades mecánicas se empleó la metodología mostrada en la figura20.

Figura 20. Metodología de caracterización mecánica del compuesto.



FUENTE: Autores del proyecto

³⁷ V.H Guerrero, P. Pontón, “Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales”. Escuela Politécnica Nacional. Quito. (2011).

A los paneles obtenidos del material compuesto, se les hizo un mecanizado para obtener de ellos el número de probetas las cuales fueron ensayadas en compresión y flexión, según normas ASTM respectivamente, determinando así la configuración de refuerzo de fibra con mayores propiedades mecánicas. Con esta configuración se desarrollara una comparación y calificación con respecto a materiales estructurales por medio del Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente.

Para llevar acabo los ensayos se desarrolló un diseño experimental basado en una configuración que tiene como factor el porcentaje de fibra empleado en el refuerzo con una variación respectiva, como se observa en la tabla17.

Tabla 17. Factor y niveles diseño experimental.

<i>FACTOR</i>	<i>NIVEL</i>
PORCENTAJE DE FIBRA	10%
	20%
	30%

FUENTE: Autores del proyecto.

Por medio de este factor a tres niveles se logró determinar la confiabilidad de cada ensayo y una probabilidad de rechazar la hipótesis que no excedida del 0.01, así el número de probetas para los ensayos de flexión y compresión empleadas, se observa en la tabla18. Los cálculos empleados en el diseño experimental para cada uno de los ensayos se presentan en el **ANEXO C**.

Tabla 18. Datos de número de probetas por ensayo.

<i>ENSAYO</i>	<i>CONFIGURACIÓN DE % DE FIBRA</i>	<i>NÚMERO DE PROBETAS</i>	<i>TOTAL DE PROBETAS</i>
FLEXIÓN	10%	11	33
	20%	11	
	30%	11	
COMPRESIÓN	10%	4	12
	20%	4	
	30%	4	

FUENTE: Autores del proyecto.

Ensayos de flexión.

En el desarrollo de la caracterización mecánica a la flexión se empleó el sistema a tres puntos en el que una carga es aplicada en el centro de la probeta y esta se encuentra apoyada en dos soportes, como se observa en la figura21.

Figura 21. Montaje de ensayo de flexión a tres puntos.

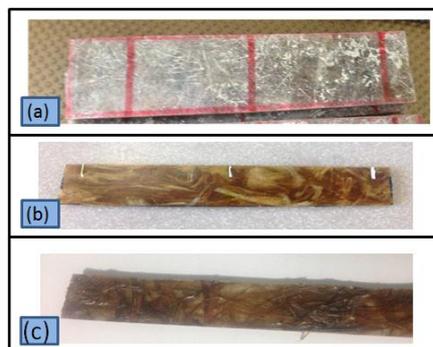


FUENTE: Autores del proyecto.

Estos ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Libre, bajo la norma ASTM D 7264/ D 7264M, la cual nos permite determinar las propiedades de resistencia y rigidez de materias compuestas. Se fijó en el equipo una velocidad de ensayo de 1mm/min y se registraron los valores de fuerza y deflexión generados.

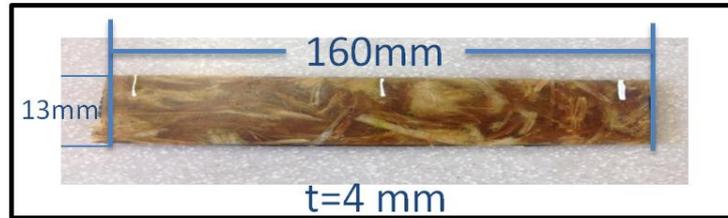
Previo al montaje, las probetas se determina el centro y las bases óptimas para efectuar el ensayo correctamente como se muestra en la figura22 y en la figura23, las dimensiones de las probetas requeridas para cada ensayo.

Figura 22. Probetas a diferentes porcentajes; a) configuración de refuerzo a 30%; b) configuración de refuerzo a 20%; c) configuración de refuerzo a 10%



FUENTE: Autores del proyecto

Figura 23. Vista frontal y dimensiones de la probeta empleada en los ensayos de flexión.



FUENTE: Autores del proyecto

Ensayos De Compresión.

Para este ensayo se empleó la norma ASTM D-695, la cual determina las propiedades de compresión en plásticos rígidos reforzados y no reforzados, con probetas que tienen dimensiones estándar. Estos datos nos permitirán conocer el comportamiento del material ante los esfuerzos a los que será sometidos.

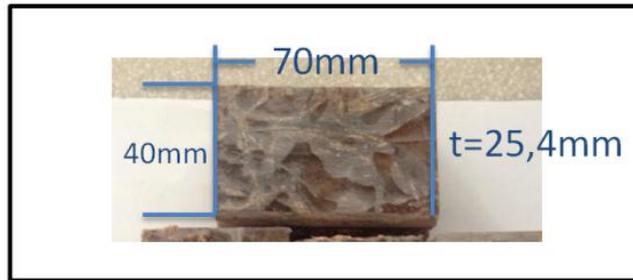
Estos ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Libre, empleando una velocidad de ensayo de 2mm/min. En la figura 24 (a) y figura 24 (b) se observa el montaje en el equipo y falla a la compresión, en la figura 25, las dimensiones de las probetas requeridas para cada ensayo.

Figura 24. a) Montaje de ensayo compresión; b) falla a compresión.



FUENTE: Autores del proyecto

Figura 25. Vista frontal y dimensiones de la probeta empleada en los ensayos de compresión.



FUENTE: Autores del proyecto.

8. Resultados y discusión

Se presentan a continuación los resultados de la caracterización de la fibra concernientes a la digestión y extracción de la fibra y características mecánicas efectuadas a las fibras de guadua con ensayos de tensión de acuerdo con la norma ASTM C-1557. Para la obtención del material compuesto se determinaron fracciones volumétricas de matriz y pesos de refuerzo, de acuerdo a la configuración de 10%, 20% y 30% de refuerzo. La caracterización mecánica efectuada a las probetas del compuesto, se realizaron bajo ensayos de flexión y compresión, de acuerdo con las normas ASTM D-3039 y ASTM D-695, respectivamente. Posteriormente se seleccionó la configuración de refuerzo con las mejores características mecánicas exhibidas. Finalmente, se compararon estos resultados con los requerimientos de la norma sismo resistente (NSR-10) y así determinar si aplica como material estructural.

Caracterización de la fibra.

Digestión de la fibra.

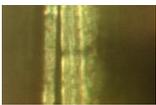
Durante la digestión de las fibras se llevó a cabo una prueba piloto para determinar el porcentaje de Hidróxido de sodio ideal que impactara en menor medida las propiedades mecánicas de las fibras de guadua. Las formulaciones de hidromódulo se llevaron a cabo basados en los estudios realizados por Martin Estrada en su tesis de maestría titulada “*Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*”.

La primera formulación se realizó con un diez por ciento de hidróxido de sodio esto con el fin de obtener fibras con mejores propiedades mecánicas y un nivel de delignificación ideal para ser usadas como refuerzo en la matriz polimérica. En la segunda formulación se utilizó una

concentración de quince por ciento de hidróxido de sodio, este planteamiento se realizó en búsqueda de una mejor adherencia entre el refuerzo y la matriz debido a la reducción de lignina presente en las fibras después de la digestión.

En la tabla 19 se puede observar el comportamiento de ambas fibras como refuerzo en la matriz polimérica.

Tabla 19. Concentraciones Hidróxido de sodio.

Concentración NaOH (%)	Relación Hidromódulo/ Fibra	Número Kappa	Micrografía	Adherencia matriz Polimérica
10	3 L/Kg	16.8		 <p>Probeta 10%</p>
15	3 L/Kg	12.6		 <p>Probeta 15%</p>

FUENTE: Autores del proyecto.

Las muestras de compuesto obtenidas fueron sometidas a las mismas condiciones de temperatura de curado, cantidad de refuerzo y presión aplicada; como se observa las muestras de fibra procesada con una concentración de 10% de Hidróxido de Sodio presentaron una menor adherencia generando una falla por mala adherencia en el material ya conformado, contrario al comportamiento que se obtuvo con la concentración de 15% de hidróxido de Sodio. Este fenómeno de mala adherencia se presentó por el nivel de lignina presente realizada la digestión ya que con esta baja concentración de hidróxido de Sodio el número kappa determinado fue de 16.8 contrario al 12.6 que presentó la concentración del 15%. Los números kappa fueron hallados bajo el mismo procedimiento de absorción de permanganato de Potasio empleando la ecuación 3 mostrada a continuación.

Ecuación 3. Medición de porcentaje de lignina.

$$\%lignina = \frac{W_{Residuo\ FDA} - W_{Residuo\ permanganato}}{W_{Muestra}} \times 100$$

Dónde:

$W_{Residuo\ FDA}$ = Peso de residuo de Fibra digerida

$W_{Residuo\ permanganato}$ = Perdida de permanganato

$W_{Muestra}$ = Peso total de la muestra

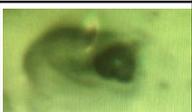
A demás de los niveles de lignina presentes después de realizado el proceso de digestión es de suma importancia determinar el estado de las fibras ya que dependiendo del nivel de degradación que se haya presentado en estas se ve afectado el comportamiento mecánico. Se puede notar en las micrografías realizadas que pese al aumento de concentración del hidróxido de Sodio en la segunda formulación de hidromódulo las fibras no sufren un desgaste que pueda implicar una disminución en la resistencia mecánica, por el contrario esta concentración al 15% de hidróxido de Sodio y 3 Litros de hidromódulo por Kilogramo de fibra proporciona un número kappa que indica una delignificación apta para el uso de las fibras como refuerzo en la matriz polimérica sin que esto vaya a implicar una mala adhesión entre ambas fases.

Ensayos de tensión

Áreas transversales

Las áreas transversales de las fibras de guadua se determinaron mediante el uso de un microscopio el cual nos proporcionaría el dato promedio para hallar el esfuerzo al cual fue sometida la fibra durante la aplicación de la carga de tensión. El promedio de área determinada fue de $1.94 \times 10^{-7} \text{m}^2$ tanto para fibras madura como para fibras sobre-maduras tratadas bajo la misma concentración del 15% de hidróxido de sodio. En la tabla 20 se pueden observar la micrografías realizadas y el diámetro promedio hallado para ambos casos.

Tabla 20. Micrografías fibra de Guadua.

Edad	Micrografía	Diámetro Promedio (mm)
Madura		0,25
Sobremadura		

FUENTE: Autores del proyecto.

Durante la extracción de las fibras se conservó una geometría constante con el fin de obtener áreas similares ya que una variación haría que los resultados de los esfuerzos hallados durante la ejecución del ensayo de tensión fueran muy dispersos generando una desviación amplia como

ocurrió en el trabajo de ESTRADA Martin, en donde se evaluaron haces de fibra sin geometría constante y sus resultados presentaron una variación del 49%.

Esfuerzo y Deformación a tensión

Las fibras que fueron extraídas mediante el proceso de digestión se sometieron a ensayos de tensión con el fin de encontrar sus propiedades mecánicas, específicamente el esfuerzo a tensión. Estas pruebas se llevaron a cabo bajo las normas ASTM D1557-03 y ASTM D3822-07.

