

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO  
DE FIBRA CORTA DE *GUADUA (ANGUSTIFOLIA KUNTH)* Y RESINA  
TERMOPLÁSTICA (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)**

**CARLOS LEONARDO VÁSQUEZ SOTELO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO  
DE FIBRA CORTA DE *GUADUA (ANGUSTIFOLIA KUNTH)* Y RESINA  
TERMOPLÁSTICA (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)**

**CARLOS LEONARDO VÁSQUEZ SOTELO**

**Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de Solución a un problema de  
ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
RICARDO A. FORERO R.  
INGENIERO MECÁNICO-USTA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto, a mis padres Dalfari Sotelo Ordoñez y Carlos Enrique Vásquez González (QEPD), a mi hermano Jeymar Julián quienes han sido el pilar de mi formación como persona.

A mi madre Dalfari, quien siempre veló por mi bienestar, con su tenacidad y trabajo incansable es ejemplo no solo para mí, sino también para mi hermano.

A la memoria de mi padre Carlos Enrique, quien en su vida siempre fue una persona noble, trabajadora y extremadamente familiar. Incluso después de su partida nos sigue acompañando y apoyando.

A mi hermano Jeymar Julián, porque gracias a él recogí enseñanzas del camino que todo hermano mayor traza, siendo ahora el momento oportuno para andar juntos este nuevo rumbo.

A la familia Morán Pulido, por haberme abierto las puertas de su casa, acogerme como un miembro más de su familia e impulsarme en esos momentos que creía difíciles.

A Stefanie Ulloa Sánchez, mi esposa quien fue mi apoyo incondicional y me acompañó a lo largo de esta etapa de formación profesional.

**Carlos Leonardo Vásquez Sotelo**

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento especial al ingeniero Ricardo Alberto Forero Rubiano, por el apoyo, acompañamiento y tiempo brindado en el desarrollo de la investigación.

Al SENA Centro metalmecánico de Bogotá, por permitirme realizar los ensayos y pruebas requeridas para culminar la investigación.

A la Universidad Santo Tomás por acogerme en su claustro y permitirme ser ingeniero mecánico.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1 GENERAL.....	11
2.2 ESPECÍFICOS .....	11
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
3.1 MATERIALES COMPUESTOS .....	12
3.2 MATERIALES COMPUESTOS MATRIZ POLIMÉRICA (MCMP) .....	13
3.3 MATERIAL DE LA MATRIZ .....	14
3.4 CLASIFICACIÓN DEL REFUERZO.....	16
3.4.1 Partículas.....	16
3.4.2 Estructural .....	16
3.4.3 Fibras.....	17
3.4.3.1 Longitud de las fibras .....	17
3.4.3.2 Orientación de las fibras.....	18
3.5 TIPOS DE REFUERZOS.....	18
3.5.1 Fibras naturales.....	19
3.5.2 Guadua ( <i>Angustifolia kunth</i> ) como fuente de fibras naturales .....	20
3.5.2.1 Constitución de la guadua .....	20
3.5.2.2 Estado de maduración de la guadua.....	21
3.5.2.3 Composición química de la guadua .....	22
3.5.3 Procesos de deslignificado .....	24
3.6 PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIAL COMPUESTO.....	26
3.7 PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN .....	28
3.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	30
3.9 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (FTIR) .....	31
3.10 ANÁLISIS DE DATOS POR MEDIO DEL MÉTODO DE TUKEY .....	32
3.10.1 Prueba de Tukey .....	33
<b>4. METODOLOGÍA, MÉTODOS Y EQUIPOS.....</b>	<b>34</b>
4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	34
4.2 SELECCIÓN DE LA FIBRA .....	35
4.2.1 Determinación del contenido de humedad de la fibra.....	35
4.2.2 Selección del tamaño de la fibra.....	35
4.3 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS .....	36
4.3.1 Extrusión.....	36

4.3.2	Moldeo por compresión .....	37
4.4	ENSAYO A TENSIÓN DE LAS PROBETAS LDPE CON FIBRAS DE GUADUA TRATADAS.....	39
4.5	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	39
4.6	ESPECTROMETRÍA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	40
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
5.1	CONTENIDO DE HUMEDAD FIBRA.....	41
5.2	INSPECCIÓN VISUAL PROBETAS MATERIAL COMPUESTO.....	43
5.3	ENSAYO DE TENSIÓN.....	46
5.4	ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBA DE TUKEY .....	47
5.5	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	50
5.6	ESPECTROMETRÍA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	54
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>59</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Tipos de materiales compuestos .....	13
<b>Tabla 2</b>	Constituyentes de los MCMP .....	14
<b>Tabla 3</b>	Materiales termoplásticos .....	15
<b>Tabla 4</b>	Tipos de refuerzos (fibras) .....	19
<b>Tabla 5</b>	Composición química de la guadua ( <i>Angustifolia kunth</i> ).....	23
<b>Tabla 6</b>	Métodos de extracción de fibra natural (guadua) .....	23
<b>Tabla 7</b>	Proceso de deslignificado. ....	24
<b>Tabla 8</b>	Procesos de conformado de materiales compuestos .....	27
<b>Tabla 9</b>	Probeta Tipo I para materiales poliméricos Norma ASTM D638.....	29
<b>Tabla 10</b>	Espectroscopia infrarroja .....	32
<b>Tabla 11</b>	Datos típicos de un experimento de un solo factor .....	33
<b>Tabla 12</b>	Parámetros iniciales de compresión .....	38
<b>Tabla 13</b>	Nomenclatura para tratamientos a la fibra de guadua y probetas de material compuesto .....	41
<b>Tabla 14</b>	Descripción física de las probetas obtenidas .....	43
<b>Tabla 15</b>	Resumen del Análisis de varianza de un factor .....	48
<b>Tabla 16</b>	Comparación de medias por pares .....	49
<b>Tabla 17</b>	Probetas con HSD .....	50
<b>Tabla 18</b>	Resultados de similitud de compuestos encontrada con FTIR en las probetas .....	55
<b>Tabla 19</b>	Comparación % transmitancia del material compuesto respecto al LDPE .....	57

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Tipos de refuerzo.....	16
<b>Figura 2</b> Compuesto laminar .....	17
<b>Figura 3</b> Representación esquemática de los compuestos reforzados con fibras a) continuas y alineadas, b) discontinuas y alineadas, c) discontinuas y orientadas aleatoriamente.....	18
<b>Figura 4</b> Microestructura de las fibras. a) Fibras de madera y b) Fibras de bambú (S/ tejido longitudinal, St tejido transversal).....	20
<b>Figura 5</b> Fases de maduración de la guadua .....	22
<b>Figura 6</b> Porcentaje lignina, celulosa y hemicelulosa .....	26
<b>Figura 7</b> Diagrama funcionamiento SEM.....	31
<b>Figura 8</b> Diseño de Experimentos .....	34
<b>Figura 9</b> Tamizaje fibra de guadua ( <i>Angustifolia kunth</i> ) .....	36
<b>Figura 10</b> Extrusión fibra de guadua más LDPE.....	37
<b>Figura 11</b> Molde para probetas Tipo I.....	37
<b>Figura 12</b> Prensa hidráulica.....	38
<b>Figura 13</b> Probetas tipo I, matriz polimérica y fibra de guadua.....	38
<b>Figura 14</b> Maquina Universal de Ensayos BESMAK BMT – 50 E (SENA Centro Metalmecánico) .....	39
<b>Figura 15</b> Gráfica comparación de la perdida de humedad de la fibra de guadua.....	42
<b>Figura 16</b> Módulos de elasticidad promedio .....	46
<b>Figura 17</b> Esfuerzo máximo promedio.....	47
<b>Figura 18</b> Diagrama Esfuerzo vs Deformación .....	50
<b>Figura 19</b> Fotografías SEM de las probetas estudiadas .....	51
<b>Figura 20</b> Comparación del módulo de elasticidad, separación en la intercara y elongación.....	54
<b>Figura 21</b> Espectrometría Infrarrojo.....	56

## RESUMEN

El presente proyecto muestra la caracterización mecánica realizada a un material compuesto matriz polímero (Polietileno de Baja densidad - LDPE) reforzado con fibra corta de guadua (*Angustifolia kunth*). Este proyecto se basó en los métodos implementados por Hurtado [1] en la obtención de la fibra de guadua, con el retiro de lignina. Se fabricaron probetas Tipo I según la norma ASTM D 638 y se siguió el protocolo recomendado por la misma norma en la ejecución del ensayo.

En el diseño de experimentos se tuvo en cuenta el LDPE como matriz, los siete tratamientos planteados por Hurtado [1] para la deslignificación de la fibra corta a partir de guadua como refuerzo y tres valores de concentración en peso del refuerzo en la matriz (10%, 20% y 30%) [2]–[6], generando 21 formulaciones; y los resultados se analizaron a partir de un modelo Tukey.

Con el ensayo a tensión se obtuvo que la formulación con mayor resistencia mecánica fue la que contaba con fibra natural sin tratamiento a una concentración del 10%. Adicionalmente, con el análisis SEM se evidenció que la distancia en la intercara fue menor a las otras formulaciones, por lo cual existe una relación directa entre la resistencia mecánica y la separación en la intercara del material compuesto. Finalmente, con el ensayo FTIR se logró evidenciar que la interacción entre la fibra tratada con el Hipoclorito de Sodio 3%, tiene un efecto directo sobre el polímero, generando un aumento en la hemicelulosa, producto de la oxidación generada por la humedad contenida en la fibra.

**Palabras clave:** Material compuesto, moldeo por compresión, SEM, FTIR, Módulo de elasticidad, *Angustifolia kunth*.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en diferentes sectores industriales como son, el metalmecánico, el aeronáutico, el aeroespacial, de la construcción y automotriz, se ha implementado el uso de materiales compuestos en el desarrollo de piezas de ingeniería buscando obtener mejores relaciones entre variables, especialmente peso contra resistencia. Los más estudiados recientemente son las de matriz polímero reforzado con fibras naturales, sintéticas, minerales u orgánicas.

Colombia es productor de *guadua (Angustifolia kunth)*, la cual, se aprovecha en su forma natural para la construcción por su condición sismo-resistente, su resistencia mecánica a tensión, su flexibilidad y facilidad de aprovechamiento. Es considerada una planta semi-dura a dura y tiene una ventaja respecto a otro tipo de plantaciones, que consiste en alcanzar el tiempo productivo en un periodo mucho más corto y al ser una gramínea no es necesario hacer replantaciones [7], [8].

La *guadua* tiene muy buenas propiedades a tensión y compresión, por lo cual, podría ser utilizada como refuerzo en materiales compuestos con matriz polímero (MCMP), reemplazando con buenos resultados a las fibras sintéticas como la poliamida, a las fibras minerales como las de vidrio e incluso a las de carbono.

En este orden de ideas, la Universidad Santo Tomás viene trabajando en el desarrollo de materiales compuestos matriz polímero, aprovechando la fibra de *guadua* como elemento de refuerzo. Para lo cual, en una primera etapa se realizó la “Estandarización del proceso de obtención de fibra de *guadua (Angustifolia kunth)* como materia prima para material compuesto” [1], en la cual, se realizaron seis (6) procesos químicos independientes, buscando la deslignificación de la *guadua*.

Estos estudios buscan encontrar materiales alternativos que pudiesen significar el reemplazo de materiales tradicionales en elementos mecánicos estructurales, como por ejemplo en marcos de bicicletas y piezas para automóviles (aplicaciones ya existentes en vehículos Audi, BMW, Ford, Fiat, entre otros); los cuales, se puede decir ya involucran el uso de fibras naturales [9].

Por lo anterior, el presente proyecto tiene como objetivo general, “caracterizar mecánicamente a tensión un material compuesto de fibra corta de *guadua (Angustifolia kunth)* y resina termoplástica (polietileno de baja densidad)”.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 GENERAL

Caracterizar mecánicamente a tensión un material compuesto de fibra corta de guadua (*Angustifolia kunth*) y resina termoplástica (polietileno de baja densidad)

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Obtener las probetas del material compuesto a partir de los procesos de deslignificado de la fibra de *guadua* (*Angustifolia kunth*) y polietileno de baja densidad.
- Evaluar la propiedad mecánica a tensión del material compuesto obtenido aplicando la norma ASTM D638 y la prueba microscopía electrónica de barrido SEM
- Evaluar por medio de ensayos FTIR si hubo una variación química en el compuesto matriz-fibra a partir de la mezcla de los componentes.

### **3. MARCO TEÓRICO**

A través de la historia, el hombre ha sido inspirado por la naturaleza para satisfacer sus necesidades básicas y mejorar los entornos en los cuales se encuentra. Esto ha servido para desarrollar nuevos conceptos tecnológicos que facilitan las construcciones y mejoran los procesos de fabricación.

Ha sido tan importante el desarrollo tecnológico en la historia del hombre, que se ha clasificado en diferentes épocas, adscritas directa o indirectamente a su habilidad en la obtención y transformación de los recursos que tiene a su disposición. Como por ejemplo la edad de Piedra, Bronce y Hierro. En estas se desarrollaron herramientas para la supervivencia, tanto para la caza, como la guerra (siendo esta última, uno de los escenarios que más han motivado este avance).

Gracias a materiales metálicos como el cobre, el estaño y el bronce, así como del hierro, los aceros y el aluminio; el hombre ha podido fabricar, desde armas hasta vehículos espaciales capaces de resistir las condiciones extremas del espacio. A partir de los árboles, se ha desarrollado la construcción de viviendas y muebles. Y a partir de los minerales se han obtenido materiales semiconductores esenciales en la fabricación de microchips, tecnología electrónica usada para la fabricación de computadores, celulares, entre otros.

Actualmente los procesos de manufactura en la industria se encuentran en constante cambio y tienen una mayor exigencia en el desarrollo de nuevas tecnologías, lo que obliga a un mejor aprovechamiento de los recursos que se tienen disponibles, es por esta razón se retomó el uso de los materiales compuestos, que cuentan con un gran potencial de propiedades, con una larga vida funcional y bajos costos de producción.

#### **3.1 MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas no químicas, insolubles de dos o más materiales diferentes dando como resultado un nuevo material de propiedades específicas y diferentes a los materiales involucrados. Que poseen una intercara discreta y reconocible que los separa llamada matriz o fase continua. La matriz o fase continua es la que soporta la carga y encapsula al material de refuerzo o fase discontinua que en asociación da a lugar un material con mayor resistencia y rigidez, además, brindan una disminución de peso y mayor resistencia a la fatiga, al desgaste, corrosión por mencionar algunos [10], [11].

En el diseño estructural es indudable la necesidad de conocer fehacientemente las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. En el caso particular de los materiales compuestos, dada su naturaleza anisótropa y heterogénea, el número de variables es notablemente superior a los materiales convencionales. Los fabricantes raramente proporcionan el listado completo de variables debido en

algunos casos por las dificultades intrínsecas que entrañan los ensayos experimentales para determinarlas [12].

**Tabla 1** Tipos de materiales compuestos

Tipos	Definición
Material compuesto matriz cerámica	Son materiales que tienen un aumento en las propiedades como la tenacidad a otros materiales cerámicos tradicionales, además, soportan temperaturas altas y con menor peso que las metálicas a la misma temperatura [10], tienen alta resistencia a la oxidación lo que los hace particularmente llamativos [13].
Material compuesto matriz metálica	Son materiales que incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos [10], reforzados con fibras cerámicas o metálicas que obtienen alta resistencia mecánica a la tracción y disminución en el peso, resistencia a la abrasión, conductividad eléctrica, se pueden trabajar en altas condiciones operacionales, por esto son mayormente atractivos para aplicaciones de ingeniería [14], [15]. Las matrices metálicas con mayor preferencia son las más ligeras (aluminio, titanio, magnesio) lo que facilita mayores aplicaciones [16].
Material compuesto matriz polimérica	Son materiales fácilmente moldeables, además de sus altas propiedades mecánicas en relación a su densidad, reducen considerablemente su peso y tienden a ser resistentes a la corrosión, son más económicos de realizar que sus pares metálicos sin embargo no son usados en condiciones donde se requieran altas temperaturas [17]. Los materiales de la matriz polimérica se clasifican en tres tipos, los termoplásticos los cuales una vez polimerizados pueden volver a calentarse y ser reutilizados; los termoestables, que por otro lado son irreversibles por la formación de enlaces entrecruzados muy fuertes lo que confiere gran resistencia térmica, mecánica y especialmente química y los elastómeros que tienen la capacidad de deformarse en gran porcentaje [18].

### 3.2 MATERIALES COMPUESTOS MATRIZ POLIMÉRICA (MCMP)

Las propiedades de ese tipo de materiales se encuentran relacionadas con la unión que exista entre sus constituyentes, con el fin de potencializar dicha unión, se requiere utilizar agentes de acoplamiento o adherencia, para así, modificar la adhesión superficial generando una interfase distinta [19]. Es bien sabido, que los materiales compuestos son aquellos que se forman al mezclar dos o más materiales diferentes sin que ocurra reacción química alguna [20].

**Tabla 2** Constituyentes de los MCMP

Constituyentes	Característica	Ejemplos
Matriz	La función principal de la matriz es definir las propiedades físicas y químicas del material y mantiene en su posición al refuerzo manteniéndolo “embebido” en su interior [14].	Las matrices termoplásticas son del tipo más común que su par termoestable y un representante de bajo costo son el polipropileno y polietilenos [21].
Refuerzo	El refuerzo de un material compuesto puede ser de dos formas, 1) En forma de partículas, las cuales son más efectivas en cuanto menor sea su tamaño y sea más homogénea su distribución en el material compuesto. 2) La otra forma en la que se utiliza es en fibra, ya que son más resistentes, rígidas y de bajo peso [14].	Las fibras mayormente utilizadas son poliméricas o cerámicas como por ejemplo vidrio, aramidas, carbono, oxido de aluminio, carburo de silicio. También se tiene fibras naturales las cuales son obtenidas de plantas, vegetales que tienen beneficios como el costo de manufactura ya que se obtienen como desechos en algunos casos lo que facilita su proceso de obtención [14].
Acople	Debido a que los materiales empleados en los materiales compuestos tienen composiciones y orígenes, por lo cual no son compatibles y la sinergia entre ambos compuestos no se da en su totalidad. Es en estos casos que se utiliza de diferentes métodos para mejorar la unión entre los compuestos (Mecánica, electrostática, química o mediante interdifusión) [22].	El polvo de coco debido a su alto contenido de lignina puede ser usado como agente de acople. También es muy usado en materiales con matriz polimérica y fibras naturales un injerto de anhídrido maleico el cual posee la misma estructura molecular que los PP [22], [23].

La adecuada combinación los constituyentes nombrados en la Tabla 2, genera materiales con mejores propiedades que las partes que lo componen por separado [20].

### 3.3 MATERIAL DE LA MATRIZ

Los termoplásticos son polímeros generalmente lineales, aunque también se pueden encontrar levemente ramificados. Son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos y pueden ser conformados por la acción del calor, por lo cual se habla de que son reciclables. Entre los más usados se encuentran el Polietileno (PE), el Polipropileno (PP), el Poliestireno (PS) y el Polivinilo de cloruro (PVC), los cuales se fabrican en mayor cantidad que otros plásticos [24], [25].

Entre los materiales termoplásticos más utilizados, la familia de los PE se puede clasificar de acuerdo a la densidad que se desliga de la variación de la linealidad de su molécula, en este orden de ideas se puede hablar de los mencionados en la Tabla 3.

**Tabla 3** Materiales termoplásticos

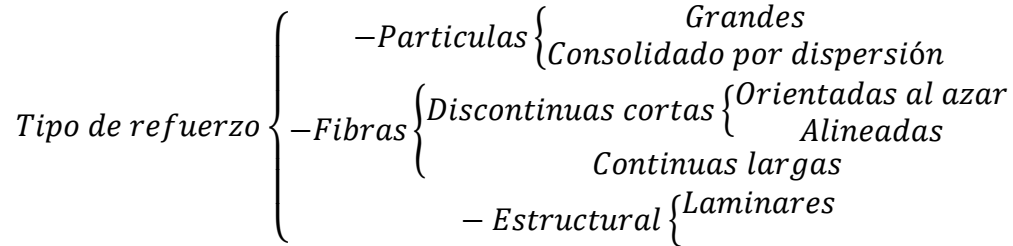
Termoplástico	Características	Aplicaciones
<p>Polietileno de Baja Densidad (LDPE)</p>	<p>Este tipo de termoplástico se genera a partir de la polimerización del etileno de radicales libres, a presión (103 a 345 MPa) y temperaturas elevadas (150 300 °C), además no reacciona a temperatura ambiente, excepto en el caso de algunos agentes oxidantes fuertes y algunos solventes [26].</p>	<p>Bolsas, cortinas, contenedores herméticos domésticos, tuberías para riego, envases de laboratorio.</p>
<p>Polietileno de Alta Densidad (HDPE)</p>	<p>Es un polímero sintético, termoplástico miembro de las poliolefinas, se obtiene por medio de la reacción de polimerización del polietileno elaborado a partir del etano [27]. El proceso de polimerización se lleva a cabo a baja presión con catalizadores en suspensión, obteniendo un polímero cristalino de cadena lineal muy poco ramificada, que produce una estructura compacta con densidad entre 0,941 y 0,965 g/cm<sup>3</sup>. La presión para su elaboración es menor a los 14 MPa y en muchos casos menos de los 7 MPa. Es más duro y opaco, puede soportar temperaturas entre los 110° (de forma continua) y de 120°C (periodos cortos) [26].</p>	<p>Envases, bolsas, contención de determinados productos químicos, tuberías para gas natural, tuberías de agua para el abastecimiento de uso doméstico.</p>
<p>Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE)</p>	<p>Éste puede ser producido como un homopolímero resultando de HDPE, o como un copolímero teniendo como comonomero alquenos como el buteno. Las propiedades físicas del LLDPE dependen de su peso molecular y densidad (0,946 - 0,94 g/cm<sup>3</sup>). Es muy flexible y alargable bajo tensión, pero no es tan fácil de procesar como el LDPE [26].</p>	<p>Al ser un material resistente a muchos solventes muestra gran variedad de usos: Bolsas (para hielo, alimentos congelados, residuos), juguetes, geomembranas, tuberías flexibles.</p>

En general, los materiales termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y tienen un bajo costo. La principal desventaja es que son materiales con temperaturas de fusión relativamente bajas, por lo cual, no pueden aplicarse donde la temperatura es una propiedad funcional [28].

### 3.4 CLASIFICACIÓN DEL REFUERZO

Los materiales de refuerzo pueden ser variados y diferentes, sin embargo, pueden clasificarse según su tamaño y orientación, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1 Tipos de refuerzo



Fuente: [29]

#### 3.4.1 Partículas

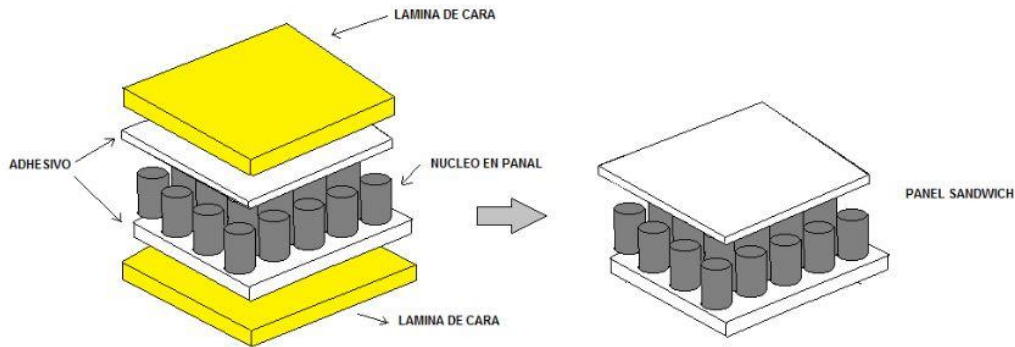
Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en partículas grandes y consolidadas por dispersión. Dentro de las partículas que son consideradas grandes se encuentra el hormigón, el cual tiene cemento que hace de matriz y la arena o grava que es el refuerzo que es la partícula. Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son mucho más pequeñas, los diámetros tienen de 10 a 250nm (nanómetros). Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplica, las partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de la carga y de este modo restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, le resistencia a la tracción y la dureza [29], [30].

