



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo y Evaluación de un  
compósito de Resina Epoxi  
Reforzada con Fibra de Coco**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Jose Carlos Zapata Flores

**DIRECTOR DE TESIS**

Miguel Ángel Hernández Gallegos



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi madre, por ser mi heroína y sacarme adelante.*

## **Agradecimientos.**

A mi madre por ser un ejemplo y una inspiración en mi vida. Por todo su esfuerzo para que me convirtiera en un hombre de bien, por tus desvelos y tus des madrugadas. Gracias por todo lo que me has entregado.

A Marco por tu amistad, por siempre estar en las buenas y en las malas, por apoyo con el que siempre he sentido que cuento y por ser mi mejor amigo.

A Abril por ser mi apoyo y no dejar que me rindiera siendo la fuerza que me empujo para terminar los ciclos inconclusos.

A mi hermano Roberto por saber que soy tu ejemplo.

A toda la gente que me apoyo en alguna etapa de mi vida

A mi tutor Miguel Ángel por creer en mi idea y apoyar este trabajo, brindándome su guía y facilitándome todas las herramientas para alcanzar el objetivo.

Al Dr. Carlos Andrés Álvarez Gayosso, al M.I. José Guadalupe Ramírez Vieyra y a la Dra. Alba Covelo Villar por brindarme su guía, su experiencia y por facilitarme las herramientas para la elaboración de este trabajo.

Al Q. Rafael Iván Puente Lee responsable del microscopio electrónico de barrido de la USAII, así como personal de los laboratorios de microscopia electrónica de la DIMEI por facilitarnos los equipos para poder realizar los estudios necesarios para este trabajo.

Al Dr. Emilio Bucio Carillo por facilitarnos los equipos para la elaboración de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme de los medios, así como de todas las herramientas que me permitieron cobijarme bajo tu estandarte, dándome la satisfacción de ser uno más de tus hijos.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
<b>I. ANTECEDENTES TEORICOS</b> .....	<b>7</b>
<b>a. MATERIAL COMPUESTO (composite)[1-8]</b> .....	<b>7</b>
i. CLASIFICACION Y TIPOS [1-8] .....	8
ii. PROPIEDADES MECÁNICAS [1-11].....	9
iii. VENTAJAS Y DESVENTAJAS [7-10] .....	11
<b>b. MATERIALES COMERCIALES USADOS COMO FIBRA DE REFUERZO [7-11]</b> .....	<b>12</b>
i. FIBRA DE VIDRIO [12].....	13
ii. FIBRA DE CABONO [5-8].....	15
iii. FIBRAS DE ARAMIDA (KEVLAR) [6-8].....	15
iv. FIBRAS NATURALES [9-11] .....	16
<b>c. USO Y APLICACIONES DEL COCO [9-11]</b> .....	<b>17</b>
i. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA FIBRA DE COCO [9-11, 13-19].....	19
ii. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA FIBRA DE COCO [9-11, 13-19] .....	19
iii. PRODUCCIÓN DE PALMA DE COCO EN EL ESTADO DE COLIMA [26] .....	20
iv. RESINA EPÓXICA (RESINA EPOXI-VINILÉSTER) [20-23].....	21
<b>d. TECNICAS DE CARACTERIZACION:</b> .....	<b>22</b>
<b>TENSION, FATIGA Y MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO [23]</b> .....	<b>22</b>
i. ENSAYO DE TENSIÓN [13-24] .....	22
ii. ENSAYO DE FLEXIÓN [13-24].....	25
iii. ENSAYO DE FATIGA EN TENSION [24] .....	26
iv. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO [25] .....	26
<b>II. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>29</b>
<b>a. FABRICACION DE PROBETAS</b> .....	<b>29</b>
i. METODOLOGIA: EXTRACCION DE LA FIBRA DE COCO .....	29
ii. METODOLOGÍA: FABRICACION DE PROBETAS DE FIBRA DE COCO Y RESINA EPOXI.....	31
<b>b. EVALUACIÓN MECÁNICA</b> .....	<b>38</b>
i. ENSAYOS MECÁNICOS APLICADOS AL MATERIAL COMPUESTO .....	39
ii. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA .....	40
<b>III. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	<b>41</b>
<b>a. ENSAYOS MECÁNICOS</b> .....	<b>41</b>
i. TENSIÓN .....	41
ii. FLEXIÓN.....	48
iii. FATIGA .....	50

b.	MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO .....	52
IV.	CONCLUSIONES .....	59
V.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION .....	60
VI.	BIBLIOGRAFIA Y/O REFERENCIAS .....	61

## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años el mundo ha comenzado a desarrollar una cultura de consumo de productos amigables con el ambiente, en la cual se pretende cuidar los recursos naturales o en su defecto se busca generar un menor impacto ambiental, tratando de beneficiar a las pequeñas economías.

