

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS COMPUESTOS POLIMÉRICOS  
REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES LINO, CAÑAMO Y YUTE**

**JESUS JAVIER QUIROGA VALDEZ**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y  
QUÍMICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, Julio 2 de 2021**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS COMPUESTOS POLIMÉRICOS  
REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES LINO, CAÑAMO Y YUTE**

**JESUS JAVIER QUIROGA VALDEZ**

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Directora: DRA. SONIA ESPERANZA REYES GÓMEZ**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y  
QUÍMICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**Pamplona, Julio 2 de 2021**

## Dedicatoria

¡Que nadie se quede afuera, se los dedico a todos!

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

A mi novia que con su apoyo incondicional estuvo presente en todo este proceso, a través de sus consejos, de su amor, y paciencia me ayudo a concluir esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios primeramente por bendecirme e iluminarme en todo este proceso. También agradezco a mis padres, hermanos y abuela por su esfuerzo y apoyo para poder culminar mis estudios, a la Universidad de Pamplona por ser las aulas de mi formación profesional y al cuerpo de docentes de Ingeniería química por la enseñanzas y aportes que fortalecieron mis conocimientos para ser quien soy ahora. A mis compañeros y amigos que a lo largo del tiempo se convirtieron en una familia y que cada momento compartido será siempre recordado.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL problema y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1 MATERIALES COMPUESTOS.....	14
<b>3.1.1 Matrices y Refuerzos</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.2 Materiales compuestos biodegradables</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 MATRIZ POLIMÉRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.1 Ácido Polilactico (PLA)</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.2 Propiedades y Biodegradabilidad del PLA</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3 FIBRAS COMO MATERIALES DE REFUERZO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.1 Materiales compuestos de polímeros con fibras naturales (NFCS)</b> .....	<b>22</b>
<b>4.FIBRAS DE REFUERZO NATURALES VEGETALES</b> .....	<b>22</b>
4.1 cáñamo.....	23
4.2 lino.....	24
4.3 yute.....	25
<b>5. Tratamientos químicos para mejorar la compatibilidad matriz-fibra</b> .....	<b>26</b>
<b>5.1 Refuerzos tejidos y no tejidos producidos a partir de fibras naturales</b> .....	<b>27</b>

5.2 TIPOS DE TEJIDO .....	28
5.2.1 Tejido plano.....	28
5.2.2 Tejido Sarga .....	29
5.2.3 Tejido Satén.....	29
5.2.4 No tejidos .....	30
<b>6. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.....</b>	<b>30</b>
6.1 Proceso de Extrusión .....	31
6.2 Proceso de Compresión .....	32
6.3 Proceso de Inyección .....	33
7. PROPIEDADES MECANICAS .....	34
7.1 PRUEBA DE FLEXIÓN .....	34
7.2 PRUEBA DE TRACCIÓN .....	35
7.2.1 Resistencia a la Tracción.....	37
7.3 PRUEBA DE IMPACTO .....	37
7.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS CÁÑAMO, LINO Y YUTE	38
7.5 RESPUESTA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN UNITARIA EN FIBRAS NATURALES.....	39
<b>8. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>40</b>
8.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DE YUTE PICADO (2,5%, 3,75%) Y YUTE TEJIDO (11,6%) EN MATRIZ DE PLA. ....	40
8.1.1 Análisis mecánico por resistencia a la tracción.....	40
8.1.2 Análisis mecánico por flexión .....	42
8.1.3 Análisis de la prueba de impacto .....	43
8.2 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON VARIACIÓN EN LA ARQUITECTURA DEL REFUERZO DE FIBRAS DE LINO, YUTE Y CÁÑAMO EN MATRIZ DE PLA .....	44

8.2.1	Prueba de tracción .....	44
8.2.2	Prueba de flexión.....	45
8.2.3	Prueba de impacto .....	46
8.3	RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS CORTAS DE LINO, YUTE Y CÁÑAMO EN MATRIZ DE PLA 47	
9.	BIODEGRADACIÓN .....	49
9.1	materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras vegetales.....	49
9.2	degradación de las fibras naturales en polímeros reforzados .....	50
10.	RESUMEN DE LOS ANÁLISIS .....	50
11.	CONCLUSIONES.....	51
12.	RECOMENDACIONES .....	52
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas del polímero PLA .....	20
Tabla 2 Tiempo de descomposición de distintos materiales.....	23
Tabla 3 Tipos de tratamiento químico de la fibra natural y sus efectos. ....	27
Tabla 4. Dureza y tensión de las fibras naturales.....	35
Tabla 5 Propiedades de las fibras vegetales.....	39
Tabla 6 Resultados prueba de tracción .....	41
Tabla 7 Resultados del Ensayo de Flexión .....	43
Tabla 8 Resultados obtenidos prueba de impacto.....	44
Tabla 9 Valores reportados en el ensayo de tracción.....	45
Tabla 10 Valores reportados en el ensayo de flexión .....	46
Tabla 11 Valores reportados en el ensayo de impacto.....	47
Tabla 12 Datos de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos por fibras cortas .....	48



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de los tres tipos de materiales compuestos. (a) Con partículas, (b) reforzado con fibras, y (c) laminar.....	14
Figura 2. Configuración básica de un material compuesto.....	16
Figura 3. Clasificación de polímeros biodegradables.....	17
Figura 4. Estructura química del ácido poliláctico PLA.....	18
Figura 5 Proceso de producción de PLA .....	19
Figura 6. Fibras naturales clasificadas según su origen.....	22
Figura 7 Constitución de un tallo de cáñamo.....	24
Figura 8 Secciones transversales y representaciones esquemáticas de lino a diferentes escalas, desde el tallo hasta las fibrillas de celulosa. ....	25
Figura 9 Morfología de la fibra de yute.....	26
Figura 10 Estructura básica del tejido plano.....	28
Figura 11. Estructura del tejido sarga o diagonal. ....	29
Figura 12 Estructura del tejido satén o raso.....	30
Figura 13. (a) Estructura al azar de un no tejido y (b) estructura de un tejido. ....	30
Figura 14. Proceso de extrusión.....	31
Figura 15 Moldeo de compresión. ....	32
Figura 16. Proceso de inyección.....	33
Figura 17 Prueba de flexión.....	35
Figura 18 Ensayo a tracción de los materiales.....	36
Figura 19 Ensayo de tracción.....	36
Figura 20. Péndulo de impacto Charpy.....	38
Figura 21. Curva típica esfuerzo vs. deformación-fibras naturales. ....	39

## INTRODUCCIÓN

Los materiales que se utilizan actualmente en el envasado de alimentos, bebidas, productos médicos y farmacéuticos, así como en aplicaciones industriales, no son degradables ya que son hechos a base de vidrio, metales, plásticos sintéticos, entre otros. Además, se han hecho evidentes los problemas de contaminación ambiental que estos materiales han generado (Abdul Khalil et al., 2016). Actualmente la mayoría de las industrias buscan reducir el impacto en el medio ambiente durante el desarrollo de sus actividades manufactureras. Esto se ha notado en la creciente demanda de materiales biodegradables en el campo de los empaques y envases de alimentos, que es el sector más grande de la industria del plástico.

En las últimas décadas los grupos de investigación en la academia y la industria han estado trabajando activamente para el desarrollo de compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales debido a las extraordinarias propiedades de dichas fibra naturales, entre las que se mencionan: su alta disponibilidad, con una producción mundial que bordea los 60 millones de toneladas anuales (Senthilkumar et al., 2018); sus características únicas en comparación con otros materiales de refuerzo y relleno entre las que se incluyen renovabilidad, biodegradabilidad, bajo costo, reciclabilidad y baja densidad, junto con apreciables propiedades mecánicas que las convierten en un sustituto ecológico.(Lakshmi Narayana & Bhaskara Rao, 2021)(Berenice Vargas Reyes, 2013)

Los materiales compuestos hechos de fibras naturales y biopolímeros son completamente biodegradables y se denominan “compuestos verdes” debido a sus propiedades beneficiosas para el medio ambiente (Freire et al., 2019). Algunos de los polímeros biodegradables empleados como matriz polimérica son el ácido poliláctico (PLA), los ésteres de celulosa, los polihidroxicarbonos (PHA) y los polímeros de almidón. En cuanto a las fibras naturales para la fabricación de estos materiales reforzados se ha reportado el uso de kenaf, yute, plátano, piña, granos de elefante, cáñamo, lino, yute, bambú, abacá y cascarilla de arroz (Pozo Morales, 2019). Los materiales compuestos de matriz polimérica y fibra natural son una apuesta al reemplazo de diversas materias primas que presentan como principal desventaja su alto peso. Asimismo, se toma ventaja de la baja densidad y la capacidad de las fibras vegetales a estirarse y recuperar su tamaño una vez que se retira aplicación de un esfuerzo (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019). Como ventajas para la utilización de refuerzos de fibras naturales cabe

mencionar que se pueden utilizar incluso después del desgaste y que los costos de su procesamiento no son altos. Además, se resalta la flexibilidad de diseño y fácil moldeado de piezas complejas (Cintia Silvana, 2006). Sin embargo, la fabricación de este tipo de materiales compuestos presenta ciertos desafíos como el acoplamiento entre la fibra y el polímero. Ya que las fibras contienen celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y otras sustancias cerosas, éstas tienen afinidad para absorber la humedad del entorno, lo cual hace que las fibras se unan débilmente con la matriz polimérica. Este problema se ha abordado mediante el uso de técnicas de modificación de superficies que mejoran la resistencia entre las fases (Suresh et al., 2021).

En esta monografía se realizó una revisión bibliográfica de los materiales con matriz polimérica de PLA reforzados con las fibras naturales lino, yute y cáñamo. Se estudiaron los tipos de refuerzos, los tratamientos químicos para aumentar la compatibilidad fibra-matriz, la procesabilidad de estos materiales, y la influencia de los tipos de fibras naturales sobre la biodegradabilidad y las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y la prueba de impacto.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

En el escenario actual, existe un aumento de la conciencia sobre la contaminación ambiental por residuos industriales que ha llevado a reemplazar los materiales sintéticos nocivos por materiales más ecológicos. El uso de plásticos se incrementa especialmente para uso doméstico y comercial. El uso de productos plásticos conduce a la acumulación de desechos no biodegradables y son una amenaza para el sistema ecológico.

La contaminación que se presenta con fibras sintéticas y productos plásticos, han sobrepasado sus límites evidenciando residuos de estos materiales desechados en todas las partes del mundo. Inclusive playas vírgenes contienen desechos plásticos de tamaño microscópico mezclado en la arena. El constante uso material plástico en el mundo acarrea producir grandes cantidades de petróleo para su fabricación y cuando dejan de utilizarse pasan a ser parte de miles de toneladas de desechos (Páez & Zarate, 2012).

Por lo tanto, durante la última década se ha llevado a cabo una extensa investigación sobre la biodegradación de los plásticos. Las fibras naturales junto con los materiales sintéticos biodegradables se pueden utilizar para desarrollar biocompuestos que tienen beneficios para el medio ambiente como la biodegradabilidad, la capacidad de renovación del material base y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (Rajeshkumar et al., 2021).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Realizar un estudio comparativo de las propiedades mecánicas y la biodegradabilidad de biopolímeros de PLA reforzados con las fibras naturales cáñamo, yute y lino.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar los métodos de fabricación reportados para los polímeros PLA con fibras naturales de cáñamo, yute y lino como refuerzo.
- Recopilar y analizar las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, prueba de impacto) y la biodegradabilidad de polímeros naturales (PLA) reforzados con fibras naturales (cáñamo, yute y lino).
- Establecer la relación polímero-fibra natural que proporcione un incremento en las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, prueba de impacto) y la biodegradabilidad de estos materiales compuestos.

### 3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se comparte la información de materiales compuestos teniendo en cuenta (matriz-refuerzo) a utilizar basados en propiedades mecánicas y biodegradabilidad de estos, generando un conocimiento amplio, ofreciendo diferentes conceptos del problema tratado, debido a que posibilita alternativas en el torno al estudio del tema de la elaboración de compuestos reforzados con fibras naturales.

#### 3.1 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son materiales que constan de dos o más fases. Están diseñados con el único propósito de producir un mejor rendimiento mecánico que sus componentes. En general, una fase es más dura que las otras fases discontinuas y se conoce como matriz de fase continua, mejorada y de baja dureza. Como producto de las interacciones químicas y otros efectos del procesamiento, existe un paso adicional conocido como la interfaz entre el refuerzo y el sustrato. Las propiedades de los materiales compuestos dependen de las propiedades de las respectivas fases, su distribución y las interacciones entre ellas (Isaac M. Daniel, 2006).

Los materiales compuestos se pueden clasificar según la naturaleza del sustrato (polímero, cerámica o metal) y la naturaleza, forma y tamaño del refuerzo (fibras granulares continuas largas o cortas, fibras, etc.). Asimismo, se clasifican en función de la forma o la naturaleza de la fase dispersa en materiales compuestos reforzados con partículas, filamentos o fibras (Figura 1). La unión de la matriz y la fibra es parte esencial en la resistencia de estos compuestos, los cuales poseen mayor resistencia que los elementos que los componen por separados. Estas fibras reciben la fuerza que es transmitida por el material de la matriz y son las que toleran la mayor parte de las fuerzas aplicadas a estos materiales (Donald R. Askeland, 1999).