#### 3.4.2 Estructural

Se compone de materiales con geometrías básicas, tiene propiedades homogéneas o heterogéneas, según sea la construcción del compuesto. Estos compuestos laminares son los conocidos como tipo sándwich o emparedado, siendo una unión no química de dos placas con resina de poliéster en el centro (Figura 2) [30].

Un ejemplo de laminados estructurales es el triplex usado en las construcciones, con él se puede hacer viviendas y estructuras. Se compone de dos laminas delgadas con astillas de aserrín en el centro para darle mayor rigidez y disminuir su peso, al ser con menor densidad [30].

**Figura 2** Compuesto laminar



Fuente: [31]

### 3.4.3 Fibras

Los compuestos que se refuerzan con fibras son los más importantes, ya que la unión da como resultado una alta resistencia a la tracción y una baja densidad generando un material con excelente resistencia y bajo peso. Estas características se expresan mediante los parámetros resistencia específica y módulo específico [29], [30].

Muchas de las propiedades de los materiales compuestos son fuertemente dependientes de parámetros microestructurales tales como el diámetro, longitud, distribución de longitudes, fracción de volumen y orientación de las fibras [32].

Dentro de las fibras se encuentran las fibras naturales, que se extraen de diferentes partes de las plantas. El término genérico de fibra natural se aplica a un amplio rango de materiales fibro-celulosos, como por ejemplo, las fibras obtenidas a partir del tallo del cáñamo, de las hojas del sisal o de las semillas del algodón. Las plantas están constituidas por fibras, las cuales son responsables de su estructura y rigidez.

#### 3.4.3.1 Longitud de las fibras

Una clasificación de las fibras está dada por su longitud, ya que, a partir de sus dimensiones y orientación se puede calcular su resistencia mecánica y comportamiento [30].

Existe una medida denominada "longitud de fibra crítica" a partir de la cual se aumenta la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta depende del diámetro de la fibra, para la fibra de vidrio y carbón es del orden de 1mm lo que equivale a 20 o 150 veces el diámetro de la fibra. Mientras que las fibras que tienen 15 veces la longitud son consideradas como crítica así como en las fibras continuas [29].

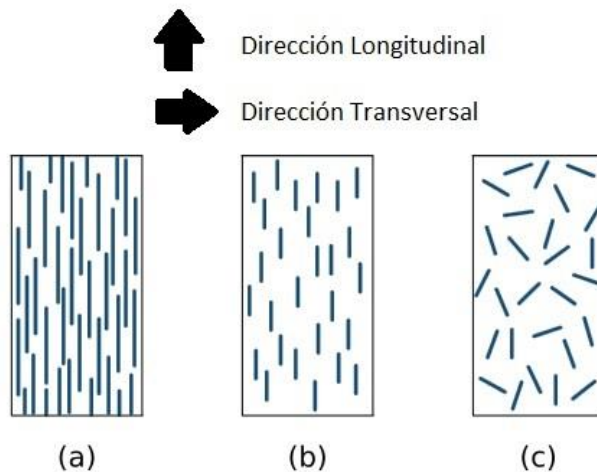
### 3.4.3.2 Orientación de las fibras

La orientación de las fibras es de vital importancia en las propiedades mecánicas del compuesto, pues dependiendo de la dirección de la carga estas trabajan de una mejor forma (paralela al eje de la fibra) y mantendrán una mayor sinergia con la matriz reduciendo los desprendimientos [33].

Las fibras cortas con orientación aleatoria se pueden introducir con facilidad en la matriz, dando un comportamiento cuasi-isotrópico (propiedades homogéneas en el material), aunque por lo general generan materiales compuestos de bajo rendimiento. Ya que el esfuerzo solo proporciona una marcada reagudización y un incremento de la resistencia local, siendo la matriz el constituyente que gobierna las propiedades mecánicas globales del material [12].

Los ordenamientos unidireccionales con fibras continuas producen propiedades anisotrópicas, con excelentes propiedades de resistencia y rigidez paralelas a las fibras (cuando las orientaciones se dan transversales, la resistencia es menor).

**Figura 3** Representación esquemática de los compuestos reforzados con fibras a) continuas y alineadas, b) discontinuas y alineadas, c) discontinuas y orientadas aleatoriamente.



Fuente: [30]

## 3.5 TIPOS DE REFUERZOS

El material de refuerzo se clasifica según su obtención, es decir, se pueden obtener de la naturaleza como orgánicos (fuente animal o vegetal) e inorgánicos (fuente mineral) y sintéticos (obtenidos por principios químicos).

**Tabla 4** Tipos de refuerzos (fibras)

Fibras	Características	Ejemplos
Fibra Natural	Las fibras naturales son aquellas provenientes de la naturaleza, pueden ser de origen animal o vegetal. Las fibras de origen animal muestran una longitud y un diámetro apropiados para su transformación en hilo; las fibras de origen vegetal se encuentran como elementos estructurales en todas las plantas, se componen principalmente de fibrillas celulosa encajadas en una matriz de lignina, estas fibrillas se encuentran alineadas a lo largo de la longitud de la fibra brindando máxima resistencia a la tracción y a la flexión [34].	Origen animal: Hilo (lana, seda) Origen vegetal: Hilaza (yute, lino y cáñamo), fibras de hojas (abacá, fique y piña), fibras de semilla (coco, algodón y kapok), fibras laminares (trigo, maíz y arroz), entre otros.
Fibra Mineral	Este tipo de fibras se caracterizan por poseer alta resistencia y un buen módulo de elasticidad [35]. Fibras tales como las de carbón (usadas en la industria aeronáutica y aeroespacial al ser un material muy liviano) y como las fibras de vidrio usada como refuerzo de matrices poliméricas [35] [36].	Carbón, vidrio.
Fibra Sintética	Las fibras sintéticas son polímeros producidos químicamente, estas fibras abarcan desde nailones (poliamidas), poliésteres, polilefinas, etc [37]. Estas fibras se producen a partir de resinas derivadas del petróleo y en su mayoría son de gran interés en la industria textil[38].	Polipropileno (PP), polietileno (PE), poliéster (PET), poliamida o nylon (PA), teflón (PTFE), poliacrilonitrilo (PAN), fibras de alto módulo (Kevlar y Aramida).

### 3.5.1 Fibras naturales

Son materiales fibrosos extraídos directamente del medio natural, el término se aplica a una amplia gama de materiales fibro-celulosos que se encuentran en las partes de las plantas. Las plantas están constituidas por fibras, éstas son las responsables de su estructura y rigidez. Las fibras son generalmente de forma alargada, presentando una elevada relación longitud-diámetro, sin embargo, ésta forma puede variar de acuerdo al tipo de planta [1].

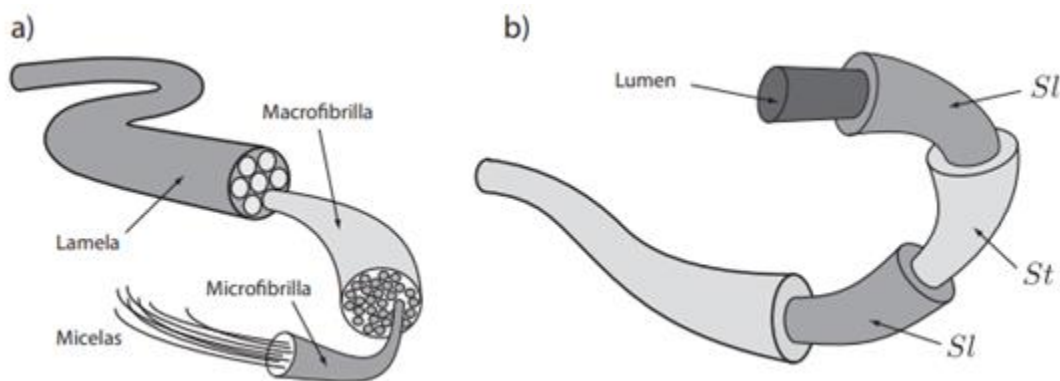
Las fibras naturales son un recurso renovable por excelencia, su consumo es sostenible ya que generan menos CO<sub>2</sub> porque su cosecha y producción necesitan menos demanda de energía en comparación con la fabricación de fibras sintéticas. En su proceso productivo se generan subproductos que bien pueden ser usados en

otros, además, al acabarse su vida útil las fibras naturales son 100% biodegradables [39].

Algunas de las fibras de mayor uso de origen vegetal son el algodón, lino, yute, ramio, cáñamo y sisal; en el grupo de fibras de origen animal se encuentran la lana, la seda y el pelo.

A partir de la *Angustifolia kunth* se puede obtener fibras naturales ya que estas contribuyen con 40% a 50% del volumen total del culmo y con 60% a 70% del peso de la planta. Como están localizadas en los internodos, forman una capa protectora alrededor de los haces vasculares. Cerca a los nodos las fibras son cortas, mientras que hacia la zona central del internodo las fibras son largas (*Figura 4 b*). Además, tienen capas concéntricas de celulosa y hemicelulosa, éstas tienen una orientación distinta del tejido en cada una de ellas [17].

**Figura 4** Microestructura de las fibras. a) Fibras de madera y b) Fibras de bambú (*Sl* tejido longitudinal, *St* tejido transversal).



Fuente: [17]

### 3.5.2 *Guadua (Angustifolia kunth)* como fuente de fibras naturales

La *guadua (Angustifolia kunth)* es una planta leñosa arborescente que pertenece a la familia del bambú. En el mundo existen 1300 especies de bambú leñosos y herbáceos distribuidos en Asia 63%, América 32%, África y Oceanía 5% [40].

La especie de *guadua (Angustifolia kunth)* sobresale dentro del género por sus propiedades físico – mecánicas y por el tamaño de sus tallos que alcanzan hasta 30 m de altura y 25 cm de diámetro [41].

#### 3.5.2.1 Constitución de la *guadua*

- Rizoma: La *guadua* pertenece a las rizomatosas de tipo paquimorfo; el rizoma es la base principal del tallo o culmo y asegura su estabilidad, con nudos y entrenudos bajo la superficie de la tierra de donde se desprenden

las raíces y raicillas. Es comúnmente conocido como el caimán de la Guadua, además de ser el órgano almacenador de nutrientes es el elemento apto para la propagación asexual [40].

- Raíces: Dependiendo del suelo en que se encuentre pueden alcanzar un grosor de 5 mm y profundidades hasta de 1.50 metros parte de ellas se profundizan y otras se extienden de forma horizontal [40].
- Tallo: Es de forma cilíndrica y cónica, con entrenudos huecos denominados tabiques y nudos esparcidos de forma transversal que garantizan mayor rigidez, flexibilidad y resistencia de los tallos. El culmo, tallo o guadua está formado por fibras longitudinales que de acuerdo a su edad (juvenil, hecha, madura) se lignifican, entregándonos una extraordinaria resistencia en la parte maderable y en la cara exterior [40].
- Ramas: A diferencia del tallo son macizas, en algunos casos se atrofian y son reemplazadas por unas espinas de 10 o 15 centímetros, sus ramas son muy especiales, crecen casi solitarias [40].
- Hojas: Son de color verde especial, inconfundible en la distancia y en medio de otras plantaciones, sobresale el color de sus hojas, generalmente las hojas tienen la punta muy similar a una lanza, por lo tanto son hojas lanceoladas y lisas [40].
- Semilla: Se asemeja a un grano de arroz (es una gramínea) de coloración blancuzca muy clara en su interior y con un café muy claro en su exterior, es de aproximadamente 5 y 8 milímetros de larga y 3 milímetros de espesor [40].
- Flor: La flor es muy diminuta se asemeja a una orquídea, de color violáceo o rosáceo, se dice que su color depende de la calidad del suelo donde esta plantada, es una flor de vida muy corta, dura aproximadamente 48 horas, está ubicada en las partes terminales de las ramas superiores y en el primer tercio de la espiga [40].

#### 3.5.2.2 Estado de maduración de la guadua

La guadua obtiene su altura definitiva en los primeros seis meses de vida y su madurez entre los 3 y 5 años. Carece de tejido cambium, de allí que no tenga incremento en diámetro con el paso del tiempo [41]. Desde el momento que emerge el renuevo hasta que se muere transcurren cuatro fases:

- a) Renuevo en donde el tallo está cubierto totalmente por las hojas cualinares.
- b) Joven o biche se inicia con el desarrollo de las ramas laterales que van a sostener las hojas de follaje.
- c) Madura o hecha en donde el tallo es de color verde claro opaco, en esta fase la guadua es apta para ser aprovechada y con edad entre 4 hasta 6 años.

d) Seca cuando el tallo se torna amarillo después de los siete años.

**Figura 5** Fases de maduración de la guadua



a) Nuevo o Renuevo



b) Joven o Biche



c) Madura



d) Seca

Fuente: [40]

### 3.5.2.3 Composición química de la guadua

Los componentes más importantes que intervienen en el comportamiento mecánico y estructural de las plantas son principalmente la celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es la que proporciona la resistencia mecánica a la planta, la hemicelulosa es la que rodea a la celulosa cristalizándose lo que le da rigidez y la lignina proporciona propiedades de elasticidad y se encarga de unir las fibras entre sí [42].

La composición química de la fibra fue realizada por Cuellar y Muñoz [6] en la Universidad nacional de Manizales a una guadua (*Angustifolia kunth*) de entre 3 y 5 años de maduración, en la cual aplicaron las Normas Técnicas Colombianas obteniendo los datos mostrados en la Tabla 5.

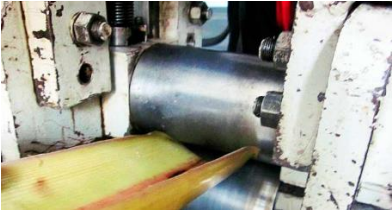
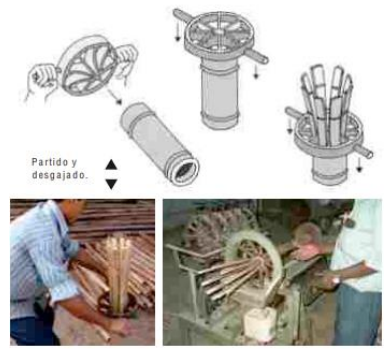

**Tabla 5** Composición química de la guadua (*Angustifolia kunth*)

COMPONENTES	% EN BASE HÚMEDA
Humedad (NTC 727)	8.97
Celulosa (NTC 697)	47.06
Lignina (NTC 998)	21.88
Cenizas (NTC 841)	3.80

Fuente: [6]

La extracción de la fibra de guadua (*Angustifolia kunth*) se logra a través de diferentes métodos, ya sean manuales o mecánicos. Algunos de ellos se encuentran en la Tabla 6.

**Tabla 6** Métodos de extracción de fibra natural (guadua)

Nombre	Característica	Imagen
Compresión por medio de rodillos	Este método se realiza mediante la compresión del material (guadua) a través de dos rodillos y mecánicamente se le va retirando la humedad hasta llegar al punto que se fracciona la fibra [43].	 [43]
Esterilla	Es un método empleado para el corte de la guadua para construcción mediante cuchillas en una herramienta circular [44]. Es la pieza de mayor valor agregado, la cual se pica y se transforma en láminas de hasta 60cm [41].	 [44]
Cepillado	Consiste en realizar un corte superficial a la guadua e ir retirando la viruta uniforme del mismo, mediante el uso de un cepillo de carpintería [45].	 [41]

### 3.5.3 Procesos de deslignificado

Siguiendo la metodología empleada en un proceso estándar, a partir de la obtención de la fibra natural (como es la guadua), se busca la remoción de la lignina, celulosa y hemicelulosa que tienen las plantas las cuales actúan como adhesivo natural, de manera que se propenda por la obtención de las fibrillas de la mejor forma posible [1].

**Tabla 7** Proceso de deslignificado.

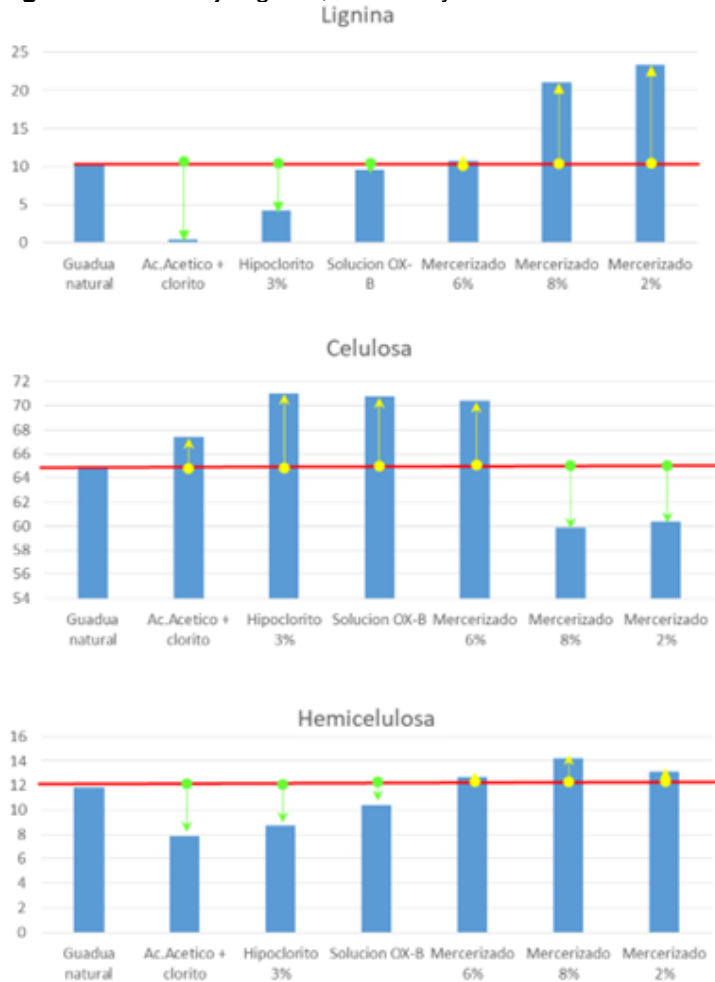
Tratamiento	Procedimiento	Antecedente
Ácido acético con clorito de sodio	Se limpia con agua destilada para liberar de residuos de otros materiales la fibra. A continuación, se seca a 60 °C durante 6 horas hasta obtener peso constante. 13 gramos de fibra seca son sumergidos en 500 mL de una solución acuosa compuesta por 250 mL de clorito de sodio al 2% y 250 mL de ácido acético 3M. La solución junto con la fibra es mantenida en agitación a una temperatura de 47 °C durante 2 horas. Luego de este tiempo se filtra a través de papel de filtro y se lava abundantemente con agua destilada hasta obtener pH neutro [46].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización del proceso de obtención de fibra angustifolia kunth como materia prima para material compuesto [1].</li> <li>• Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización [46].</li> </ul>
Hipoclorito de sodio 3%	100 g de fibra limpia y seca fueron tratadas con 100 mL de una solución acuosa al 3% P/V de hipoclorito de sodio, durante 20 minutos con agitación constante. A continuación, la fibra blanqueada fue filtrada usando un filtro de tela y se lavó con abundantemente agua destilada hasta obtener pH neutro. [46].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización del proceso de obtención de fibra angustifolia kunth como materia prima para material compuesto [1].</li> <li>• Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización [46].</li> </ul>

Solución OX-B (Peróxido de hidrogeno con hipoclorito de sodio)	50 g de fibra limpia y seca fueron sumergidos en 2000 ml de una solución oxidante constituida por 1000 ml de hipoclorito de sodio 0,5% P/V y 1000 ml de 0,34% V/V de peróxido de hidrógeno. La fibra en la solución se mantuvo en agitación a temperatura ambiente durante dos horas, luego se filtró y se lavó con abundante agua destilada hasta pH neutro. A continuación la fibra tratada por la solución oxidante se sumergió en una solución de NaOH al 0,6% y manteniendo en agitación durante una hora, tiempo después del cual se filtró y se llevó a un pH neutro y se secó hasta peso constante [46].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización del proceso de obtención de fibra angustifolia kunth como materia prima para material compuesto [1].</li> <li>• Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización [46].</li> </ul>
Mercerizado 2%	Consiste esencialmente en sumergir la fibra en una solución de hidróxido de sodio por un determinado período de tiempo, para luego neutralizarla a través de una solución ácida suave. Diversas condiciones de trabajo han sido analizadas, pero en muchos de estos casos se emplean elevadas concentraciones en la solución de hidróxido de sodio, e incluso durante períodos de exposición largos, sin considerar los posteriores procesos de limpieza o purificación requeridos para el apropiado vertimiento de las soluciones una vez ha concluido el proceso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización del proceso de obtención de fibra de guadua (<i>Angustifolia kunth</i>) como materia prima para material compuesto [1].</li> </ul>
Mercerizado 6%		
Mercerizado 8%		

El origen y tramos de guadua (*Angustifolia kunth*) empleados en el desarrollo de la presente investigación para la caracterización de la fibra de guadua como potencial refuerzo en materiales compuestos fue la misma utilizada por Hurtado [1].

En la Figura 6 se encuentran los resultados obtenidos por Hurtado en el laboratorio de la Universidad Nacional de Bogotá empleando los 6 tratamientos químicos (mencionados en la Tabla 7) para retirar la lignina.

**Figura 6** Porcentaje lignina, celulosa y hemicelulosa



Fuente: [1]


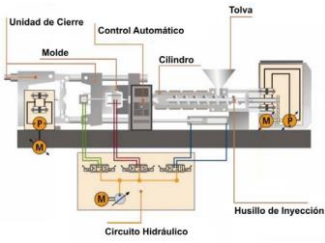
Sobresalen los tratamientos de Ácido acético, Hipoclorito de Sodio 3% y Solución OX-B para retirar la lignina, sin embargo, si bien se busca tener una mejor adhesión entre la fibra y la resina, no se garantiza que pueda haber una mejor resistencia mecánica, pues la fibra puede sufrir deterioro por el ataque químico.

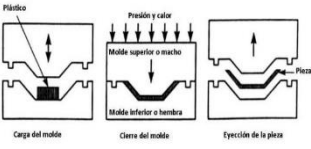
### 3.6 PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIAL COMPUESTO

El plástico se procesa de formas distintas, según sea termoplástico o termoestable. Los termoplásticos, formados por polímeros lineales o ramificados, pueden fundirse. Se ablandan cuando se calientan y se endurecen al enfriarse. Lo que no ocurre con los plásticos termoestables que están entrecruzados. No obstante, la mayoría de los termoestables endurecen más rápido cuando se calientan; el curado final los vuelve rígidos al final de darle el forma al plástico [47].

Las técnicas empleadas para conseguir la forma final y el acabado de los plásticos dependen de cuatro factores: naturaleza del polímero, tiempo, temperatura y forma. La naturaleza de muchos de estos procesos es cíclica, pudiéndose clasificar como continuos o semicontinuos [47].