En la Tabla 21 se pueden evidenciar los valores promedio de resistencia a la tensión de las fibras maduras y sobre-maduras junto con su desviación estándar y su coeficiente de variación, también se puede evidenciar el promedio de deformación que sufrieron las fibras durante la ejecución del ensayo con su respectiva desviación y coeficiente de variación

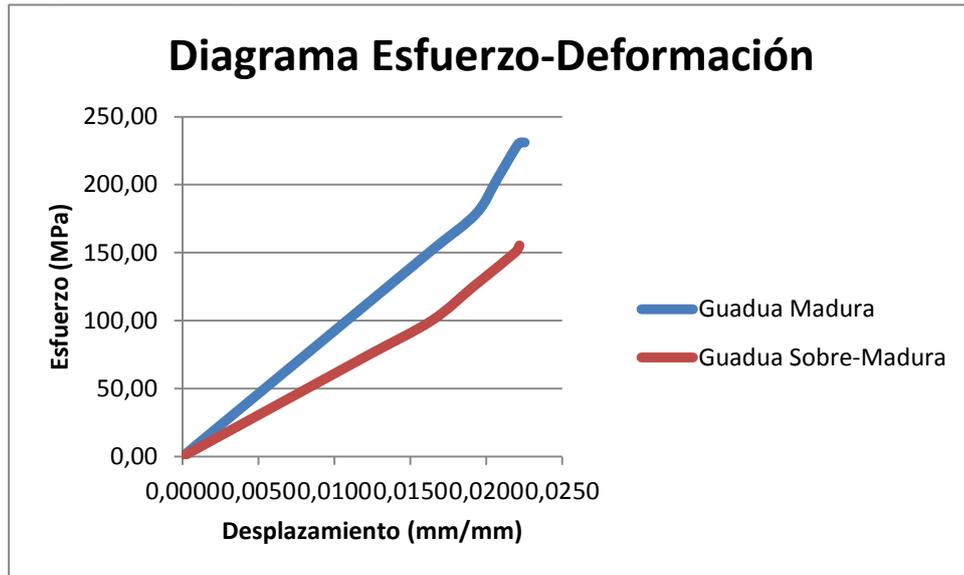
Tabla 21. Esfuerzo y deformación fibras de Guadua Angustifolia. x

Edad de Culmo	Esfuerzo (MPa)	Desviación (MPa)	CV (%)	Deformación (mm/mm)	Desviación (mm/mm)	CV (%)
Madura	239,73	46,66	19,46	0,023	0,0017	7,318
Sobre-Madura	161,17	36,78	22,82	0,022	0,0019	8,48

FUENTE: Autores del Proyecto.

Se puede evidenciar una diferencia significativa en la resistencia a la tensión de las fibras según su edad, como se puede ver en la figura 26 la resistencia de la Guadua Madura es mayor a la de las fibras sobre-Maduras bajo las mismas condiciones del ensayo.

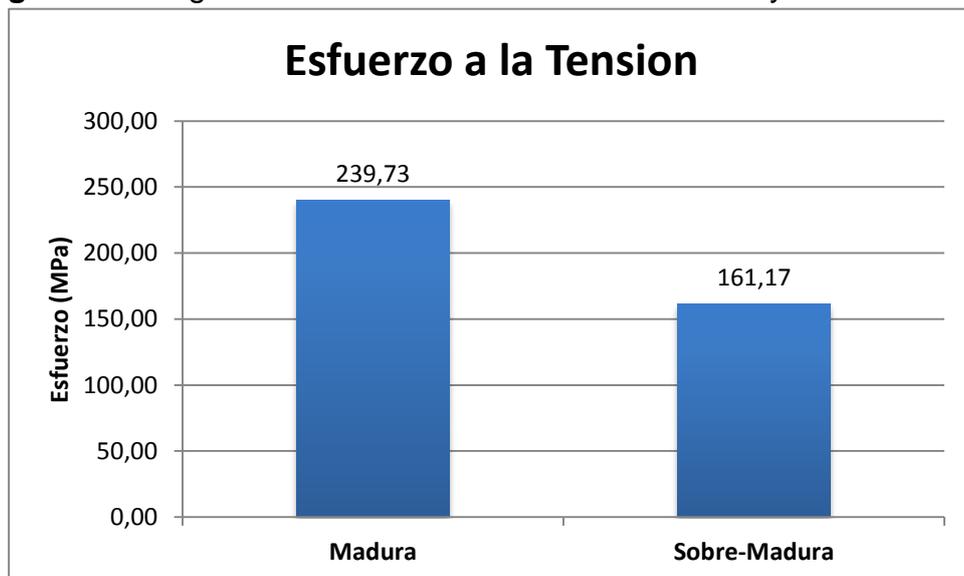
Figura 26. Diagrama Esfuerzo Vs Deformación Fibras de Guadua.



FUENTE: Autores del proyecto.

La relación entre la resistencia y la edad del culmo es proporcional debido a los porcentajes de celulosa existente en las fibras; en la guadua madura el porcentaje de celulosa es mas alto comparado con la fibra sobre-madura según análisis realizados en estudios anteriores, por esta razón las fibras maduras presentan una mayor resistencia. La deformación no presenta una diferencia significativa entre las dos edades de culmo, este comportamiento se atribuye a la ejecución del proceso de digestión bajo los mismos parámetros de concentración de Hidróxido de Sodio, lo que produce un desgaste homogéneo sin importar la edad del culmo. En el diagrama de Pareto de la figura 27 se puede detallar la diferencia de resistencias obtenidas del ensayo de tensión.

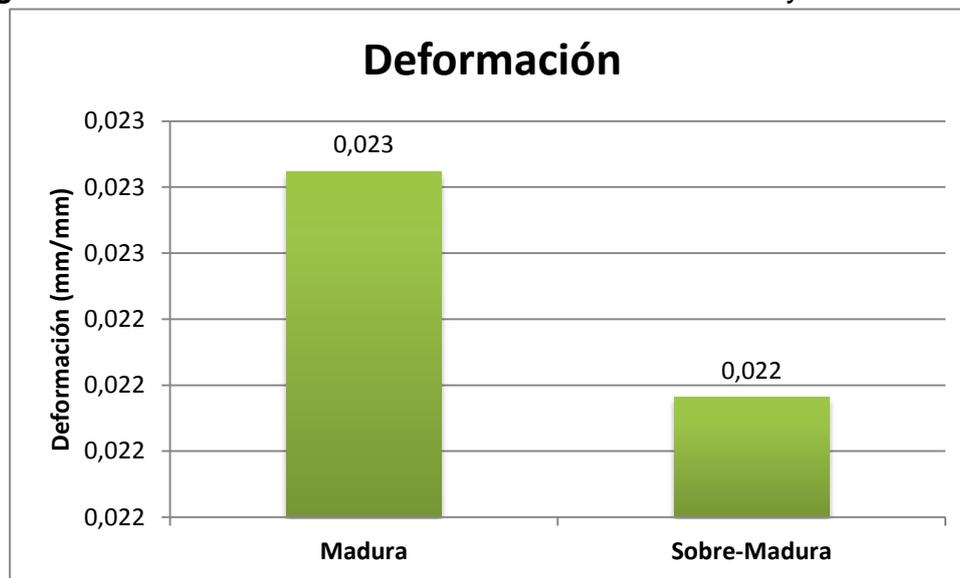
Figura 27. Diagrama Pareto Esfuerzo Guadua Madura y Sobre-Madura.



FUENTE: Autores del proyecto.

Del anterior diagrama se puede observar que las fibras de Guadua Maduras presentaron una resistencia 32,7% por encima de la registrada por las fibras Sobre-Maduras, en lo concerniente a la deformación en la figura 28 se observa en detalle el comportamiento de las fibras.

Figura 28. Deformación de las fibras de Guadua Madura y Sobre-Madura.



Fuente: Autores del proyecto.

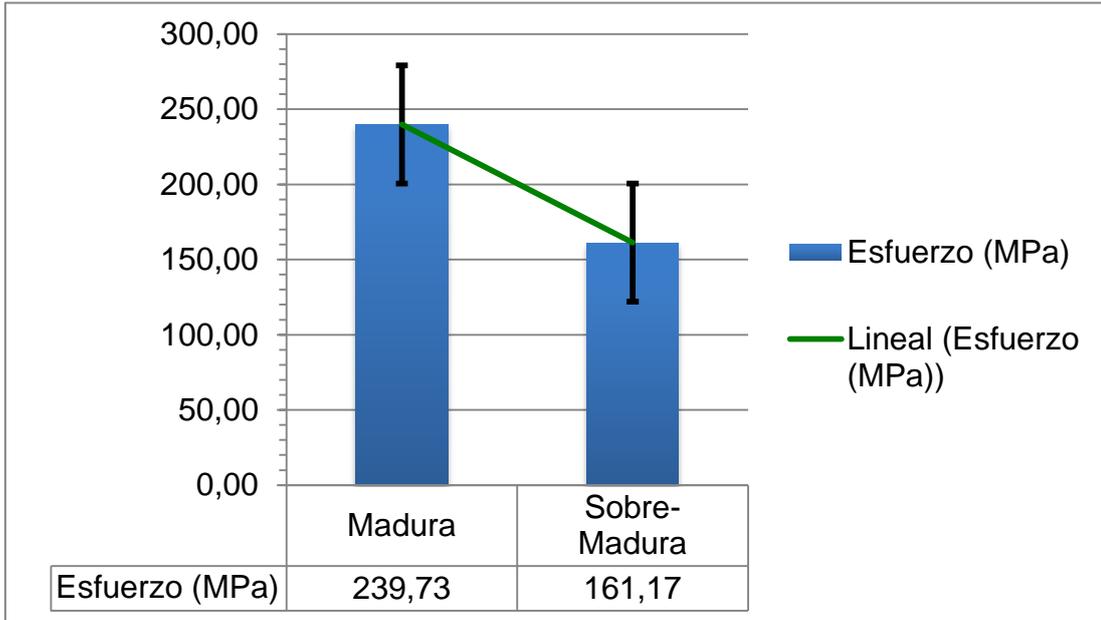
Debido a la digestión realizada de manera homogénea a las fibras de Guadua la diferencia de deformación entre culmos fue de un 4,34% lo que indica que se presentó un desgaste similar en ambas fibras bajo la formulación de hidromódulo propuesta con la concentración de hidróxido de Sodio de 15%.

Pese al cambio de edad las fibras no sufren una variación significativa en su deformación, lo que si se ve relacionado inversamente es la resistencia a la tensión ya que a mayor edad de culmo la resistencia disminuye, este fenómeno se atribuye principalmente a un bajo contenido de celulosa en la estructura de los culmos sobre-maduros con presencia de humedad.

Selección de Fibra como refuerzo en Matriz Polimérica.

Una vez conocido el comportamiento mecánico de las fibras clasificadas según su edad se realiza la elección de la que mejor comportamiento presentó para ser usadas como refuerzo en la matriz polimérica que va a emplearse para el conformado del material compuesto. En la figura 29 se realiza una comparación general de las propiedades presentadas.

Figura 29. Esfuerzo y deformación de Fibras Maduras y Sobre-Maduras.



Fuente: Autores del proyecto.

De acuerdo a la grafica anterior el mejor comportamiento tanto en resistencia a la tensión y deformación fue presentado por la fibras de edad madura, por esta razón son las seleccionadas para ser empleadas como refuerzo en la matriz polimérica para la previa caracterización del material compuesto.

Determinación de las fracciones volumétricas de refuerzo.

Se presenta el peso promedio de las fibras maduras empleadas en probetas de flexión y compresión con un refuerzo no máximo de 30%, se observó que a medida del aumento de porcentaje de la fibra disminuye el peso del compuesto debido a la baja densidad del refuerzo natural. En el desarrollo de la práctica se determinó que las densidades de la fibra de guadua y resina epóxica se encontraron en el orden del promedio de 0.413 g/cm^3 y 1.20 g/cm^3 .

Tabla 22. Características de las probetas de flexión y compresión con diferentes fracciones volumétricas de fibra.