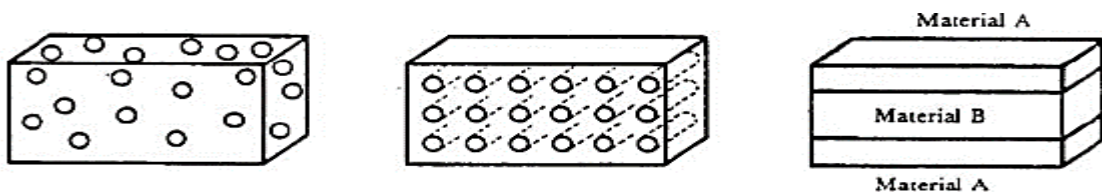


Figura 1. Comparación de los tres tipos de materiales compuestos. (a) Con partículas, (b) reforzado con fibras, y (c) laminar.

Fuente: (Donald R. Askeland, 1999)

Los compuestos continuos reforzados con fibras, que orientan las fibras en una dirección específica, son uno de los materiales más utilizados para crear excelentes propiedades mecánicas (Chawla, 1998).

### **3.1.1 Matrices y Refuerzos**

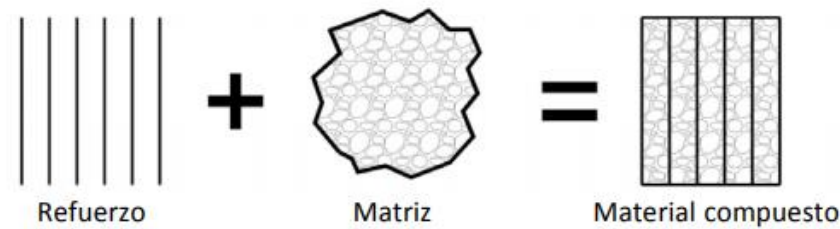
Existen tres tipos de matriz: (i) metálica, (ii) cerámica y (iii) polimérica. De manera general, del tipo de matriz que se utilice, dependerá el control principal de las propiedades eléctricas, mecánicas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del material compuesto.(Dávila et al., 2011)

El material utilizado como matriz afecta las propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del compuesto. Por ejemplo, las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, ductilidad, resistencia al impacto, etc., dependen del tipo de matriz, del tipo de refuerzo y de la arquitectura utilizada. El modo de falla del compuesto está fuertemente influenciado por el tipo de matriz y la compatibilidad con el refuerzo. Sin embargo, en el caso de propiedades eléctricas, la matriz puede dar al material la capacidad de aislar o conducir electricidad. Desde el punto de vista químico, estos son los factores que determinan la resistencia de los compuestos expuestos a las influencias ambientales.(Dávila et al., 2011)

En ese sentido, las matrices poliméricas se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones debido a su baja densidad, excelentes propiedades a temperatura ambiente, facilidad de moldeo y costo relativamente bajo. Hay tres tipos de matrices poliméricas: termoplásticos, termoestables y elastómeros. La matriz termoplástica se vuelve líquida cuando se calienta. Este ciclo reversible de endurecimiento y ablandamiento es responsable de su reciclabilidad. Algunos ejemplos de matrices termoplásticas son polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno (PET). Además, existen polímeros termoplásticos de origen natural como el ácido poliláctico (PLA) y el polihidroxibutirato (PHB), los cuales presentan propiedades muy similares al polietileno (PE), polipropileno (PP) y demás polímeros termoplásticos derivados del petróleo (Dávila et al., 2011).

Por otro lado, el papel principal del refuerzo es mejorar las propiedades de la matriz. Los refuerzos son componentes sintéticos que también pueden aportar propiedades como conductividad eléctrica o aislamiento térmico, estabilidad térmica y propiedades estructurales. Los refuerzos pueden ser partículas, fibras o elementos estructurales (Dávila et al., 2011). En

la Figura 2 se ilustra la configuración básica de un material compuesto (composite) reforzado con fibras.



**Figura 2. Configuración básica de un material compuesto.**

**Fuente:** (Dávila et al., 2011)

Desde un punto de vista técnico, los composites más importantes son aquellos en los que la fase dispersa está constituida por fibras. La mayoría de estos materiales mejoran la resistencia a la fatiga, la rigidez y las relaciones de resistencia a peso al combinar fibras rígidas y fuertes en una matriz más blanda y maleable. El material de la matriz transmite la carga a las fibras que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. El uso de fibras naturales como el cáñamo, el lino y el yute se incorporan como refuerzo en la base de polímero. Aunque este tipo de material tiene multitud de ventajas, cabe destacar que reduce los costes de producción y reduce el impacto en el medio ambiente. (Mazzanti et al., 2020)

### **3.1.2 Materiales compuestos biodegradables**

Los compuestos biodegradables se distinguen de los materiales convencionales por su bajo impacto ambiental en la fabricación, sus beneficios relacionados con la gestión de residuos y su capacidad para descomponerse en compuestos más simples. Se lleva a cabo bajo la influencia del medio ambiente. Estas propiedades deben ser comunes tanto a la matriz como al refuerzo que componen el material. Inicialmente en la década de 1990, la investigación sobre el uso de estas fibras vegetales en la producción de materiales compuestos no recibió mucha atención debido a su resistencia y rigidez en comparación con las fibras convencionales (carbono, aramida, vidrio), pero la reducción de costos asociada con la producción (por falta de requisitos técnicos), el bajo impacto ambiental de sus procesos de producción, su baja densidad (lo que permite reducir considerablemente la masa del compuesto) y las ventajas asociadas a la gestión de residuos derivados de este tipo de fibras comenzó a destacar entre los beneficios del uso de fibras naturales en la obtención de estos materiales (Bledzki, A., Reihmane, S. y Gassan, 1996).



### 3.2 MATRIZ POLIMÉRICA

Debido a las preocupaciones de seguridad ambiental asociadas con los polímeros petroquímicos, los investigadores han desarrollado polímeros biodegradables alternativos utilizando recursos naturales.

Un polímero, por tanto, es un compuesto orgánico, que puede ser de origen natural o sintético, con alto peso molecular, formado por unidades estructurales repetitivas llamadas monómeros. (Valero-Valdivieso et al., 2013)

La figura 2 muestra la clasificación de los polímeros biodegradables. Con la excepción del cuarto grupo de origen fósil, los primeros tres grupos de polímeros provienen de fuentes renovables. El primer grupo de la clasificación corresponde a los polímeros agrícolas derivados de la biomasa. El segundo grupo corresponde a polímeros obtenidos a partir de microorganismos, y el tercer grupo al que pertenece el ácido poliláctico (PLA) corresponde a polímeros obtenidos por síntesis de monómeros a partir de biomasa mediante biotecnología. El PLA es uno de los polímeros biodegradables más utilizados como refuerzo de matriz para compuestos naturales debido a sus propiedades mecánicas superiores en comparación con otros materiales (Maya Jacob John, 2007).

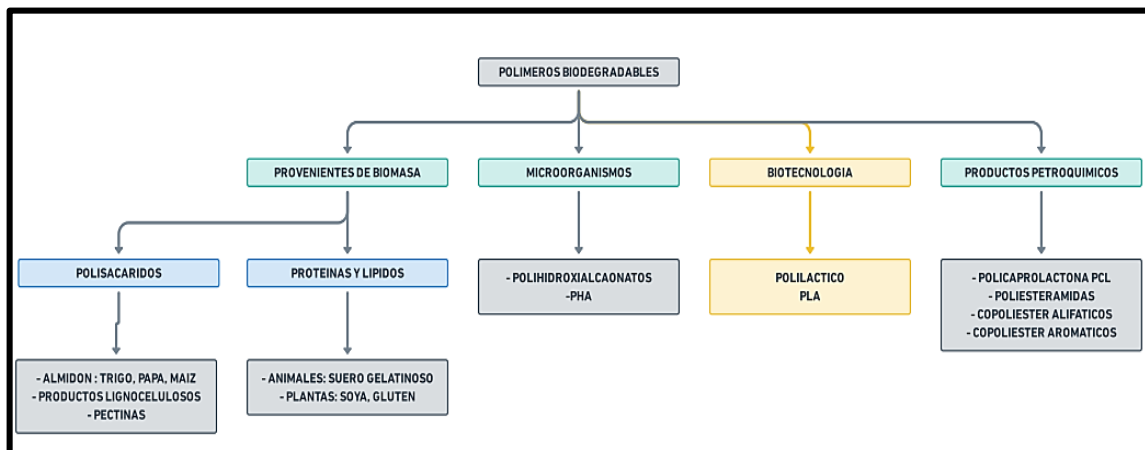


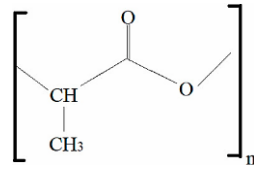
Figura 3. Clasificación de polímeros biodegradables.

Fuente: (Maya Jacob John, 2007).

#### 3.2.1 Ácido Poliláctico (PLA)

El Ácido poliláctico o PLA (Figura 3) es un polímero termoplástico, biodegradable, biocompatible y con propiedades mecánicas similares a las de otros polímeros derivados de hidrocarburos. Es un poliéster alifático  $(C_3H_4O_2)_n$  cuyo monómero principal es el ácido láctico

con fórmula  $C_3H_6O_3$ . Su monómero es un ácido carboxílico con un grupo hidroxilo.(Monroy, 2013)



**Figura 4. Estructura química del ácido poliláctico PLA.**

**Fuente:** (Farah et al., 2016).

Las diferentes etapas para la producción del PLA se muestran en la figura 4. La materia prima para la producción de PLA es el almidón que se encuentra abundantemente en la naturaleza como resultado del proceso fotosintético en las plantas (1). Actualmente se usa como principal fuente del almidón la mazorca, el arroz, la caña de azúcar, la remolacha, el trigo y la papa. Sin embargo, se están desarrollando nuevas tecnologías que permitan el uso de biomasa lignocelulosa como la paja del arroz, los restos del maíz, el bagazo, etc. A partir del proceso de hidrólisis enzimática del almidón se obtiene el monómero de glucosa (2) necesario para obtener el ácido láctico a partir de la fermentación (3). Después de la fermentación, se siguen básicamente dos rutas para la conversión del ácido láctico en PLA de alto peso molecular, una es la polimerización por condensación directa del ácido láctico y la segunda es la polimerización a partir de la apertura del anillo láctico (Erwin T.H. Vinka, 2003).

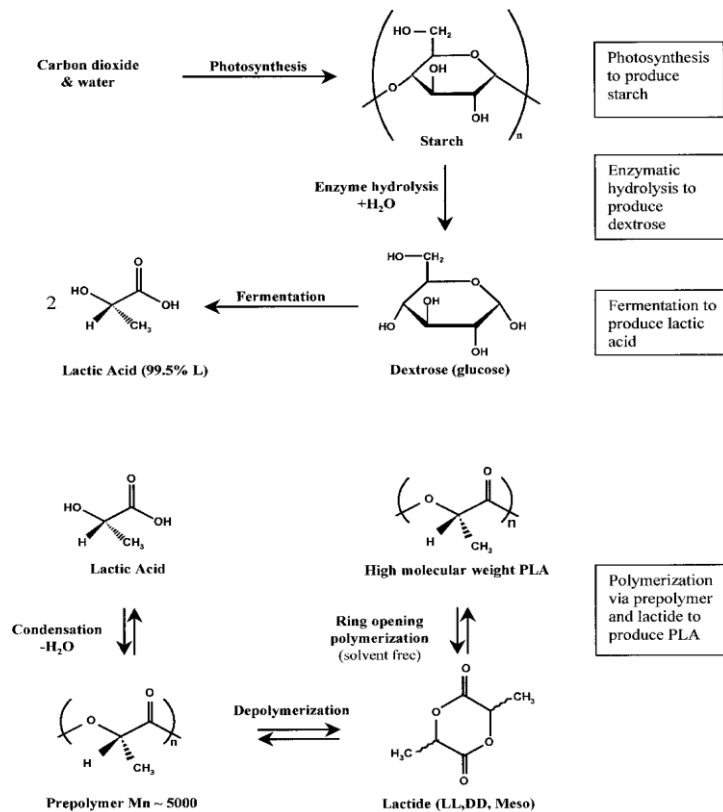


Figura 5 Proceso de producción de PLA

Fuente: (Erwin T.H. Vinka, 2003).

Los avances en la fermentación bacteriana de la glucosa a partir de diferentes recursos renovables como la mazorca, el arroz, la caña de azúcar, etc., han permitido costos de producción más económicos que las tecnologías usadas en la industria petroquímica. Actualmente, varias empresas desarrollan procesos para la producción de PLA con gran orientación en campos como las películas plásticas, empaques e ingeniería. (Monroy, 2013)

### 3.2.2 Propiedades y Biodegradabilidad del PLA

El ácido poliláctico PLA se ha convertido en el agente formador de biopelículas más utilizado debido a sus altas propiedades mecánicas, biodegradabilidad, transparencia y flexibilidad superiores en comparación con los polímeros convencionales (Ema et al., 2006). El PLA se sintetizó en 1932 mediante el calentamiento de ácido láctico al vacío. Pero el bajo peso molecular dificultó su adopción intersectorial. La polimerización directa y la polimerización por apertura de anillo son las técnicas de síntesis de PLA que permiten alcanzar PLA de alto peso molecular. La temperatura de procesamiento, el tiempo, los isómeros, la cristalinidad y el peso molecular son los factores principales que gobiernan las propiedades del polímero PLA

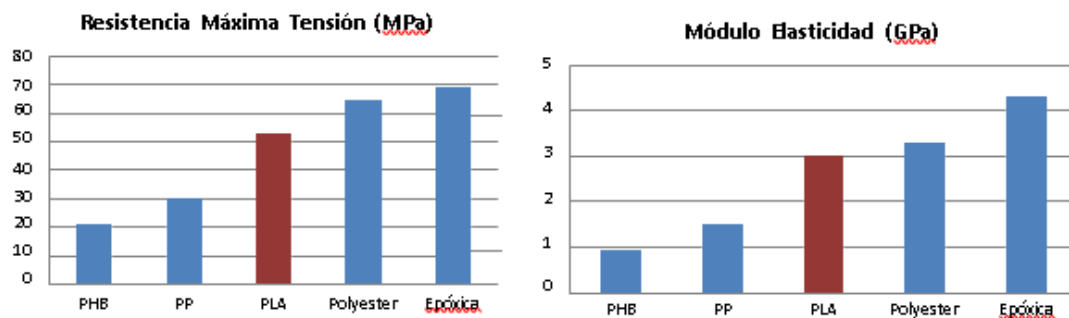
(Tabla 1). Las propiedades físicas, mecánicas y reológicas del PLA dependen de su temperatura de transición vítrea  $T_g$  (Farah et al., 2016).