**Tabla 8** Procesos de conformado de materiales compuestos

Proceso	Descripción	Imagen
Extrusión	<p>La extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación de plásticos y se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras, las más comunes son las de monohusillo. En el proceso de extrusión, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido [24], [48]. El método monohusillo consiste en un tornillo que gira en el interior de un cilindro caliente, donde los pellets se alimentan por medio de una tolva situada en uno de los extremos y se desliza a lo largo del cilindro por acción de giro del tornillo. Los pellets se van fundiendo a medida que se desplaza a lo largo del tornillo por contacto con las paredes calientes del cilindro y por acción del calor generado por fricción en el fundido viscoso, finalmente, el tornillo presiona al polímero fundido forzándolo a atravesar la boquilla que va a determinar su forma final [48].</p> <p><b>Variables:</b> Tiempo, temperatura y velocidad de avance.</p>	
Inyección	<p>El moldeo por inyección es, quizás, el método de moldeo más característico de la industria de plásticos. Consiste básicamente en fundir un material plástico en condiciones adecuadas e introducirlo a presión en las cavidades de un molde en el que se enfría hasta una temperatura apta para que las piezas puedan ser extraídas sin deformarse. El proceso, en lo que a moldeo se refiere, puede dividirse en dos fases. En la primera tiene lugar la fusión del material, y, en la segunda, la inyección del mismo en el molde [24].</p> <p><b>Variables:</b> Tiempo, presión, temperatura y velocidad de avance.</p>	 <p>[49]</p>

Compresión	<p>El moldeo por compresión es un método en el que el material generalmente es precalentado, colocado en una cavidad de molde abierto; posteriormente el molde se cierra, para aplicar calor y presión forzando al material a entrar en contacto con todas las áreas del molde, mientras que el calor y la presión se mantiene hasta que el material de moldeo se ha curado. El proceso se emplea en resinas termoestables en un estado parcialmente curado, ya sea en forma de pellets, masilla o preformas[47]. Este es uno de los métodos de más bajo costo, adicionalmente de obtener menor desperdicio de material. El molde es calentado eléctricamente y la temperatura deseada es regulada mediante un termostato o un potenciómetro [50]. Sin embargo, el moldeo por compresión a menudo proporciona productos de pobre consistencia y dificultad en el acabado, siendo poco adecuado para algunos tipos de piezas [47].</p> <p><b>Variables:</b> Tiempo, presión y temperatura.</p>	 <p style="text-align: center;">[47]</p>
------------	---	---

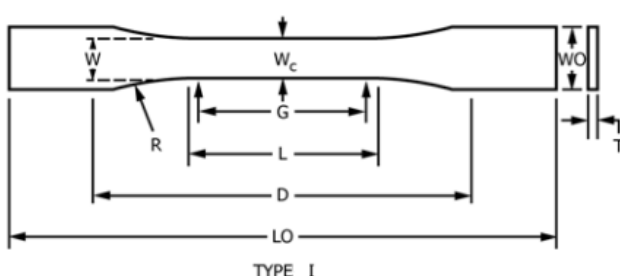
### 3.7 PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN

Es la prueba más común para determinar las propiedades de los materiales, requiere de la preparación de un espécimen según las especificaciones correspondientes que lo reglamenta, como lo es la norma ASTM D638 “Test Method for Tensile Properties of Plastics”[51] y la norma ASTM D3039 “Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” [52] y consiste en la aplicación de una fuerza unidireccional lenta y constante mediante un cabezal móvil, alargando la muestra hasta que se rompe. Durante la prueba se traza una gráfica que muestra la relación entre la fuerza aplicada y la deformación [15], [30].

Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos no reforzados y reforzados en forma de probetas estándar con forma de mancuerna (Tabla 9) [51].

Este método de prueba está diseñado para producir datos de propiedades de tracción para el control y especificación de materiales plásticos. Estos datos también son útiles para la caracterización cualitativa en la investigación y el desarrollo [51]. Se ha encontrado que los datos de prueba obtenidos por este método son útiles en el diseño de ingeniería. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las probetas a comparar deben estar sometidas en igualdad de condiciones geométricas y deben usarse pruebas adicionales especiales donde se necesite antes de considerar estos datos para el diseño de ingeniería [51].

**Tabla 9** Probeta Tipo I para materiales poliméricos Norma ASTM D638

 <b>D638 - 14</b> TYPE I	
Descripción	Dimensiones [mm]
W - Ancho en la sección estrecha	13
L - Longitud de la sección estrecha	57
WO - Ancho total	19
LO - Longitud total	165
G - Longitud de calibre	50
D - Distancia entre agarres	115
R - Radio de filete	76

Fuente: [51]

Se sabe que las propiedades de tracción varían con la preparación de la muestra, la velocidad y el entorno de la prueba. En consecuencia, donde se desean resultados comparativos precisos, estos factores deben controlarse cuidadosamente [51].

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E), es la pendiente de la curva esfuerzo – deformación en su región elástica y esta relación es la ley de Hooke. El módulo de elasticidad está dado por la ecuación 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Donde, E es el módulo de elasticidad,  $\sigma$  es el esfuerzo y  $\varepsilon$  la deformación unitaria.

El esfuerzo  $\sigma$  esta dado por la relación que existe entre la fuerza y el área transversal a la fuerza aplicada, como se indica en la ecuación 2.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde, F es la fuerza y A el área transversal a la fuerza aplicada.

La deformación unitaria  $\varepsilon$  esta dada por la diferencia de la longitud del material y la longitud inicial, como se indica en la ecuación 3.

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L} \quad (3)$$

Donde,  $L_0$  es la longitud del material en un momento determinado y L la longitud inicial del mismo.

### 3.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

El ojo humano puede distinguir dos puntos separados 0,1mm, si se encuentran más cerca el ojo solo vería una única imagen borrosa. Los microscopios ópticos pueden ser utilizados para magnificar esta distancia y permitir distinguir detalles mucho menores a 0,1 mm [53].

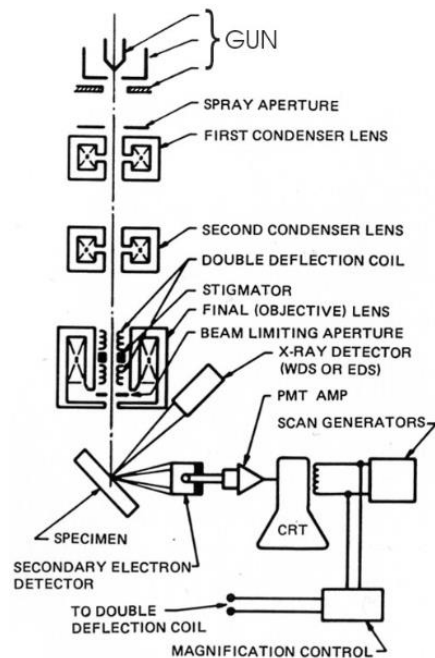
El límite de los microscopios ópticos está dado por la naturaleza ondulatoria de la luz visible, debido a que la física nos dice que ningún instrumento puede resolver detalles más pequeños que la longitud de onda de la radiación con la que se observa [53].

La Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) utiliza haces de electrones acelerados en vacío, que se comportan como una onda similar a la luz visible caracterizada por una longitud de onda 100.000 veces más pequeña [53].

Los componentes esenciales de todos los equipos SEM incluyen lo siguiente:

- Fuente de electrones.
- Lentes de electrones.
- Etapa de muestra.
- Detectores para todas las señales de interés.
- Dispositivos de visualización (salida de datos).
- Requisitos de infraestructura: Fuente de alimentación, Sistema de vacío, Sistema de refrigeración, Piso sin vibraciones y recinto libre de campos magnéticos y eléctricos [54].

**Figura 7** Diagrama funcionamiento SEM



Fuente: [54]

El SEM se usa habitualmente para generar imágenes de alta resolución de formas de objetos y para mostrar variaciones espaciales en las composiciones:

- Adquisición de mapas elementales o análisis químicos puntuales.
- Mapas de composición basados en diferencias de elementos.
- Se pueden utilizar para examinar la orientación microfabricada y cristalográfica en muchos materiales.
- Se utiliza para la discriminación rápida de fases en muestras multifase [54].

### 3.9 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (FTIR)

Las pruebas de infrarrojo o termografía infrarroja, se utilizan para medir o mapear las temperaturas de la superficie en función de la radiación infrarroja emitida por un objeto a medida que el calor fluye a través de ese objeto. La mayoría de la radiación infrarroja es más larga en longitud de onda que la luz visible, pero puede detectarse utilizando dispositivos de imagen térmica, comúnmente llamados “cámaras infrarrojas” [55].

La espectroscopia FTIR ofrece una amplia gama de oportunidades analíticas en laboratorios académicos, analíticos y forenses. Profundamente arraigado en todo, desde la simple identificación de compuestos hasta el proceso y monitoreo regulatorio, FTIR cubre una amplia gama de aplicaciones químicas especialmente para polímeros y compuestos orgánicos [55].

El FTIR usa interferometría para registrar información sobre un material colocado en el haz IR. La transformada de Fourier da como resultado espectros que los analistas pueden usar para identificar o cuantificar el material [55].

- Un espectro FTIR surge de los interferogramas que se “decodifican” en espectros reconocibles.
- Los patrones en los espectros ayudan a identificar la muestra, ya que las moléculas exhiben huellas dactilares IR específicas [55].

La espectroscopia infrarroja es una técnica apropiada para establecer la composición química de las fibras, así como para evaluar los cambios que estas experimentan por efecto de los tratamientos superficiales implementados [56].

Los enlaces distintivos del LDPE a partir de los ensayos de infrarrojo que se pueden encontrar en la literatura son picos entre 2870 – 2946  $\text{cm}^{-1}$ , los cuales corresponden a dos absorciones por el estiramiento del enlace C-H, 1230  $\text{cm}^{-1}$  es asignada a vibraciones de estiramientos del enlace C-O de grupos esterres o éteres y 720  $\text{cm}^{-1}$  asignado a CH<sub>2</sub> de grupos metílicos [57].

**Tabla 10** Espectroscopia infrarroja

Posición $\text{cm}^{-1}$	Enlace	Descripción
3200-3400	N-H	Polimérico, aquí aparecen las aminas y una pequeña señal de carbonilo. En muestras húmedas aparece la señal de estiramiento H-O-H en la flexión 1650.
2800-3000	C-H	Señal que puede estar muy cerca del grupo de los metilos y metilenos.
2200-2400	C≡N	Del grupo de los nitrilos.
1500-1700	H-O-H	Señal asociada a presencia de agua (Pico característico del agua).
1200-1300	C-H	Intensidad débil sin uso práctico.
1100-1200	C-O	Estas señales son complementarias y caen en la misma región.
1000-1100	C-N	Señales pequeñas en alifáticos y más intensas y finas en aromáticos.
0-500	CH <sub>2</sub>	Metileno.

Fuente: [46], [47]

### 3.10 ANÁLISIS DE DATOS POR MEDIO DEL MÉTODO DE TUKEY

Suponga que se tienen X tratamientos o niveles diferentes de un solo factor que quieren compararse. La respuesta observada de cada uno de los X tratamientos es una variable aleatoria. Los datos aparecen como en la Tabla 11 [60].

**Tabla 11** Datos típicos de un experimento de un solo factor

Tratamiento (nivel)	Observaciones				Totales	Promedios
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_1$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_2$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
a	$y_{a1}$	$y_{a2}$	...	$y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_a$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Fuente: [60]

### 3.10.1 Prueba de Tukey

Suponga que, después de un análisis de varianza en el que se ha rechazado la hipótesis nula de la igualdad de las medias de los tratamientos, quieren probarse todas las comparaciones de las medias por pares [60].

Jhon W. Tukey propuso un procedimiento para probar la hipótesis para las que el nivel de significancia global es exactamente  $\alpha$  cuando los tamaños de las muestras son iguales [60].

La prueba de Tukey declara que dos medias son significativamente diferentes si el absoluto de sus diferencias muestrales excede:

$$HSD = q_{\alpha(V_1, V_2)} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (4)$$

Donde, HSD es diferencia honestamente significativa por sus siglas en inglés, MSE es el cuadrado medio del error experimental, n el tamaño de la muestra y  $q_{\alpha(V_1, V_2)}$  es la amplitud total estudentizada que se encuentra en las tablas de Tukey y Duncan donde  $V_1$  es el número de tratamientos,  $V_2$  son los grados de libertad y  $\alpha$  es nivel de significancia.

$$MS_E = \frac{SC}{GL} \quad (5)$$

Donde, SC es la suma de cuadrados dentro de los grupos y GL los grados de libertad dentro de los grupos.

Por lo tanto, cualquier par de promedios de los tratamientos que la diferencia absoluta sea superior al HSD, implicaría que el par correspondiente son significativamente diferentes [60].

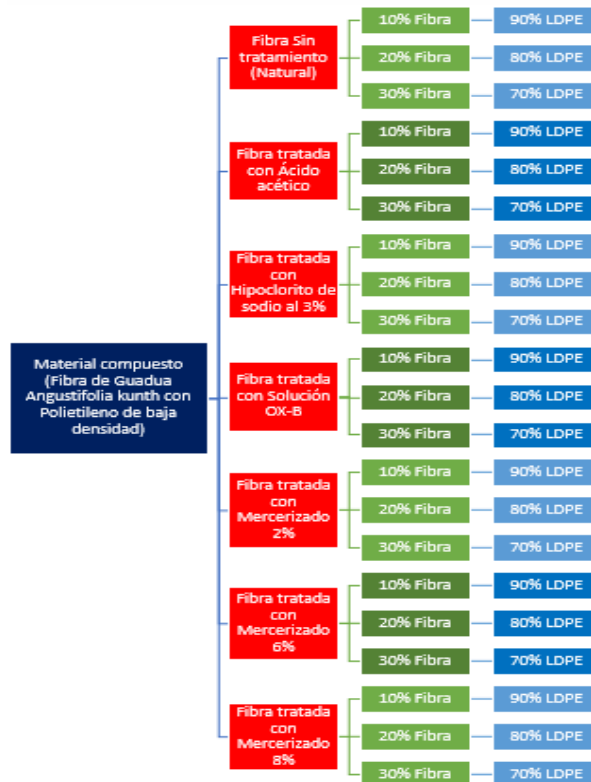
## 4. METODOLOGÍA, MÉTODOS Y EQUIPOS

Para desarrollar el objetivo del presente proyecto de investigación, se debe seguir la metodología para obtención de fibra con los tratamientos planteados en “Estandarización del proceso de obtención de fibra de guadua (*Angustifolia kunth*) como materia prima para material compuesto” [1] para la fabricación de las probetas del polímero y la fibra en mención.

### 4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para la elaboración de las probetas del material compuesto de fibra de guadua con los tratamientos de deslignificado, se realizaron como se indica en la Figura 8, estos porcentajes se hicieron con base a otras investigaciones en las que utilizaron concentraciones similares [6], [33], [61]. Para obtener mejores resultados del ensayo a tensión del compuesto, la norma ASTM D 638 sugiere realizar 5 ensayos por cada una de las concentraciones, por lo cual es necesario la fabricación de 105 probetas.

Figura 8 Diseño de Experimentos



Fuente: Autor

## 4.2 SELECCIÓN DE LA FIBRA

Una vez obtenidas las tiras de fibras de guadua (*Angustifolia kunth*) mediante cepillado mencionado en la Tabla 6, se realizan los seis tratamientos que se plantean en la Tabla 7 para la deslignificación, para lo cual se necesitaron los siguientes equipos:

- Balanza digital.
- Beaker.
- Agitador de vidrio.
- Plancha de calentamiento.
- Termómetro de mercurio.
- Cepillo de Madera.
- Tamiz.
- Molino para cortar la fibra.
- Horno.

### 4.2.1 Determinación del contenido de humedad de la fibra

Esta prueba se realizó con la finalidad de identificar los cambios de retención de agua en el interior de la fibra una vez aplicados los tratamientos.

La medición del contenido de humedad, se hizo utilizando el método de la diferencia de pesos como indica la norma ASTM D4442 "Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials" [62]. Se tomó la muestra después de realizar cada tratamiento, estos fueron lavados con agua destilada al finalizar y posteriormente pesados individualmente en una balanza electrónica Sartorius, con una sensibilidad de medida de 0,01g, luego fueron introducidos en un horno Memmert 854 Schwabach durante 12 horas a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y fueron pesados nuevamente.

$$\%_{0H} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \quad (6)$$

Donde,  $\%_{0H}$  es el contenido de humedad,  $P_1$  es el peso después de aplicársele el tratamiento y  $P_2$  es el peso después de realizársele el proceso de sacado en horno a las condiciones indicadas anteriormente.

### 4.2.2 Selección del tamaño de la fibra

Las fibras obtenidas para la utilización del material compuesto fueron pasadas por tamices (Figura 9) con malla N°35 (0.5mm) y quedaron en otro con malla N°45 (0,355mm) que según la norma ASTM E 11-95 se obtienen fibras con un diámetro promedio 0.2mm y longitud de entre 4 y 5mm. Estas características de la fibra corta han sido usadas en otras investigaciones similares [42].

**Figura 9** Tamizaje fibra de guadua (*Angustifolia kunth*)



Fuente: Autor

### **4.3 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS**

La fabricación de las probetas se lleva a cabo en diferentes fases, la primera de ellas es la extrusión del polietileno de baja densidad LDPE y la fibra tratada, la segunda fase consiste en pelletizar el cordón de la extrusión para mediante moldeo por compresión con el molde para probetas ASTM D 638.

Materiales y equipos requeridos:

- Polietileno de baja densidad (LDPE).
- Fibra natural cortas.
- Extrusora.
- Molino.
- Molde con cavidades ASTM D 638.
- Prensa hidráulica con resistencias eléctricas.

#### **4.3.1 Extrusión**

El proceso de extrusión fue llevado a cabo en una extrusora de tornillo simple con 6 resistencias distribuidas en 2 zonas de temperatura. Las condiciones empleadas fueron: velocidad de rotación del tornillo de extrusión 30rpm, las temperaturas 175°C y 190°C respectivamente, diámetro del dado de salida 3mm. Se vertió en la tolva una mezcla de ExxonMobil LDPE 105 BR y fibra de guadua triturada, en los porcentajes planteados.

**Figura 10** Extrusión fibra de guadua más LDPE



Fuente: Autor

#### **4.3.2 Moldeo por compresión**

Para el proceso de moldeo por compresión se utilizó un molde para cinco cavidades (Figura 11)

**Figura 11** Molde para probetas Tipo I



Fuente: Autor

Las cavidades en el molde que se ve en la Figura 11 son para probetas Tipo I según la norma ASTM D 638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” [51] el cual fue montado en una prensa hidráulica con resistencias para calentar las placas de prensado y molde por conducción (Figura 12).

**Figura 12** Prensa hidráulica



Fuente: Autor

El molde fue calentado a 185°C y se llevó a una presión de 3000PSI durante un tiempo de prensado de 3 minutos y un tiempo de enfriamiento de 15 minutos, como se indica en la Tabla 12 el proceso de vertimiento se realizó en cantidades de 10%, 20% y 30% de material fibroso previamente pelletizado y el restante de LDPE en forma de pellets.

**Tabla 12** Parámetros iniciales de compresión

ETAPAS	TEMPERATURA [°C]	TIEMPO [min]	PRESIÓN [PSI]
PRECALENTADO	185 ± 5	20	0
PRENSADO	185 ± 5	3	3000
ENFRIAMIENTO	25	15	0

Fuente: Autor

Se obtienen 105 probetas de matriz polimérica y fibra de guadua correspondientes a 7 tratamientos realizados a la fibra y 3 concentraciones de fibra en las probetas Figura 13.

**Figura 13** Probetas tipo I, matriz polimérica y fibra de guadua



Fuente: Autor

#### 4.4 ENSAYO A TENSIÓN DE LAS PROBETAS LDPE CON FIBRAS DE GUADUA TRATADAS

Se realizaron ensayos de tensión al material compuesto LDPE con fibras de guadua en el Centro de Materiales y Ensayos SENA, Centro Metalmecánico Regional Distrito Capital; mediante el uso de la máquina universal de ensayos BESMAK BMT – 50 E.

La velocidad en que se realizó el ensayo fue de 5mm/min siguiendo la norma ASTM D638.

**Figura 14** Máquina Universal de Ensayos BESMAK BMT – 50 E (SENA Centro Metalmecánico)



Fuente: Autor

#### 4.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Se realizaron ensayos Scanning Electron Microscope (SEM) transversales a la zona de ruptura de las probetas para medir la distancia en la intercara del material compuesto y evidenciar su relación con el módulo de elasticidad; dicho ensayo se realizó en el Centro de Materiales y Ensayos SENA, Centro Metalmecánico Regional Distrito Capital, utilizando el equipo Phenom XL.

Condiciones del ensayo: La preparación de las muestras se realizan según el procedimiento P-031 del SENA CM con las siguientes características:

- Temperatura: 19°C.
- Aumentos: 2000X.
- Baño en oro: No.

#### **4.6 ESPECTROMETRÍA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)**

Se realizaron ensayos de espectrometría infrarroja para visualizar si la fibra con tratamientos afecta a la estructura química del polímero, dicho ensayo se realizó en el Centro de Materiales y Ensayos SENA, Centro Metalmecánico Regional Distrito Capital, utilizando el equipo SHIMADZU IRTracer – 100.

Condiciones del ensayo: La preparación de las muestras se realizan según el procedimiento P-036 del SENA CM con las siguientes características:

- Temperatura: 19°C
- N° Barridos: 72
- Rango del espectro: 0 - 4000cm<sup>-1</sup>

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se muestran los resultados y análisis a partir de las formulaciones planteadas (material compuesto obtenido con fibras de guadua previamente tratadas y polietileno de baja densidad). Las pruebas de laboratorio empleadas fueron: ensayos de tensión, microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

En la Tabla 13, se muestra la nomenclatura asignada para los tratamientos usados en las fibras y la denominación para cada una de las probetas, empleadas en el presente proyecto.

**Tabla 13** Nomenclatura para tratamientos a la fibra de guadua y probetas de material compuesto

NOMENCLATURA DEL TRATAMIENTO	TRATAMIENTO A LA FIBRA DE GUADUA	IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS
T1	SIN TRATAMIENTO	P1,P2,P3,P4,P5
T2	ÁCIDO ACÉTICO	
T3	HIPOCLORITO DE SODIO AL 3%	
T4	SOLUCIÓN OX-B	
T5	MERCERIZADO 2% (SODA CAUSTICA 2%)	
T6	MERCERIZADO 6% (SODA CAUSTICA 6%)	
T7	MERCERIZADO 8% (SODA CAUSTICA 8%)	

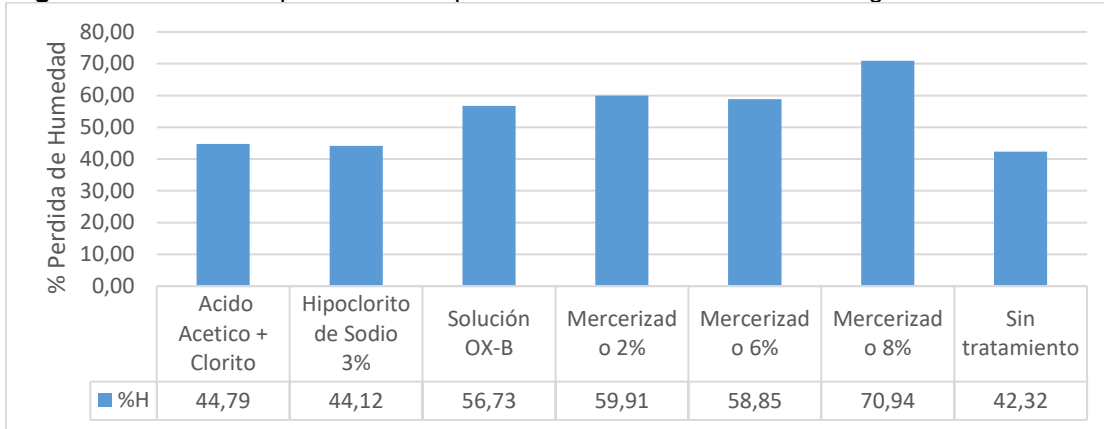
Fuente: Autor

### 5.1 CONTENIDO DE HUMEDAD FIBRA

Siguiendo la metodología, lo primero que se analizó fue el porcentaje de humedad presente en la fibra de guadua, como se muestra a continuación

Se procedió al cálculo de humedad contenida en las fibras, siguiendo la ecuación 4 según norma ASTM D4442, para diferencia de pesos obteniendo lo expuesto en la Figura 15.