<i>TIPO DE PROBETA</i>	<i>CONFIGURACIÓN DE REFUERZO</i>	<i>PESO PROMEDIO DE FIBRA GUADUA (g)</i>	<i>PESO PROMEDIO DE LA PROBETA (g)</i>	<i>DENSIDAD(g/m³)</i>
<i>FLEXIÓN</i>	10%	0,4	10,2	1,15
	20%	0,7	9,55	1,08
	30%	1	9,2	1,05
<i>COMPRESIÓN</i>	10%	2,9	96,3	1,35
	20%	5,8	93,22	1,31
	30%	8,8	67,9	1,26

FUENTE: Autores del proyecto

A medida que se incrementa la configuración del refuerzo se hace más compleja la manipulación de la fibra debido a la estructura física presente en la fibra como lo son las ondulaciones, lo cual al agruparlas manualmente, hace que esta ocupe mayor volumen en los moldes. De esta manera se trabajaran las configuraciones 0.1, 0.2 y 0.3 como refuerzo en la matriz. EL detalle del cálculo de la cantidad de fibra para cada fracción de refuerzo, así como, las fracciones volumétricas empleadas en el proyecto se presenta en el Anexo#.

Se ensayaron 11 probetas de flexión y 4 probetas por compresión para cada disposición del refuerzo con fibra madura. La selección del refuerzo es un promedio basado en estudios hechos en la facultad de ingeniería de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, el análisis del presente proyecto va enfocado en el efecto de las propiedades mecánicas a flexión y compresión del compuesto a variaciones del refuerzo con fibra natural, bajo las mismas condiciones de manufactura.

Previo a los ensayos mecánicos se tomaron las medidas de largo, ancho y espesor en tres puntos a lo largo de cada probeta verificando que estas cumplan con los rangos de tolerancia presentados en las normas, en la tabla 23 se presentan los valores obtenidos de 7 probetas tomadas al azar para cada tipo de ensayo. Para asegurar las medidas de las probetas se rectificaron utilizando un esmeril hasta verificar que estén dentro de las dimensiones descritas y de igual manera mejorando su acabado superficial.

Tabla 23. Dimensiones de las probetas de muestra al azar.

NÚMERO DE PROBETA	PROBETAS A FLEXIÓN			PROBETAS A COMPRESIÓN		
	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	ESPESOR (mm)
1	13,11	161	4,17	40,5	70	25,54
2	13,22	162	4,12	41,1	70,1	25,6
3	13,22	161	4,21	40,12	70,9	25,7
4	13,18	160,8	4,13	40,5	70,2	25,6
5	13,15	163	4,17	40,25	71,1	25,8
6	13,22	158	4,12	40,3	70,2	25,5
7	13,18	162	4,12	40,2	70,3	25,9
8	13,11	159,9	4,3	-	-	-
9	13,26	160,2	4,12	-	-	-
10	13,09	160	4,18	-	-	-
PROMEDIO	13,17	160,89	4,16	40,42	70,40	25,66
DESVIACIÓN	0,06	1,44	0,06	0,33	0,42	0,14
TOLERANCIA	-	-	-	-	-	-

FUENTE: Autores del proyecto.

Como se observa en la tabla 23, para los ensayos de flexión y compresión si bien no se especifica en la norma las tolerancias, se puede observar que las dimensiones de las probetas están muy cerca de los valores requeridos por las normas ASTM D-7264 y ASTM D-695.

Evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Se describirán los resultados promedio de los ensayos de flexión y compresión realizados a las probetas del material compuesto reforzado con fibras de guadua. En el anexo D, se presentan las propiedades individuales de cada ensayo.

Ensayo de flexión.

Se desarrollaron ensayos de flexión con probetas de acuerdo a la norma ASTM D-7264 y con fracciones volumétricas de refuerzo entre 0.1, 0.2 y 0.3. Se registraron los datos de fuerza y deflexión de las probetas, a partir de los cuales se calcularon **la propiedad mecánicas como la resistencia a la flexión**. En todos los casos las probetas se fracturaron durante el ensayo. Las características de cada una de las probetas, configuración del refuerzo, varianzas y propiedades mecánicas de los compuestos se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Propiedades mecánicas a flexión de material compuesto de matriz epóxica reforzadas con fibras de Guadua.

Configuración del refuerzo	Esfuerzo (MPa)	Desviación (MPa)	CV (%)	T max (MPa)	Desviación (MPa)	CV (%)	Deformación (mm/mm)	Desviación (mm/mm)	CV (%)	Densidad (g/cm ³)
0,1	312,82	46,47	14,86	25,62	3,81	14,86	0,01	0,0016	13,19	1,15
0,2	474,38	13,82	2,91	38,85	1,13	2,91	0,02	0,0020	11,01	1,08
0,3	549,50	13,74	2,50	45,00	1,12	2,50	0,02	0,0008	3,73	1,05

FUENTE: Autores del proyecto

De acuerdo a lo observado en la tabla 24 las propiedades mecánicas a diferentes configuraciones de refuerzo evidenciaron coeficientes de variación (CV) menores al 15%, lo que indica una menor diferencia en los resultados. De igual manera, las configuraciones de los refuerzo reales presentados fueron menores al 2% con relación a las ideales, esto se debió a que en la adición manual se presentaron pérdidas o adiciones de la fibra, lo que también se pudo haber presentado en alguna otra etapa del proceso. En el anexo D y en las tablas 25, 26 y 27 mostradas a continuación se puede evidenciar lo descrito anteriormente.

Tabla 25. Ensayos de flexión con configuración de 0,1 en fibra de guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Desplazamiento extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	T max (MPa)	Deformación
0,1	1	0,12	12	245,25	282,98	23,17	0,0113
	2	0,13	10	215,82	249,02	20,39	0,0094
	3	0,15	15	343,35	396,17	32,44	0,0141
	4	0,10	14	284,49	328,26	26,88	0,0131
	5	0,11	13	274,68	316,94	25,96	0,0122
	6	0,15	12	245,25	282,98	23,17	0,0113
	7	0,13	14	313,92	362,22	29,66	0,0131
	8	0,12	14	304,11	350,90	28,74	0,0131
	9	0,10	10	215,82	249,02	20,39	0,0094
	10	0,15	12	255,06	294,30	24,10	0,0113
	11	0,11	14	284,49	328,26	26,88	0,0131
Promedio		0,12	12,73	271,11	312,82	25,62	0,012
Desviación		0,02	1,68	40,27	46,47	3,81	0,0016
CV(%)		15,39	13,19	14,86	14,86	14,86	13,19

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla 26. Ensayos de flexión con configuración de 0,2 en fibra de guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Desplazamiento extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	T max (MPa)	Deformación
0,2	1	0,22	18	402,21	464,09	38,01	0,017
	2	0,24	19	412,02	475,41	38,93	0,018
	3	0,21	22	421,83	486,73	39,86	0,021
	4	0,23	17	392,40	452,77	37,08	0,016
	5	0,22	19	412,02	475,41	38,93	0,018
	6	0,25	22	421,83	486,73	39,86	0,021
	7	0,21	22	421,83	486,73	39,86	0,021
	8	0,22	18	402,21	464,09	38,01	0,017
	9	0,20	17	392,40	452,77	37,08	0,016
	10	0,24	22	421,83	486,73	39,86	0,021
	11	0,21	22	421,83	486,73	39,86	0,021
Promedio		0,22	19,82	411,13	474,38	38,85	0,019
Desviación		0,02	2,18	11,98	13,82	1,13	0,0020
CV(%)		6,98	11,01	2,91	2,91	2,91	11,01

FUENTE: Autores del proyecto.

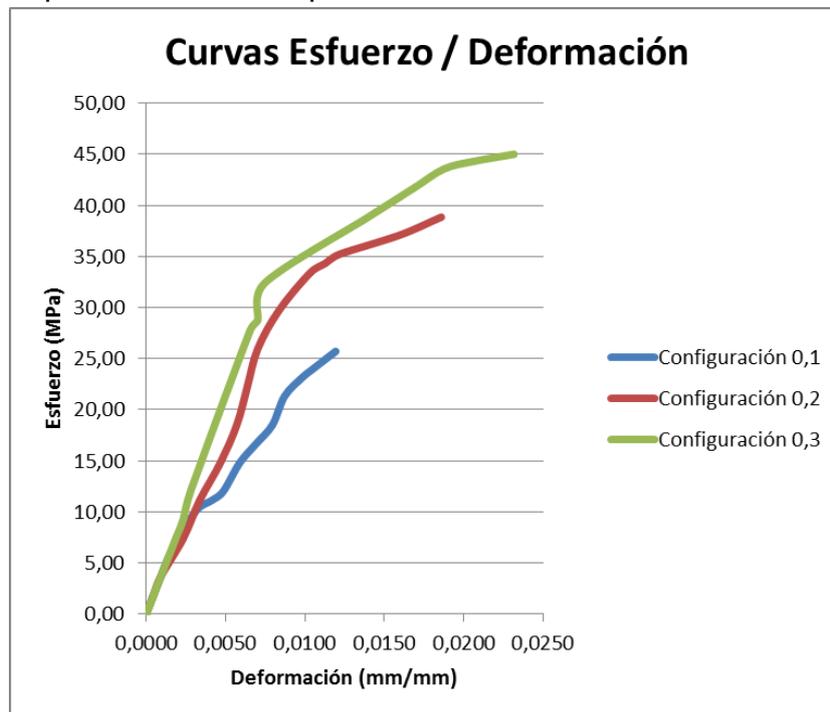
Tabla 27. Ensayos de flexión con configuración de 0,3 en fibra de guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Desplazamiento extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	T max (MPa)	Deformación
0,3	1	0,31	24	470,88	543,32	44,49	0,0225
	2	0,3	25	480,69	554,64	45,42	0,0234
	3	0,32	25	490,50	565,96	46,35	0,0234
	4	0,34	23	461,07	532,00	43,57	0,0216
	5	0,32	24	470,88	543,32	44,49	0,0225
	6	0,31	23	461,07	532,00	43,57	0,0216
	7	0,3	25	490,50	565,96	46,35	0,0234
	8	0,33	25	480,69	554,64	45,42	0,0234
	9	0,31	23	461,07	532,00	43,57	0,0216
	10	0,33	25	480,69	554,64	45,42	0,0234
	11	0,34	25	490,50	565,96	46,35	0,0234
Promedio		0,32	24,27	476,23	549,50	45,00	0,0228
Desviación		0,01	0,90	11,91	13,74	1,12	0,00085
CV(%)		4,53	3,73	2,50	2,50	2,50	3,73

FUENTE: Autores del proyecto.

Las probetas presentaron las densidades más elevadas en la ausencia de fibra de guadua madura debido a la baja densidad que esta presenta ($0,413 \text{ g/cm}^3$). Para observar el comportamiento mecánico a la flexión, es necesario considerar la curva esfuerzo vs deformación bajo cada configuración del refuerzo según la figura 30.

Figura 30. Curvas esfuerzo vs. Deformación a la flexión del material compuesto de matriz epóxica reforzada con fibras de Guadua.