**Tabla 1** Propiedades físicas y mecánicas del polímero PLA

PROPIEDAD	PLA
DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	1,25-1,36
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Mpa)	21-70
MÓDULO DE TRACCIÓN (Gpa)	3,5-4,1
DUREZA (Mpa)	82-88
DEFORMACIÓN DE LA FALLA (%)	4,0-7,0
TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)	150-175

Fuente: (Farah et al., 2016)(Ema et al., 2006)

En cuanto a sus propiedades, el PLA tiene buena resistencia a alimentos grasos, una excelente barrera a aromas y sabores, se sella fácilmente por acción de la temperatura, y tiene una buena transparencia y brillo. Estos activos ofrecen un gran valor y una variedad de aplicaciones comerciales (Erwin T.H. Vinka, 2003). También tiene mejores propiedades mecánicas que otros polímeros como PHB y PP, y propiedades comparables a plásticos como epóxidos y poliésteres utilizados como base para compuestos de alta calidad. La Gráfica 1 muestra las propiedades de tracción del PLA y otros polímeros.



**Gráfica 1** Propiedades Mecánicas del PLA en comparación a otros polímeros

Fuente: (Bodros et al., 2007)(Isaac M. Daniel, 2006)

La biodegradación del PLA se produce de dos formas. Uno se debe a la hidrólisis debido a la presencia de agua y el otro se debe a la actividad microbiana.

El polímero láctico es el dímero cíclico del ácido láctico con dos isómeros ópticos, el d y el L. El polímero L-láctico (L.P.L.A) corresponde al isómero natural mientras que el dL-láctico (D.L.P.L.A) corresponde a la mezcla sintética del d-láctico y el L-láctico.(Dávila et al., 2011)

Cuanto mayor sea el contenido de L.P.L.A, mayor será la cristalinidad y más lenta será la descomposición del PLA. En presencia de PLA, cuando es fuerte y de alto peso molecular, los microorganismos (hongos y bacterias) pueden colonizar la superficie del polímero y secretar enzimas que descomponen el polímero en pedazos más pequeños. La colonización de la superficie depende de factores como la tensión superficial, la porosidad y textura de la superficie y la accesibilidad a las cadenas de polímeros. Los grupos hidrófilos de la enzima (COOH, OH, NH) atacan los grupos éster de las dos cadenas del polímero por hidrólisis seguida de oxidación, de esta forma reducen el polímero a fragmentos de peso molecular inferiores a 500 g/mol, los cuales pueden ser digeridos por los microorganismos. Las reacciones enzimáticas ocurren generalmente en medio acuoso. Las condiciones necesarias para que se pueda producir el proceso de biodegradación son: presencia de microorganismos, oxígeno, humedad, nutrientes minerales, temperaturas entre 20 a 60°C dependiendo del microorganismo y pH entre 5-8 (Torres Concha Stein; Bruno, 2014).

El mecanismo de hidrólisis catalítica se debe principalmente a la ruptura de los enlaces éster y depende principalmente de la humedad y la temperatura. La acción bacteriana tiene lugar si el peso molecular promedio  $M_n = 10,000$ . Así, el PLA se descompone principalmente en dióxido de carbono y agua (Fukushima et al., 2009).

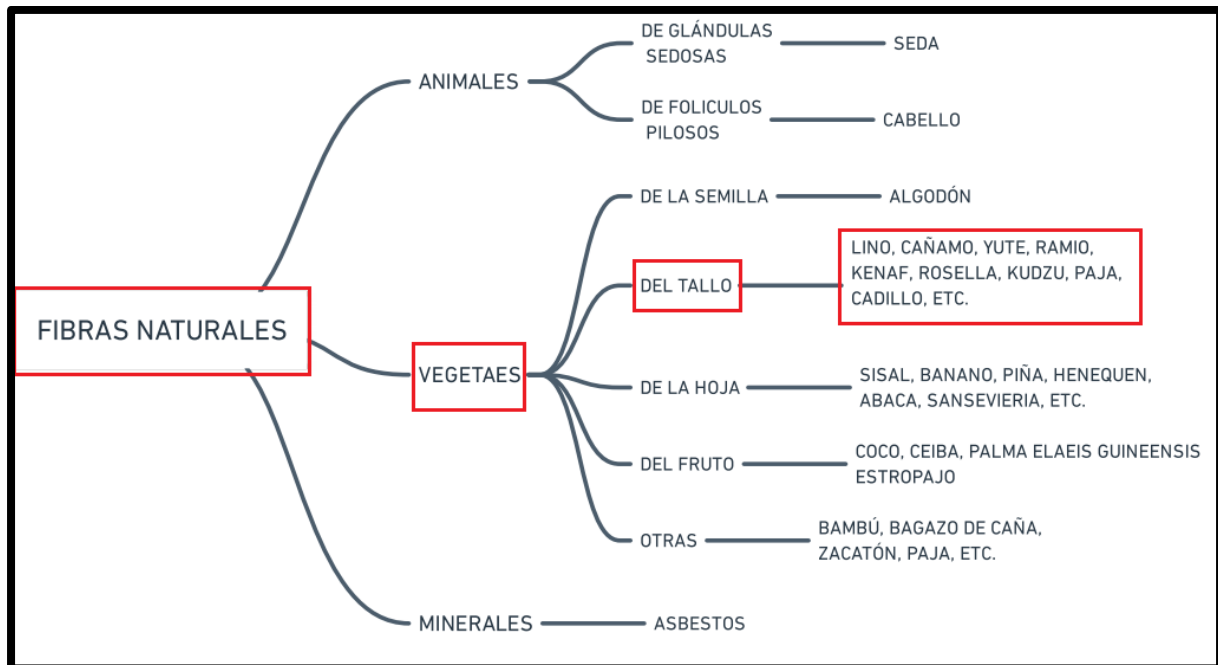
### **3.3 FIBRAS COMO MATERIALES DE REFUERZO**

Las fibras son todos aquellos materiales, de origen natural (animal o vegetal), que se pueden hilar, trenzar o utilizar para fabricar telas mediante operaciones de trenzado, fieltado o tejido. Una fibra es un sólido relativamente flexible, microscópicamente homogéneo, con una pequeña sección transversal y una elevada relación longitud-anchura.(E.Nicolas- & Luis, 2015) Por su parte, se llama fibra a cada uno de los filamentos que, dispuestos en haces, entran en la composición de los hilos y tejidos, ya sean minerales, artificiales, vegetales o animales. La fibra textil es la unidad de materia de todo textil sus características son su finura y gran longitud (Adot, 2010).

Todas las fibras vegetales están compuestas de celulosa, mientras que las fibras animales están compuestas principalmente de proteínas. Las fibras vegetales se clasifican en varios tipos según

la parte de la planta de la que están hechas. Se clasifican en fibras de semillas y frutos, tallos blandos, fibras sólidas u hojas (Maya Jacob John, 2007).

La Figura 5 muestra una clasificación general de las fibras naturales según su origen.



**Figura 6. Fibras naturales clasificadas según su origen.**

**Fuente:** (Velásquez Restrepo et al., 2016).

### 3.3.1 Materiales compuestos de polímeros con fibras naturales (NFCS)

Los compuestos poliméricos reforzados son combinaciones de polímeros y materiales de refuerzo que proporcionan un incremento en una propiedad significativa y/o mejoras en el costo. Para tener una estructura eficaz, debe de existir una fuerte unión entre la resina y el refuerzo, los refuerzos generalmente vienen en formas de fibras, tanto las resinas termoplásticas como las termofijas pueden ser usadas para la generación de estos (Berenice Vargas Reyes, 2013).

Las propiedades mecánicas de los plásticos reforzados son determinadas en gran medida por el tipo de refuerzo, su forma, y posicionamiento. Un alto contenido de refuerzo fibroso produce una alta resistencia a la tracción (que aumenta con la longitud de la fibra), pero no necesariamente confiere una mayor rigidez (Martin et al., 2013).

## 4.FIBRAS DE REFUERZO NATURALES VEGETALES

Existen además estudios que cuantifican el impacto ambiental que supone la producción de fibras vegetales. Los datos revelados por estos informes muestran las ventajas ecológicas de la

producción de fibras vegetales como el lino frente a la producción de fibras sintéticas. Destacan que la mayor parte de indicadores ambientales como son el cambio climático, la acidificación, el consumo de energía de los procesos son favorables a la producción de fibras de lino. Además, presentan claves para la optimización de los procesos de producción de fibras vegetales con el objetivo de reducir los métodos de extracción mecanizados (que suponen altos costes energéticos) y el uso de productos químicos como fertilizantes en los cultivos que incrementa problemas como la eutrofización (problema que afecta a los ecosistemas acuáticos). Estos trabajos demuestran que la producción de fibras vegetales se presenta como una alternativa atractiva desde el punto de vista medioambiental a la producción de fibras tradicionales como la fibra de vidrio. También es importante destacar las ventajas que conlleva desde el punto de vista de la gestión de residuos el uso de materiales de origen natural, lo que está relacionado con la biodegradabilidad de los materiales naturales frente al tiempo de descomposición de los materiales sintéticos o minerales. A continuación, en la Tabla 2 se reflejan los valores medios del tiempo de descomposición de distintos materiales. De esta forma queda patente la diferencia, relativa al impacto ambiental, que supone el desecho de materiales naturales frente a otros (Pozo Morales, 2019).

**Tabla 2 Tiempo de descomposición de distintos materiales.**

<b>MATERIAL</b>	<b>TIEMPO DE DESCOMPOSICIÓN</b>
<b>PAPEL CONVENCIONAL</b>	1 MES
<b>PBH</b>	1 MES
<b>ALGODÓN</b>	1-5 MESES
<b>ALMIDON</b>	2 MESES
<b>BAMBOO</b>	1 AÑO
<b>CHICLE DE MASCAR</b>	1-3 AÑOS
<b>PLASTICO</b>	5 AÑOS
<b>VIDRIO Y NEUMATICOS</b>	450 AÑOS
<b>PLA</b>	2-3 MESES

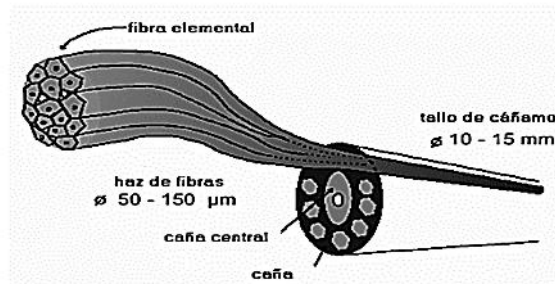
**Fuente:**(Gorría, 2017)

#### **4.1 cáñamo**

La fibra de cáñamo es una de las fibras naturales disponibles más fuertes y rígidas por tanto tiene un gran potencial como refuerzo compuesto. Las fibras del líber en el cáñamo están compuestas por aproximadamente 74% de celulosa, 14% de hemicelulosa, 5% de lignina, 1% de pectinas y 6% de otras sustancias, como ceras. Los tallos de cáñamo se degradan típicamente

para permitir que la fibra se separe del núcleo leñoso; esto se llama retting. A veces, las fibras se separan del tallo mediante un pelado mecánico llamado decorticación o enrutado mecánico. (Väisänen et al., 2018).

En la figura 6, se puede observar un filamento de cáñamo que emerge de la caña en el cual está contenido (Sánchez, 2004).



**Figura 7** Constitución de un tallo de cáñamo.

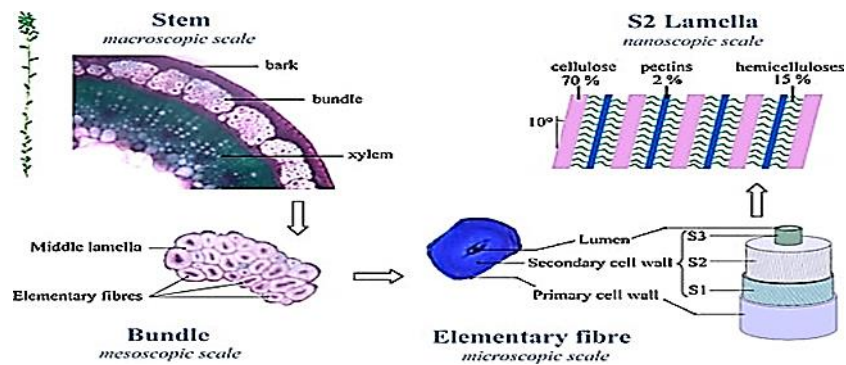
**Fuente:** (Sánchez, 2004).

El uso de fibras de cáñamo como refuerzo en materiales compuestos ha recibido una atención creciente tanto por parte de la academia como de la industria debido a su disponibilidad ilimitada, menor densidad y resistencia específica mucho mayor que las fibras convencionales como el carbono y el vidrio, y el hecho de que son renovables. (Vallejos, 2008)

#### 4.2 lino

El lino se puede describir como una estructura compuesta desde la escala macroscópica hasta la escala nanoscópica (figura 8). La sección transversal de un tallo de lino, que tiene aproximadamente 80 cm de largo y 2 mm de ancho, revela capas concéntricas más o menos densas que protegen el material de los ataques externos y confieren rigidez al tallo (la corteza) o permiten que el agua y los nutrientes penetren desde el centro del tallo hasta las fibras (el xilema). (Charlet et al., 2010).