**Figura 15** Gráfica comparación de la pérdida de humedad de la fibra de guadua



Fuente: Autor

Una vez obtenidas las muestras de fibra de guadua con los respectivos tratamientos, se procedió a colocarlos durante 12 horas en un horno a una temperatura de 105°C. A partir de la diferencia de peso, antes y después del secado, se determinó el porcentaje de pérdida de peso de las muestras, con lo cual, se evidencia lo siguiente:

1ro. Que la muestra que tuvo mayor porcentaje de pérdida de peso fue el mercerizado 8%, con un 70,94%.

2do. Que tratamientos como el mercerizado 2%, mercerizado 6% y Solución OX-B, tienen un porcentaje de pérdida de peso superior al 50% y muy cercano entre ellos.

3ro. Que la fibra sin ningún tratamiento tiene el porcentaje de pérdida de humedad más bajo con un 42,32%.

La humedad es un factor nocivo al momento de fabricar materiales compuestos matriz polimérica, en especial cuando la resina es termoplástica. Lo anterior, debido a que cuando se procesan este tipo de materiales hay una aportación de temperatura, que en el caso del polietileno de baja densidad es de 185 °C, la cual está por arriba de la temperatura de ebullición del agua y que genera burbujas al interior del polímero y en caso de procesos como el de inyección y compresión, estas burbujas se ven sometidas a altas presiones, que llevan al disociar la molécula de agua y por ende induce la degradación química del polímero.

## 5.2 INSPECCIÓN VISUAL PROBETAS MATERIAL COMPUESTO



Posterior al proceso de extrusión, en el cual se mezclaron el polietileno de baja densidad (LDPE) y las fibras de guadua debidamente tratadas, se obtuvieron las probetas para el ensayo de tensión Tipo I de acuerdo a la Norma ASTM D638, por medio del proceso de compresión.

Una vez obtenidas las probetas, se procedió a hacer una descripción física de las mismas, como se observa en la Tabla 14, se muestran dos imágenes de cada probeta.



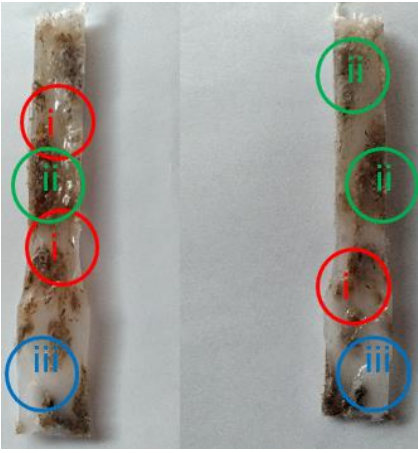
**Tabla 14** Descripción física de las probetas obtenidas

PROBETA	FOTOS	DESCRIPCIÓN
FIBRA SIN TRATAMIENTO	<p>A</p> <p>B</p>	<p>En la probeta con fibra sin tratamiento se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Zonas en las cuales no hay relleno completo.</li> <li>ii. Hay una concentración de la fibra en la zona central de la probeta.</li> <li>iii. No hay presencia de fibra en estos puntos.</li> </ul>
ÁCIDO ACÉTICO	<p>C</p> <p>D</p>	<p>En la probeta con ácido acético se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i. La fibra se observa de un color más oscuro, el cual obtuvo después del proceso de extrusión, sin que sea consecuencia de quemadura de la misma.</li> <li>ii. Se observan burbujas en el interior de la probeta en ambas imágenes (C y D).</li> <li>iii. Hay zonas que no están completamente rellenas.</li> </ul>

**Tabla 14** (Cont.)

<p>HIPOCLORITO DE SODIO AL 3%</p>	 <p>E F</p>	<p>En la probeta con Hipoclorito de sodio 3% se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>i. Hay zonas que no están completamente rellenas por el polímero.</li><li>ii. Se observan burbujas en el interior de la probeta en ambas imágenes.</li><li>iii. La fibra tiene un color café oscuro.</li></ul>
<p>SOLUCIÓN OX-B</p>	 <p>G H</p>	<p>En la probeta con Solución OX-B se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>i. Hay zonas en las cuales quedan socavados.</li><li>ii. Se observan burbujas en el interior de la probeta en ambas imágenes.</li><li>iii. La fibra tiene un color café claro con relleno de la misma a lo largo de la probeta.</li></ul>

**Tabla 14** (Cont.)

<p>MERCERIZADO 2%</p>	 <p>I J</p>	<p>En la probeta con Mercerizado 2% se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Hay zonas en las cuales solo hay polietileno de baja densidad.</li> <li>ii. La fibra se acumuló en un solo costado de la probeta I dejando espacios únicamente del polímero como se indica en la imagen J.</li> <li>iii. Hay presencia de burbujas en la imagen J.</li> </ul>
<p>MERCERIZADO 6%</p>	 <p>K L</p>	<p>En la probeta con Mercerizado 6% se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Hay presencia de burbujas internas en las probetas.</li> <li>ii. Hay una distribución cuasi isotrópica en la probeta.</li> </ul>
<p>MERCERIZADO 8%</p>	 <p>M N</p>	<p>En la probeta con fibra sin tratamiento se observa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Zonas en las cuales no hay relleno completo.</li> <li>ii. Hay una concentración de la fibra en las zonas indicadas de la probeta.</li> <li>iii. No hay presencia de fibra en estos puntos, consecuencia de la acumulación de la misma en los puntos indicados (ii).</li> </ul>

Fuente: Autor

### 5.3 ENSAYO DE TENSIÓN

Se realizó el ensayo a tensión según la Norma ASTM D638, con probetas Tipo I de acuerdo a las formulaciones nombradas anteriormente, a partir de este se realizó la caracterización mecánica obteniendo los datos de esfuerzo máximo, el módulo elástico y la elongación.

En la Figura 16 se muestra el consolidado del módulo elástico promedio para cada uno de los tratamientos y su correspondiente porcentaje de mezcla. Se observa que los tratamientos con mayor módulo de elasticidad son:

1. Material compuesto con fibra sin tratamiento al 10%.
2. Material compuesto con fibra tratada con ácido acético con una concentración de fibra del 20%.
3. Material compuesto con fibra tratada con mercerizado 2% con una concentración de fibra del 30%.
4. Material compuesto con fibra sin tratamiento al 20%.
5. Material compuesto con Hipoclorito de sodio 3% con una concentración de fibra del 10%.

**Figura 16** Módulos de elasticidad promedio



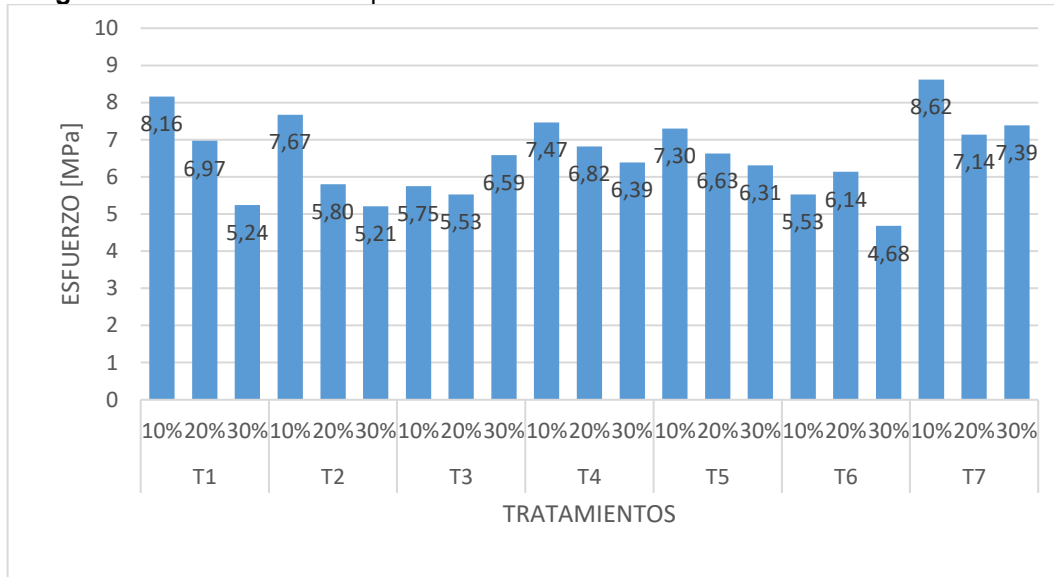
Fuente: Autor

En la Figura 17 se muestra el consolidado del esfuerzo máximo promedio para cada uno de los tratamientos y su correspondiente porcentaje de mezcla. Se observa que los tratamientos con mayor resistencia al esfuerzo máximo son:

1. Material compuesto con fibra tratada con mercerizado 8% con una concentración del 10%.
2. Material compuesto con fibra sin tratamiento al 10%.
3. Material compuesto con fibra tratada con ácido acético con una concentración del 10%.

4. Material compuesto con fibra tratada con la Solución OX-B a una concentración del 10%.
5. Material compuesto con fibra tratada con mercerizado 8% con una concentración del 30%.

**Figura 17** Esfuerzo máximo promedio



Fuente: Autor

Los datos obtenidos por resistencia mecánica con fibras de guadua y polietileno de baja densidad en comparación con otras investigaciones como lo son las fibras de bagazo y abaca con polipropileno

#### 5.4 ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBA DE TUKEY

Para la elección de las formulaciones a ser ensayadas por SEM y FTIR, se realizó una prueba basada en el análisis estadístico partiendo del módulo de elasticidad de cada una de las probetas, ejecutando la prueba de Tukey, utilizando las ecuaciones 5 y 6 para obtener el valor correspondiente al HSD que se puede observar en la Tabla 15.

**Tabla 15** Resumen del Análisis de varianza de un factor

	<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>
T1	Concentración 10%	5	413.7179625	82.74359251
	Concentración 20%	5	348.9857102	69.79714205
	Concentración 30%	5	319.7447443	63.94894885
T2	Concentración 10%	5	274.1769021	54.83538041
	Concentración 20%	5	356.9175223	71.38350446
	Concentración 30%	5	248.2138929	49.64277859
T3	Concentración 10%	5	348.2183274	69.64366549
	Concentración 20%	5	301.6298687	60.32597374
	Concentración 30%	5	280.1544729	56.03089458
T4	Concentración 10%	5	291.0337938	58.20675876
	Concentración 20%	5	286.9800533	57.39601067
	Concentración 30%	5	236.8557773	47.37115547
T5	Concentración 10%	5	286.962212	57.3924424
	Concentración 20%	5	304.830653	60.9661306
	Concentración 30%	5	352.8783398	70.57566796
T6	Concentración 10%	5	306.0918897	61.21837794
	Concentración 20%	5	344.0857343	68.81714685
	Concentración 30%	5	243.2159678	48.64319356
T7	Concentración 10%	5	329.4976716	65.89953431
	Concentración 20%	5	300.7552279	60.15104559
	Concentración 30%	5	291.4418862	58.28837723

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>
Entre grupos	7859.85955	20
Dentro de los grupos	17388.76383	84
Total	25248.62338	104

**Prueba de Tukey**

HSD	27.28
q(v1,v2)	4.24
MSe	207.0090932
n	5

Fuente: Autor

Se realizó un análisis por diferencia de medias al módulo de elasticidad para evidenciar cuales de estas tienen una diferencia honestamente significativa, obteniendo los grupos como se evidencia en la Tabla 16 sombreado de color verde.

**Tabla 16** Comparación de medias por pares

		T1			T2			T3			T4			T5			T6			T7		
		10 %	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
T 1	10 %		13.365	16.815	27.908	11.360	33.101	13.100	34.334	29.292	24.537	25.348	35.372	25.351	21.777	12.168	21.525	28.591	32.242	16.844	22.593	24.455
	20 %			3.450	14.543	2.005	19.736	0.265	20.969	15.927	11.172	11.983	22.007	11.986	8.413	1.197	8.160	15.226	18.877	3.479	9.228	11.090
	30 %				11.094	5.455	16.286	3.715	17.519	12.477	7.722	8.533	18.558	8.537	4.963	4.647	4.711	11.776	15.427	0.029	5.778	7.641
T 2	10 %				16.548	5.193	14.808	6.426	1.384	3.371	2.561	7.464	2.557	6.131	15.740	6.383	0.683	4.334	11.064	5.316	3.453	
	20 %					21.741	1.740	22.974	17.932	13.177	13.987	24.012	13.991	10.417	0.808	10.165	17.265	20.882	5.484	11.243	13.095	
	30 %						20.001	1.233	3.809	8.564	7.753	2.272	7.750	11.323	20.933	11.576	4.519	0.859	16.257	10.508	8.646	
T 3	10 %						21.234	16.192	11.437	12.248	22.273	12.251	8.678	0.932	8.425	15.491	19.142	3.744	9.493	11.355		
	20 %							5.042	9.797	8.986	1.035	8.983	12.557	22.166	12.809	5.743	2.092	17.490	11.791	9.879		
	30 %								4.755	3.944	6.081	3.941	7.514	17.124	7.767	0.701	2.950	12.448	6.699	4.837		
T 4	10 %									0.811	10.836	0.814	2.759	12.369	3.012	4.054	7.705	7.693	1.944	0.082		
	20 %										10.025	0.004	3.570	13.180	3.822	3.243	6.894	8.504	2.755	0.892		
	30 %											10.021	13.595	23.205	13.847	6.783	3.131	18.528	12.728	10.917		
T 5	10 %												3.574	13.183	3.826	3.240	6.891	8.507	2.759	0.896		
	20 %													9.610	0.252	6.813	10.464	4.933	0.815	2.678		
	30 %														9.357	16.423	20.074	4.676	10.425	12.287		
T 6	10 %															7.066	10.717	4.681	1.067	2.930		
	20 %																3.651	11.747	5.998	4.136		
	30 %																	15.398	9.649	7.787		
T 7	10 %																		5.748	7.611		
	20 %																			1.863		

Fuente: Autor

A partir de los datos de la Tabla 16, se toman los valores que superan el HSD, adicionalmente se agregan las probetas con mayor y menor módulo de elasticidad, las probetas son expuestas en la Tabla 17 y son a las cuales se le realizaron los ensayos SEM y FTIR, lo anterior debido al elevado costo de estas pruebas.

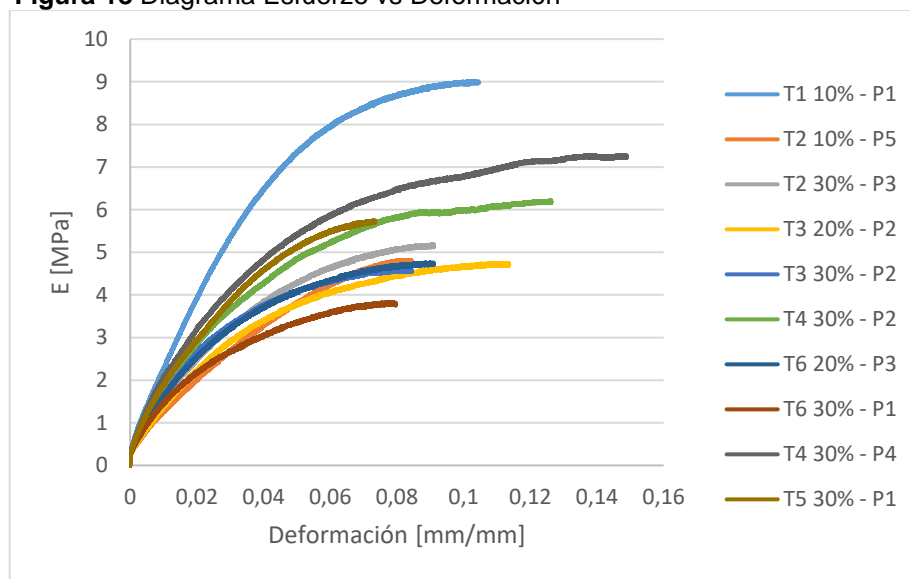
**Tabla 17** Probetas con HSD

	TRATAMIENTO	PROBETA
1	T1 - 10%	P1
2	T2 - 10%	P5
3	T2 - 30%	P3
4	T3 - 20%	P2
5	T3 - 30%	P2
6	T4 - 30%	P2
7	T6 - 20%	P3
8	T6 - 30%	P1
9	T4 - 30%	P4
10	T5 - 30%	P1

Fuente: Autor

El diagrama esfuerzo deformación de las probetas mencionadas en la Tabla 17 se puede observar en la Figura 18.

**Figura 18** Diagrama Esfuerzo vs Deformación



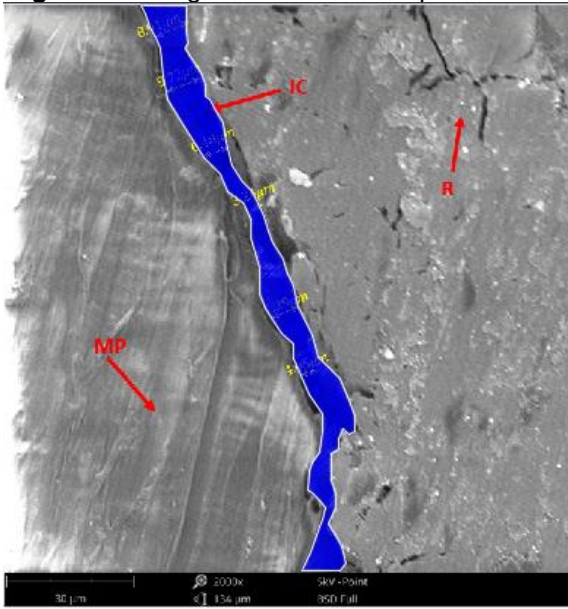
Fuente: Autor

## 5.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

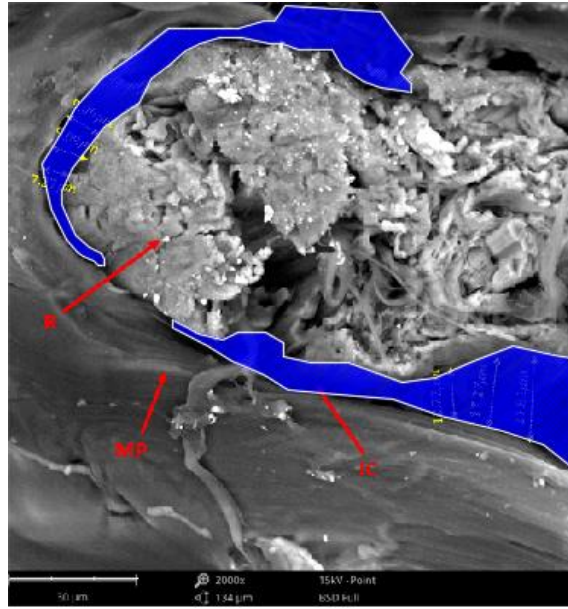
Como método de comparación en cuanto a la posible relación que exista entre el módulo de elasticidad y la separación en la intercara del material compuesto, se realizó el ensayo SEM, para medir la separación se utilizó un software CAD para rellenar los espacios de la intercara (zona azul) y así mismo cuantificar esta área.

En la Figura 19 se puede observar la separación de la intercara del material compuesto en las probetas estudiadas.