FUENTE: Autores del proyecto

Se puede analizar que la curva presenta dos comportamientos diferentes, el inicial es un tramo lineal hasta llegar cerca de la mitad del esfuerzo, y entra un tramo de deformaciones irreversibles que se representa en un comportamiento no lineal hasta por último llegar a la fractura. Los valores que se obtuvieron

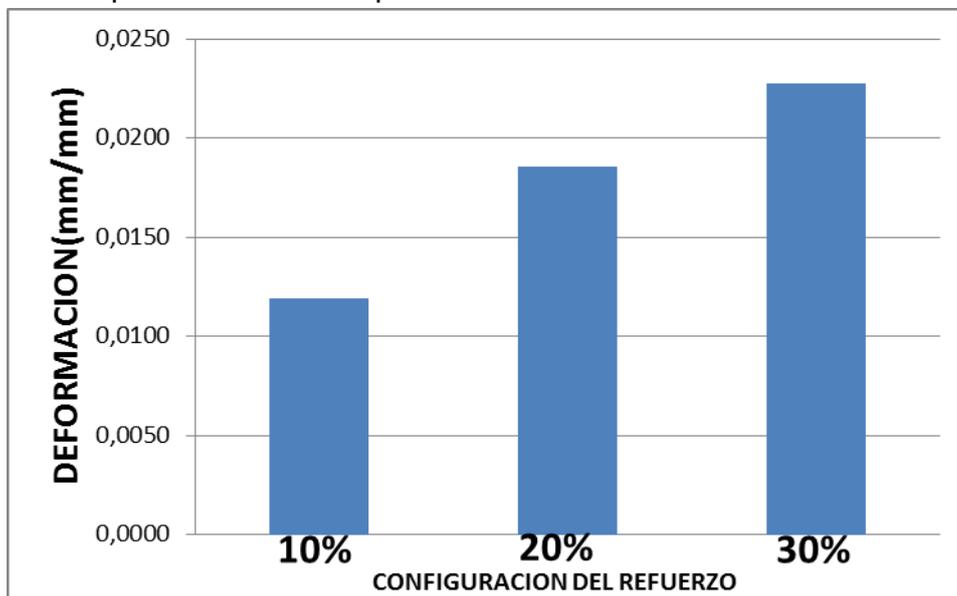
para graficar las curvas se tomaron de probetas representativas de cada configuración.

Se evidencia que el incremento del refuerzo aumento las propiedades mecánicas del compuesto, al igual que la orientación multi-direccional de las fibras. La figura 30 permito evaluar que el comportamiento mecánico a diferentes configuraciones del refuerzo es similar, cual demuestra reproducibilidad en procedimiento experimental.

De igual manera por medio de las curvas de esfuerzo vs deformación se analizan las deformaciones máximas obtenidas por cada configuración de refuerzo. La que alcanzo a tener el mayor rango de deformación frente a las de más configuraciones fue la que se reforzó con 30%, es decir, al adicionar más porcentaje de refuerzo al compuesto, la matriz reforzada adquiere mayor resistencia lo que incrementa su deformación, ya que esta es la que transmite la carga aplicada a las fibras.

Esto se evidencia en la figura 31, al observar el comportamiento que tiene la deformación del compuesto al incremento de la configuración de refuerzo, lo que nos indica que una configuración del 0.1 de refuerzo, presento una disminución del 47,5% con respecto a la deformación del 0.3 de refuerzo.

Figura 31. Incremento en la deformación máxima a la flexión del material compuesto de matriz epóxica reforzada con fibras de Guadua

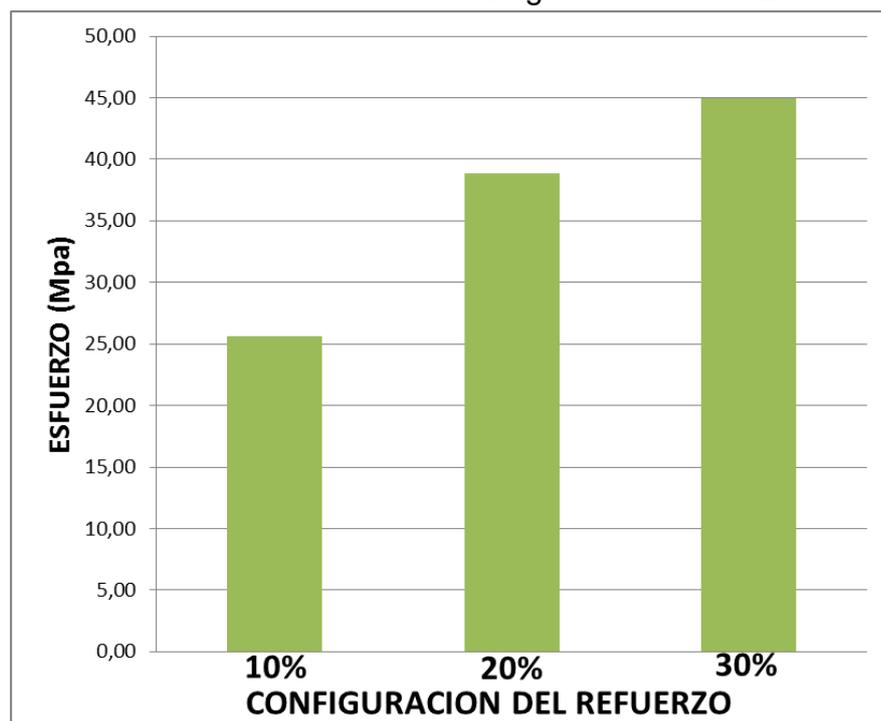


FUENTE: Autores del proyecto

Resistencia a la flexión.

Con respecto a la resistencia a la flexión del compuesto reforzado con fibra de guadua madura se vió un incremento lo cual se logra analizar en la figura 32. Esto puede deberse a los beneficios que ofrece las propiedades mecánicas de la fibra natural, así también, la eliminación de lignina efectuado previo a la extracción de la fibra, lo cual tiene un efecto positivo en la adherencia química del refuerzo y la matriz. (martin estrada).

Figura 32. Incremento de la resistencia a la flexión con forme aumenta en 10% la fracción de la fibra de guadua al refuerzo.

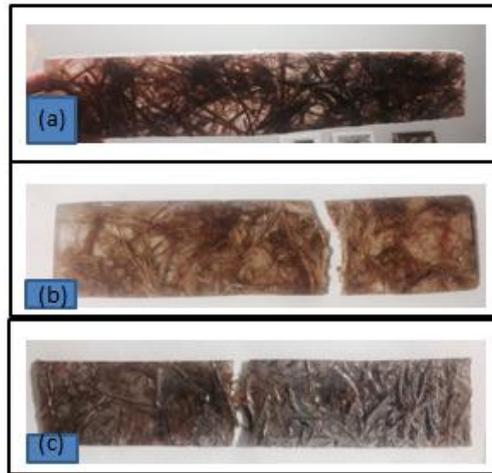


FUENTE: Autores del proyecto.

De la anterior figura 32, se logra analizar que para un material compuesto reforzado bajo una configuración de fibra de guadua madura, la mayor resistencia a la flexión se alcanzó con una configuración del 30%, y la menor presentó un esfuerzo menor en un 43% con respecto a la mayor.

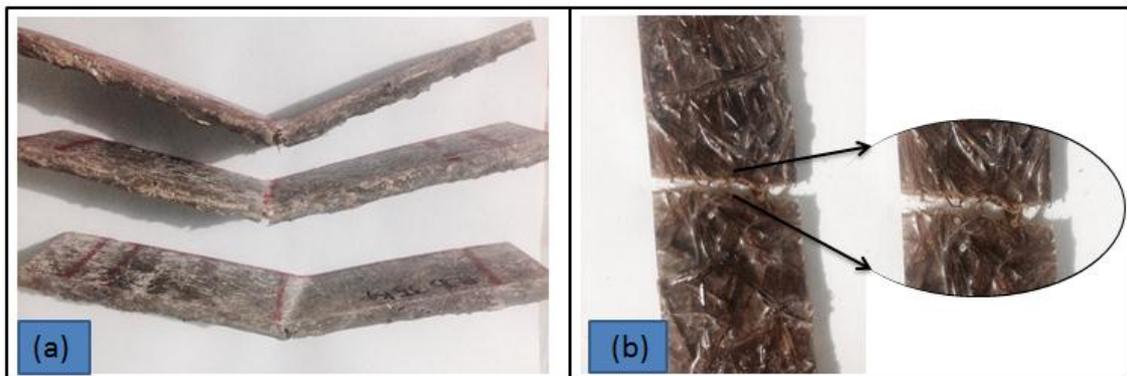
Finalmente, en la figura 33 y 34 se presentan las probetas a flexión ensayadas.

Figura 33. Vista de la fractura; a) reforzado con 10%;b) reforzado con20%;c) reforzado con30%.



FUENTE: Autores del proyecto

Figura 34. Vistas de probetas ensayadas; a) vista lateral de probeta ensayada; b) vista detallada de la fractura general.



FUENTE: Autores del proyecto.

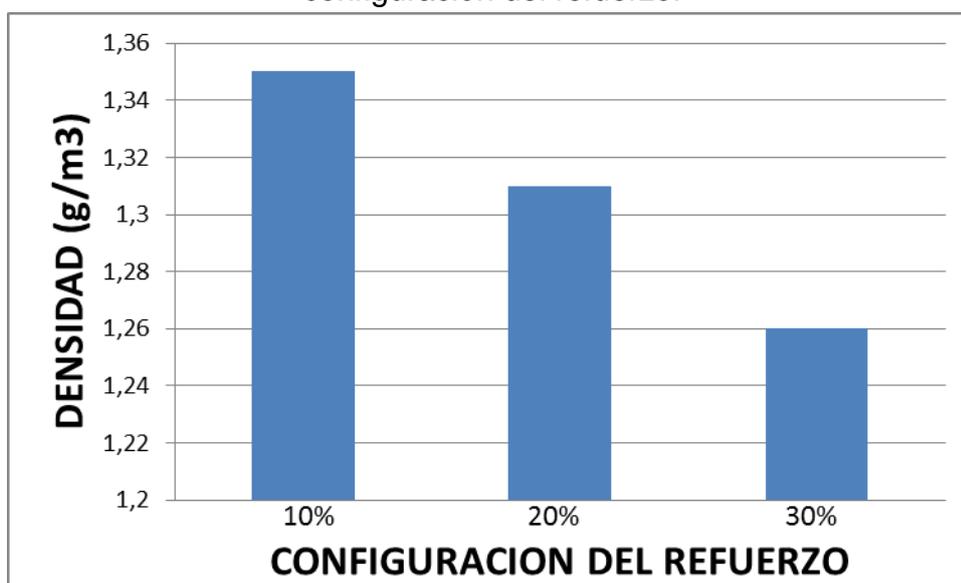
Al aplicar una carga sobre las probetas se observó que la falla del material compuesto se originó en la matriz y luego se trasladó a las fibras, así a pesar de existir rotura en el material, algunas probetas se mantuvieron unidas debido a que no fallaron las fibras, esto ocurre en vista de que la matriz en zonas posee menores propiedades mecánicas que la fibra de guadua y/o la adherencia no fue suficiente.

Ensayo de compresión.

Para los ensayos de compresión se elaboraron probetas bajo la norma ASTM D-695. De igual manera que las probetas de flexión se les variaron la configuración de refuerzo en 0.1, 0.2 y 0.3 y se evaluó su desempeño mecánico.

Inicialmente se analizaron las densidades presente de los compuestos, se notó que el aumento en la configuración del refuerzo a cada de 10%, disminuye la densidad en el compuesto, como se observa en la tabla 28. Características de las probetas de flexión y compresión con diferentes fracciones volumétricas de fibras. En la figura 35 se observa la disminución de un 6,6% de la densidad en la configuración máxima del refuerzo con respecto a la configuración del 0.1. Esto se esperaba, debido a que se considera que la densidad de la fibra de guadua (0.413 g/cm^3) es 290% menor a la densidad de la resina epóxica (1.20 g/cm^3).

Figura 35. Variación de la densidad con el incremento de la configuración del refuerzo.



FUENTE: Autores del proyecto

A continuación se presentan en la tabla 28. La configuración del refuerzo, varianzas y Las características de las propiedades mecánicas, de las cuales se construyen la curva esfuerzo vs deformación y se analiza su resistencia a la compresión.

Tabla 28. Propiedades mecánicas a compresión del material compuesto de matriz epóxica reforzadas con fibras de Guadua.