Con esta tendencia en los años recientes se ha volteado a ver a la naturaleza como una fuente de inspiración para la generación de nuevas tecnologías o productos, ya que la naturaleza ha resuelto varios problemas de maneras muy diversas o imaginativas, dando como resultados materias primas que pueden ser aprovechadas de maneras muy diversas.

Una de las materias primas más antiguas en su uso, son las fibras naturales, las cuales debido a su buena resistencia y relativa facilidad en su extracción, son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones gracias a su gran versatilidad. En los últimos años se ha observado que es posible obtener buenos resultados al sustituir la utilización de fibras sintéticas por fibras naturales en materiales que requieren fibras de refuerzo.

Una de las fibras que al ser observada cuenta con una gran resistencia, es la fibra de coco, ya que es capaz de resistir grandes impactos, sin embargo existe relativamente poca información sobre los posibles usos que se le pueden dar a esta fibra como refuerzo de algún otro material.

En la región del pacífico mexicano, uno de los productos agrícolas más abundantes es el coco. El interior de este producto es utilizado regularmente como fuente de alimentación, sin embargo la cáscara de este alimento es un desperdicio el cual en los últimos años ha comenzado a ser utilizado en varias aplicaciones, siendo en jardinería la más común. Una de las grandes ventajas de la utilización de la cáscara o fibra del coco es que es un sub-producto, obtenido casi de manera gratuita.

Adicionalmente, la fibra de coco cuenta con propiedades mecánicas importantes como son la resistencia a la flexión y alta resistencia a la tensión; así mismo, cuenta con una gran capacidad de absorción de líquidos lo que puede ser aprovechado para su incorporación como refuerzo en materiales compuestos con una matriz líquida.

## **RESUMEN**

En esta tesis se realizó la caracterización de un nuevo material compuesto, formado por una matriz de resina epoxi de bisfenol comercial y un catalizador de amina cicloalifática, en la que se utilizó fibra de coco como material de refuerzo.

Durante el desarrollo del presente trabajo se probaron diferentes orientaciones del material de refuerzo, obteniéndose diferentes resultados.

El nuevo material de refuerzo y las fibras mismas de coco fueron sometidos a ensayos de tensión, flexión y fatiga. Las fibras de coco fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

## **OBJETIVOS**

Objetivos Generales:

**Desarrollar un compósito entre resina epóxica y fibra de coco con la finalidad de generar un sistema con altas propiedades mecánicas y que sirva como propuesta de un material ligero y resistente.**

Objetivos particulares:

- Caracterizar morfológicamente la fibra de coco mediante microscopía electrónica de barrido con la finalidad de obtener información de las características superficiales de las mismas.
- Conocer la composición química del coco por medio de microscopía electrónica de barrido para caracterizar el tipo de fibra de trabajo.
- Realizar evaluaciones mecánicas por medio de ensayos de tensión, flexión y fatiga que ayuden a verificar y validar el efecto positivo de la incorporación de las fibras de coco como material de refuerzo en una resina epóxica comercial.



## I. ANTECEDENTES TEORICOS

### a. *MATERIAL COMPUESTO (composite)*[1-8]

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por la unión de dos o más materiales micro o macro constituyentes insolubles entre sí, la mayor parte están constituidos por una parte aglomerante (regularmente una resina aglomerante) y por otra, que actúa de refuerzo dentro de dicho material, estas dos partes son fácilmente identificadas dentro del material gracias a la interface entre los mismos.

Algunos puntos importantes con los que debe de contar el material para ser considerado material compuesto son:

- Consta de dos o más materiales físicamente diferentes que pueden ser separados por medios mecánicos.
- Pueden fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada, para alcanzar las propiedades óptimas de dicho compuesto.
- Las propiedades son superiores y en algunos casos únicas en aspectos específicos, a las propiedades de los componentes originales

Estos materiales existen en la naturaleza, un ejemplo de ello es el bambú el cual está formado por fibras y almidones los cuales ayudan a mantenerlas aglomeradas, esta combinación genera un material altamente resistente, con muy buenas características mecánicas.

Hoy en día, los materiales compuestos no son exclusivamente creados por la naturaleza ya que gracias a nuevas tecnologías se han creado una gran variedad de estos materiales de manera sintética.