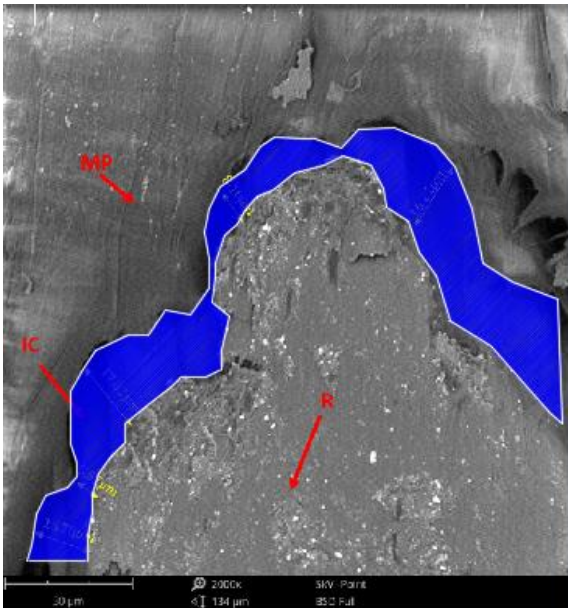
Figura 19 Fotografías SEM de las probetas estudiadas



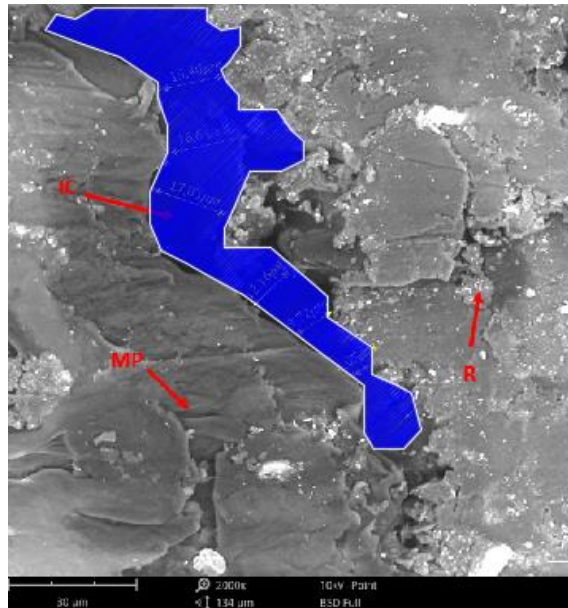
Separación:  $868,74\mu\text{m}^2$ .  
a) T1 10% - P1



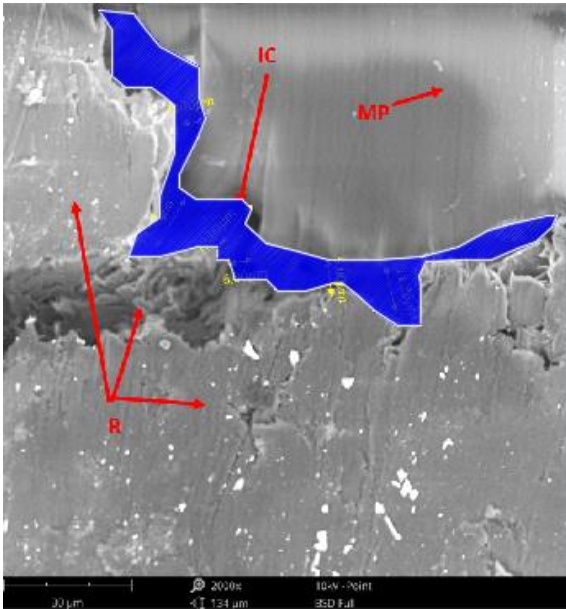
Separación:  $1860,27\mu\text{m}^2$   
b) T2 10% - P5



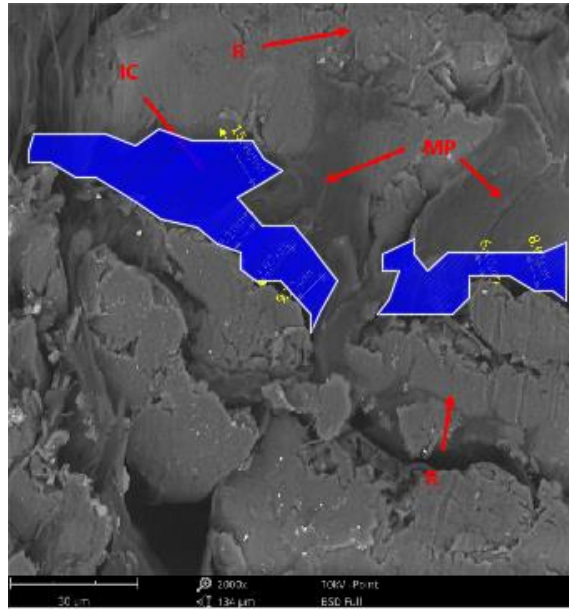
Separación:  $2538,49\mu\text{m}^2$   
c) T2 30% - P3



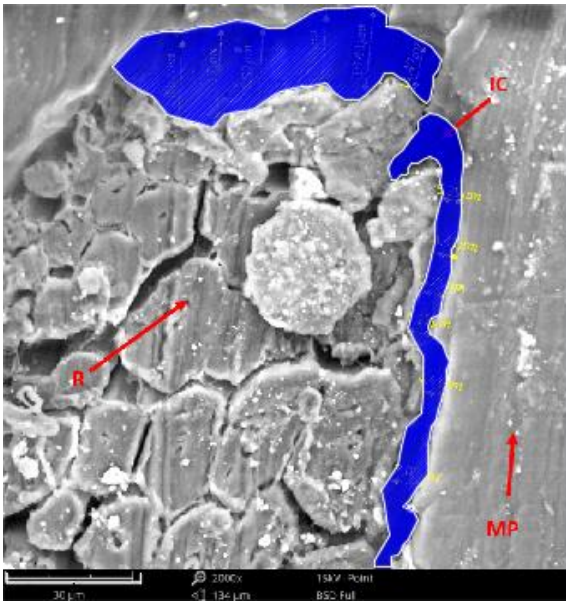
Separación:  $2127,65\mu\text{m}^2$   
d) T3 20% - P2



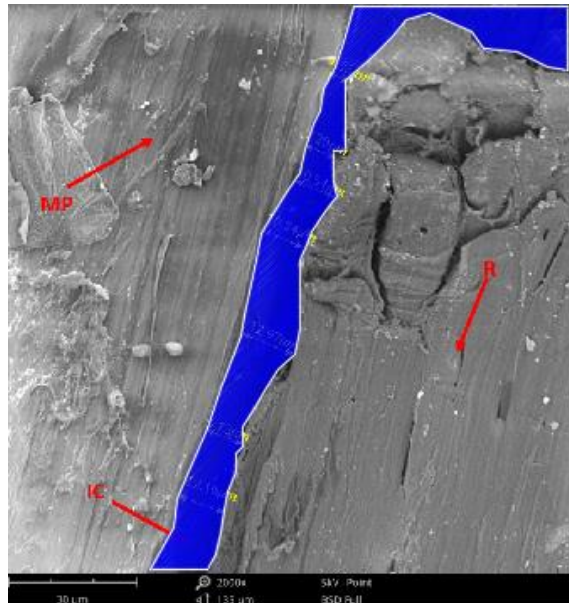
Separación:  $1274,64\mu\text{m}^2$   
e) T3 30% - P2



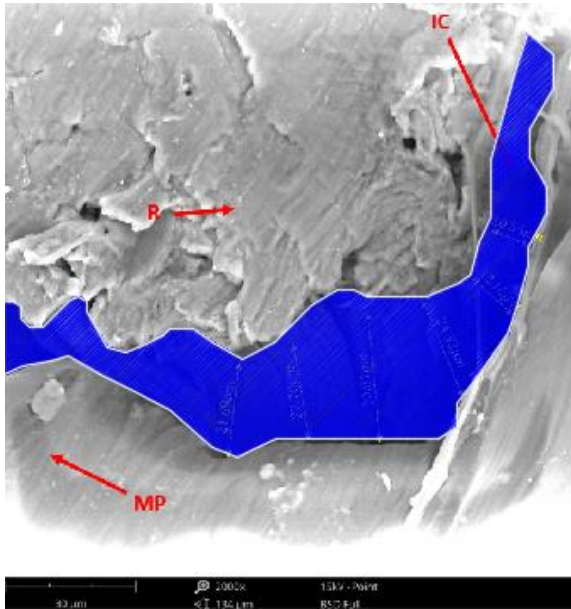
Separación:  $1592,57\mu\text{m}^2$   
f) T4 30% - P2



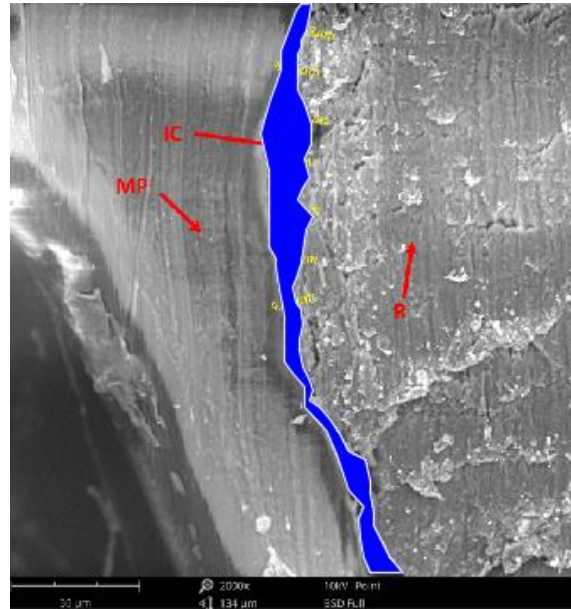
Separación:  $1990,78\mu\text{m}^2$   
g) T6 20% - P3



Separación:  $1705,88\mu\text{m}^2$   
h) T6 30% - P1



Separación:  $3214,58\mu\text{m}^2$   
i) T4 30% - P4

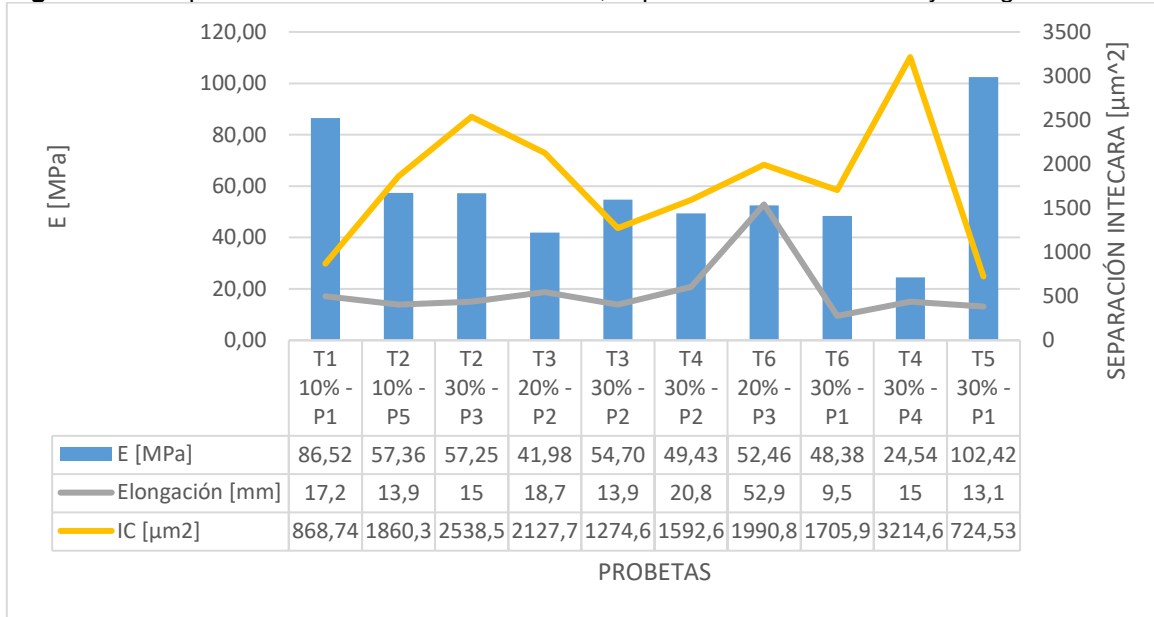


Separación:  $724,53\mu\text{m}^2$   
j) T5 30% - P1

Donde, **R** es el refuerzo (fibra de guadua (*Angustifolia kunth*)), **MP** la matriz polimérica (LDPE) e **IC** la intercara del material compuesto.  
Fuente: Autor

Las fotografías SEM, se obtuvieron utilizando dos mil aumentos (2000x), adicionalmente, la Figura 19 de la a) a la h), corresponde a las 8 probetas que mediante la prueba de Tukey arrojaron una diferencia honestamente significativa. La Figura 19 i) – j), corresponde a las probetas con menor y mayor módulo de elasticidad respectivamente.

**Figura 20** Comparación del módulo de elasticidad, separación en la intercara y elongación



Fuente: Autor

En la Figura 20, se puede observar que los valores de separación en la intercara de las probetas (T1 10% - P1) y (T5 30% - P1) son bajos, lo que genera una mayor transmisión de la carga y mejor módulo de elasticidad, siendo esta última la probeta con módulo de elasticidad elevado. Con esto se infiere que la resistencia mecánica del material está directamente relacionada a la interacción que exista entre ambos materiales y no se tiene relación con la elongación del mismo, debido a que en general la elongación se mantiene constante en las probetas donde varía el módulo de elasticidad y en (T6 20% - P3) donde fue mayor la elongación no significó que fuera la probeta con mayor o menor módulo de elasticidad.

## 5.6 ESPECTROMETRÍA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Como se trataron químicamente las fibras de guadua con el objetivo de retirar la mayor cantidad posible de lignina, los tratamientos químicos utilizados pueden atacar de igual manera la matriz polimérica alterando su estructura química, lo cual puede aumentar o disminuir sus propiedades mecánicas.

Se introducen las probetas en el equipo y para cada muestra fueron realizados 72 barridos en el IR Tracer-100. En la Tabla 18, se pueden observar los compuestos que fueron identificados con el ensayo de infrarrojo; corroborando que el material utilizado en la matriz del MC corresponde a la familia del Polietileno.

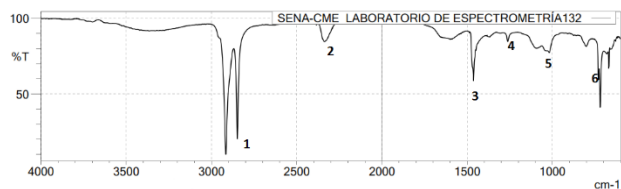
**Tabla 18** Resultados de similitud de compuestos encontrada con FTIR en las probetas

COMPUESTO	SIMILITUD COMPUESTOS EN PROBETAS [%]									
	T1 10% - P1	T2 10% - P5	T2 30% - P3	T3 20% - P2	T3 30% - P2	T4 30% - P2	T6 20% - P3	T6 30% - P1	T4 30% - P4	T5 30% - P1
1 Polietileno Oxidado	97.70	99.00	98.20	-	77.60	98.80	94.00	97.80	97.80	98.20
2 Polietileno (PE)	96.90	98.00	97.30	67.80	77.10	97.40	93.40	96.90	97.00	96.80
3 Ácido etileno acrílico (EAA)	96.80	98.00	97.00	-	-	97.60	93.20	96.80	97.00	97.10
4 Polietileno de alta densidad (HDPE)	97.20	97.80	96.80	68.00	79.80	97.70	93.40	96.90	97.80	97.40
5 Acrilato de etilo	93.90	95.30	94.60	-	-	94.90	90.60	94.00	93.60	94.20
6 Polietileno clorado 25% con talco	-	-	-	71.50	82.50	-	-	-	-	-
7 Polietileno clorado 36% con caolín	-	-	-	70.00	80.40	-	-	-	-	-
8 Copolímero de acetato de vinilo al 18% (EVA)	-	-	-	66.90	-	-	-	-	-	-

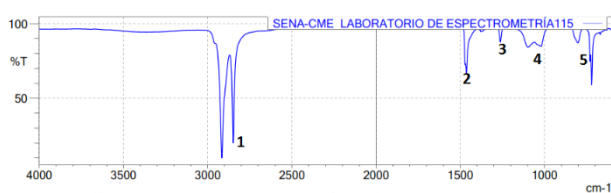
Fuente: Autor

Las gráficas comparativas del ensayo de infrarrojo se encuentran en la Figura 21, donde se pueden ver los picos para ver el efecto producido por de los tratamientos aplicados en el refuerzo y que afectaron la matriz.

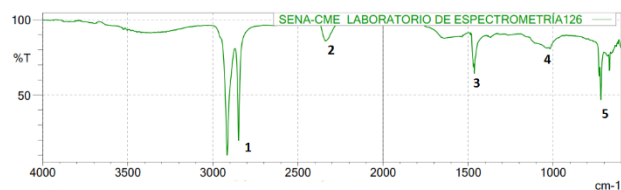
**Figura 21** Espectrometría Infrarrojo



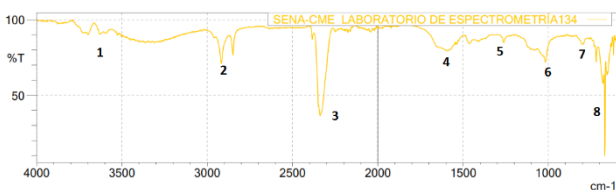
a) T1 10% - P1



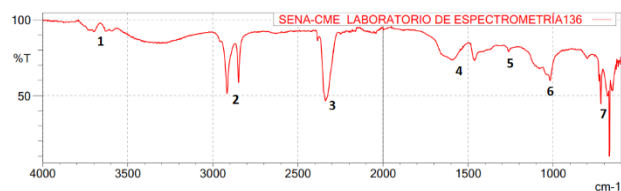
b) T2 10% - P5



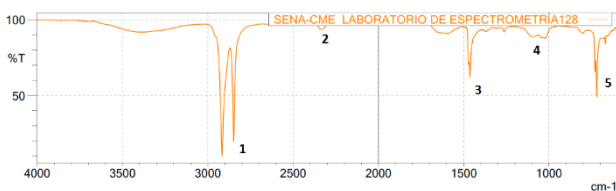
c) T2 30% - P3



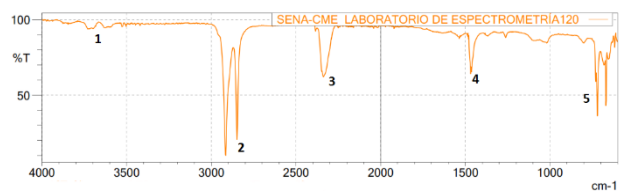
d) T3 20% - P2



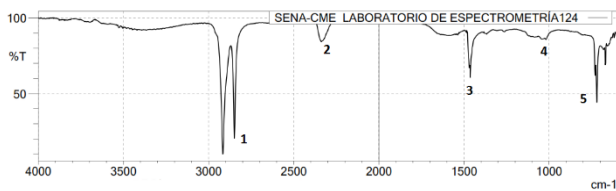
e) T3 30% - P2



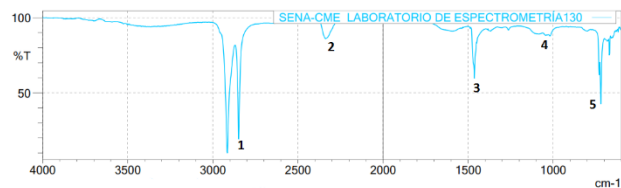
f) T4 30% - P2



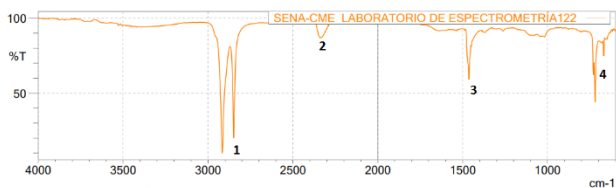
g) T6 20% - P3



h) T6 30% - P1



i) T4 30% - P4



j) T5 30% - P1

Fuente: Autor

El polietileno de baja densidad, tiene los siguientes grupos funcionales:

1. Ubicado a una frecuencia de entre  $2870 - 2946 \text{ cm}^{-1}$  un enlace C-H.
2. En  $1230 \text{ cm}^{-1}$  un enlace C-O.
3. En  $720 \text{ cm}^{-1}$  un enlace  $\text{CH}_2$ .

En la Tabla 19, se encuentra la comparación de los porcentajes de transmitancia con respecto al LDPE, correspondiente a las probetas de estudio.

**Tabla 19** Comparación % transmitancia del material compuesto respecto al LDPE

Enlace	% TRANSMITANCIA LDPE	T1	T2	T2	T3	T3	T4	T6	T6	T4	T5
		10 % - P1	10 % - P5	30 % - P3	20 % - P2	30 % - P2	30 % - P2	20 % - P3	30 % - P1	30 % - P4	30 % - P1
N-H					+	+		+			
C-H	90%	=	=	=	--	--	=	=	=	=	=
$\text{C}\equiv\text{N}$		+		+	++	++	+	+	+	+	+
H-O-H y C=O		+	+	+	++	+	++	+	+	+	+
C-H			+		+	+					
C-O	50%	=	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-N					+						
CH2	50%	=	=	=	++	++	=	+	=	=	=

Fuente: Autor

En la Figura 21, se muestra la espectrometría del ensayo de infrarrojo (FTIR) del material compuesto en las formulaciones que se obtuvieron por la prueba de Tukey. En ellas se identifican los enlaces propios del LDPE, sin embargo, también hay presencia de otros enlaces correspondientes a elementos que deben provenir de los tratamientos realizados a las fibras, algunos de estos enlaces tienen variaciones en el porcentaje de transmitancia, representando una interacción entre el polietileno y la fibra tratada.

- En las muestras (T3 20% - P2) y (T3 30% - P2), se observa una disminución importante en los picos de C-H y aumento en H-O-H y C=O, lo que es resultado de un aumento de la oxidación de la celulosa [46] efecto producido por la presencia de agua en el interior de las probetas y un aumento en la transmitancia de los picos de CH2 muy asociada también a la hemicelulosa.
- La fibra natural tuvo menor pérdida de humedad, mejor módulo de elasticidad y una de las menores separaciones en la intercara, no presenta cambios que interactúen con el polímero, solo se ve lo que representa a la lignina en  $1530 \text{ cm}^{-1}$  aproximadamente y a la celulosa en  $1645 \text{ cm}^{-1}$ .
- El ácido acético es el tratamiento que mayor pérdida de lignina muestra, es uno de los que menor pérdida de humedad presentó, mostró un bajo módulo de elasticidad, mediante el análisis de SEM se evidenció una separación media respecto a los otros tratamientos. De acuerdo al análisis FTIR no se

visualizan los grupos oxidrilo, los cuales están asociados a la unión con polímeros [46].

- El mercerizado 2% fue el que mayor lignina ganó debido al tratamiento, este se encuentra entre los mejores resultados de módulo de elasticidad y menor separación en la intercara. En el análisis de infrarrojo no hay interacción con el polímero, sin embargo, solo aparecen los enlaces xilanos debidos al estiramiento de los enlaces C-O y C-C correspondientes al glucosídico [63].
- Solución OX-B, hay una afectación ligera en los enlaces del polímero debido a que hay una disminución en la hemicelulosa la cual se encuentra en 1732cm<sup>-1</sup>.

Finalmente, los resultados mecánicos obtenidos con la fibra de guadua (*Angustifolia kunth*) y LDPE son bajos comparados con otros materiales compuestos en los que se utilizó fibras de bagazo de caña, coco, fique y abacá donde también utilizaron un polímero termoplástico como matriz [33], [50], por consiguiente, la fibra de guadua corta no cuenta con las capacidades idóneas para su uso en materiales compuestos con matriz LDPE.

## 6. CONCLUSIONES

Se logró realizar la caracterización del material compuesto matriz termoplástica reforzado con fibra de guadua mediante ensayo de tensión, de acuerdo con la norma ASTM D638 que llevo a la realización de un diseño de experimentos dando lugar a la determinación de las propiedades del material compuesto.

Gracias al análisis SEM, se permitió ver en detalle la distancia de la intercara, la cual, tiene una relación inversamente proporcional con la resistencia mecánica del material compuesto, entre menor sea la separación más alta será su resistencia.

El control de la humedad es crítico en el desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, ya que estas requieren de poco tiempo para rehidratarse y la presencia de burbujas en las probetas es manifestación de esta situación.

Por medio de la prueba de infrarrojo (FTIR) se puede ver que la composición química de la matriz del tratamiento T3 tiene una composición diferente debido a la fibra tratada con Hipoclorito de sodio al 3% y por ende si hay cambio en estas por la interacción que existe entre matriz-refuerzo.

Según lo observado, en los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia a tensión, se tiene que el tratamiento T1 (fibra de guadua sin tratamiento) con un porcentaje de 10%, es el tratamiento que tiene valores más altos, por lo tanto, se evidencia que la fibra de guadua *Angustifolia kunth* actúa mejor sin tratamiento.

## 7. RECOMENDACIONES

El proceso de moldeo por compresión requiere de un control en la preparación de la muestra, de manera que se pueda extraer el aire presente entre los pellets mientras se plastifica el mismo. Lo más recomendable, sería desarrollar o adquirir un dispositivo que permita transferir el material al interior del molde.

Se recomienda que, si el proceso de secado de las fibras naturales y el moldeo no son realizados en brevedad de tiempo, se realice nuevamente el secado, debido a que las fibras recuperan rápidamente la humedad y afectan el proceso de conformado.