Configuración del refuerzo	Esfuerzo (MPa)	Desviación (MPa)	CV (%)	Deformación (mm/mm)	Desviación (mm/mm)	CV (%)
0,1	40,07	2,01	5,02	0,061	0,0059	9,70
0,2	27,19	1,03	3,80	0,042	0,0058	13,70
0,3	20,32	1,15	5,67	0,029	0,0035	12,25

FUENTE: Autores del proyecto

De acuerdo a lo observado en la tabla 28, las propiedades mecánicas a diferentes configuraciones de refuerzo evidenciaron coeficientes de variación (CV) menores al 14%, lo que indica una menor diferencia en los resultados.

En las tablas 29, 30 y 31 se pueden observar las propiedades de cada probeta ensayada a compresión.

Tabla 29. Ensayo de compresión con configuración de 0,1 en fibra de Guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra Nº	Configuración del refuerzo real	Variación del largo (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm/mm)
0,1	1	0,11	4,6	19178,55	18,88	0,066
	2	0,12	3,8	22003,83	21,66	0,054
	3	0,13	4	20934,54	20,60	0,057
	4	0,115	4,6	20473,47	20,15	0,066
Promedio			4,25	20647,6	20,32	0,061
Desviación			0,41	1170,49	1,15	0,0059
CV (%)			9,70	5,67	5,67	9,70

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla 30. Ensayo de compresión con configuración de 0,2 en fibra de Guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra Nº	Configuración del refuerzo real	Variación del largo (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm/mm)
0,2	1	0,25	3,5	28988,55	28,53	0,050
	2	0,21	2,6	26487	26,07	0,037
	3	0,21	2,7	27271,8	26,84	0,039
	4	0,23	3	27762,3	27,33	0,043
Promedio			2,95	27627,41	27,19	0,042
Desviación			0,40	1048,47	1,03	0,0058
CV (%)			13,70	3,80	3,80	13,70

FUENTE: Autores del proyecto.

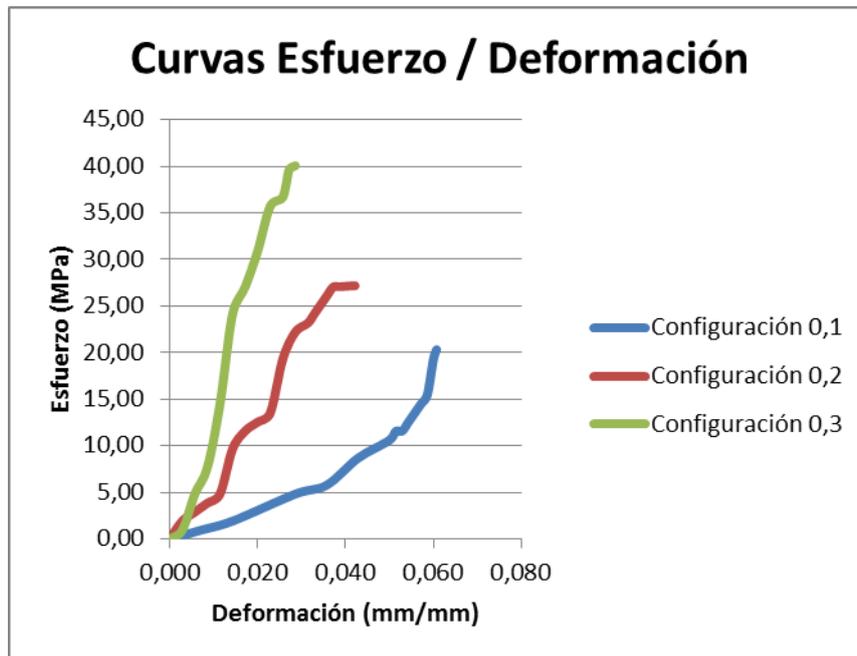
Tabla 31. Ensayo de compresión con configuración de 0,3 en fibra de Guadua.

Configuración del refuerzo	Muestra Nº	Configuración del refuerzo real	Variación del largo (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm/mm)
0,3	1	0,33	1,7	41202,0	40,55	0,024
	2	0,31	2,2	38259,0	37,66	0,031
	3	0,31	2,2	40221,0	39,59	0,031
	4	0,35	1,9	43164,0	42,48	0,027
Promedio			2,0	40711,5	40,07	0,029
Desviación			0,24	2042,1	2,01	0,0035
CV (%)			12,2	5,0	5,02	12,25

FUENTE: Autores del proyecto.

El análisis de las propiedades mecánicas se llevó a cabo con la construcción de la curva de esfuerzo vs deformación presentada en la figura 35, en esta se ve el comportamiento mecánico del material y el efecto de la configuración del refuerzo que en esta ejerce. Los valores que se obtuvieron para graficar las curvas se tomaron de probetas representativas de cada configuración.

Figura 35. Curvas esfuerzo vs. Deformación a la compresión del material compuesto de matriz epóxica reforzada con fibras de Guadua.



FUENTE: Autores del proyecto

A diferencia de la curva observada en las probetas ensayadas a flexión, esta tiene un mayor rango de comportamiento lineal a lo largo de toda la curva. Las probetas ensayadas a compresión presentaron un comportamiento mecánico similar en las configuraciones de 0.3 y 0.2, a diferencia entre la configuración 0.1 que un 25% es lineal, así también, se observa aumentos de la resistencia conforme se incrementa la incorporación de más porcentaje de fibra.

Resistencia a la compresión.

De los datos obtenidos en la propiedad mecánica a la compresión se tomaron los esfuerzos máximos de cada configuración de refuerzo. Esta variación de refuerzo de fibra de guadua madura se vio reflejado en el aumento de la resistencia, como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Incremento de la resistencia a la compresión conforme aumenta la configuración del refuerzo.

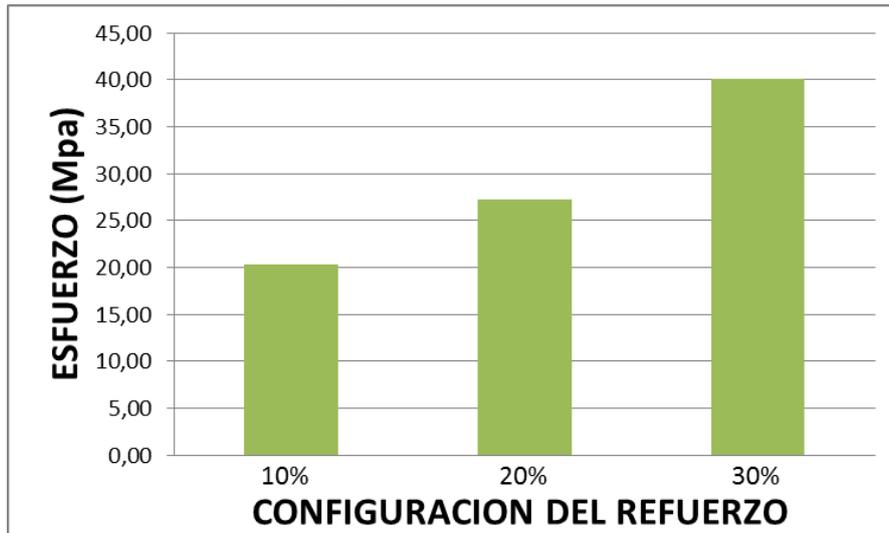


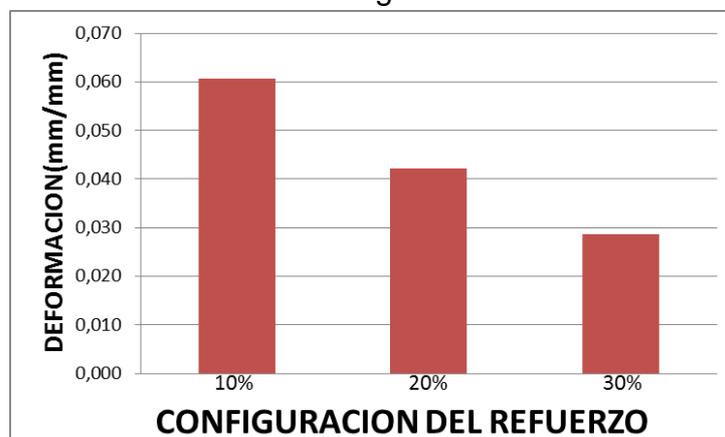
FIGURA: Autores del proyecto

Al implementar una configuración del 30% de fibra como refuerzo, se mejoró la resistencia del material llegando a los 40 MPa. Se observa que el incremento del 10% más a la configuración del 0.2 del refuerzo, tuvo aumento mayor en un 32% de la resistencia, en comparación del incremento de fibra del 10% en la configuración del 0.1 que fue del 25%, es decir, que en la configuración del 0.3 se potencio la unión de la matriz a las fibras de guadua madura.

Deformación a la rotura.

Con el análisis de la gráfica de esfuerzo vs deformación, la menos deformación del material compuesto se encontró en la configuración del refuerzo del 0.3, este efecto es positivo para una aplicación estructural ya que se requiere menor deformación del material.

Figura 37. Comportamiento de la deformación del material compuesto con el incremento de la configuración del refuerzo.

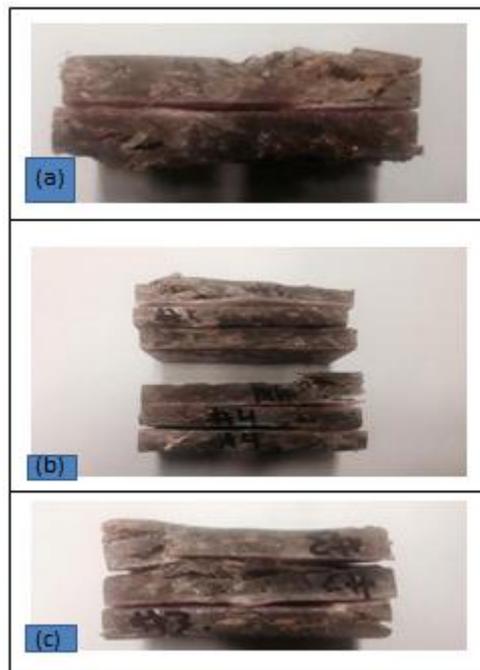


FUENTE: Autores del proyecto.

Como se observa en la figura 37, la mayor deformación de las tres variaciones de refuerzo la obtuvo la configuración del 0.1 con un 0,0059. Esto es consecuencia a que la resistencia soportable es 49% menor a la de la configuración del 30%, lo que hizo que este falle prematuramente e impidió una mayor deformación.

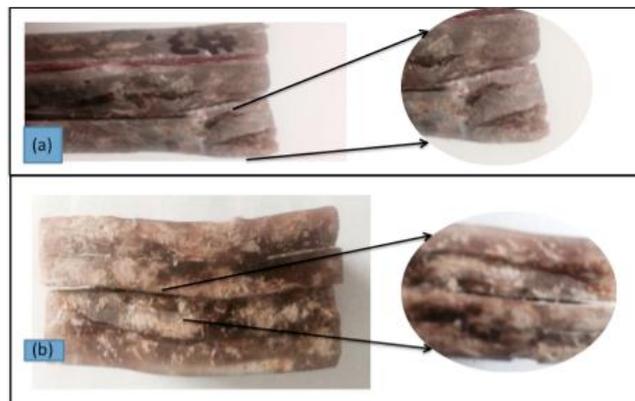
Finalmente, en las siguientes figuras 28 y 29 se presentan las probetas a compresión ensayadas.

Figura 38. Vista de las probetas ensayadas; a) reforzado con 10%;b) reforzado con20%;c) reforzado con30%.



FUENTE: Autores del proyecto.

Figura 39. Vista detallada; a) la fractura de la probeta; b) presencia de delaminación.



FUENTE: Autores del proyecto.