**Figura 8 Secciones transversales y representaciones esquemáticas de lino a diferentes escalas, desde el tallo hasta las fibrillas de celulosa.**

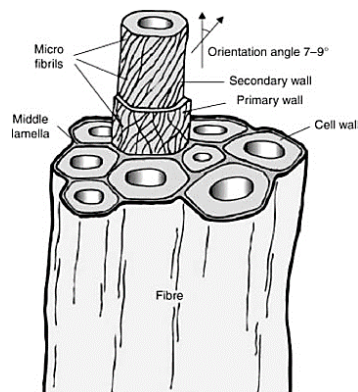
**Fuente:** (Charlet et al., 2010).

Cada una de estas fibras consiste en un conjunto de capas concéntricas rodeando una cavidad central denominada lumen. Todas las capas están conformadas por celulosa embebida en una matriz amorfa de hemicelulosa y lignina. La pared celular más externa se denomina Pared Primaria y se forma durante el crecimiento de la planta. Esta pared tiene en su totalidad una estructura amorfa y tiene la función de proteger las paredes internas de la fibra. La Pared Secundaria consta de tres capas (S1, S2, S3). Las capas S1 y S2 contienen microfibras de celulosa cruzada y la capa S2 es la única donde las microfibras de celulosa están dispuestas de manera ordenada formando un espiral con un ángulo constante (ángulo micro fibrilar). Esta característica ordenada (cristalina) de la celulosa en esta capa proporciona a la planta rigidez. Por esta razón, el espesor de la capa S2 y la magnitud del ángulo micro fibrilar, determina las propiedades mecánicas de la fibra (Charlet et al., 2010).

#### 4.3 yute

El yute conocido como la fibra dorada, se cultiva en áreas de tierras bajas tropicales, con una humedad del (60- 90%). Se trata de una de las fibras naturales más largas y usadas para diversas aplicaciones textiles, la edad de maduración mínima es 100 días, alcanza los 4.0 metros y la extracción artesanal se realiza a través del proceso de enriado. Actualmente, se carece de una fibra técnica continua con calidad suficiente para ser utilizada en el campo de los materiales compuestos (Pozo Morales, 2019).

El proceso de enriado consiste en quitar las partes más suaves de la planta, exponiendo los tallos cortados a la descomposición microbiana. En el enriado la planta es sometida a un proceso de fermentación que lleva consigo la putrefacción de su parte leñosa sin que resulten dañadas las fibras. Una sola fibra de yute tiene generalmente forma poligonal con esquinas redondeadas (ver figura 9).



**Figura 9 Morfología de la fibra de yute.**

**Fuente:** (Habib Awais a et al., 2021)

El yute es una fibra lignocelulósica que posee grupo-OH (grupo polar) lo que causa susceptibilidad a la humedad y directamente afecta las propiedades del compuesto yute; especialmente la estabilidad dimensional. También debido a este grupo polar, el yute no se adhiere de manera eficiente a las matrices no polares. Para superar esta dificultad esta fibra debe ser modificada químicamente. Para mejorar la adhesión interfaz entre las matrices no polares y fibra hidrófila, deben utilizarse agente de acoplamiento o compatibilizador (E.Nicolas- & Luis, 2015).

## **5. TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA MEJORAR LA COMPATIBILIDAD MATRIZ-FIBRA**

Los compuestos reforzados con fibras naturales tienen inconvenientes tales como una mala humectabilidad y un bajo rendimiento de la matriz de fibra/polímero, y absorben más agua y humedad. La presencia de celulosa que es de naturaleza hidrófila afecta la unión interfacial entre la matriz polimérica y las fibras porque la matriz es hidrófoba. El tratamiento químico de las fibras naturales es una forma de optimizar la interacción entre las fibras y la matriz polimérica. Esto se debe a que reduce la función OH presente en la superficie de la fibra y también aumenta la rugosidad de la superficie, mejorando así la interacción superficial entre el sustrato y la fibra.

Después de la eliminación de las fibras de la planta respectiva, las fibras se agrupan mediante elementos pegajosos. El proceso de eliminación de la goma de mascar de la fibra se conoce

como desgomado. Por tanto, es fundamental modificar la superficie de la fibra tratándola con productos químicos.

El tratamiento químico es uno de los procesos clave utilizados para reducir la hidrofilia de las fibras y mejorar su compatibilidad con los polímeros. La Tabla 3 muestra los diversos tratamientos químicos que se utilizan con su respectivo efecto sobre las fibras naturales. Entre ellos se encuentran el tratamiento alcalino (NaOH), tratamiento con silano (ST), tratamiento con ácido acético (AAT), tratamiento con peróxido de benzoilo (BPT), tratamiento con permanganato de potasio (PPT), tratamiento con ácido esteárico (SAT), recubrimiento de polímero (PT), copolimerización por injerto (GC) y tratamiento con isocianato (IT) (Sathish et al., 2021).

**Tabla 3 Tipos de tratamiento químico de la fibra natural y sus efectos.**

TRATAMIENTO QUÍMICO	EFEECTO DEL TRATAMIENTO
NaOH	Elimina la hemicelulosa, la lignina, la pectina y los elementos cerosos que conducen a la falta de fibra en la superficie.
AAT	Mejora las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de la fibra.
ST	Mejora las propiedades mecánicas y térmicas de las fibras naturales.
BPT	Mejora la interacción entre la fibra hidrófila y la matriz hidrofóbica.
PPT	Mejorar la estructura física de la fibra mediante la confiscación de pectina, aceite y elementos cerosos.
SAT	Proporciona mejores propiedades físicas y químicas en comparación con todos los demás tratamientos químicos.
PT	Mejora la compatibilidad entre fibras y matriz.
GC	Mejora las propiedades térmicas y reduce la hinchazón.
IT	Aumenta significativamente las propiedades de resistencia y reduce la absorción de agua.

**Fuente:** (Sathish et al., 2021)

### 5.1 Refuerzos tejidos y no tejidos producidos a partir de fibras naturales

Los materiales fibrosos son la mejor alternativa para fortalecer sustratos poliméricos. Se ha demostrado que cuanto más delgado es el material, es menos probable que falle y se rompa. Sin embargo, si las fibras no están unidas en una matriz, la utilidad estructural de las fibras no se utilizará por completo. La composición por la que se disponen en la matriz también es determinante de las propiedades finales y propiedades del material. Dichos perfiles incluyen metálicos, de fibra larga, tejidos y no tejidos. Además, se pueden realizar muchas

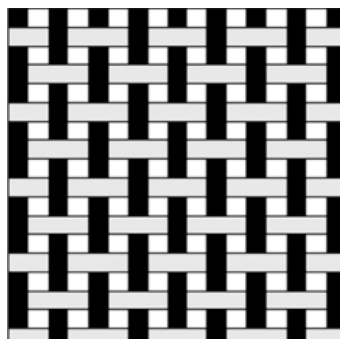
modificaciones al tejer el hilo, lo que da como resultado compuestos con propiedades mecánicas diferentes.(Dávila et al., 2011)

Si la disposición de fibras largas se hace en una dirección, el material tendrá mayor resistencia en la dirección longitudinal de las fibras. Por otro lado, cuando las fibras se incrustan perpendiculares entre sí, el material se vuelve más isótropo, pero su resistencia y tenacidad frente a la fractura entre capas se reducen, lo que limita su uso en aplicaciones responsables de la estructura. Estos defectos de los materiales elaborados por estratificación manual pueden reducirse al ser reforzados con tejidos de fibras, puesto que éstas presentan una conformación más estable y mejor estructurada, además de una superficie rugosa, lo cual consigue una interfaz más adecuada y permite que estas láminas se acoplen de mejor manera entre ellas (Dávila et al., 2011).

## 5.2 TIPOS DE TEJIDO

### 5.2.1 Tejido plano

Los tejidos planos son los más simples de todos los tejidos y están formados por filamentos intercalados en donde las fibras de la trama pasan de manera regular y uniforme por encima y por debajo de la urdimbre. Así, la primera fibra correspondiente a la trama pasará por encima de la primera fibra de la urdimbre, debajo de la segunda, encima de la tercera y así sucesivamente. En la próxima columna, las fibras de trama pasarán debajo de la primera de urdimbre, encima de la segunda, debajo de la tercera y así sucesivamente. Después se continúa con estas repeticiones de la primera secuencia en la tercera columna y por ende en todas las columnas impares. Estos tejidos tienen un mayor número de entrelazamientos por unidad de área, lo cual puede reducir la resistencia y rigidez de un material compuesto. En la Figura 10 se muestra la estructura básica de un tejido plano (Dávila et al., 2011).



**Figura 10 Estructura básica del tejido plano.**

Fuente:(Dávila et al., 2011)

### 5.2.2 Tejido Sarga

Este tipo de tejido consiste en pasar un filamento de fibra de trama sobre dos de urdimbre, luego uno debajo y nuevamente dos encima. La secuencia continúa en la segunda fila de trama, pero un filamento más delante de la urdimbre. Esta configuración se observa como líneas diagonales en el tejido, razón por la cual es llamado también tejido diagonal. Estos tejidos tienen una estructura compacta y generalmente presentan buena resistencia a la abrasión y al desgaste. En la Figura 11 se puede observar la estructura básica de un tejido sarga (Dávila et al., 2011)

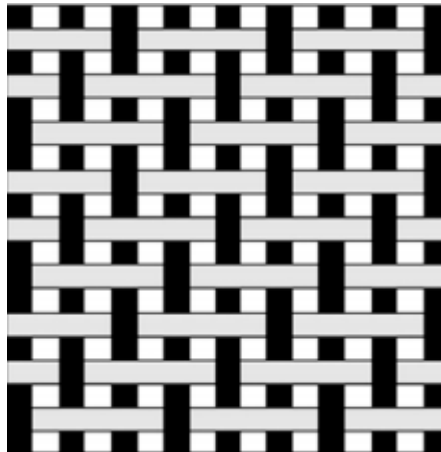
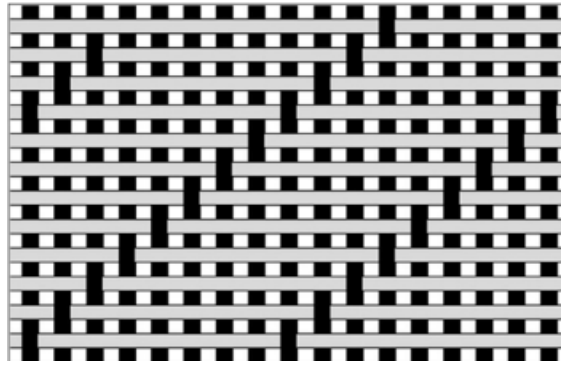


Figura 11. Estructura del tejido sarga o diagonal.

Fuente: (Dávila et al., 2011).

### 5.2.3 Tejido Satén

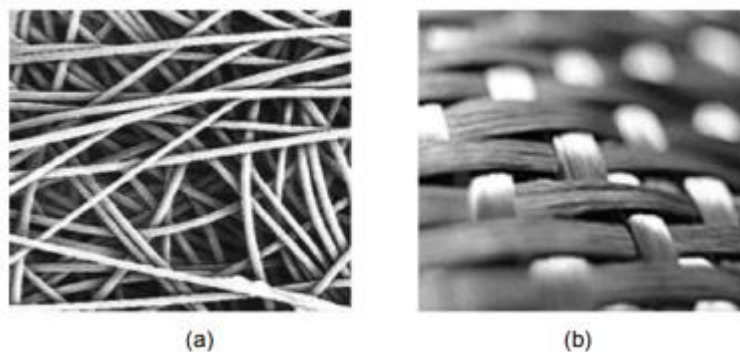
En el tejido satén o raso, los filamentos de la urdimbre se dividen en series mayores que para la sarga (de cinco a ocho series). De estos filamentos, cada uno sólo cubre la trama en la primera pasada; en la siguiente, el tercero saltando uno y así sucesivamente. De aquí resulta que, teniendo la urdimbre pocos enlaces con la trama, la superficie del tejido aparece brillante. En la Figura 12 se puede observar la configuración de un tejido tipo satén (Dávila et al., 2011).



**Figura 12 Estructura del tejido satén o raso.**  
Fuente:(Dávila et al., 2011).

#### 5.2.4 No tejidos

Un no tejido es una estructura plana, flexible y porosa constituida de una manta de fibras o filamentos orientados direccionalmente o al azar, los mismos que están consolidados por procesos mecánicos, químicos, térmicos y combinaciones de éstos. Para un mejor entendimiento del concepto de no tejido es necesario poder diferenciarlo de un tejido. Para este efecto, en la Figura 13 se muestra la diferencia básica existente entre un tejido y un no tejido (Dávila et al., 2011).