Se recomienda para futuras investigaciones repetir la obtención del material compuesto matriz polimérica LDPE con fibra de guadua (*Angustifolia kunth*) utilizando el moldeo por inyección.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. A. Hurtado Riveros, «Estandarización del proceso de obtención de fibra de *angustifolia kunth* como materia prima para material compuesto», p. 89, 2017.
- [2] C. Córdoba, J. Mera, D. Martínez, y J. Rodríguez, «Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, tetera (*Stromanthe Stromathoides*)», 2010.
- [3] R. J. Balam Cocom, S. Duarte Aranda, y G. Canché Escamilla, «Obtention and characterization of composites of henequen pineapple fibers and polypropylene», 2005.
- [4] A. Osorio Saraz, F. Varón Aristizabal, y J. Herrera Mejía, «Mechanical behavior of the concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers», 2007.
- [5] K. Quesada Solis, P. Alvarado Aguilar, R. Silbaja Ballesteros, y J. Vega Baudrit, «Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) comomaterial de refuerzo en resinas de poliéster», 2005.
- [6] A. Cuéllar y I. Muñoz, «Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas», *DYNA*, vol. 77, n.º 162, pp. 137-142, 2010.
- [7] Bambú de Colombia, «Bambú de Colombia», 2012.  
<http://www.bambudecolombia.com/> (accedido ago. 18, 2019).
- [8] C. E. E. Tiempo, «La guadua, recurso productivo de Colombia para el mundo», *El Tiempo*, 2006.  
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3245166> (accedido ago. 18, 2019).
- [9] A. K. Bledzki y V. E. Sperber, «Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural», p. 10, 2007.
- [10] F. Stupenengo, «Materiales y materias primas», 2011.  
<http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf> (accedido ago. 18, 2019).
- [11] Z. C. López, S. J. G. Vargas, y G. A. V. García, «Fabricación y caracterización de un material compuesto de matriz polimérica con refuerzo metálico (malla de aluminio)», p. 97, 2009.
- [12] M. A. Pérez y M. Sánchez, Eds., *Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos*, 1st ed. OmniaScience, 2014.
- [13] P. Fulay y D. Askeland, *The Science & Engineering of Materials*. Cengage Learning, 2005.
- [14] V. Guerrero y V. Sotomayor, «Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales», 2011, Accedido: ago. 18, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/20338571/Nuevos\\_materiales\\_aplicaciones\\_estructurales\\_e\\_industriales](https://www.academia.edu/20338571/Nuevos_materiales_aplicaciones_estructurales_e_industriales).
- [15] R. L. Mott, «Resistencia de Materiales», *El Solucionario*, 2009.  
[https://www.elsolucionario.org/resistencia-de-materiales-robert-l-mott\\_17/](https://www.elsolucionario.org/resistencia-de-materiales-robert-l-mott_17/) (accedido ago. 18, 2019).

- [16] C. E. da Costa, F. V. López, y J. M. T. Castelló, «Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones», *Rev. Metal.*, vol. 36, n.º 3, pp. 179-192, 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570.
- [17] M. Estrada Mejía, «Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos», 2010.  
[http://www.docentes.unal.edu.co/mestradam/docs/tesisMEM\\_maestria.pdf](http://www.docentes.unal.edu.co/mestradam/docs/tesisMEM_maestria.pdf) (accedido ago. 18, 2019).
- [18] H. Hernández, J. D. Illera, y E. Niño, «Incorporación de materias primas renovables y recicladas en resinas de poliéster insaturado», . pp, p. 6, 2013.
- [19] M. C. Bautista, J. Rubio, y J. L. Oteo, «El proceso de organofilización de vidrios para su aplicación en materiales compuestos», p. 12, 1991.
- [20] Á. G. Velázquez, M. G. A. Moreno, H. E. C. Ramírez, R. A. B. Páez, y L. T. Palomar, «Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica», *Tecnol. En Marcha*, vol. 26, n.º 3, pp. 26-37, 2013.
- [21] M. Klárová, «Composite materials», 2015.  
[http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory\\_FMMI\\_ENG/2\\_rocnik/TRaCM/Composite%20materials.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI_ENG/2_rocnik/TRaCM/Composite%20materials.pdf) (accedido ago. 18, 2019).
- [22] L. J. Q. Giraldo, «Desarrollo y evaluación de un material compuesto elaborado a partir de polipropileno y fibras cortas de bambú mediante la técnica de moldeo por compresión en caliente», p. 96, 2018.
- [23] A. Dzul, «Efecto de un agente de acoplamiento natural sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto Polipropileno/Henequén», 2015.  
[https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/410/1/PCM\\_M\\_Tesis\\_2015\\_Ariana\\_Dzul.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/410/1/PCM_M_Tesis_2015_Ariana_Dzul.pdf) (accedido dic. 05, 2019).
- [24] M. Beltran y A. Marcilla, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante, 2012.
- [25] É. Hermida, «Polímeros», 2008. [http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09\\_Polimeros.pdf](http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf) (accedido ago. 18, 2019).
- [26] M. P. Payá, «Investigación sobre la mejora de la humectabilidad de films poliméricos de polietileno de baja densidad (LDPE) mediante plasma por descarga corona. Optimización de laminados con espumas de polietileno mediante procesos de laminación con adhesivos Hot-Melt para aplicaciones técnicas en el sector de automoción», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universitat Politècnica de València, 2011.
- [27] I. E. R. Girón, «Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad», p. 126, 2005.
- [28] Escuela Colombiana de Ingeniería, «Plásticos: Curso de procesos de manufactura», 2007.  
[https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734\\_plimeros.pdf](https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf) (accedido ago. 18, 2019).
- [29] A. Moral Borque y M. Nogueira López, «Materiales de última generación y materiales eficientes», 2007.  
[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/Pg-MA-ASIG/Pg-ASIG-](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/Pg-MA-ASIG/Pg-ASIG-)

- 200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf (accedido ago. 18, 2019).
- [30] J. A. AyalaCorrea y C. A. Barbosa Fontecha, «Determinación de la resistencia a la tracción y tenacidad de un material compuesto a partir de bagazo de caña de azúcar y almidón de yuca, a través de los ensayos de tensión y de impacto charpy», p. 97, 2014.
- [31] W. D. Callister Jr, «Materials Science Engineering, an introduction», *Scribd*, 1995. <https://es.scribd.com/doc/35972475/introcienciamateri-callister>.
- [32] D. Hull y T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 1996.
- [33] J. S. Gómez P, «Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio», p. 67, 2009.
- [34] Y. Deaquiz Oyola y B. Moreno Medina, «Producción y biosíntesis de fibras vegetales. Una revisión», vol. 6, pp. 29-42, 2016.
- [35] A. Besednjak, *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2009.
- [36] L. C. Martínez, J. C. D. R. Romero, y J. R. Montes, *Procesos industriales para materiales no metálicos*. Vision Libros, 2006.
- [37] A. P. Ziarsolo y E. A. Sánchez, «Una introducción a los textiles artificiales en las colecciones de indumentaria del siglo XX y su conservación», *Ge-Conserv. Conserv.*, n.º 9, p. 31, 2016.
- [38] L. L. Romero, «Fibras artificiais e sintéticas», p. 13.
- [39] J. W. Ramírez Colorado y R. Triana Arroyave, «Caracterización de un material compuesto matriz termoestable reforzado con fibra de guadua», ago. 2017, Accedido: ene. 14, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co>.
- [40] J. Perea, J. Villegas, Y. Cerquera, y M. del P. Cortés, «Evaluación y documentación de prácticas sobresalientes sobre el manejo de la cosecha y maduración de la guadua en el departamento del Huila», 2003. [http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/3967/2/2006718144553\\_Manual%20de%20guadua.pdf](http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/3967/2/2006718144553_Manual%20de%20guadua.pdf) (accedido dic. 10, 2019).
- [41] H. J. Martínez Covalada, «La cadena de la Guadua en Colombia», 2005. [http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6108/1/200511216197\\_caracterizacion\\_guadua.pdf](http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6108/1/200511216197_caracterizacion_guadua.pdf) (accedido dic. 10, 2019).
- [42] L. E. Jaramillo Valarezo, «Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadúa angustifolia proveniente del Ecuador», 2013, Accedido: ene. 12, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5114>.
- [43] J. Flórez, «Máquina para extraer fibras naturales de guadua y plátano», *VirtualPro.co*, 2013. <https://www.virtualpro.co/noticias/maquina-para-extraer-fibras-naturales-de-guadua-y-platano> (accedido dic. 04, 2019).
- [44] Biasin y Cho, «Guadua recurso sustentable», 2004. <https://reaxionatural.files.wordpress.com/2011/08/guadua.pdf> (accedido ene. 14, 2020).
- [45] Fundación Susayana, «Manual Básico de Carpintería.pdf». 2017.

- [46] F. L. Vera, H. A. M. Cortes, C. V. Murcia, y I. C. Galvis, «Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización», *Inf. Téc.*, vol. 78, n.º 2 (Julio-Diciembre 2014), pp. 106-114, 2014.
- [47] F. Diaz del Castillo, «Conformado de materiales plásticos», UNAM, 2012, Accedido: sep. 02, 2019. [En línea]. Disponible en: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf).
- [48] A. Varela, J. L. Mier, y R. Artiaga, *Structural Elements with polymers materials*. Universidad De a Coruna, 1997.
- [49] C. Cadena y A. Meza, «Diseño de una máquina inyectora de plástico», 2006. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2007/124274.pdf> (accedido ene. 14, 2020).
- [50] J. C. Páez Moscoso, «Obtención de compuestos de polidropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión», 2007, Accedido: sep. 02, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/352>.
- [51] D20 Committee, «Test Method for Tensile Properties of Plastics», ASTM International. doi: 10.1520/D0638-14.
- [52] D30 Committee, «Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials», ASTM International. doi: 10.1520/D3039\_D3039M-17.
- [53] M. Ipohorski y P. B. Bozzano, «Microscopia electrónica de barrido en la caracterización de materiales», 2013. <http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2018/01/RevistasCel/tomo63-3/5-MICROSCOPIA-ELECTRONICA-DE-BARRIDO-EN-LA-CARACTERIZACION-DE-MATERIALES-cei63-3-2013-5.pdf> (accedido dic. 08, 2019).
- [54] S. Swapp, «Scanning Electron Microscopy (SEM)», 2017. [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html).
- [55] Thermo Fisher Scientific, «FTIR Spectroscopy Basics», 2002. <https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>.
- [56] P. Gañan, C. Jiménez, I. Giraldo, M. Jaramillo, L. Toro, y J. Cruz, «Efecto de la modificación de la interfase en el comportamiento de materiales compuestos naturales», 2003.
- [57] C. A. Ararat y E. A. Murillo, «Functionalized Low Density Polyethylene with maleinized Hyperbranched Polyester Polyol», *Ing. Cienc.*, vol. 12, n.º 23, pp. 127-144, feb. 2016, doi: 10.17230/ingciencia.12.23.7.
- [58] P. Mondragón Cortez, «Espectroscopia de Infrarrojo para todos». 2017.
- [59] F. Rojo Callejas, «Tablas de Espectroscopia Infrarroja». .
- [60] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, 2005.
- [61] E. Aguilar-Palazuelos, O. Jiménez-Arévalo, J. J. Zazueta-Morales, y F. Martínez, «Caracterización Estructural De Compositos Biodegradables

Elaborados A Partir De Mezclas De Almidón de Maíz Y Fibra De Caña utilizando el Proceso De Inyección-Moldeo.», p. 5, 2006.

- [62] D20 Committee, «Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials», ASTM International, 2003. Accedido: sep. 02, 2019. [En línea]. Disponible en:  
<http://file.yizimg.com/424653/2013121013320823.pdf>.
- [63] L. T. Palomar, A. Ayala Bautista, y G. Montero, «Determinación simplificada del contenido de lignina en paja de trigo por método volumétrico y su caracterización química». 2015.

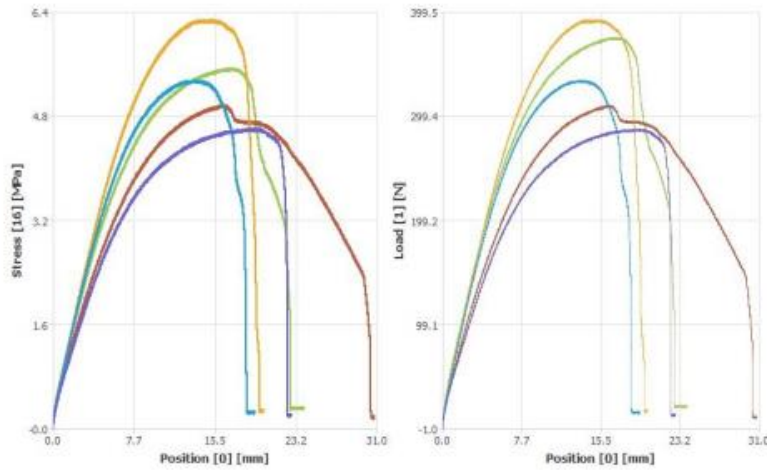
# ANEXOS

## Anexo 1: Informe de ensayo a tensión



mar. Jun. 11 11:40:30 2019

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL)  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL) AL 10%

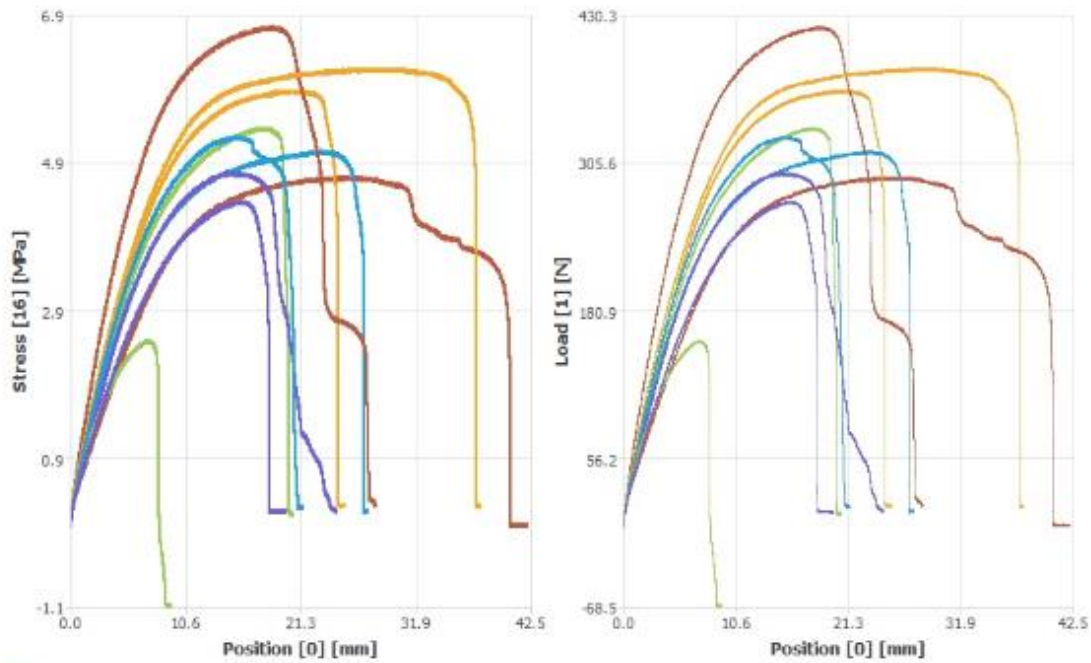


Test	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
Test 1	375.2	5.5	LD: 1, WD: 1 [mm]
Test 2	309.7	5.0	LD: 1, WD: 1 [mm]
Test 3	391.7	6.3	LD: 1, WD: 1 [mm]
Test 4	334.0	5.3	LD: 1, WD: 1 [mm]
Test 5	287.0	4.6	LD: 1, WD: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
NORMA D638

PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA

10 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL)  
PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL) AL 20%



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	335.5	5.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	293.8	4.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	366.9	5.9	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	315.9	5.0	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5			



Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
297.3	4.8	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 6

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
156.2	2.5	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 7

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
420.6	6.7	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 8

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
385.5	6.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 9

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
327.8	5.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

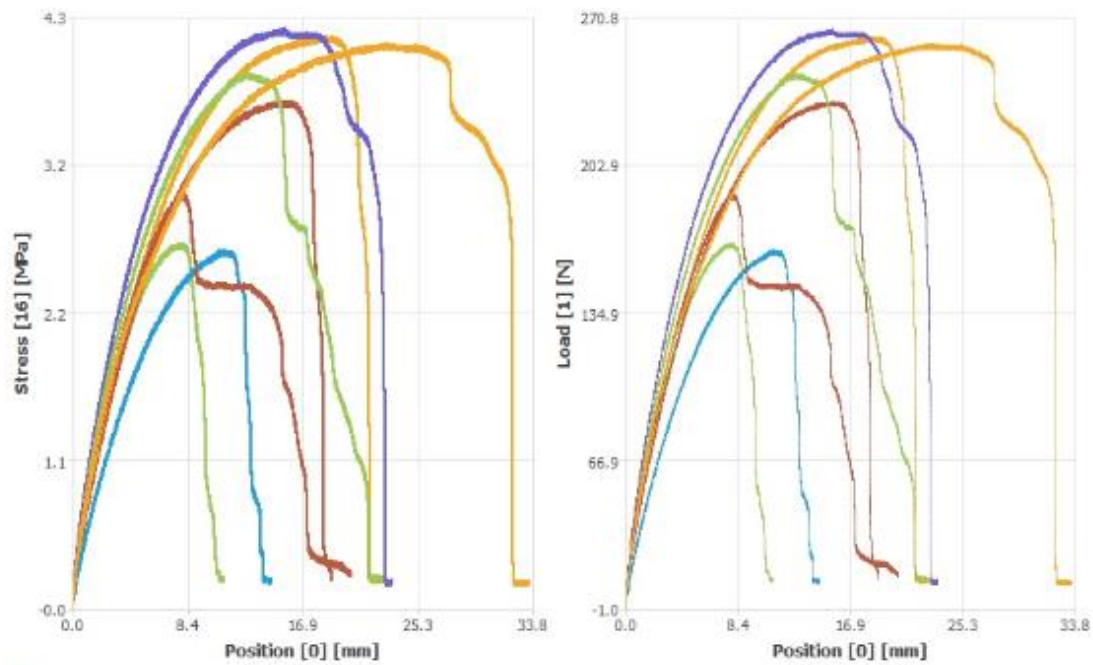
Test 10

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
273.2	4.4	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
NORMA D638

PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA

7 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL)  
PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA (FIBRA NATURAL) AL 30%



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	167.0	2.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	232.0	3.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	261.9	4.2	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	163.9	2.6	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5			



Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
265.5	4.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 6

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
244.9	3.9	LO: 1, W0: 1 [mm]

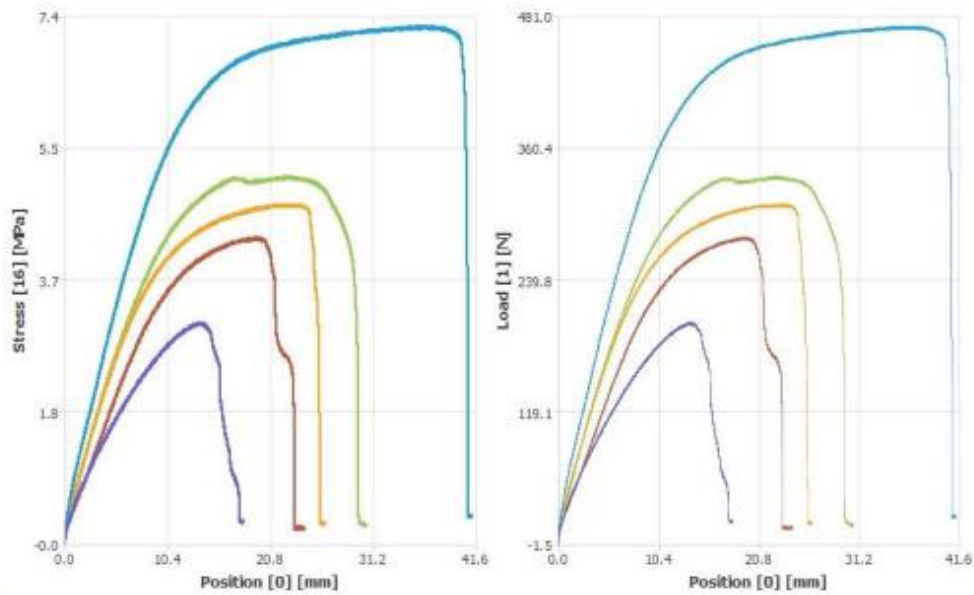
Test 7

Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
189.7	3.0	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 8

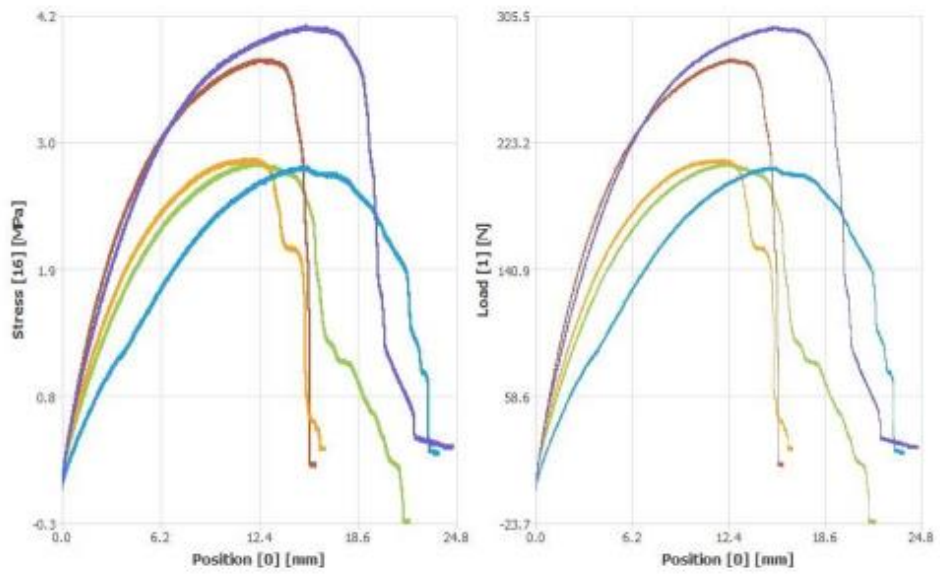
Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
258.7	4.1	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + ACIDO ACETICO + CLORITO  
 5 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA+ ACIDO ACETICO + CLORITO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + ACIDO ACETICO + CLORITO



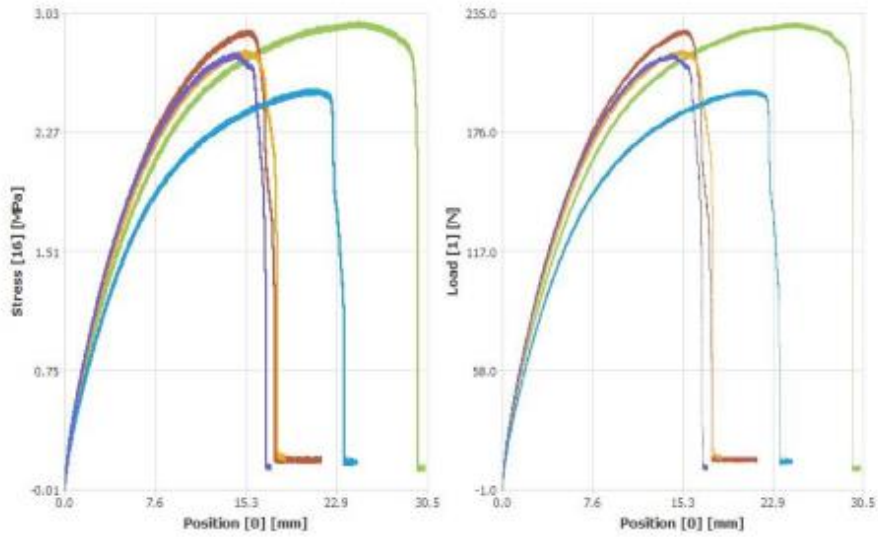
Test	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
Test 1	335.0	5.1	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	279.3	4.3	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	309.2	4.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	471.6	7.2	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	201.0	3.1	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + ACIDO ACETICO + CLORITO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA+ ACIDO ACETICO + CLORITO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + ACIDO ACETICO + CLORIT