Al analizar las fallas presentes en las probetas para las distintas configuraciones de refuerzo ensayadas a compresión resaltan dos principales: fracturas y delaminación. Se notó que la falla comenzó por la matriz y se transmitió a las fibras, así las fibras que no fallaron a la fractura mantuvieron que no se despedazara la probeta, este comportamiento sobresalió conforme se incrementaba la cantidad de fibra de guadua madura al refuerzo, así de igual manera, las ondulaciones y la delaminación se presentaron en todas las probetas ensayadas acentuándose para las probetas con refuerzo del 0.1.

Selección de la configuración de refuerzo con mejores propiedades mecánicas.

La selección se determinó bajo los aspectos de cantidad de fibra de guadua madura presentes en el refuerzo y el efecto que este tuvo en el desempeño mecánico. Esta selección de la configuración con mejores características mecánicas y físicas (densidad), se basaron en los resultados anteriormente analizados, resaltando que la capacidad de resistir las acciones de fuerzas de flexión y compresión aumentaron al adicionar cada vez un porcentaje mayor del refuerzo, al mismo tiempo, el incremento de la variación del refuerzo de la fibra de guadua madura reducía la densidad del material compuesto. En la tabla 26, se presentan los valores obtenidos en cada uno de los dos ensayos.

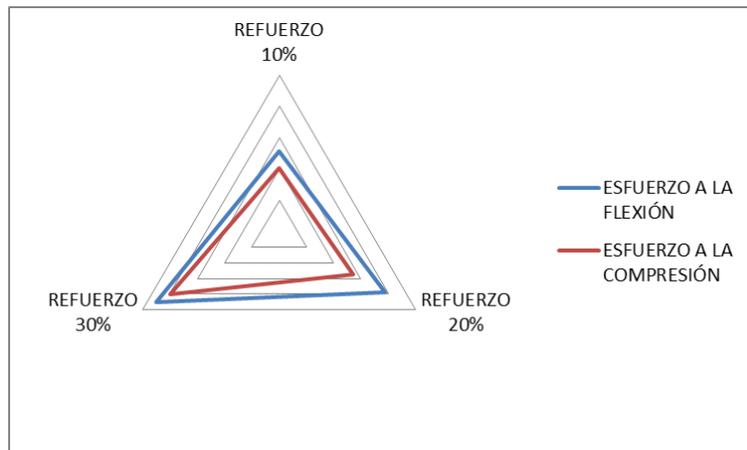
Tabla 26. Propiedades mecánicas del material compuesto de matriz epóxica con varias configuraciones de refuerzo con fibras de Guadua.

Configuración del refuerzo	FLEXIÓN				COMPRESIÓN		
	Esfuerzo (Mpa)	T max (Mpa)	Deformación (mm/mm)	densidad (g/cm3)	Esfuerzo (Mpa)	Deformación (mm/mm)	densidad (g/cm3)
10%	312,82	25,62	0,0119	1,15	20,32	0,061	1,35
20%	474,38	38,85	0,0186	1,08	27,19	0,042	1,31
30%	549,50	45,00	0,0228	1,05	40,07	0,029	1,26

FUENTE: Autores del proyecto.

Posteriormente, para elegir la mejor configuración de refuerzo se evaluó las propiedades mecánicas alcanzadas por las configuraciones, las cuales se muestran en los siguientes diagramas.

Figura 40. Efecto de la variación del porcentaje de refuerzo en los esfuerzos de flexión y compresión.

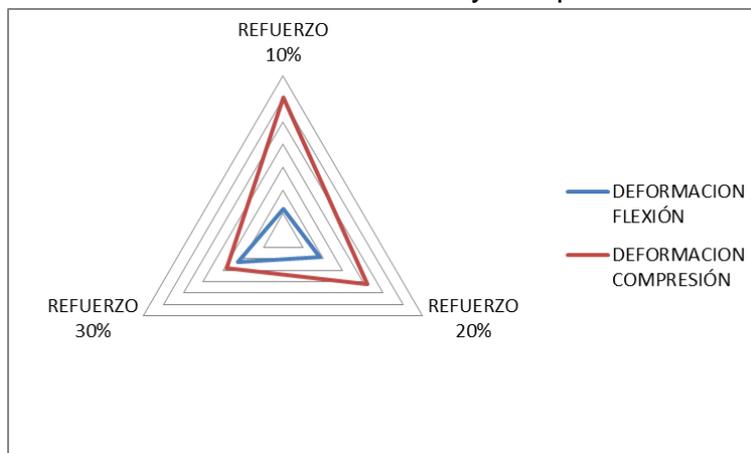


FUENTE: Autores del proyecto

Con el gráfico multi-eje presentado en la figura 40 se observa un aumento gradual en la resistencia a la flexión y compresión conforme se incrementa la concentración de fibra de guadua madura. La configuración del 30% del refuerzo presentó las mejores propiedades mecánicas y comparada con las demás, fue la que menores deformaciones obtuvo. Como se observa en la figura 41.

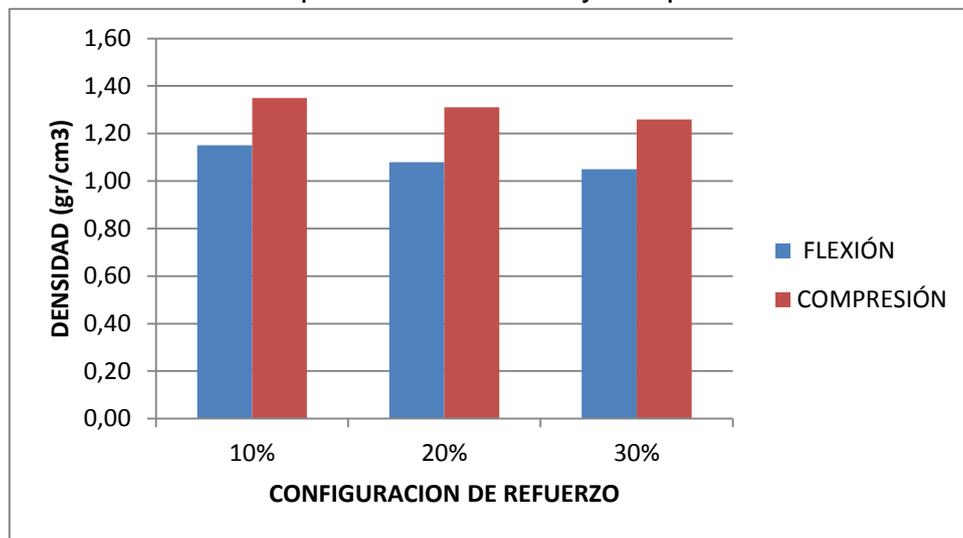
Esta configuración del 0.3 de refuerzo en la matriz presentó mejores propiedades a la flexión que a la compresión, como es el comportamiento de los paneles estructurales, ya que en estos se requiere altas propiedades a la flexión. Cabe señalar que la configuración del 30% de refuerzo es la que presentó las probetas con densidades más bajas en los dos ensayos realizados, como se muestra en la figura 42.

Figura 41. Efecto de la variación del porcentaje de refuerzo en las deformaciones de flexión y compresión.



FUENTE: Autores del proyecto

Figura 42. Efecto de la variación del porcentaje de refuerzo en las densidades de las probetas de flexión y compresión.



FUENTE: Autores del proyecto.

De esta manera la que presento la mejor relación entre las propiedades mecánicas, la cantidad de fibra utiliza y baja densidad es la configuración del 30% de refuerzo en la matriz. Estas propiedades físico-mecánicas son ideales para materiales en aplicaciones estructurales, razón por la cual fue necesario hacer una comparación con un material sismo resistente basado en normas colombianas ya que los cúlmos de guadua en la región Andina son principalmente usados para proyectos de construcción.

9. CONCLUSIONES

1. Mediante los ensayos de tensión realizados a las fibras de *Guadua Angustifolia Kunth* se pudo observar la influencia de la edad en la resistencia a la tensión, esto debido a la presencia de celulosa en las fibras maduras lo que dio un 32,7% más de resistencia a estos culmos presentando esfuerzos a tensión promedio de 239,73 MPa, mientras que las fibras de *Guadua* Sobre-Madura presentaron una resistencia de 161,17 MPa; 78,56 MPa por debajo de la resistencia de las fibras maduras, es por esta razón que se selecciona como refuerzo de matriz polimérica.
2. Mediante la digestión para la extracción de las fibras de *Guadua* se pudo evidenciar una fácil obtención de fibras largas, lo que optimiza la orientación en la matriz polimérica, el promedio de longitud fue de 72,12 mm tanto para fibras maduras como sobre maduras.
3. En la elaboración de los paneles del material compuesto, los parámetros adecuados para su obtención fueron; una presión aplicada por un peso de 300kg, un tiempo
- 4.
5. tiempo de curado de 48 horas bajo una temperatura ambiente (17°C) y un tiempo de post-curado de alrededor de 15 días. Por facilidad de fabricación se emplearon porcentajes de refuerzo no máximos del 30%.
6. Mediante los ensayos de flexión y compresión efectuados, se presentó que las configuraciones del 0.2 y 0.3 en el refuerzo del material compuesto, presentaron un efecto similar al aumentar su resistencia y disminuir la densidad a mayores porcentajes de fibra.
7. Las propiedades mecánicas encontradas en el material compuesto con una configuración del 30% en el refuerzo, presentaron una resistencia a la flexión (45 MPa) y una deformación (0,022) en más de un 40% en comparación con el material reforzado a un 10%. Con respecto a la compresión, el incremento de la resistencia (40 MPa) fue de un 50%.
8. Durante los ensayos de flexión y compresión las probetas presentaron bajo los esfuerzos aplicados que la falla comenzó por la matriz y se transmitieron a las fibras de *Guadua*. Las fibras que no llegaron a la ruptura mantuvieron las probetas unidas en la zona de la fractura, lo que causó que las probetas no llegaran a una fragmentación total.
9. La densidad del material compuesto bajo el 10%, 20% y 30% de fibra en el refuerzo no llegaron a exceder más del 1,35 g/cm³.
10. El material que mejor logro combinar las características mecánicas en una baja densidad es el material compuesto reforzado con el 30% de fibra, optando por propiedades deseables en aplicaciones estructurales.
11. El maquinado de los tableros elaborados para la obtención de probetas reveló facilidad en el manejo y conformado de piezas.

12.RECOMENDACIONES

1. Para la digestión de las fibras es recomendado realizar una nueva formulación de Hidromódulo el cual influya directa o inversamente en la deformación de la fibra.
2. Realizar la extracción de las fibras mediante otros métodos para observar el comportamiento de esta como refuerzo.
3. Realizar la caracterización mecánica del compuesto obtenido a diferentes métodos de fabricación.
4. Analizar el efecto de las propiedades mecánicas de la fibra de guadua como refuerzo dentro de un material compuesto híbrido.
5. Realizar un estudio acerca de la biodegradabilidad del compuesto para observar la incidencia de la fibra de Guadua en la descomposición del material.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] Andrezej K. Bledzki, V. E. (n.d.). COMPORTAMIENTOS RECIENTES Y APLICACIONES DE POLIMEROS RELLENOS DE FIBRA NATURAL. *Institut für Werstofftechnik* , 9.
- [2.] Oscar Francisco Delgado, J. A. (2010). EXTRUSION DE PERFILES ESPUMADOS DE MADERA PLASTICA. *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES* .
- [3.] VAN DE WEYENBERG I, et al. (2003). Influence And Chemical Treatmentnt of Flax Fibres On Their Composites.
- [4.] ESPINAL, Carlos. et al. (2005). La Cadena De La Guadua En Colombia. Bogotá D.C.
- [5.] POSSO. Andres . (2011). Diversidad Genética Y Estructura Poblacional De Guadua angustifolia Kunth En El Eje Cafetero Colombiano. Palmira.
- [6.] ESTRADA. Martin. (2010). Extracción Y Caracterización Mecánica De Las Fibras De Bambú (Guadua Angustifolia) Para Uso Potencial Como Refuerzo De Materiales Compuestos. Bogotá D.C.
- [7.] Hector J. Martinez Covalada, C. F. (2005). *LA CADENA DE LA GUADUA EN COLOMBIA, UNA MIRADA GLOBAL DE SU ESTRUCTURA Y DINAMICA*. BOGOTA: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLO RURAL.
- [8.] Oscar F. Delgado, J. A. (2010). *EXTRUSION DE PERFILES ESPUMADOS DE MADERA PLASTICA*. BOGOTA: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
- [9.] Stupenengo, F. (2011). *MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS, materiales compuestos*. ARGENTINA: COLECCION ECUENTRO INET.
- [10.] A.besedgnjak. (2009). LOS MATERIALES COMPUESTOS. ALEMANIA.
- [11.] GONZALES, Luis. Elementos Para La Caracterización Mecánica De La Guadua Angustifolia Kunth.
- [12.] BLEDZKI. Andrzej, SPERBER. Volker. . Comportamientos Recientes Y Aplicaciones De Polímeros Rellenos De Fibra Natural.