**Figura 13. (a) Estructura al azar de un no tejido y (b) estructura de un tejido.**  
Fuente: (Dávila et al., 2011)

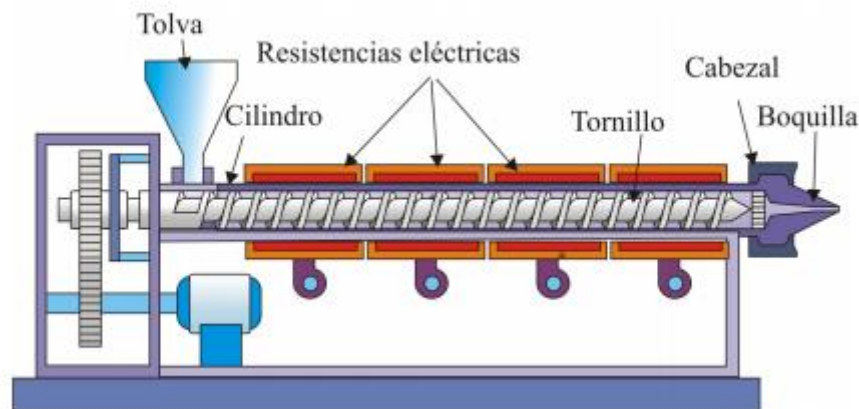
## 6. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

La elección del proceso de fabricación de compuestos es muy importante, ya que puede cumplir con los requisitos del producto para una aplicación particular. Además, el costo de producción de los compuestos representa el 50-60% del costo total del producto, por lo que debe elegir el mejor método de tratamiento para obtener el mejor efecto con el costo más bajo. Esta elección

depende de parámetros específicos como el tipo de molde, el tipo y la forma del refuerzo y el uso previsto del producto terminado. También debe conocer la condición de tratamiento, así como las ventajas y limitaciones de cada método de tratamiento. Este texto describe los procesos más utilizados para obtener compuestos termoplásticos y termoendurecibles. Por ejemplo, laminación manual, moldeo por inyección, extrusión, inyección, moldeo por compresión, extrusión, prescripción previa, moldeo por transferencia de plástico(Levy, 2006).

### 6.1 Proceso de Extrusión

La extrusión (Figura 14) es un proceso mediante el cual un material es expulsado a través del orificio de un dado para darle una forma determinada. Este método se utiliza en la industria del plástico para lograr una sección transversal constante de polímeros termoplásticos. La extrusora más común es la extrusora de tornillo, donde el polímero se crea mediante la rotación del gusano. Se utilizan extrusoras de un solo tornillo o de múltiples tornillos que, dependiendo del material a procesar, pueden girar juntas o viceversa (Dávila et al., 2011).



**Figura 14. Proceso de extrusión.**

**Fuente:** (Maribel Beltrán & Antonio Marcilla, 2012)

En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor. En este caso la extrusora actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al polímero a través de la boquilla. En otras ocasiones se extruyen los materiales sólidos, como es el caso del procesado de fibras en el que se requieren elevadas orientaciones en el material.(Maribel Beltrán & Antonio Marcilla, 2012)

Como puede apreciarse el sistema de alimentación más habitual es una tolva, en la que el material a procesar se alimenta en forma de polvo o granza. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está constituido por un tornillo de Arquímedes que gira en

el interior de un cilindro calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de la máquina es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro, compacta el alimento sólido, da lugar a la fusión del material y lo transporta hacia la boquilla de conformado, produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material. (Maribel Beltrán & Antonio Marcilla, 2012)

## 6.2 Proceso de Compresión

Es un proceso de alto volumen y alta presión adecuado para el moldeo de piezas complejas reforzadas con fibra de alta resistencia que utilizan resinas termoestables o termoplásticas, como se observa en la Figura 15.

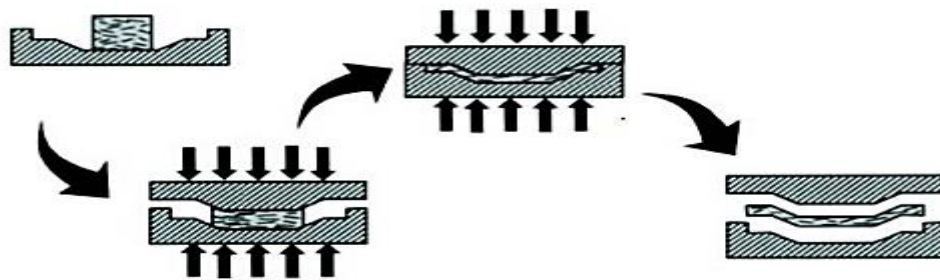


Figura 15 Moldeo de compresión.

Fuente: (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019)

Los pasos del proceso se detallan a continuación:

- a. En la fase de precalentamiento se disponen alternadamente láminas de fibra de refuerzo y polímero termoplástico, con la adecuada orientación sobre un molde que ha sido anteriormente tratado con un agente desmoldante. La cantidad de material a utilizarse se calcula según el espesor deseado de la pieza.
- b. Se cierra el molde y se lo coloca en una prensa calefactora. Se aplica una presión baja o nula hasta que la temperatura del material alcance la temperatura de fusión de la resina.
- c. Una vez alcanzado el equilibrio térmico comienza la fase de moldeo, para lo cual se aplica una mayor presión llamada presión de moldeo, que consolida el material haciendo que el plástico, que se encuentra en estado fundido fluya a través de los intersticios formados por la disposición de las fibras y las moje.

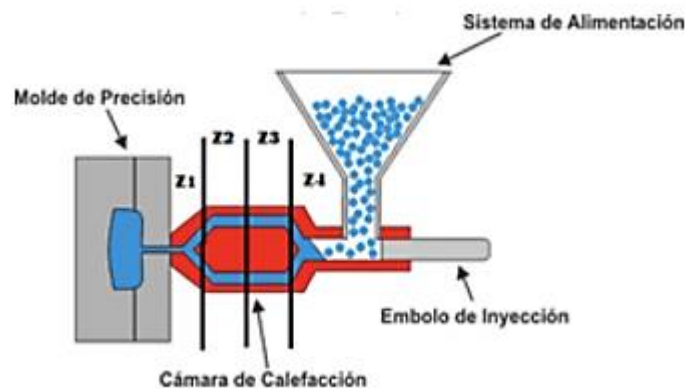


**d.** Transcurrido el tiempo de moldeo se lleva a cabo la fase de enfriamiento en la cual el molde es enfriado en una prensa con sistema de refrigeración de tal manera que la presión se mantenga constante hasta que el material se haya solidificado por completo. De esta forma se evita una recuperación elástica del material.

**e.** Finalmente, la pieza es retirada del molde (Dávila et al., 2011).

### 6.3 Proceso de Inyección

El moldeo por inyección (Figura 16) involucra dos procesos distintos. El primero comprende los pasos elementales de transporte de sólidos, generación del fundido, mezclado, presurizado y transferencia de material, los cuales se llevan a cabo en la unidad de inyección de la máquina de moldeo; el segundo es la formación del producto y la contracción, las cuales toman lugar en la cavidad del molde.



**Figura 16. Proceso de inyección.**

**Fuente:** (Freire et al., 2019).

Las etapas del proceso se enumeran a continuación:

**a.** Los pellets de material compuesto son secados en un horno de convección previo a su alimentación al equipo de inyección, para evitar la acumulación de humedad y consiguientes problemas en el funcionamiento del equipo.

**b.** Se alimentan los pellets a una tolva en forma de embudo, donde son mezclados con aditivos y colorantes y se fijan los parámetros de temperatura, presión y velocidad del tornillo.

**c.** Los pellets plásticos son transportados por el movimiento de un tornillo sinfín y son calentados hasta la temperatura de fusión del material, permitiendo que el plástico en estado líquido fluya a través de la boquilla. El polímero fundido que atraviesa la boquilla se presuriza

debido al mecanismo del tornillo y es inyectado en las cavidades del molde con una presión de 100 a 200 MPa.

**d.** Al fluir por las cavidades, el fundido desplaza al aire por salidas instaladas en el equipo y el molde cerrado se mantiene una presión de 50 a 100 MPa. Esta presión es denominada presión de empaque. Una válvula check evita el retorno del flujo de plástico fundido.

**e.** El molde se enfría a una temperatura menor a la de fusión del material, generalmente entre 50 y 100°C permitiendo la solidificación del plástico. Esta temperatura debe ser controlada para evitar distorsión de la forma de las piezas.

**f.** Después del enfriamiento los moldes se abren, las piezas son expulsadas y el molde se vuelve a cerrar y se prepara para el siguiente ciclo de inyección (Dávila et al., 2011).

## **7. PROPIEDADES MECANICAS**

Como se mencionó anteriormente, las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, ductilidad, resistencia al impacto, etc., dependen del tipo de matriz, del tipo de refuerzo y el orden de perfiles utilizados. El modo de falla del compuesto está fuertemente influenciado por el tipo de matriz y la compatibilidad con el refuerzo (Dávila et al., 2011). A continuación, se presentan algunos de los ensayos más relevantes para determinar las propiedades mecánicas de materiales compuestos.

### **7.1 PRUEBA DE FLEXIÓN**

La resistencia a la flexión es la propiedad de los materiales de soportar cargas perpendiculares a su eje. El esfuerzo resultante es la combinación de esfuerzos de compresión y tensión. En materiales compuestos, esta resistencia aumenta al incrementar el porcentaje volumétrico de fibras del material, también es importante considerar que esta propiedad mecánica es sensible a la correcta cohesión entre la fase fibrilar y la matriz. Esta interfaz permite transmitir esfuerzos desde la matriz hacia la fase fibrilar. El largo de la fibra es una propiedad geométrica que aumenta la resistencia a la flexión (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019).

Las propiedades de flexión se miden bajo el método *ASTM D7264M-07 "Standard Test Method for Flexure Matrix Composite Materials"*: Esta norma detalla las particularidades que tiene el ensayo de flexión en materiales plásticos, características de las probetas y normas que rigen la puesta en funcionamiento de este método (*ASTM D7264 / D7264M - 21 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, n.d.).

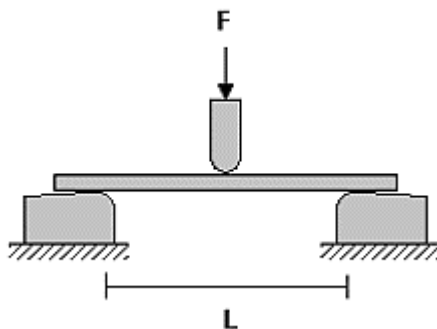
En la Tabla 4, se muestra la dureza y el esfuerzo último de diferentes fibras naturales.

**Tabla 4. Dureza y tensión de las fibras naturales.**

FIBRA VEGETAL	TIPO DE FIBRA	RIGIDEZ (Gpa)	ESFUERZO ÚLTIMO (Mpa)
CAÑAMO	Tallo	30-60	300-800
LINO	Tallo	50-70	500-900
YUTE	Tallo	20-55	200-900
SISAL	Hoja	9,0-22	100-800
MADERAS SUAVES	Tronco	10,0-50	100-170

**Fuente:** (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019)

Se pueden obtener fácilmente propiedades mecánicas importantes en las pruebas de flexión. El laminado de la muestra se tensa en la parte inferior y se comprime en la parte superior. Los planes de trabajo provisionales no están limitados (figura 17). Además, los esfuerzos cortantes en la dirección perpendicular a la superficie de rodadura que surgen de esta configuración de prueba se minimizan tanto como sea posible eligiendo entre una amplia distancia de apoyo en el espesor de la muestra. (Pozo Morales, 2019)



**Figura 17 Prueba de flexión**

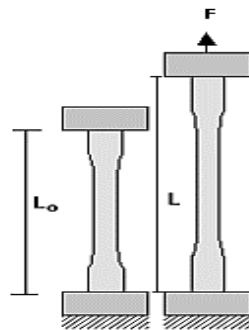
**Fuente:** (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019)

## 7.2 PRUEBA DE TRACCIÓN

Los ensayos de esfuerzo - deformación por tracción permiten medir la fuerza necesaria para producir la deformación a una velocidad de estiramiento constante registrándose automáticamente los valores de la fuerza y la variación de la longitud de la probeta. La fuerza

necesaria para producir dicha deformación dependerá de las dimensiones iniciales de la probeta a ensayar, de ahí que el término esfuerzo se refiere a la fuerza por unidad de superficie, cuya unidad es MPa ( $10^6 \text{ N/m}^2$ ). Las pruebas pueden realizarse a diferentes temperaturas, a diferentes tasas de alargamiento o a diferentes tasas de deformación. El alargamiento es la velocidad a la que se mueve la punta del dinamómetro, es decir, el aumento de la longitud de la muestra por unidad de tiempo. (Vallejos, 2008)

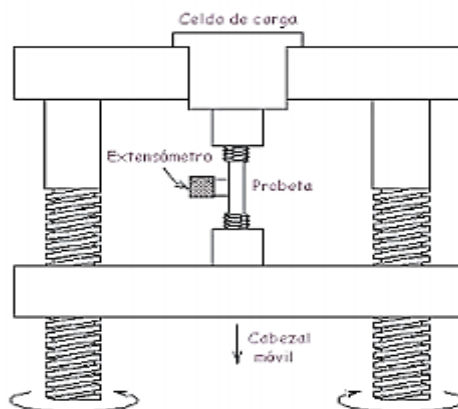
Mientras que la velocidad de deformación se define como la deformación por unidad de tiempo, los ensayos de esfuerzo-deformación se rigen por la velocidad de deformación. En la figura 18 se describe cómo transcurre el ensayo a tracción cuando una probeta se encuentra sujeta entre las mordazas y es estirada por una fuerza  $F$  (Vallejos, 2008).



**Figura 18** Ensayo a tracción de los materiales.

**Fuente:** (Vallejos, 2008).

La máquina de ensayo (figura 19) deforma la probeta previamente obtenida desplazando el cabezal móvil a una velocidad determinada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un computador que registra el desplazamiento y la carga aplicada.



**Figura 19** Ensayo de tracción

**Fuente:** (Donald R. Askeland, 1999)

Las propiedades de resistencia a la tracción se miden bajo la norma *ASTM D 3039M-08* “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”: Describe el método de la prueba estándar de resistencia a la tracción en materiales plásticos, proporciona las características que deben tener los especímenes que van a ser utilizados en esta prueba (longitud, grosor y características que deben llevar estos). (*ASTM D3039 / D3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, n.d.).