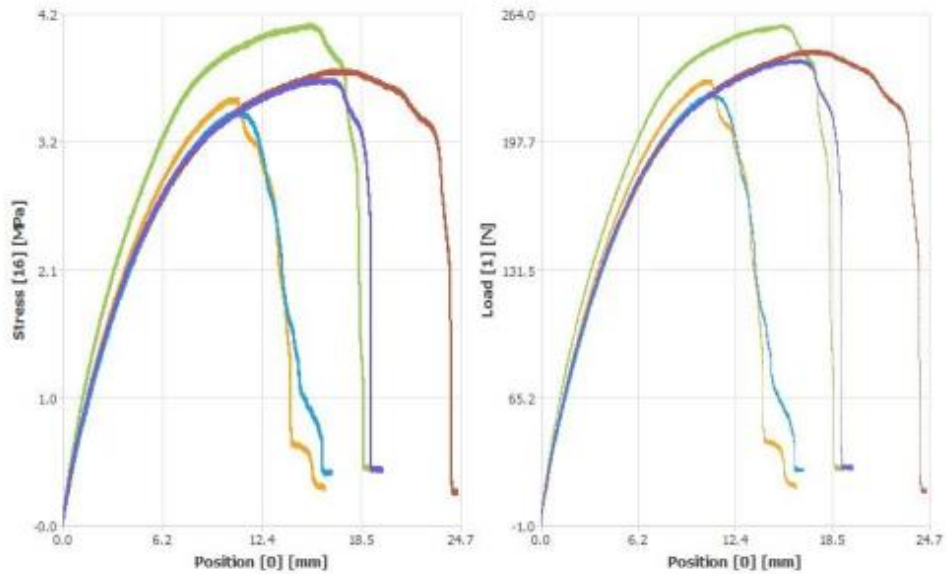
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	210.3	2.9	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	277.3	3.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	212.3	2.9	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	207.7	2.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	299.0	4.1	LO: 1, WO: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + ACIDO ACETICO + CLORITO  
 5 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA+ ACIDO ACETICO + CLORITO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + ACIDO ACETICO + CLORITO



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	230.4	3.0	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	226.3	2.9	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	216.5	2.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	196.9	2.5	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	214.4	2.8	LO: 1, WO: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO DE SODIO  
 5 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA+ HIPOCLORITO DE SODIO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + HIPOCLORITO DE SODIO

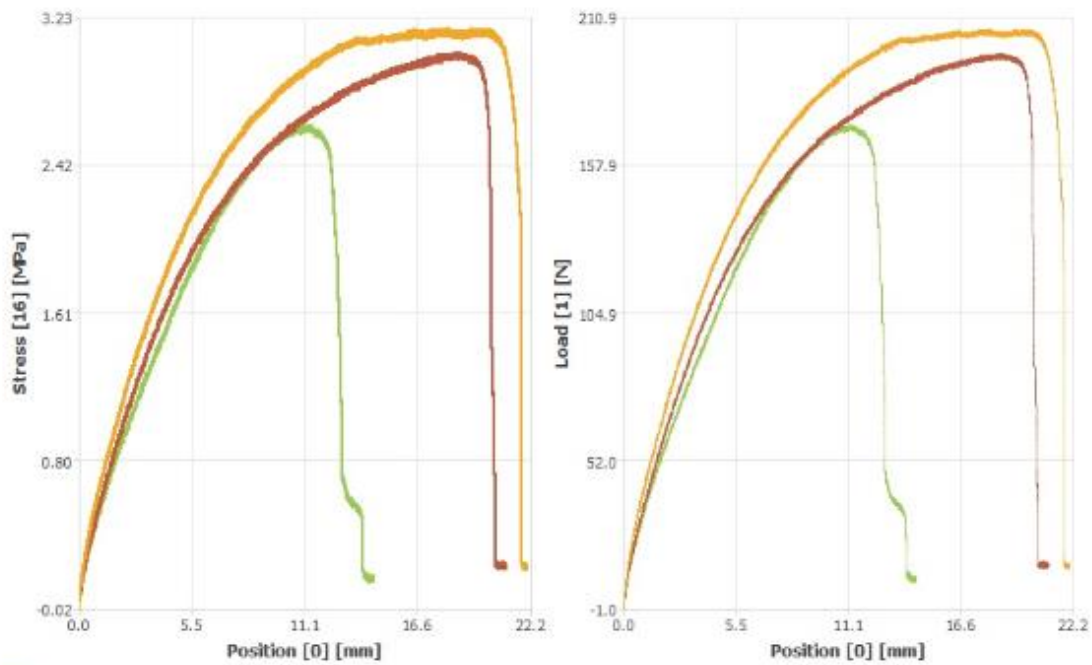


Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	258.8	4.1	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	245.4	3.8	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	229.9	3.5	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	222.7	3.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	240.2	3.7	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
NORMA D638

PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO DE SODIO

3 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO DE SODIO  
PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + HIPOCLORITO DE SODIO



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	172.1	2.6	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	197.9	3.0	LO: 1, W0: 1 [mm]

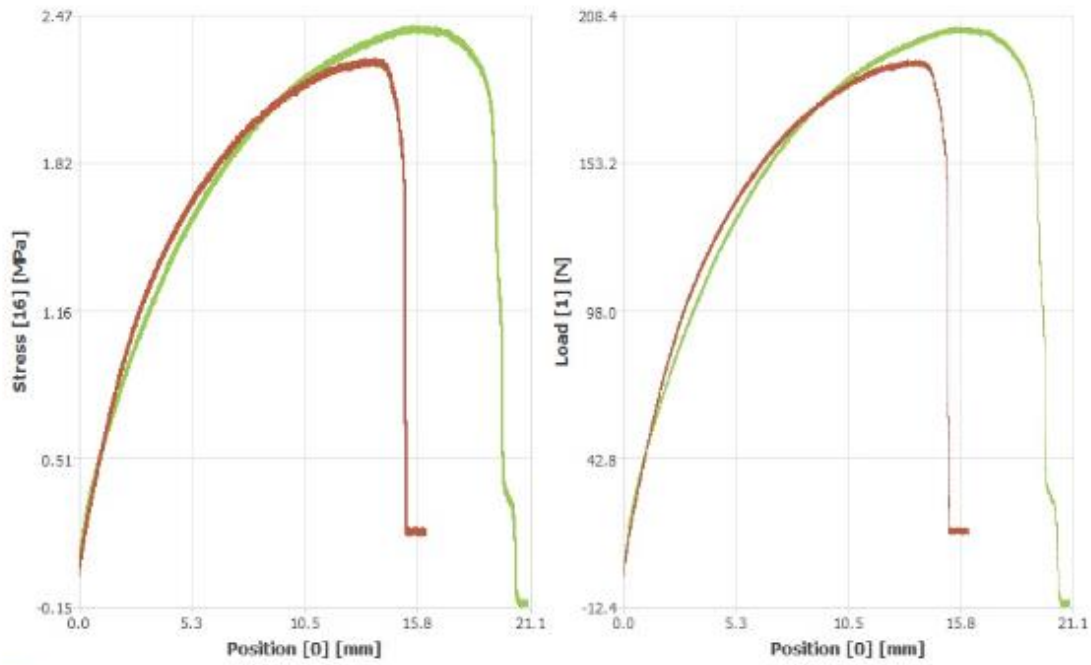
  

Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	206.7	3.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
NORMA D638

PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO DE SODIO

2 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO DE SODIO  
PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + HIPOCLORITO DE SODIO



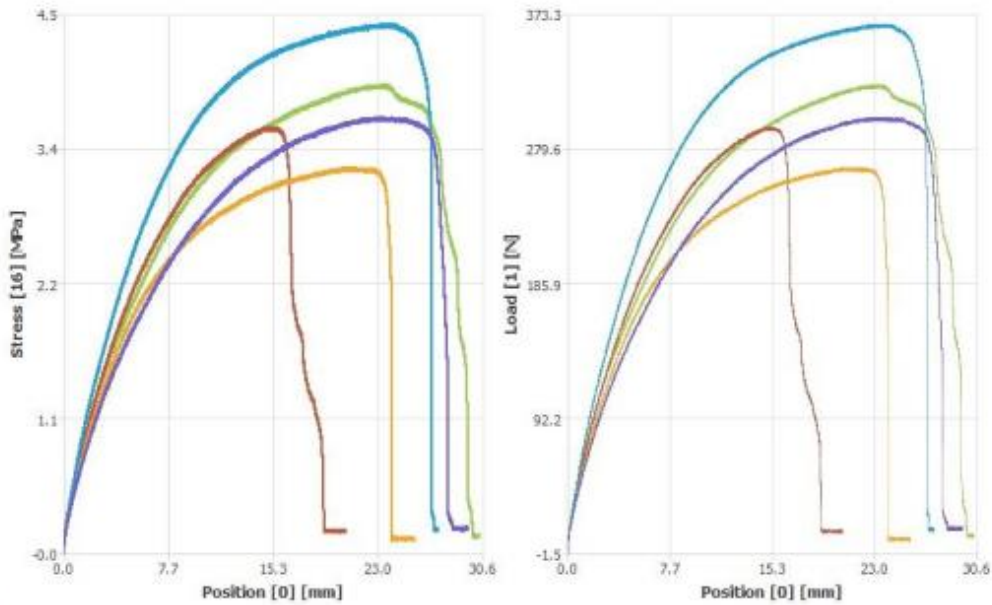
Test 1		
Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
204.0	2.4	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 2		
Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
191.7	2.3	LO: 1, W0: 1 [mm]



ENSAYO MECANICO A TENSION  
NORMA D638  
PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO  
ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO OX  
PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + HIPOCLORITO OX



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	324.2	3.9	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	294.8	3.6	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	266.9	3.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

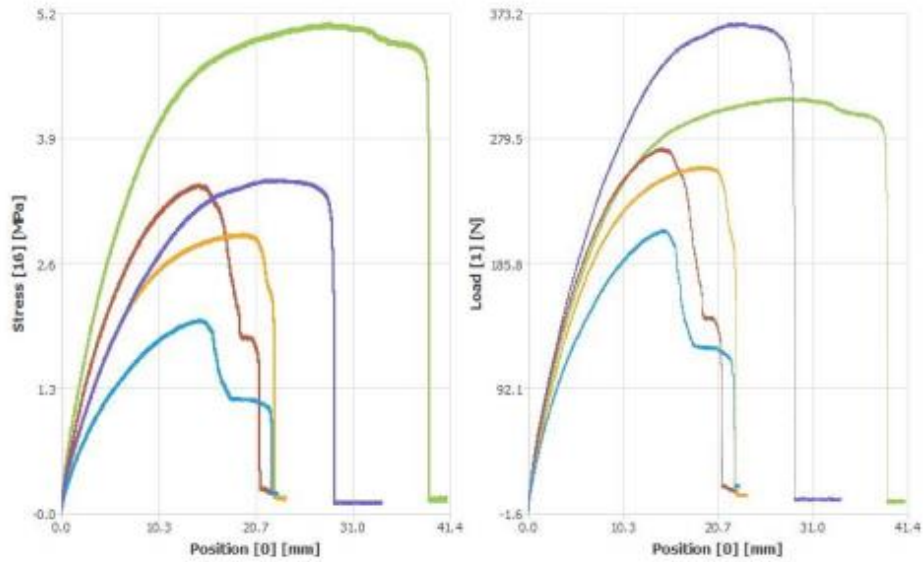
  

Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	365.9	4.4	LO: 1, W0: 1 [mm]

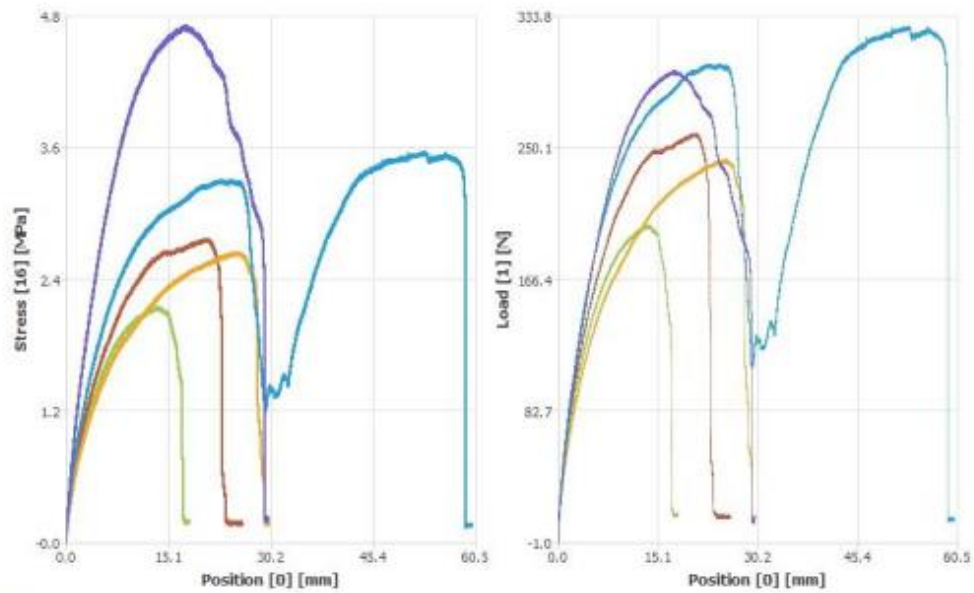
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	301.5	3.6	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO OX  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + HIPOCLORITO OX



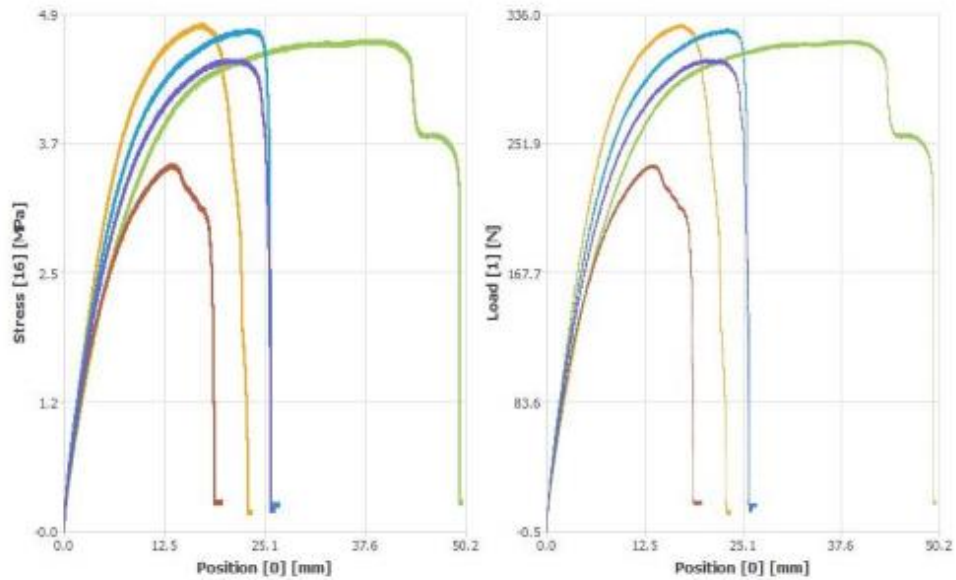
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	310.7	5.1	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	272.1	3.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	258.7	2.9	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	210.8	2.0	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	365.9	3.4	LO: 1, W0: 1 [mm]

**ENSAYO MECANICO A TENSION**  
**NORMA D638**  
**PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO**  
**ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + HIPOCLORITO OX**  
**PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + HIPOCLORITO OX**



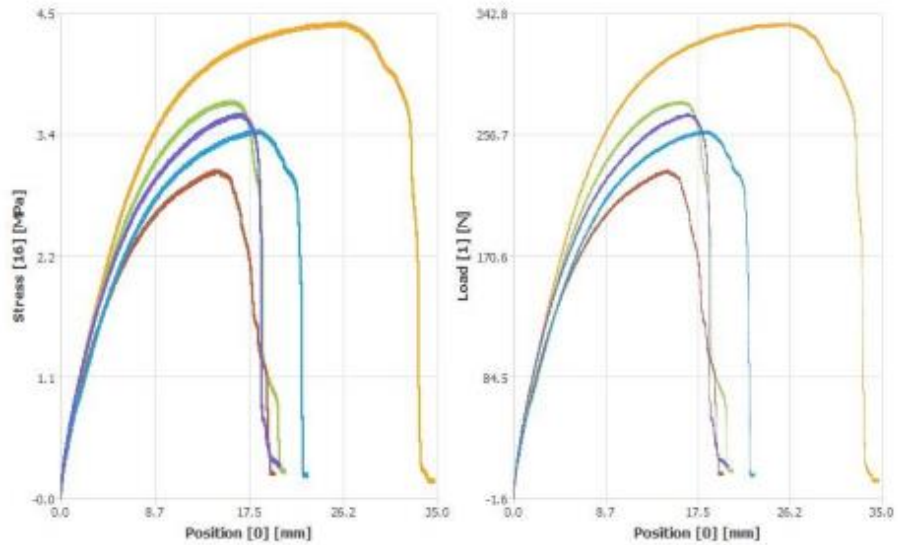
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	201.0	2.2	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	259.2	2.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	242.7	2.7	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	327.3	3.6	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	298.9	4.8	LO: 1, WO: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + MERCERIZADO AL 2%



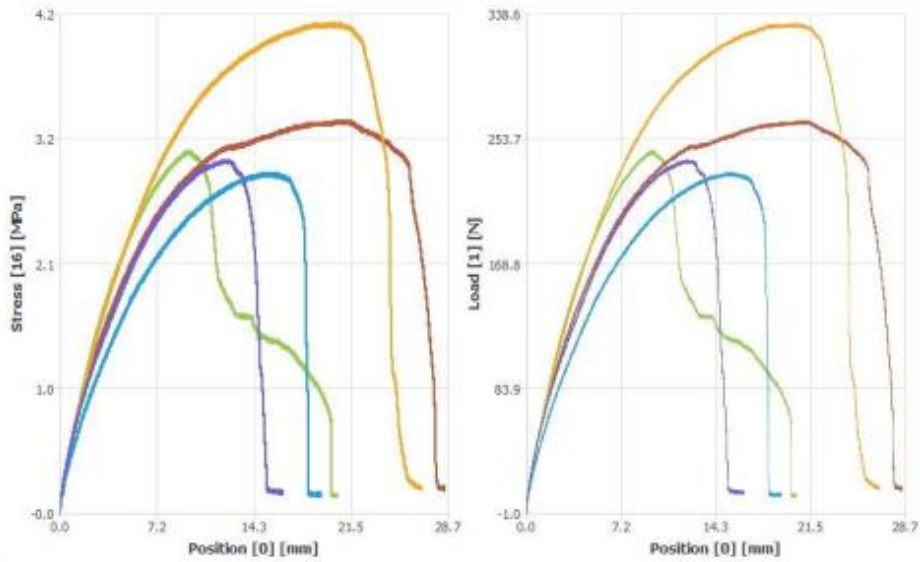
Test	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
Test 1	319.1	4.7	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	237.6	3.5	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	329.4	4.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	325.8	4.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	306.2	4.5	LO: 1, WO: 1 [mm]

**ENSAYO MECANICO A TENSION**  
**NORMA D638**  
**PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO**  
**ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO**  
**PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + MERCERIZADO AL 2%**



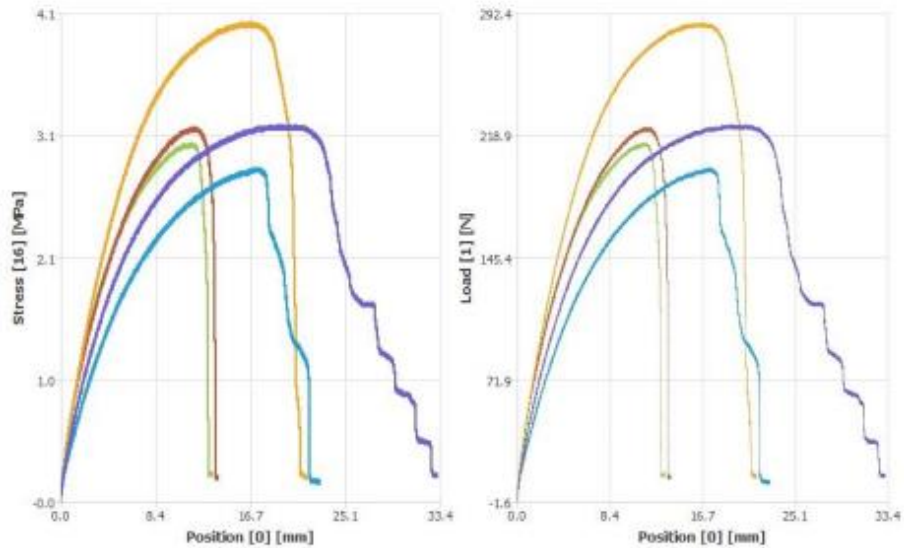
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	280.4	3.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	231.4	3.0	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	336.1	4.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	259.8	3.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	271.6	3.6	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 5 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + MERCERIZADO AL 2%



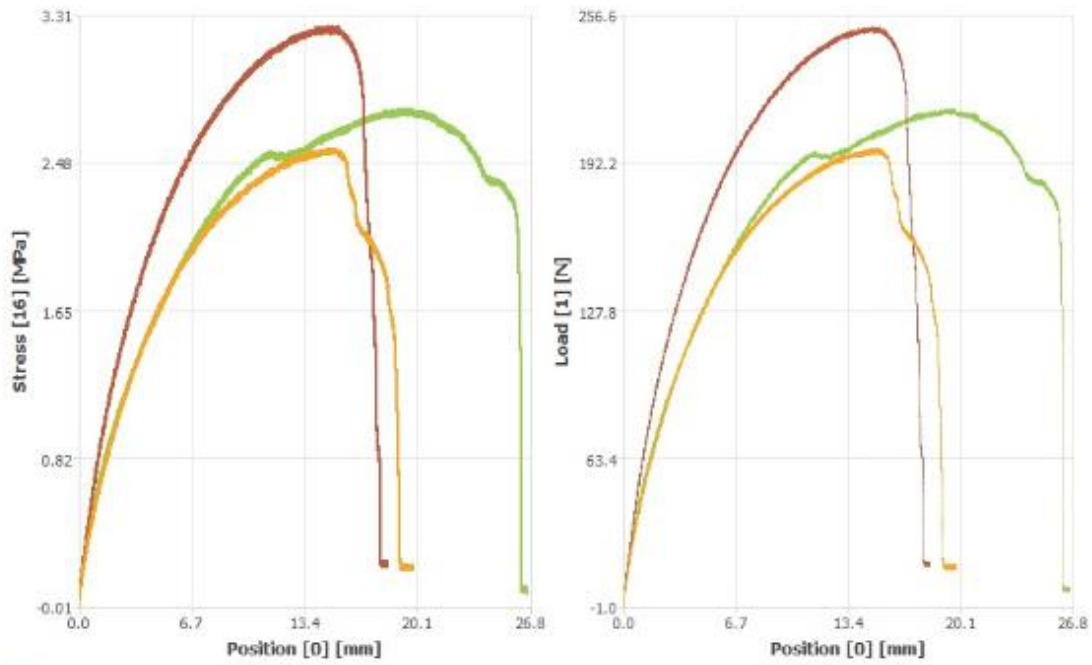
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	245.3	3.1	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	265.9	3.3	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	332.0	4.1	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	230.4	2.9	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	239.1	3.0	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + MERCERIZADO AL 6%



Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	214.4	3.0	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	223.7	3.2	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	286.6	4.1	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	199.4	2.8	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	225.2	3.2	LO: 1, WO: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 3 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + MERCERIZADO AL 6%