- [13.] CAMPBEL, F. (2004). *MANUFACTURING PROCESS FOR ADVANCED COMPOSITES*. GRAN BRETAÑA.
- [14.] GUAMANQUISPE, J. (2013). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIUGA MECANICA DE POLIMEROS COMPUESTOS CON FIBRA NATURAL Y SU ICIDENCIA EN LA APLICACION PARA LA FABRICACION DE ACCESORIOS DE LA INDUSTRIA CARROCERA*.
- [15.] HULL, D. (2003). *MATERIALLES COMPUESTOS*. BARCELONA.
- [16.] PONCE, S. (2012). *OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA BIODEGRADABLE REFORZADOS CON FIBRA DE ABACÁ*. QUITO.
- [17.] TORRES, E. (2011). *ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE FIBRA EN LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH POR PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÚÓN Y PROFUNDIDAD DEL CAMPO EXTENDIDO*. BUCARAMANGA.
- [18.] V.GUERRERO, P. P. (2015). *NUEVOS MATERIALES: APLICACIONES ESTRUCTURALES E INDUSTRIALES*. QUITO-ECUADOR.
- [19.] VICTOR H, G. P. (s.f.). *MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES Y SINTETICAS*. QUITO, ECUADOR.

ANEXOS

ANEXO A

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO.

A.1. EXTRACCIÓN DE LAS FIBRAS DE GUADUA.

A.1.1. Proceso de Mercerizado

El proceso de mercerizado se emplea principalmente para la extracción de pulpa o pasta de celulosa con la que se produce papel y cartón. En el proceso de digestión por mercerizado es indispensable el uso de hidróxido de Sodio, esto con el fin de extraer la lignina presentes en las fibras de madera, mediante el uso de recipientes a presión como autoclaves. El líquido que se separa de las fibras una vez realizado el proceso es llamado licor negro y este debe ser puesto a disposición del laboratorio para que realicen el drenado adecuado, debido que el contenido ácido de este licor puede afectar recursos hídricos.

La mezcla entre el reactivo y el agua se llama Licor blanco $NaOH+H_2O$, esta solución debe suministrarse con precisión ya en exceso puede afectar la resistencia mecánica de las fibras, debido al desgaste que puede ocasionar deterioro en la celulosa.

El Hidromódulo sugerido para una delignificación óptima es:

Ecuación A.1.1. Ecuación Hidromódulo según peso de astillas.

$$HM = \frac{V_{H_2O}}{W_{Astillas\ de\ Guadua}}$$

Los materiales y equipos empleados para la realización de este procedimiento se describen a continuación:

- Culmos de *Guadua Angustifolia Kunth* Madura
- Culmos de *Guadua Angustifolia Kunth* Sobre-madura.
- Autoclave, para controlar las variables de la digestión de las astillas de guadua.
- Microscopio, para el análisis del área transversal de las fibras.
- 1500 gramos de Hidróxido de Sodio (NaOH)
- Desecador, para la absorción de la humedad restante presente en las astillas de la guadua.
- Báscula digital modelo SP2001 y marca OHAUS, controlar los pesos de astillas de guadua y suministros de químicos para la digestión.
- Papel Filtro, retener las fibras durante la separación del licor negro.
- Indicador de Ph, verificar el ambiente alcalino presente en las astillas de guadua procesadas.

El procedimiento general para llevar a cabo esta práctica de laboratorio se describe a continuación:

1. Se extraen astillas mediante corte mecánico, procurando que estas sean largas y lo más delgadas posibles para que los químicos penetren de manera adecuada el material.
2. Se pesan y se miden el reactivo de Hidróxido de sodio y las astillas que se van a introducir en la autoclave.
3. Se realiza la mezcla entre el reactivo y el agua manteniendo el porcentaje de concentración determinado.
4. Se mezclan las astillas y el Hidromódulo dentro de un recipiente de vidrio, esto debido a que el ambiente es muy corrosivo y puede averiar la autoclave.
5. Se introduce el recipiente en la autoclave y se cierra bien para evitar pérdidas de presión.
6. Se programa el ciclo de la autoclave con presión, temperatura y tiempo de enfriamiento.
7. Se retira el recipiente de la autoclave.
8. Las fibras se separan del licor negro mediante papel filtro y se lava con abundante agua hasta que se neutralice su pH.
9. Se introduce la pulpa limpia en un desecador con el fin de eliminar humedad y poder proceder a separar las fibras.

ANEXO B
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FIBRAS DE GUADUA
ANGUSTIFOLIA.

1. ENSAYOS A TENSIÓN SEGÚN NORMA ASTM D1557.

Se describen a continuación en la tabla B.1.1. los parámetros bajo los cuales se desarrolló el ensayo a tensión de las fibras de *Guadua Angustifolia Kunth* madura y sobre-madura.

Tabla B.1.1. Parámetros ensayo de tensión Fibras de Guadua.

ENSAYOS DE TENSIÓN A FIBRAS DE GUADUA	
Numero de pruebas por edad	29
Velocidad del ensayo (mm/min)	0,5
Longitud promedio de la fibra (mm)	72,67

FUENTE: Autores del proyecto.

Se presentan a continuación las áreas promedio determinadas para las fibras ensayadas en la Tabla B.1.2.

Tabla B.1.2. Áreas promedio en fibras de Guadua Madura y Sobre-Madura.

Edad	Micrografía	Área promedio (m²)
Madura		1,94 x10 ⁻⁷
Sobremadura		

FUENTE: Autores del proyecto.

En las siguientes tablas se pueden observar los resultados de los ensayos a tensión realizados a las muestras de *Fibra de Guadua* con edades madura y sobre-madura.

Tabla B.1.3. Esfuerzo a la tensión de las fibras de Guadua Madura según norma ASTM D1557.

Edad de culmo	Muestra	Desplazamiento extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm/mm)
Madura	M1	1,7	42,18	214,84	0,023
	M2	1,5	43,16	259,73	0,021
	M3	1,8	44,15	243,95	0,025
	M4	1,7	39,24	312,26	0,024
	M5	1,5	43,16	311,55	0,022
	M6	1,6	48,07	244,81	0,023
	M7	1,7	47,09	221,72	0,025
	M8	1,5	44,15	224,83	0,020
	M9	1,8	43,16	283,87	0,023
	M10	1,5	47,09	283,34	0,019
	M11	1,7	39,24	216,85	0,023
	M12	1,7	48,07	265,64	0,024
	M13	1,6	47,09	239,82	0,022
	M14	1,7	43,16	203,25	0,023
	M15	1,5	45,13	359,10	0,021
	M16	1,8	45,13	325,71	0,024
	M17	1,6	44,15	224,83	0,023
	M18	1,5	46,11	187,20	0,021
	M19	1,5	48,07	181,94	0,021
	M20	1,7	43,16	238,53	0,024
	M21	1,7	41,20	209,84	0,025
	M22	1,7	45,13	249,38	0,024
	M23	1,5	46,11	187,20	0,021
	M24	1,6	45,13	229,82	0,021
	M25	1,8	43,16	219,83	0,025
	M26	1,7	46,11	174,51	0,024
	M27	1,6	48,07	170,01	0,023
	M28	1,5	39,24	258,07	0,021
	M29	1,7	41,20	209,84	0,023
Promedio		1,634	44,35	239,73	0,023
Desviación		0,108	2,68	46,66	0,0017
CV (%)		6,597	6,04	19,46	7,318

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla B.1.3. Esfuerzo a la tensión de las fibras de Guadua Sobre-Madura según norma ASTM D1557.

Edad de culmo	Muestra	Desplazamiento extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm/mm)
Sobre-Madura	SM1	1,50	31,39	249,81	0,021
	SM2	1,60	34,34	174,87	0,022
	SM3	1,70	30,41	143,20	0,023
	SM4	1,80	28,45	133,96	0,026
	SM5	1,50	26,49	134,90	0,021
	SM6	1,60	28,45	171,18	0,022
	SM7	1,50	29,43	234,20	0,021
	SM8	1,50	30,41	154,88	0,021
	SM9	1,50	30,41	143,20	0,021
	SM10	1,80	34,34	149,92	0,026
	SM11	1,60	31,39	249,81	0,023
	SM12	1,50	32,37	164,87	0,019
	SM13	1,70	26,49	146,37	0,023
	SM14	1,70	27,47	139,89	0,023
	SM15	1,60	28,45	226,39	0,021
	SM16	1,80	29,43	128,50	0,025
	SM17	1,70	34,34	174,87	0,023
	SM18	1,80	33,35	145,64	0,026
	SM19	1,60	32,37	194,79	0,023
	SM20	1,80	34,34	174,87	0,026
	SM21	1,60	26,49	124,72	0,023
	SM22	1,50	28,45	124,22	0,021
	SM23	1,60	29,43	138,58	0,021
	SM24	1,80	30,41	132,79	0,024
	SM25	1,50	32,37	131,44	0,020
	SM26	1,70	33,35	169,87	0,023
	SM27	1,60	30,41	132,79	0,021
	SM28	1,50	28,45	144,89	0,020
	SM29	1,50	29,43	138,58	0,020
Promedio		1,62	30,44	161,17	0,022
Desviación		0,12	2,47	36,78	0,0019
CV (%)		7,11	8,10	22,82	8,48

FUENTE: Autores del proyecto.

ANEXO C
DETERMINACION DEL PESO DE LA FIBRA Y SUS FRACCIONES
VOLUMETRICAS.

El peso utilizado de la fibra de guadua-madura en su variación de configuración de refuerzo y según el ensayo a caracterizar se determinó con las ecuaciones.

Ecuación C.1.1. los valores se muestran en la **TABLA C.1.1**

Ecuación C.1.1. Masa fibra de guadua.

$$mfg = X * \rho fg * Vpt$$

Dónde:

X = configuración del refuerzo.

ρfg = densidad de la guadua.

Vpt = volumen del panel.

TABLA C.1.1. PESO DE LA FIBRA SEGÚN SU CONFIGURACION Y ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	Vprobeta (cm)	CONFIGURACION DE REFUERZO	PESO DE LA FIBRA (g)
FLEXION	8,32	0,1	0,343616
		0,2	0,687232
		0,3	1,030848
COMNPRESION	71,12	0,1	2,937256
		0,2	5,874512
		0,3	8,811768

FUENTE: Autores del proyecto.

Basado en el peso de la fibra que se determinó para cada probeta, se realizó una sumatoria teniendo en cuenta la geometría del panel y la cantidad de probetas que se podían extraer del mismo, de esta manera se logra identificar la cantidad real de fibra empleada para la obtención del panel de material compuesto. En la tabla C.1.2. se mencionan los parámetros empleados para el desarrollo de lo descrito anteriormente.