### **7.2.1 Resistencia a la Tracción**

Ésta es la tensión máxima que puede soportar el material. Se calcula a partir de la carga máxima generada durante el ensayo de tracción realizado hasta el fallo y la sección transversal inicial de la probeta. La carga máxima soportada por la probeta suele ser mayor que la carga máxima de rotura. Este es un parámetro importante porque refleja la resistencia del material (Carrero, 2014).

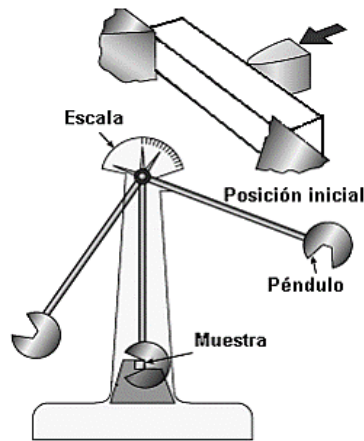
La resistencia a la tracción tiene un valor independiente del tamaño de la muestra, sin embargo, esta depende de otros factores como la presencia o ausencia de defectos en la superficie de la muestra, la temperatura del medio de prueba y el material a analizar.(Ibarra, 2017)

## **7.3 PRUEBA DE IMPACTO**

Es una propiedad del material resistir la fractura cuando se somete a cargas de choque de alta velocidad. Al igual que otras propiedades mecánicas, esta resistencia de los compuestos reforzados depende en gran medida del número de fibras. Es decir, a medida que aumenta el porcentaje de volumen de refuerzo, aumenta la resistencia al impacto del material compuesto. Las fibras vegetales naturales obtenidas del tallo como el cáñamo y el yute tienen una mayor capacidad de carga debido a la composición geométrica de las fibras. Existen tecnologías como el “*Moldeo manual de materiales compuestos*” que aumentan la resistencia al impacto de los composites aumentando el número de capas de refuerzo planas o tejidas. La energía absorbida se expresa en julios  $J$  (Cunalata Sánchez & Jiménez Abarca, 2019).

La prueba de impacto se realiza bajo la norma *ASTM D 256* “*Standard Test Methodos for Determining the Izod Pendulum Impact Resistence of plastics*”: Describe el método o prueba de impacto para materiales plásticos, proporciona los parámetros a tener en cuenta de las probetas a utilizar (*ASTM D256 - 10(2018) Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*, 2018).

El ensayo de impacto o prueba Charpy, que consta de un péndulo que inicia su movimiento a una altura  $h_0$ , e impacta a la probeta a una altura  $h_1$  menor, figura 20. Conociendo  $h_0$  y  $h_1$  se puede calcular las diferencias de energía potencial, que es la energía de impacto absorbida durante la rotura de la probeta.(Vallejos, 2008)



**Figura 20. Péndulo de impacto Charpy.**

**Fuente:** (Vallejos, 2008).

#### **7.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS CÁÑAMO, LINO Y YUTE**

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales dependen del método de extracción, la composición química, el clima de crecimiento y las condiciones del suelo y la presencia de defectos. Algunos de los defectos más comunes en las fibras naturales son las bandas de deslizamiento debido al crecimiento no uniforme de la fibra, la ramificación fina de la fibra, el aumento de los ángulos de unión, la rotura durante la extracción y la rugosidad de la superficie. El tamaño y la distribución de estos defectos reduce las propiedades mecánicas reales y hace que el hilo sea más susceptible a la rotura (Monroy, 2013).

Las propiedades más interesantes pertenecen al grupo denominado de fibras rígidas, que corresponde a las fibras de líber y hojas (pertenecen a este grupo las fibras tradicionales derivadas del lino, el yute y el ramio). Otro factor que determina las propiedades de las fibras vegetales es su composición. En la mayoría de los casos, la celulosa es el componente principal de la fibra vegetal, lo que explica su hidrofilia y su contenido de agua del 8-12,6%. La resistencia y tenacidad de la fibra están asociadas con un alto contenido de celulosa, especialmente las fibras de polímero de celulosa que se retuercen a lo largo del eje de la fibra y tienen un pequeño ángulo entre el eje y la fibra. Cuanto mayores sean las propiedades

mecánicas de la fibra, más afectado será el tamaño de la celda, además de la composición de la celulosa.

La Tabla 5 permite comparar las propiedades mecánicas y la densidad de las fibras. (Gorría, 2017)

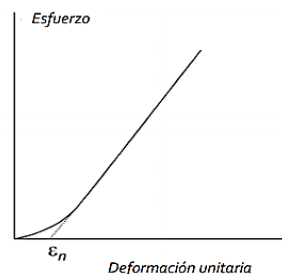
**Tabla 5 Propiedades de las fibras vegetales.**

FIBRA	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	DEFORMACIÓN DE ROTURA (%)
CAÑAMO	550-1100	38-70	1,48	1,6
LINO	345-1035	27-65	1,54	2,7-3,2
YUTE	393-1000	13-26,5	1,3-1,5	1,5-1,8

Fuente: (Gorría, 2017)(Vallejos, 2008).

## 7.5 RESPUESTA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN UNITARIA EN FIBRAS NATURALES

El esfuerzo general frente a la tensión de la fibra natural se muestra en la figura 21. La primera región de la curva (pequeña deformación) muestra una tendencia no lineal. Este comportamiento puede explicarse por el deslizamiento de las fibras primarias a lo largo del eje de la red de fibras y el deslizamiento de las fibras colocadas a lo largo del eje de las fibras. Inicialmente, el ángulo de las fibras finas en la pared secundaria es de aproximadamente 10 °. Cuando comienza la prueba de tracción, el ángulo se minimiza y comienza la reconstrucción para que quede paralelo al eje central de la fibra. Esta reordenación también provoca una deformación viscoelástica. En la segunda región de la curva, hay una deformación lineal en la tensión y la deformación. Las fibras son elásticamente activas y la tensión primaria es generada por los microfilamentos en la pared secundaria. El módulo de Young se puede calcular como la pendiente de la línea en esta área. El módulo de elasticidad depende de la superficie de estas fibras, ya que las microfibras celulósicas se deforman y soportan carga (Monroy, 2013).



**Figura 21. Curva típica esfuerzo vs. deformación-fibras naturales.**

Fuente: (Monroy, 2013).

## **8. ESTADO DEL ARTE**

### **8.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DE YUTE PICADO (2,5%, 3,75%) Y YUTE TEJIDO (11,6%) EN MATRIZ DE PLA.**

En este trabajo se presenta el desarrollo de materiales compuestos, obtenidos por moldeo por compresión, con matriz de PLA comercial reforzado con fibras de yute cortas y yute tejido. Se reportan tres mezclas de compuestos usando cargas de fibra de yute cortas o picadas de 2.5 % P/P y 3.75 % P/P, la tercera mezcla es hecha con fibra de yute tejido usando una carga en peso del 11.6 % P/P. El comportamiento de estos materiales fue comparado con la respuesta del PLA sin reforzamiento. La caracterización fue hecha midiendo resistencia a la tracción, flexión, Impacto tipo Charpy. Las fibras no fueron sometidas a ningún tratamiento y se utilizaron diferentes cantidades y tamaños.(E.Nicolas- & Luis, 2015)

#### **8.1.1 Análisis mecánico por resistencia a la tracción**

En la **tabla 6** se muestra que el valor de la resistencia a la tracción para el hilo de yute es de 139.425 MPa (reforzante) y el valor para el PLA puro es de 68.763 MPa (matriz); analizando estos valores, se observó que el compuesto final debería teóricamente tener un valor de tracción entre el sustrato y los valores de refuerzo, pero esto no ocurre experimentalmente. Incluso se puede observar que los valores están disminuyendo, probablemente debido a una interacción inadecuada entre la superficie de la matriz y el refuerzo, siendo necesario realizar más estudios que analicen el comportamiento de ambas superficies y mejoren su interacción.

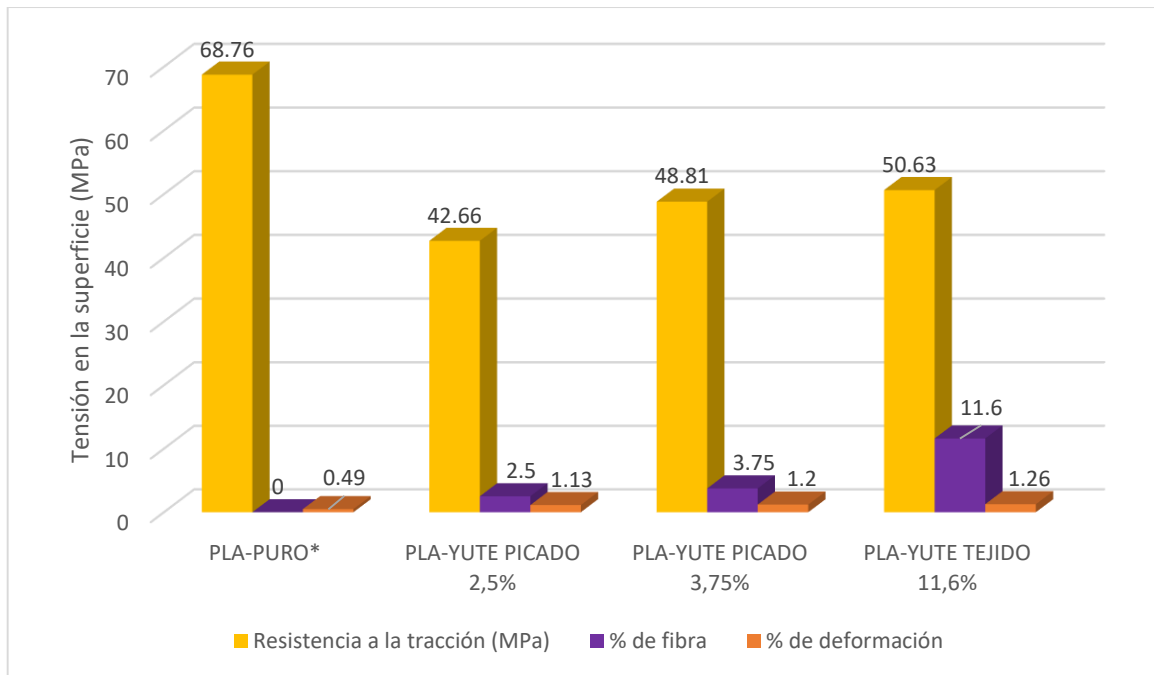


Tabla 6 Resultados prueba de tracción

FIBRA	MATRIZ	CONTENIDO DE MATRIZ %	CONTENIDO DE FIBRA %	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Mpa)
PLA PURO	-	-	-	-	68,76
YUTE	-	-	-	HILO DE YUTE	139,425
YUTE	PLA	97,50	2,50	YUTE PICADO	42,66
YUTE	PLA	96,25	3,75	YUTE PICADO	48,81
YUTE	PLA	88,40	11,6	YUTE TEJIDO(MALLA)	50,63

Fuente: (E.Nicolas- & Luis, 2015)

De acuerdo a la **gráfica 2** se puede analizar que existe una disminución de la resistencia a la tracción, se aprecia que de 68.763 MPa del PLA puro baja a 42.66, 48.81 y 50.63 MPa para las cargas de 2.5, 3.75 y 11.6% de yute respectivamente. El % de disminución de la resistencia a la tracción es de 37.96 % para una carga de 2.5 % de yute picado, 29.02 % para una carga de 3.75 % de yute picado y 26.37 % para una carga de 11.6 % de yute tejido. Se entiende que cuanto mayor sea la carga de yute en forma de tejido, menor será la disminución de la resistencia a la tracción. En cuanto a "deformación", en comparación con PLA puro, se observó un aumento en todas las mezclas de compuestos, con la siguiente relación: A medida que aumentaba la carga de refuerzo, aumentaba el "% de deformación".



**Grafica 2 Comparación resistencia a la tracción y % de deformación.**

**Fuente:** (E.Nicolas- & Luis, 2015)

### 8.1.2 Análisis mecánico por flexión

En La Tabla 7 se muestra el aumento de la tensión superficial. Este aumento se vuelve progresivo a medida que aumenta la carga, es así que a 11.6 % de yute tejido con PLA se tiene un valor de 15.27 MPa en referencia a (PLA puro) con un valor de 12,56 MPa, lo que corresponde a un aumento del 22.45 %. En esta tabla 2, al igual que en el ensayo de tracción, el material reforzado con fibra de yute tejido de % de carga de 11.6 es aquel que presenta las mejores características a flexión comparado con los demás compuestos ensayados.

**Tabla 7 Resultados del Ensayo de Flexión**

FIBRA	MATRIZ	CONTENIDO DE MATRIZ %	CONTENIDO DE FIBRA %	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Mpa)
PLA PURO	-	-	-	-	12,49
YUTE	-	-	-	HILO DE YUTE	-
YUTE	PLA	97,50	2,50	YUTE PICADO	12,99
YUTE	PLA	96,25	3,75	YUTE PICADO	14,88
YUTE	PLA	88,40	11,6	YUTE TEJIDO(MALLA)	15,27

Fuente: (E.Nicolas- & Luis, 2015)

### 8.1.3 Análisis de la prueba de impacto

Con los datos obtenidos en la prueba de impacto reportados en la tabla 8, se pudo analizar que el compuesto reforzado con 11,6% de fibra de yute tejido, absorbe una mayor energía debido a que el compuesto lleva una malla de yute que está distribuida de manera uniforme en toda la probeta por lo cual es más difícil fracturarla. Los otros dos compuestos reforzados con 2,5% y 3,75% de yute picado también muestra un aumento, pero mínimo del valor de la energía absorbida respecto al PLA puro, lo que quizá se atribuya a la mala distribución del yute picado en la matriz de PLA.