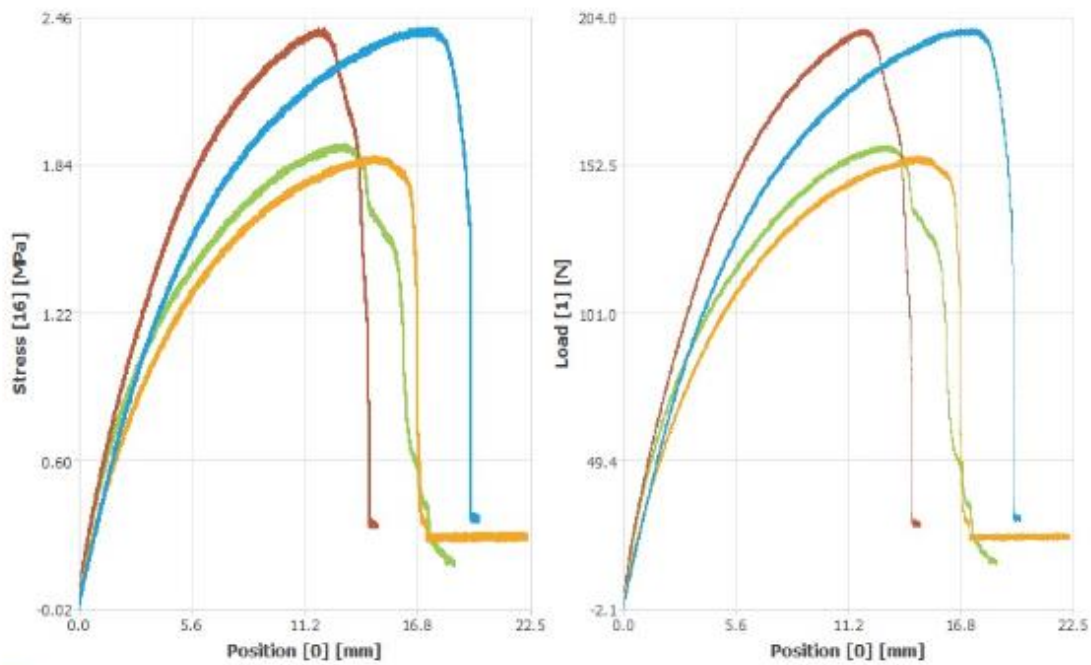
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	216.0	2.8	LO: 1, W0: 1 [mm]

Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	251.5	3.2	LO: 1, W0: 1 [mm]

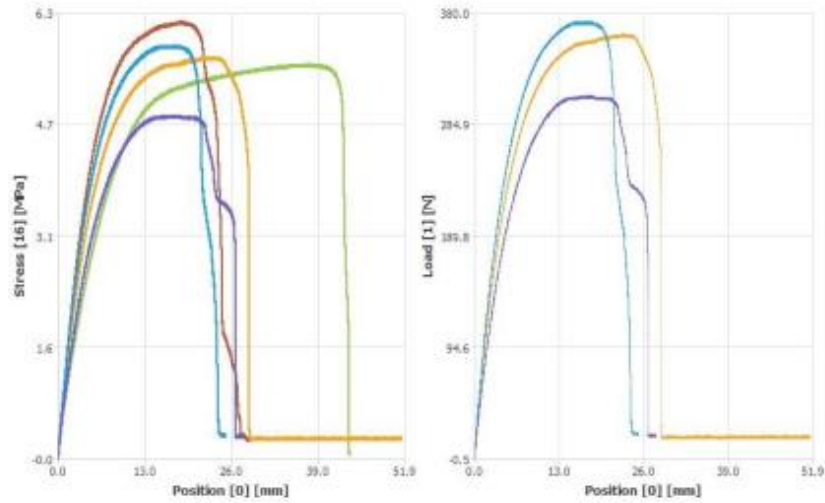
  

Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	198.4	2.6	LO: 1, W0: 1 [mm]

**ENSAYO MECANICO A TENSION**  
**NORMA D638**
**PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO**
**4 - ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO**  
**PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + MERCERIZADO AL 6%**


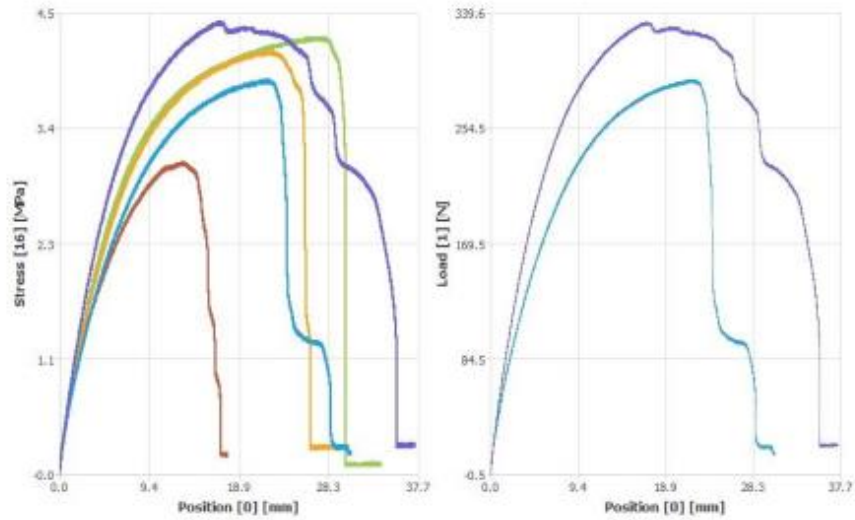
Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	159.8	1.9	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	199.9	2.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	155.6	1.9	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	199.9	2.4	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 10% + MERCERIZADO AL 8%



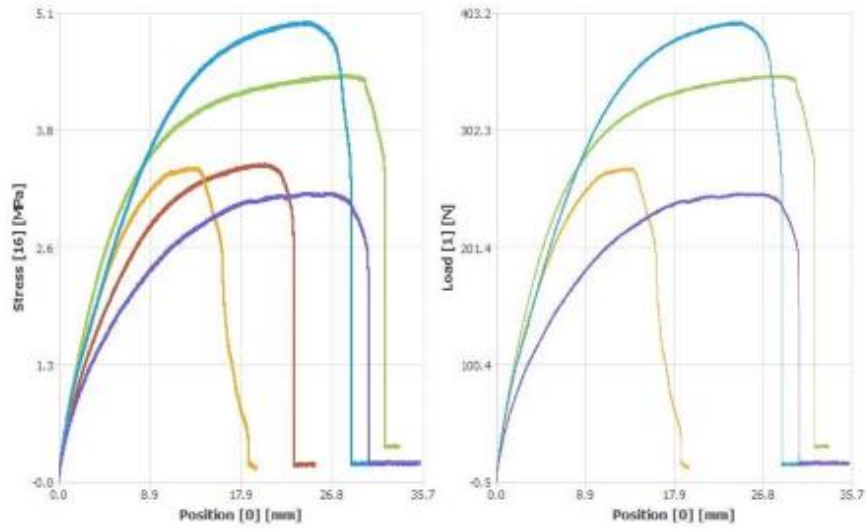
Test	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
Test 1	355.6	5.6	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	393.8	6.2	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	361.8	5.7	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	372.6	5.8	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	309.2	4.8	LO: 1, W0: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 20% + MERCERIZADO AL 8%




Test 1	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	321.6	4.3	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 2	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	229.8	3.1	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 3	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	310.7	4.2	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 4	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	290.2	3.9	LO: 1, WO: 1 [mm]
Test 5	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
	332.9	4.5	LO: 1, WO: 1 [mm]

ENSAYO MECANICO A TENSION  
 NORMA D638  
 PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 ENSAYO A TENSION: PROBETA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD + FIBRA DE GUADUA + MERCERIZADO  
 PORCENTAJE DE FIBRA: FIBRA DE GUADUA AL 30% + MERCERIZADO AL 8%




Test	Max Load [N]	Max Stress [MPa]	Dimensions
Test 1	349.4	4.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 2	273.2	3.5	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 3	270.0	3.4	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 4	395.3	5.0	LO: 1, W0: 1 [mm]
Test 5	248.4	3.1	LO: 1, W0: 1 [mm]

## Anexo 2: Informe Microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier



**CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS  
REGIONAL DISTRITO CAPITAL**

**Informe de Resultados**



---

<b>ID Informe:</b>	CME-19-299-1
--------------------	--------------

DATOS DEL CLIENTE			
No. Cotización	CME-19-299-1	NIT	1030637337
Nombre de la empresa / cliente	UNIVERSIDAD SANTO TOMAS	Ciudad	BOGOTÁ
Nombre del contacto	CARLOS VASQUEZ	E-mail	carlosvasquez@usantotomas.edu.co
Dirección	Tv 35 #278-57 Sur		
Teléfono	3123975115		

RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción Item ensayo:	2019-08-13	Fecha ejecución del ensayo:	2019-08-14
Fecha emisión del Informe:	2019-08-30	Ciudad de emisión el Informe:	Bogotá D.C.

<b>ANALISTA:</b>	Carlos Montañez Meltrán
<b>EQUIPO UTILIZADO:</b>	SHIMADZU #Tracer-100; Fourier Transform Infrared Spectrophotometer
<b>MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ITEM DE ENSAYO:</b>	Procedimiento interno: P-036 Procedimiento de preparación de Items para análisis químico

ID Lab	CME-19-299-1-1	ID Cliente	Prueba 1	Descripción del Item de ensayo	Acido acético y clorito 10% PMS
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 1: Mayor coincidencia: 990/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-2	ID Cliente	Prueba 2	Descripción del Item de ensayo	Mercerizado 6% 20% P-3
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 2: Mayor coincidencia: 940/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-3	ID Cliente	Prueba 3	Descripción del Item de ensayo	Mercerizado 2% 30% P-3
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 3: Mayor coincidencia: 982/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-4	ID Cliente	Prueba 4	Descripción del Item de ensayo	Mercerizado 6% 30% P-1
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 4: Mayor coincidencia: 978/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-5	ID Cliente	Prueba 5	Descripción del Item de ensayo	Acido acético y clorito 30% P-3
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 5: Mayor coincidencia: 982/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-6	ID Cliente	Prueba 6	Descripción del Item de ensayo	OX-8 30% P-2
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 6: Mayor coincidencia: 988/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-7	ID Cliente	Prueba 7	Descripción del Item de ensayo	OX-8 30% P-4
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 7: Mayor coincidencia: 978/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

ID Lab	CME-19-299-1-8	ID Cliente	Prueba 8	Descripción del Item de ensayo	Fibra natural 100% P-1
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 8: Mayor coincidencia: 977/1000. Library: 146 - ATR-Polymer2. Name: D_Polyethylene_Oxidized. Comment: Polyethylene, Oxidized					

Versión: 005  
 Código: F-005

Documento controlado, prohibida su reproducción  
 parcial o total sin autorización

Página: 1 de 5



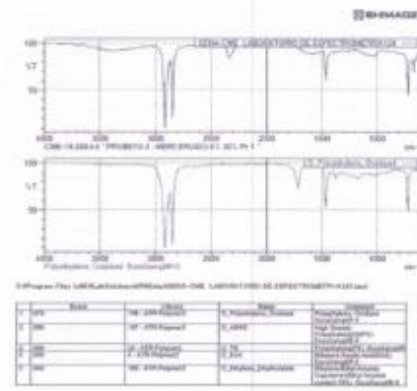
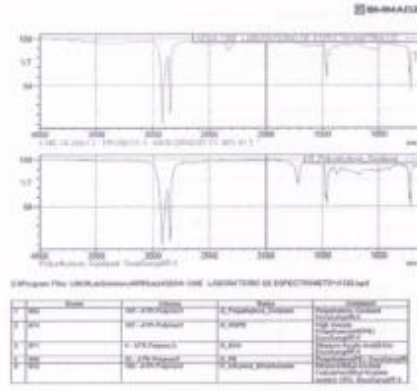
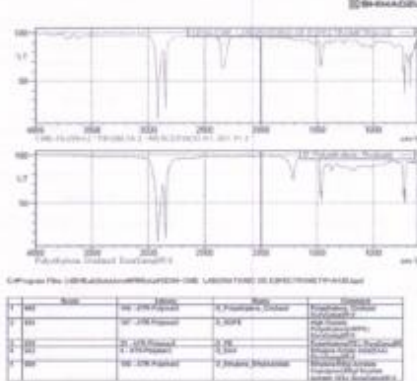
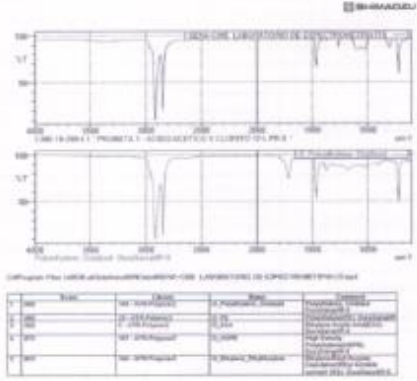
**CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS  
REGIONAL DISTRITO CAPITAL**

**Informe de Resultados**

ID Informe	CME-19-299-I
------------	--------------

ID Lab	CME-19-299-I-9	ID Cliente	Probeta 9	Descripción del ítem de ensayo	Hipoclorito sodio 20% Pr 2
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 9: Mayor coincidencia: 715/1000. Library: 121 - T-Polymer2. Name: T_PE_Chlorinated-1. Comment: Polyethylene, Chlorinated(Chlorine content 25%) with TALC					

ID Lab	CME-19-299-I-10	ID Cliente	Probeta 10	Descripción del ítem de ensayo	Hipoclorito sodio 30% Pr 2
MATERIAL DIFRACTOGRAMA 10: Mayor coincidencia: 825/1000. Library: 121 - T-Polymer2. Name: T_PE_Chlorinated-1. Comment: Polyethylene, Chlorinated(Chlorine content 25%) with TALC					



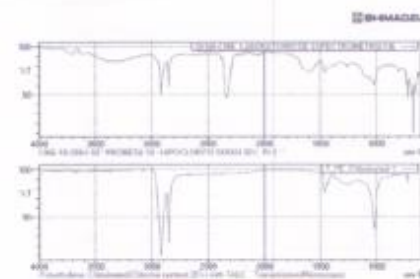
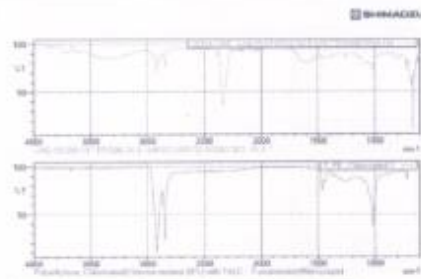




**CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS  
REGIONAL DISTRITO CAPITAL**

**Informe de Resultados**

ID Informa	CME-19-299-I
------------	--------------



Informe de Fase (C:\Programas\XRD\Software\XRD\LABORATORIO DE INVESTIGACIONES)

ID	Base	Libro	Nombre	Comentarios
1	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
2	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
3	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
4	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
5	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
6	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
7	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
8	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
9	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
10	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2

Informe de Fase (C:\Programas\XRD\Software\XRD\LABORATORIO DE INVESTIGACIONES)

ID	Base	Libro	Nombre	Comentarios
1	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
2	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
3	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
4	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
5	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
6	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
7	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
8	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
9	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2
10	01	01-070-0321	Ca(OH)2	Ca(OH)2

RESULTADOS DE ENSAYO: METALGRÁFICO - EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL			
Fecha de recepción ítem ensayo:	2019-08-13	Fecha ejecución del ensayo:	xx
Fecha emisión del informe:	xxxx	Ciudad de emisión el informe:	Sogotá D.C.

ANALISTA:	Andrés Fernando Gil Plasas - Oscar Fabian Mayorga Rodríguez
EQUIPO UTILIZADO:	Microscopio Metalográfico AXIO Observer Z1.m
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno: P-011 Procedimiento del manejo de la desbastadora y pulidora metalográfica y preparación de ítems de ensayo

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO:								
ID Lab	ID Cliente	Descripción del ítem de ensayo	Parámetro medido	Unidades	Resultados obtenidos	Incertidumbre expandida Uexp [h = 2]	Método de ensayo	Acreditado
CME-19-299-1-1	Probeta 1	Acido acético y clorito 10% Pr5	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-2	Probeta 2	Mercurizado 6% 30% Pr 3	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-3	Probeta 3	Mercurizado 2% 30% Pr 1	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-4	Probeta 4	Mercurizado 6% 30% Pr 1	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-5	Probeta 5	Acido acético y clorito 30% Pr 3	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-6	Probeta 6	OX-B 30% Pr 2	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-7	Probeta 7	OX-B 30% Pr 4	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-8	Probeta 8	Fibra natural 10% Pr 1	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-9	Probeta 9	Hipoclorito sodio 20% Pr 2	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO
CME-19-299-1-10	Probeta 10	Hipoclorito sodio 30% Pr 2	OBSERVACIÓN	µm	VER IMÁGENES ANEXAS	NR	Método interno	NO



CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS  
REGIONAL DISTRITO CAPITAL

Informe de Resultados

ID Informe	CME-19-299-1
------------	--------------

OBSERVACIONES DEL CLIENTE	
Ninguna	
OBSERVACIONES DEL LABORATORIO	
Incertidumbre expandida U <sub>95p</sub> NI. No reporta	
OBSERVACIONES GENERALES	
<p>1. No se aplica muestra, el ítem de ensayo es suministrado por el cliente a los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió de parte del cliente.</p> <p>2. Este informe emitido por los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS, contiene los resultados únicamente de los ítems sometidos a ensayo, no implica juicio o evaluación de conformidad sobre partes o lotes.</p> <p>3. Información adicional se puede consultar en los registros de los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS.</p> <p>4. Los ítems de ensayo se mantendrán bajo custodia de los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS; durante el tiempo requerido para la realización de los ensayos, una vez finalizados los mismos, éstos son entregados al cliente junto con el informe de resultados, en caso de no ser.</p> <p>5. Una vez emitido el informe de resultado original en físico y se envía por correo electrónico, el cliente cuenta con 12 meses para el retiro del mismo.</p> <p>6. La información que el cliente le ha suministrado a los laboratorios, junto con la generada en los ensayos de sus ítems y este informe, se mantiene en absoluta confidencialidad por parte de los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS.</p> <p>7. Los resultados consignados en este informe son propiedad del cliente, por ningún motivo los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS, los suministra o comunica a terceros a menos que el cliente autorice por escrito.</p> <p>8. Este informe de resultados no se puede reproducir parcialmente sin la aprobación escrita de los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS. El laboratorio se extingue de responsabilidad cuando el cliente proporcione información que pueda afectar la validez de los resultados.</p> <p>9. Este informe es válido solo con la firma autorizada para emisión de informes, personal autorizado por el SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS.</p> <p>10. Es responsabilidad del cliente revisar el contenido de este informe y realizar las respectivas observaciones y/o solicitar aclaraciones a los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS cuando existan, antes de dar continuidad a trámites que implique el uso de este documento.</p> <p>11. El Centro de Materiales y Ensayos de la Regional Distrito Capital del SENA no autoriza a sus clientes, bajo ninguna circunstancia, para que hagan uso de su símbolo ni del símbolo de acreditación de ONAC y/o referencia a la condición de acreditado en sus publicaciones, publicidad, ni documentos de tipo comercial o transaccional.</p> <p>12. Cualquier queja o sugerencia de mejora, puede dirigirse al mail: <a href="mailto:laboratoriomateriales@msena.edu.co">laboratoriomateriales@msena.edu.co</a></p>	
Autoriza emisión del informe	
Firma	
<p>MAIBIO ENRIQUE HERNANDEZ CASTILLO COORDINADOR TÉCNICO LABORATORIOS CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS REGIONAL DISTRITO CAPITAL SENA Avenida 30 No. 17B-25 Sur. 596 00 50 Ext. 14924. Bogotá D.C., Colombia NIT 895 999034-1</p>	

FINAL DEL INFORME

Anexo 3: Ficha técnica Maquina Universal de Ensayos



www.besmaklab.com

**A) TECHNICAL SPECIFICATIONS**

<i>Frame:</i>	2 Column and Single or Double Working Area
<i>Electronic Unit:</i>	EDC Controller
<i>Control:</i>	1) EDC Controller 2) RMC Remote Control 3) Software Test&Motion
<i>Electronic Control Unit Resolution:</i>	18 - 24bit (according to costumers requirement)
<i>Loading Accuracy:</i>	0.001 mm/min. or 0.01 kN/s
<i>Load Accuracy Range:</i>	%1 to %100 of the capacity
<i>Load Control Accuracy:</i>	±0.5% (Class 0.5)
<i>Loading Control Speed:</i>	0,001 mm/min. – 500 mm/min. (according to costumers requirement)
<i>Data Transfer Speed:</i>	1000Hz – 5000Hz (optional)
<i>Capacity:</i>	2 kN up-to 500 kN (contact us for other capacities)
<i>Vertical Test Area:</i>	500 - 4500 mm (variable according to capacity and costumers requirement)
<i>Horizontal Test Area:</i>	400 - 1200 mm (variable according to capacity and costumers requirement)
<i>Dimensions (width x length x height) mm :</i>	955 x1050 x 2300 (variable according to capacity and costumers requirement)
<i>Weight:</i>	(variable according to capacity)
<i>Software:</i>	Test&Motion
<i>Appropriate Ambiance Temperature:</i>	10°C~40°C, Humidity <80%
<i>Power:</i>	220 V or 380 V, 50/60Hz

Anexo 4: Ficha técnica Phenom XL (Equipo SEM)

	Phenom XL
Light optical magnification	3 - 16x
Electron optical magnification range	80 - 100,000x
Resolution	< 14 nm
Digital zoom	Max. 12x
Light optical navigation camera	Color
Acceleration voltages	Default: 5 kV, 10 kV and 15 kV Advanced mode: adjustable range between 4.8 kV and 20.5 kV imaging and analysis mode Secondary Electron Detector
Vacuum modes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge reduction mode (low vacuum mode)</li> <li>• High vacuum mode</li> <li>• Medium vacuum mode</li> </ul>
Detector	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BSD</li> <li>• EDS (optional)</li> <li>• SED (optional)</li> </ul>
Sample size	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. 100 mm x 100 mm</li> <li>• Up to 36 x 12 mm pin stubs</li> </ul>
Sample height	Max. 65 mm

Anexo 5: Ficha técnica IR Tracer-100 (Equipo FTIR)

## IRTracer-100

---

### Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

#### Specifications

---

<b>Interferometer</b>	Michelson interferometer (30° incident angle) Equipped with Advanced Dynamic Alignment system Sealed interferometer with auto dryer
<b>Beam splitter</b>	Germanium-coated KBr for Middle IR (Standard) Germanium-coated CsI for Middle/Far IR (Optional) Silicon-coated CaF <sub>2</sub> for Near IR (Optional)
<b>Light source</b>	High-energy ceramic for Middle/Far IR (Standard) Tungsten lamp for Near IR (Optional)
<b>Detector</b>	DLATGS detector with temperature control for Middle/Far IR (Standard) MCT (Hg-Cd-Te) with liquid nitrogen cooling for Middle/Near IR (Optional) InGaAs for Near IR (Optional)
<b>Wavenumber range</b>	7,800 to 350 cm <sup>-1</sup> (Standard) 12,500 to 240 cm <sup>-1</sup> (Optional)
<b>Resolution</b>	0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 cm <sup>-1</sup> (Middle/Far IR) 2, 4, 8, 16 cm <sup>-1</sup> (Near IR)
<b>Dimensions</b>	600 (W) x 665 (D) x 295 (H) mm
<b>Weight</b>	47 kg