TABLA C.1.2. Pesos real utilizado en obtención del material compuesto según configuración y ensayo.

TIPO DE ENSAYO	CONFIGURACIÓN DEL REFUERZO (%)	GEOMETRIA DEL MOLDE (cm)	NÚMERO DE PROBETAS	PESO REAL UTILIZADO (gr)
FLEXIÓN	10	70X70X0,4	216	86,4
	20		216	151,2
	30		216	216
COMPRESIÓN	10	70x70x2,54	175	507
	20		175	1015
	30		175	1540

Seguido de la fabricación de cada una de las probetas para su ensayo correspondiente se determinó la configuración real del refuerzo para el análisis de sus propiedades mecánicas. Se determinó con las siguientes ecuaciones.

Ecuación C.1.2. Fracción volumétrica de la matriz.

$$X_{vm} = \left[\frac{\rho_c - mfg}{v_p} \right] \times \frac{1}{\rho_m}$$

Ecuación C.1.3. Configuración real del refuerzo.

$$X_r = X_{vm} - 1$$

Dónde:

ρ_c = densidad del compuesto.

mfg = masa de fibra de guadua.

V_p = volumen de la probeta.

ρ_m = densidad de la matriz.

Determinado la fracción volumétrica de la matriz con los valores de densidad de la fibra de guadua madura y la matriz epoxica utilizada 0.413 g/cm^3 y 1.20 g/cm^3 , en conjunto con el peso y la densidad del material compuesto de la probeta, se logra especificar matemáticamente la configuración real del refuerzo.

ANEXO D
FORMULAS EMPLEADAS EN LOS ENSAYOS MECANICOS

1. ENSAYOS A FLEXION SEGUN LA NORMA ASTM D-7264-07

Los parámetros empleados en los ensayos y las dimensiones de las probetas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla D.1.1. Parámetros de ensayo a flexión y dimensiones de probetas según norma ASTM.

<i>PARAMETROS DE ENAYO DE FLEXION</i>	
NUMERO DE PRUEBAS POR CONFIGURACION DE REFUERZO	11
VELOCIDAD DE ENSAYO	1 mm/min
REALCION DISTANCIA ENTRE APOYOS Y ESPESOR	32;1
<i>DIMENCIONES DE PROBETAS ASTMD-7264</i>	
ANCHO(mm)	160
LARGO (mm)	13
ESPESOR (mm)	4

FUENTE: Autores del proyecto.

En la siguiente **Tabla D.1.2** se presentan los resultados de los ensayos de flexión efectuados a las probetas reforzadas con fibras de guadua madura a diferentes configuraciones y con una matriz epóxica. Estos datos están se realizaron con las ecuaciones D.1.1 y D.1.2

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{Ecuación D.1.1}$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad \text{Ecuación D.1.2}$$

Dónde:

σ = Esfuerzo, MPa.

P = Fuerza, N.

L = longitud probeta, mm.

b = Ancho probeta, mm.

h = Espesor probeta, mm.

ε = Deformación, mm/mm.

δ = Desplazamiento del extensómetro, mm.

Para el del esfuerzo máximo, se determinó bajo las siguientes ecuaciones, D.1.3, D.1.4 y D.1.5.

$$\sigma_{max} = \frac{\mu_{max}C}{I_x} \quad \text{Ecuación D.1.3}$$

$$\mu_{max} = \frac{PL}{4} \quad \text{Ecuación D.1.4}$$

$$I_x = \frac{1}{12}b_p h_p^3 \quad \text{Ecuación D.1.5}$$

Dónde:

σ_{max} = Esfuerzo maximo, MPa.

P = Fuerza, N.

L = longitud entre apoyos, mm.

b = base de la probeta, mm.

h = alto de la probeta, mm.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de los ensayos a flexión efectuados a las probetas con diferentes configuraciones de refuerzo en matrices epóxicas.

Tabla D.1.2. Resultados de ensayos a flexión del material compuesto según la norma ASTM D-7264 para una fracción volumétrica de 0,1.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	Desplazamiento extensímetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	T max (Mpa)	Deformación
0,1	1	0,12	25	12	245,25	282980769,2	282,98	23,17	0,011
	2	0,13	22	10	215,82	249023076,9	249,02	20,39	0,009
	3	0,15	35	15	343,35	396173076,9	396,17	32,44	0,014
	4	0,10	29	14	284,49	328257692,3	328,26	26,88	0,013
	5	0,11	28	13	274,68	316938461,5	316,94	25,96	0,012
	6	0,15	25	12	245,25	282980769,2	282,98	23,17	0,011
	7	0,13	32	14	313,92	362215384,6	362,22	29,66	0,013
	8	0,12	31	14	304,11	350896153,8	350,90	28,74	0,013
	9	0,10	22	10	215,82	249023076,9	249,02	20,39	0,009
	10	0,15	26	12	255,06	294300000	294,30	24,10	0,011
	11	0,11	29	14	284,49	328257692,3	328,26	26,88	0,013
Promedio		0,12	27,64	12,73	271,11	312822377,62	312,82	25,62	0,01
Desviación		0,02	4,11	1,68	40,27	46470295,75	46,47	3,81	0,0016
CV(%)		15,39	14,86	13,19	14,86	14,86	14,86	14,86	13,19

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla D.1.3. Resultados de ensayos a flexión del material compuesto según la norma ASTM D-7264 para una fracción volumétrica de 0,2.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	Desplazamiento extensiómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	T max (Mpa)	Deformación
0,2	1	0,22	41	18	402,21	464088461,5	464,09	38,01	0,017
	2	0,24	42	19	412,02	475407692,3	475,41	38,93	0,018
	3	0,21	43	22	421,83	486726923,1	486,73	39,86	0,021
	4	0,23	40	17	392,4	452769230,8	452,77	37,08	0,016
	5	0,22	42	19	412,02	475407692,3	475,41	38,93	0,018
	6	0,25	43	22	421,83	486726923,1	486,73	39,86	0,021
	7	0,21	43	22	421,83	486726923,1	486,73	39,86	0,021
	8	0,22	41	18	402,21	464088461,5	464,09	38,01	0,017
	9	0,20	40	17	392,4	452769230,8	452,77	37,08	0,016
	10	0,24	43	22	421,83	486726923,1	486,73	39,86	0,021
	11	0,21	43	22	421,83	486726923,1	486,73	39,86	0,021
Promedio		0,22	41,91	19,82	411,13	474378671,33	474,38	38,85	0,02
Desviación		0,02	1,22	2,18	11,98	13821096,38	13,82	1,13	0,0020
CV(%)		6,98	2,91	11,01	2,91	2,91	2,91	2,91	11,01

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla D.1.4. Resultados de ensayos a flexión del material compuesto según la norma ASTM D-7264 para una fracción volumétrica de 0,3.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	Desplazamiento extensiómetro (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	T max (Mpa)	Deformación
0,3	1	0,31	48	24	470,88	543323076,9	543,32	44,49	0,023
	2	0,3	49	25	480,69	554642307,7	554,64	45,42	0,023
	3	0,32	50	25	490,5	565961538,5	565,96	46,35	0,023
	4	0,34	47	23	461,07	532003846,2	532,00	43,57	0,022
	5	0,32	48	24	470,88	543323076,9	543,32	44,49	0,023
	6	0,31	47	23	461,07	532003846,2	532,00	43,57	0,022
	7	0,3	50	25	490,5	565961538,5	565,96	46,35	0,023
	8	0,33	49	25	480,69	554642307,7	554,64	45,42	0,023
	9	0,31	47	23	461,07	532003846,2	532,00	43,57	0,022
	10	0,33	49	25	480,69	554642307,7	554,64	45,42	0,023
	11	0,34	50	25	490,5	565961538,5	565,96	46,35	0,023
Promedio		0,32	48,55	24,27	476,23	549497202,80	549,50	45,00	0,02
Desviación		0,01	1,21	0,90	11,91	13736562,89	13,74	1,12	0,0008
CV(%)		4,53	2,50	3,73	2,50	2,50	2,50	2,50	3,73

FUENTE: Autores del proyecto.

2. ENSAYOS A COMPRESIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM D-695.

las dimensiones de las probetas y el número de probetas por configuración de refuerzo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla D.2.1. Dimensiones de probetas según norma ASTM.

DIMENSIONES DE PROBETAS COMPRESION	
ANCHO(mm)	160
LARGO (mm)	13
ESPESOR (mm)	4
NUMERO DE PRUEBAS POR CONFIGURACION DE REFUERZO	11

FUENTE: Autores del proyecto.

Para el cálculo de las propiedades a la compresión se emplearon las ecuaciones D.2.1. y D.2.2.

$$\sigma = \frac{F}{A_p} \quad \text{Ecuación D.2.1.}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Ecuación D.2.2.}$$

Dónde:

σ = Esfuerzo, MPa.

F = Fuerza de compresión, N.

A_0 = Área antes de la deformación, mm^2 .

ε = deformación, mm/mm.

l = largo tras deformar, mm.

l_0 = largo inicial, mm.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de los ensayos a compresión efectuados a las probetas con diferentes configuraciones de refuerzo en matrices epóxicas.

Tabla D.2.2. Resultados de ensayos a compresión del material compuesto según la norma ASTM D-695 para una fracción volumétrica de 0,1.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	VARIACION DELLARGO (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	Deformación
0,1	1	0,11	1955	4,6	19178,55	18876525,59	18,88	0,066
	2	0,12	2243	3,8	22003,83	21657312,99	21,66	0,054
	3	0,13	2134	4	20934,54	20604862,2	20,60	0,057
	4	0,115	2087	4,6	20473,47	20151053,15	20,15	0,066
Promedio			2104,75	4,25	20647,60	20322438,48	20,32	0,061
Desviación			119,32	0,41	1170,49	1152054,71	1,15	0,0059
CV (%)			5,67	9,70	5,67	5,67	5,67	9,70

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla D.2.3. Resultados de ensayos a compresión del material compuesto según la norma ASTM D-695 para una fracción volumétrica de 0,2.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	VARIACION DELLARGO (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	Deformación
0,2	1	0,25	2955	3,5	28988,55	28532037,4	28,53	0,050
	2	0,21	2700	2,6	26487	26069881,89	26,07	0,037
	3	0,21	2780	2,7	27271,8	26842322,83	26,84	0,039
	4	0,23	2830	3	27762,3	27325098,43	27,33	0,043
Promedio			2816,25	2,95	27627,4125	27192335,14	27,1923351	0,042142857
Desviación			106,8780458	0,404145188	1048,47363	1031962,233	1,03196223	0,005773503
CV (%)			3,79504823	13,6998369	3,79504823	3,79504823	3,79504823	13,6998369

FUENTE: Autores del proyecto.

Tabla D.2.4. Resultados de ensayos a compresión del material compuesto según la norma ASTM D-695 para una fracción volumétrica de 0,3.

Configuración del refuerzo	Muestra N°	Configuración del refuerzo real	Carga (Kg)	VARIACION DELLARGO (mm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Pa)	Esfuerzo (Mpa)	Deformación
0,3	1	0,33	4200	1,7	41202	40553149,61	40,55	0,024
	2	0,31	3900	2,2	38259	37656496,06	37,66	0,031
	3	0,31	4100	2,2	40221	39587598,43	39,59	0,031
	4	0,35	4400	1,9	43164	42484251,97	42,48	0,027
Promedio			4150	2	40711,50	40070374,02	40,07	0,029
Desviación			208,17	0,24	2042,11	2009955,06	2,01	0,0035
CV (%)			5,02	12,247	5,02	5,02	5,02	12,25

FUENTE: Autores del proyecto.