En la aplicación del ensayo de Impacto en estos materiales compuestos de PLA reforzados con 2,5%, 3,75% y 11,6% de fibra de yute picado y tejido nos sirve para determinar la Tenacidad de estos. Donde la tenacidad se define como la propiedad que tiene un material de absorber energía hasta el punto de ruptura, cuando es sometido a esfuerzos de choque o golpes.

Tabla 8 Resultados obtenidos prueba de impacto

FIBRA	MATRIZ	CONTENIDO DE MATRIZ %	CONTENIDO DE FIBRA %	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	RESISTENCIA PRUEBA DE IMPACTO (J/m)
PLA PURO	-	-	-	-	48,93
YUTE	-	-	-	HILO DE YUTE	-
YUTE	PLA	97,50	2,50	YUTE PICADO	51,23
YUTE	PLA	96,25	3,75	YUTE PICADO	52,43
YUTE	PLA	88,40	11,6	YUTE TEJIDO(MALLA)	120

Fuente: (E.Nicolas- & Luis, 2015)

## 8.2 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON VARIACIÓN EN LA ARQUITECTURA DEL REFUERZO DE FIBRAS DE LINO, YUTE Y CÁÑAMO EN MATRIZ DE PLA

En este otro trabajo se presenta el desarrollo de materiales compuestos, obtenidos por moldeo por compresión, con matriz de PLA reforzado con fibras de lino, yute y cáñamo con diferente arquitectura de refuerzo (yute tejido, lino tejido de tela mezclada, yute y cáñamo fibras cortas). Se reportan propiedades mecánicas (ensayo de tracción, ensayo de flexión y prueba de impacto) para estos compuestos de PLA reforzados con fibras naturales. En la prueba de flexión se les realizó un tratamiento a las fibras en la adición de un 10% en peso de microesferas de vidrio hueco (HGM) para mejorar significativamente la resistencia a la flexión, mientras que en las pruebas de tracción e impacto no se les realizó ningún tratamiento químico. Se tienen adiciones del 30% de fibras de lino a la matriz

### 8.2.1 Prueba de tracción

Las pruebas de tracción se llevan a cabo para comprobar la capacidad de los materiales para resistir o deformarse bajo cargas de tracción. En la **tabla 9** se reportan los valores para la prueba de tracción y módulo de Young de cada uno de los compuestos estudiados con diferente arquitectura de refuerzo, se observó que el valor de la resistencia a la tracción del (PLA puro) tiene un Rango de 21-70 MPa y un módulo de Young de 3,8 GPa. Luego al ser reforzado por cada una de las fibras de Lino yute y cáñamo notamos cambios en estas propiedades, en donde mientras unas aumentaron otras disminuyeron. Esto es por la arquitectura de refuerzo. En el caso de yute tejido y yute en fibras cortas reportan valores de resistencia a la tracción de 69,3 MPa y 42,6 MPa respectivamente, dónde se puede analizar la influencia de la arquitectura de refuerzo en la matriz de PLA, la arquitectura de la tela también es un factor convincente para

las propiedades de rendimiento de los compuestos, teniendo en cuenta que la adición de fibras mejora generalmente las propiedades de las matrices poliméricas debido al efecto reforzante de las fibras y que los laminados tejidos ofrecen una mayor resistencia a la tracción como se puede observar en los compuestos de Yute.

La resistencia a la tracción es mayor para el compuesto de fibras cortas de cáñamo con valores en un Rango de (151-205) MPa Y el menor es el compuesto de fibras tejidas de tela mezclada de Lino con un Rango de valor de (8-11) MPa. Teniendo como resultado en los análisis de esta prueba el compuesto reforzado con fibras cortas de cáñamo presenta mejores propiedades a la tracción, pero en cuanto al módulo de Young es similar a la de yute tejido que dio mayor resultado. Siendo así dos compuestos que están mejorando el PLA Puro a diferencia del compuesto reforzado con fibras tejidas de tela mezclada de lino porque la dirección de las fibras a la tensión aplicada también juega un papel vital durante la prueba de tracción.

**Tabla 9 Valores reportados en el ensayo de tracción**

FIBRA	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	MATRIZ	CONTENIDO DE FIBRA %	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Mpa)	MÓDULO DE YOUNG (Gpa)
		PLA	-	21-70	3,8
YUTE	TEJIDO	PLA	-	69,3	9
YUTE	FIBRAS CORTAS	PLA	-	42,6	-
LINO	TEJIDO DE TELA MEZCLADA	PLA	30	8,0-11	3,1-3,5
CAÑAMO	FIBRAS CORTAS	PLA	-	151-205	8

**Fuente:** (Habib Awais a et al., 2021)

### 8.2.2 Prueba de flexión

En la tabla 10 se reportan los valores para la prueba de flexión, en esta prueba se les realizó un tratamiento a las fibras en la adición de un 10% en peso de microesferas de vidrio hueco (HGM) para mejorar significativamente la resistencia a la flexión, pero teniendo en cuenta que el incremento adicional en la carga de HGM disminuye las características de la resistencia a la flexión. Los valores obtenidos de resistencia a la flexión y el módulo de flexión para compuestos reforzados con fibras de lino, cáñamo con arquitectura tejida y yute en fibras

cortas. Se reportaron mejores resultados de resistencia a la flexión y módulo de flexión para las fibras de cáñamo tejido y yute en fibras cortas con valores en los rangos de (77,9-118,9) MPa, (180-225) MPa y (6,1-7,6) GPa, (10,5-15) GPa respectivamente. Los valores reportados para fibra de lino tejido presentan un rango del 4%-13% de disminución en la resistencia a la tracción, siendo el PLA con un valor de 81 MPa y la fibra de lino tejido reporto un rango de (3,29-10,9) Mpa. (Habib Awais a et al., 2021)

**Tabla 10** Valores reportados en el ensayo de flexión

FIBRA	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	MATRIZ	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Mpa)	MÓDULO DE FLEXIÓN (GPa)	TRATAMIENTO
		PLA	81	3	
LINO	TELA TEJIDA	PLA	3,29-10,9	-	HGM-10% EN PESO
CAÑAMO	TELA TEJIDA	PLA	77,9-118,9	6,1-7,6	HGM-10% EN PESO
YUTE	FIBRAS CORTAS	PLA	180-225	10,5-15	HGM-10% EN PESO

**Fuente:** (Habib Awais a et al., 2021)

### 8.2.3 Prueba de impacto

La capacidad del material para absorber energía bajo una carga repentina de varias velocidades se conoce como resistencia al impacto de los materiales. Los materiales compuestos están sujetos a diferentes tipos de sollicitación de impacto durante su vida útil. Por lo tanto, es necesario percibir el comportamiento de los materiales compuestos bajo diversas cargas. Los datos reportados en la **tabla 11**, resultantes de la prueba impacto se observan valores por cada uno de los compuestos reforzados con fibra de Lino yute y cáñamo con diferente arquitectura de refuerzo.

Para los compuestos de yute en fibras cortas y yute tejido con tratamiento de HGM 10% en peso se puede analizar que entre estos dos refuerzos de fibra el de la tela tejida con tratamiento presenta mejores valores en la resistencia al impacto con un Rango de (16-29,3) KJ/m<sup>2</sup> a diferencia de yute en fibras cortas con un rango de (1,5-2,64) KJ/m<sup>2</sup>, siendo así mejor el

compuesto al que se le aplica el tratamiento de HGM en la tela tejida para estos rangos en uso de fibra de cáñamo en esta prueba de impacto.

En cuanto a comparación entre Lino, yute y cáñamo con arquitectura de refuerzo de fibras cortas, fibras tejidas y tejido unidireccional, respectivamente. Se reportan valores de resistencia al impacto de mayor a menor siendo el yute en fibras cortas el mejor en resistencia al impacto con un Rango de (36,5-60)  $\text{Kj/m}^2$ , seguido del cáñamo tejido con un tratamiento de HGM al 10% (16-29,3)  $\text{Kj/m}^2$  Y por último Lino tejido unidireccional (3,8-20,4)  $\text{Kj/m}^2$ .

En resumen, de los resultados según los valores, cuando el cáñamo tejido tiene un tratamiento es mejor que cuando se tiene yute en fibras cortas, en otro análisis en comparación con el cáñamo tejido con tratamiento HGM, fibras cortas y lino tejido unidireccionalmente, se muestran valores en los que el yute en fibras cortas presenta mejores resistencias de impacto. Teniendo en cuenta que los compuestos con un 10% de HGM en peso han mostrado una disminución en la resistencia al impacto debido a una unión débil y las estructuras unidireccional han exhibido malas propiedades de impacto en comparación con los tejidos.(Habib Awais a et al., 2021)

**Tabla 11 Valores reportados en el ensayo de impacto**

FIBRA	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	MATRIZ	RESISTENCIA PRUEBA DE IMPACTO ( $\text{Kj/m}^2$ o $\text{J/m}$ )	TRATAMIENTO
		PLA	19	-
CAÑAMO	FIBRAS CORTAS	PLA	1,5-2,64	-
YUTE	FIBRAS CORTAS	PLA	36,5-60	-
CAÑAMO	TELA TEJIDA	PLA	16-29,3	HGM-10% EN PESO
LINO	TEJIDO UD	PLA	3,8-20,4	-

**Fuente:** (Habib Awais a et al., 2021)

### **8.3 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS CORTAS DE LINO, YUTE Y CÁÑAMO EN MATRIZ DE PLA**

En este trabajo se reportan técnicas de fabricación de los materiales compuestos por moldeo por compresión (fibras de cáñamo y yute) y moldeo por extrusión-inyección (fibra de lino).

Se reporta que la sustitución de fibra de cáñamo mostró propiedades mecánicas máximas al 40% en volumen, la adición de 30% en volumen de fibra de yute mostró propiedades de tracción y flexión optimizadas en compuestos a base de PLA teniendo distribución uniforme de la fibra en la matriz que creó una unión estrecha en los compuestos basados en PLA que se suma a la mejora de la propiedad y que la fibra de lino del 30% en peso mostró una resistencia a la tracción y al impacto de hasta 56 MPa y 16,4 kJ / m<sup>2</sup> , respectivamente.(Rajeshkumar et al., 2021)

Teniendo los siguientes valores **tabla 12**, donde se reportan las propiedades mecánicas de los materiales compuestos por fibras cortas de cáñamo, lino y yute. Los valores de resistencia a la tracción con un contenido de 40% de fibras cortas reportan un valor de 54, 6 MPa, mientras que en los compuestos de yute y lino con 30% de fibras cortas reportan valores de 64, 13 MPa y 56 MPa respectivamente. Los mejores valores del módulo de Young son para el caño y lino teniendo diferentes porcentajes de fibra.

En cuanto a resistencia a la flexión el de mayor porcentaje de fibra en este caso, el cáñamo es el que presenta mejores resultados, seguido de yute y Lino.

En resumen, de yute y lino con 30% de fibras cortas para la resistencia a la tracción, módulo de Young, resistencia a la flexión, módulo de flexión y resistencia impacto. Son dos compuestos que reportan buenas propiedades en aumento de resistencia a la tracción y módulo de flexión, donde también se presenta una disminución en el módulo de Young y resistencia a la flexión En comparación con el cáñamo que presenta 40% de fibras cortas este estudio de propiedades para yute y Lino puede variar si se aumenta 40% de refuerzo en fibras cortas(Rajeshkumar et al., 2021)

**Tabla 12 Datos de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos por fibras cortas**

FIBRA	ARQUITECTURA DEL REFUERZO	MATRIZ	CONTENIDO DE FIBRA %	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Mpa)	MÓDULO DE YOUNG (Gpa)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Mpa)	MÓDULO DE FLEXIÓN (GPa)	RESISTENCIA PRUEBA DE IMPACTO (Kj/m <sup>2</sup> o J/m)	TÉCNICA DE FABRICACION
CAÑAMO	FIBRAS CORTAS	PLA	40	54,6	8,5	112,7	-	-	COMPRESIÓN
YUTE	FIBRAS CORTAS	PLA	30	64,13	3,39	97,74	7,36	-	COMPRESIÓN
LINO	FIBRAS CORTAS	PLA	30	56	4,18	86	3,825	16,4	MOLDEO POR EXTRUSIÓN Y INYECCIÓN

**Fuente:**(Rajeshkumar et al., 2021)



## 9. BIODEGRADACIÓN

Debido a los caracteres inertes de los materiales plásticos, estos no son atacados por los microorganismos presentes en el medio ambiente razón por la cual los plásticos de uso masivo, derivados del gas o petróleo no son biodegradables. No obstante, existen plásticos biodegradables que son obtenidos de fuentes de materia prima renovables como el almidón de papa (*Solanum Tuberosum* L), azúcares, aceites vegetales, etc. que se denominan biopolímeros los cuales son verdaderamente biodegradables en condiciones controladas como por ejemplo en condiciones de compostaje.

Los materiales biodegradables, debido a su naturaleza química, pueden ser absorbidos, descompuestos y metabolizados por el medio ambiente y pueden ser degradados por microorganismos en un período de tiempo relativamente corto. La biodegradabilidad no depende de la fuente del material, sino de su estructura química y molecular. Si la degradación es el resultado de la actividad microbiana y fúngica y el resultado final es agua, dióxido de carbono, metano y biomasa, el material es biodegradable (Patel et al., 2010)

### 9.1 materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras vegetales

El almidón y la celulosa se encuentran entre las biopelículas más abundantes. Estos materiales son renovables, biodegradables, económicos, fácilmente disponibles en la naturaleza y pueden usarse en una amplia variedad de aplicaciones. Por tanto, el uso de productos agrícolas es una opción importante para la producción de nuevos materiales. La incorporación de almidón en diferentes tipos de residuos biodegradables y no biodegradables para fabricar polímeros ha sido impulsada en gran medida por la tendencia de salvar el planeta reduciendo los residuos que ya producimos. (Dávila et al., 2011)

Durante la última década, muchos investigadores se han dedicado al análisis y producción de compuestos y materiales biológicos caracterizados por la disponibilidad de matrices poliméricas de diversos recursos naturales. Además, hay que tener en cuenta la creciente disponibilidad de polímeros biodegradables, como el PLA, y su interés se centra en sus propiedades mecánicas. Los biocomposites de matriz PLA con refuerzos inorgánicos han recibido mucha atención debido a la biocompatibilidad lograda en sus aplicaciones. Asimismo,

el uso de materiales biodegradables, incluidos los refuerzos naturales (fibra vegetal), ha contribuido a reducir costes y mejorar algunas propiedades. Combinando matriz biodegradable y fibra vegetal, se puede obtener un material completamente biodegradable, aceptado como una tendencia de protección ambiental.(Dávila et al., 2011)

## **9.2 degradación de las fibras naturales en polímeros reforzados**

La degradación del material compuesto se produce con la rotura de los materiales compuestos, así como con la pérdida de propiedades mecánicas. En el ambiente al aire libre, él se influye en la degradación de los compuestos con fibras naturales por humedad atmosférica, temperatura, luz ultravioleta y actividades de organismos microscópicos. La degradación ocurre por la descomposición de hemicelulosas, lignina y celulosa de la fibra. Esto puede dañar la unión entre fibras y matriz polimérica. Por lo tanto, conduce a la reducción de las propiedades mecánicas de los compuestos.(Thyavihalli Girijappa et al., 2019)

## **10. RESUMEN DE LOS ANÁLISIS**

En cuanto a propiedades mecánicas, el tipo, porcentaje de adición y la arquitectura de refuerzo de la fibra que va hacer aplicada a la matriz polimérica de PLA, influyen mucho en los valores finales. En resumen, de los análisis obtenidos en todos los valores de propiedades de flexión, tracción y de impacto encontrados en este caso en el análisis final, se puede identificar a las fibras de cáñamo en este caso con arquitectura de fibras cortas presentan las mejores propiedades mecánicas en la edición a la matriz de PLA, seguido del yute que también presenta muy buenas propiedades y del lino que es el menor en propiedades mecánicas En comparación con el yute el cáñamo.

Cabe recalcar que, en estos ensayos para propiedades mecánicas, se debe tener en cuenta la unión entre las fibras y la matriz utilizada, por diferentes valores de propiedades mecánicas que en este caso aumentan y disminuyen teniendo en cuenta el porcentaje de fibra, la arquitectura de refuerzo y las condiciones de operación con las que se realicen estas pruebas. Teniendo en cuenta el tratamiento químico a aplicar y el moldeo si es por inyección o por compresión, también tener en cuenta esos parámetros de condiciones para obtener mejores propiedades mecánicas.

## 11. CONCLUSIONES

- El comportamiento de las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras naturales (lino, yute y cáñamo), presentan mejores resultados cuando se tiene una relación entre 30% y 40% de adición en fibra a la matriz polimérica.
- Los métodos de fabricación reportados para los compuestos poliméricos reforzados con fibras (lino, yute y cáñamo) son el moldeo por compresión, inyección y extrusión.
- Se comparó las propiedades mecánicas (flexión, tracción y prueba de impacto) en los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de yute, lino y cáñamo con diferente arquitectura de tejido, donde registran mejores propiedades mecánicas las fibras cortas de cáñamo, seguido de yute y lino.
- Las condiciones de operación en el moldeo de inyección, compresión y extrusión de estos compuestos reforzados con fibras naturales, pueden variar según las propiedades que presente la matriz a utilizar.

## **12. RECOMENDACIONES**

- Los termoplásticos reforzados con fibras naturales actualmente disponibles se basan principalmente en fibras cortas, ya que la mayoría de las resinas termoplásticas tienen una alta viscosidad en fusión que dificulta la impregnación adecuada de la matriz con las fibras. Por lo tanto, se requieren nuevos métodos que utilicen fibra continua para aumentar la proporción de compuestos termoplásticos en aplicaciones estructurales.
- Un tema crítico en el desarrollo de compuestos termoplásticos reforzados con fibras continuas es la naturaleza química de las fibras y matrices de refuerzo, que dificulta la adhesión adecuada. Los tratamientos químicos específicos son obligatorios para mantener la adhesión adecuada entre las fibras y la resina, pero los tratamientos afectan negativamente las propiedades mecánicas. Por lo tanto, es necesario mantener el nivel optimizado para lograr propiedades específicas.

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Khalil, H. P. S., Davoudpour, Y., Saurabh, C. K., Hossain, M. S., Adnan, A. S., Dungani, R., Paridah, M. T., Mohamed, Z. I. S., Fazita, M. R. N., Syakir, M. I., & Haafiz, M. K. M. (2016). A review on nanocellulosic fibres as new material for sustainable packaging: Process and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.072>
- Adot, O. G. (2010). Introducción a la industrialización de la lana y las fibras especiales. *Red SUPPRAD— Universidad Católica de Córdoba. Argentina. 2010.*, *37*(3), 267–273. <https://doi.org/10.1590/S0004-282X1979000300005>
- ASTM D256 - 10(2018) Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. (2018). <https://www.astm.org/Standards/D256>
- ASTM D3039 / D3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (n.d.). Retrieved June 30, 2021, from <https://www.astm.org/Standards/D3039>
- ASTM D7264 / D7264M - 21 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (n.d.). Retrieved June 30, 2021, from <https://www.astm.org/Standards/D7264>
- Berenice Vargas Reyes. (2013). Análisis de compuestos reforzados con fibra natural de agave en piezas moldeadas por inyección. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.
- Bledzki, A., Reihmane, S. y Gassan, J. (1996). *Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. Journal of Applied Polymer Science*, 1–8.
- Bodros, E., Pillin, I., Montrelay, N., & Baley, C. (2007). Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications? *Composites Science and Technology*, *67*(3–4), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.024>
- Carrero, J. (2014). *Establecimiento de un procedimiento para calcular la incertidumbre ensayo de tracción en barras corrugadas para refuerzo de concreto*. [Fundación agraria de Colombia ]. [https://issuu.com/maosabo/docs/monografia\\_jacarrero-v3](https://issuu.com/maosabo/docs/monografia_jacarrero-v3)
- Charlet, K., Jernot, J. P., Eve, S., Gomina, M., & Bréard, J. (2010). Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fibrils. *Carbohydrate Polymers*, *82*(1), 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.022>

- Chawla, K. K. (1998). *Composites Materials* (S. and Engineering (Ed.); Third Edit).
- Cintia Silvana, N. E. (2006). *Compuestos poliméricos reforzados con desechos agroindustriales regionales* [Universidad Nacional de San Juan]. <http://gip.uniovi.es/docume/TClaudia.pdf>
- Cunalata Sánchez, E. F., & Jiménez Abarca, C. A. (2019). *Caracterización de un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute precargada mediante moldeo por compresión*.
- Dávila, J. L., Galeas, S., Guerrero, V. H., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales. In P. D. Víctor Hugo Guerrero (Ed.), *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Primera ed).
- Donald R. Askeland. (1999). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales - 4ta Edición - Donald R. Askeland*.
- E.Nicolas-, T. R., & Luis, R. B. J. (2015). *Preparación de un composito de matriz termoplástica de ácido polilactico (pla) reforzado con fibra de yute*. Universidad católica de santa maría.
- Ema, Y., Ikeya, M., & Okamoto, M. (2006). Foam processing and cellular structure of polylactide-based nanocomposites. *Polymer*, 47(15), 5350–5359. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.05.050>
- Erwin T.H. Vinka, K. R. (2003). Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, 80(3), 403–419. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00372-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00372-5)
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA , and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- Freire, C., Fernando, E., Torres Gallegos, L., & Ortega Espín, A. (2019). Fabricación De Material Biodegradable a Base De Polimeros Termoplasticos Combinados Con Fibras Cortas De Lino. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 32–38. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1402>
- Fukushima, K., Abbate, C., Tabuani, D., Gennari, M., & Camino, G. (2009). Biodegradation of poly(lactic acid) and its nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 94(10), 1646–1655. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.07.001>

- Gorría, A. L. (2017). *Estudio comparativo de diferentes tipos de fibras naturales para la fabricación de materiales compuestos biodegradables Trabajo Fin de Grado*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Habib Awais a, B., Nawabb, Y., Amjada, A., Anjanga, A., C, H. M. A., & M. Shukur Zainol Abidina. (2021). Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 4, p. 100082). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100082>
- Ibarra, D. M. H. D. la T. (2017). *Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas*. 6–11.
- Isaac M. Daniel, O. Ishai. (2006). *Engineering mechanics of composite materials* (SECOND EDI, Vol. 17, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(97\)87195-6](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(97)87195-6)
- Lakshmi Narayana, V., & Bhaskara Rao, L. (2021). A brief review on the effect of alkali treatment on mechanical properties of various natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.117>
- Levy, F. (2006). *Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia* (E. Blücher (Ed.); 1ra. ed).
- Maribel Beltrán, & Antonio Marcilla. (2012). “ *Tecnología de Polímeros* ” de la Titulación de Ingeniero Químico de con diferentes aspectos de los polímeros , como son , “ *Propiedades los aspectos relacionados con la Tecnología de Polímeros , y se el conocimiento del comportamiento de los polímeros ,* . 252– 285.
- Martin, N., Mouret, N., Davies, P., & Baley, C. (2013). Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites. *Industrial Crops and Products*, 49, 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.012>
- Maya Jacob John, S. T. (2007). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Mazzanti, V., Salzano de Luna, M., Pariante, R., Mollica, F., & Filippone, G. (2020). Natural fiber-induced degradation in PLA-hemp biocomposites in the molten state. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137(June), 105990. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105990>
- Monroy, M. (2013). Caracterización Macromecánica De Un Material Compuesto a Base De Ácido Poliláctico (Pla) Y Fibras Naturales De Cumare. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

- Páez, D. A. P., & Zarate, M. Á. S. (2012). *Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales* (Vol. 66, Issue December). UNIVERSIDAD EAN.
- Patel, H., Day, R., Butterworth, P. J., Ellis, P. R., Mahasukhonthachat, K., Sopade, P. a., Gidley, M. J., Tester, R. F., Oates, C. G., DeVries, J. W., Camire, M. E., Cho, S., Craig, S., Gordon, D., Jones, J. M., Li, B., Lineback, D., Prosky, L., Tungland, B. C., ... El, O. (2010). Obtención del ácido láctico a partir del almidón de papa (*Solanum Tuberosum* L), como materia prima para la fabricación de material descartable biodegradable. *Trends in Food Science and Technology*, 11(3), 293–301. [http://dx.doi.org/10.1016/S0268-005X\(97\)80059-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0268-005X(97)80059-8)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.051>  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861714006675>
- Pozo Morales, A. R. (2019). *Materiales Compuestos de Fibras Naturales* [Universidad Politecnica de Madrid]. [http://oa.upm.es/55053/1/ANGEL\\_RENATO\\_POZO\\_MORALES.pdf](http://oa.upm.es/55053/1/ANGEL_RENATO_POZO_MORALES.pdf)
- Rajeshkumar, G., Arvinth Seshadri, S., Devnani, G. L., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Prakash Maran, J., Al-Dhabi, N. A., Karuppiah, P., Mariadhas, V. A., Sivarajasekar, N., & Ronaldo Anuf, A. (2021). Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 310(May), 127483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127483>
- Sánchez, A. L. (2004). Influencia Del Proceso De Reciclado Sobre Las Propiedades De Los Materiales Compuestos Obtenidos Por Inyección De Poliestireno Reforzado Con Fibras Lignocelulósicas [UNIVERSIDAD DE GIRONA]. In *Dipòsit*. <http://hdl.handle.net/10803/7759>
- Sathish, S., Karthi, N., Prabhu, L., Gokulkumar, S., Balaji, D., Vigneshkumar, N., Ajeem Farhan, T. S., AkilKumar, A., & Dinesh, V. P. (2021). A review of natural fiber composites: Extraction methods, chemical treatments and applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 8017–8023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1105>
- Senthilkumar, K., Saba, N., Rajini, N., Chandrasekar, M., Jawaid, M., Siengchin, S., & Alotman, O. Y. (2018). Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. *Construction and Building Materials*, 174, 713–729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143>
- Suresh, P. S., Dilip Kumar, K., Dhanalakshmi, S., Srinivasa, C. V., & Basavaraju, B. (2021).



- Effect of fiber fraction on the physical and mechanical properties of short areca sheath fiber reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.892>
- Thyavihalli Girijappa, Y. G., Mavinkere Rangappa, S., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2019). Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. In *Frontiers in Materials* (Vol. 6). <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00226>
- Torres Concha Stein; Bruno, C. S. D. (2014). *Elaboración y caracterización mecánica de un material compuesto en base a matriz termoplástico de ácido poliláctico (pla) con refuerzo de fibras naturales*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA.
- Väisänen, T., Batello, P., Lappalainen, R., & Tomppo, L. (2018). Modification of hemp fibers (Cannabis Sativa L.) for composite applications. *Industrial Crops and Products*, *111*(November 2017), 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.049>
- Valero-Valdivieso, M. F., Ortégón, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y perspectivas. *DYNA (Colombia)*, *80*(181), 171–180.
- Vallejos, M. E. (2008). Aprovechamiento integral del cáñamo. *Revista de La Industria Textil*, *456*, 40–49.
- Velásquez Restrepo, S. M., Pelaéz Arroyave, G. J., & Giraldo Vásquez, D. H. (2016). *Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review*. 77–86.