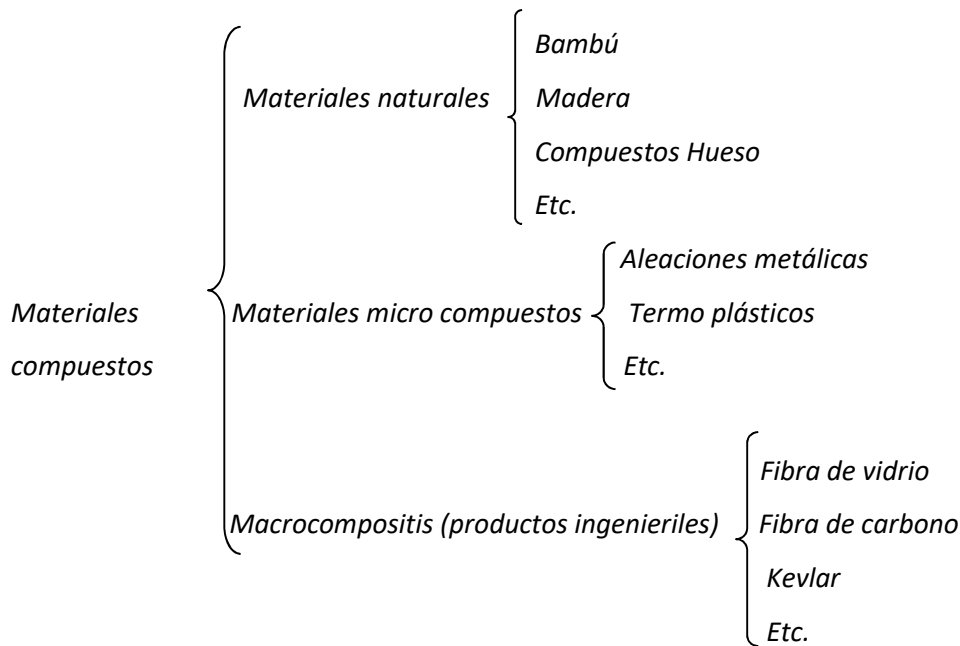
En los últimos años su uso ha tenido una gran demanda en las áreas de ingeniería ya que se pueden fabricar materiales que combinen propiedades físicas y químicas de diversos materiales, como plásticos, cerámicos o metálicos que en la naturaleza sería imposible encontrar, un ejemplo de esto se da en la industria aeroespacial en donde se utilizan materiales ligeros, flexibles, resistentes y que resistan bien la corrosión y al desgaste.

A pesar de que se desarrollen materiales con unas propiedades especiales, manejarlos prácticamente no siempre es factible, dado que se trata, de materiales costosos y de complicada fabricación.

*i. CLASIFICACION Y TIPOS [1-8]*

Debido a que los materiales compuestos cuentan con diferentes propiedades dependiendo de su origen (natural y sintético) y de su matriz, se ha generado la necesidad de clasificar los materiales, de acuerdo a sus características físicas y químicas.

La clasificación más común es de acuerdo a su origen, esta los divide de acuerdo a su origen y su composición química (Fig. 1).



*Figura 1. Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo a su origen y composición. [9, 10]*

Otra clasificación muy utilizada es de acuerdo al tipo de matriz con la que cuenta el compuesto, dividiéndolos en 3 sub-categorías las cuales son: matriz metálica, matriz cerámica y matriz polimérica. [1-8]

Este último tipo de clasificación se basó en las propiedades mecánicas que trasfiere la matriz al compuesto, con lo que la elección del tipo de matriz es de suma importancia para la aplicación que se le dará al material final.

## ii. PROPIEDADES MECÁNICAS [1-11]

Los materiales compuestos combinan las propiedades de la matriz y el refuerzo, de las cuales se tienen que tomar las siguientes consideraciones:

- La relación entre las porciones de fibra y la matriz (fracción en volumen de fibra).
- La geometría y la orientación de las fibras.
- La relación entre la resistencia mecánica y la densidad se define como resistencia específica.

La matriz a su vez tiene la propiedad de mantener unida la parte discontinua (refuerzos), adicionalmente apoya con protección para que el compuesto resista las condiciones necesarias, ya que regularmente transfiere al compuesto las propiedades eléctricas y químicas, así mismo es la que determina el valor de la resistencia.

Otro punto importante es que la matriz permite determinar las características del material compuesto como son la conformabilidad y el acabado superficial, es decir, dependiendo de la combinación de material de la matriz, será la dificultad que se tendrá para poder crear geometrías complejas.

La matriz a su vez es la que proporciona rigidez y refuerzos para trabajar en combinación con los esfuerzos de tracción, dependiendo del tipo de carga a la que sea sometida el material, la matriz tiene diferentes roles dentro del material compuesto, como son:

- Carga compresiva: la matriz tiende a soportar la mayor parte de los esfuerzos, debido a que es la fase continua del material.
- Carga de tracción: la matriz trasfiere las cargas al material de refuerzo con el que cuenta dicho material (fibras o partículas), provocando que éstas soporten el esfuerzo creadas por las cargas. Para que esto suceda correctamente es importante que la matriz y el refuerzo cuenten con una muy buena adhesión, esto determinará la resistencia al impacto y detener la propagación de fisuras (Fig. 2).



Figura 2. Carga compresiva y carga de tracción.

Como se mencionó anteriormente, los materiales compuestos pueden ser fabricados con diferentes tipos de matrices, que generan diferentes tipos de propiedades, por lo que de acuerdo a su clasificación, son los siguientes:

- I. Matriz metálica.- Este tipo de matrices son muy utilizadas en aplicaciones para la industria aeroespacial y automotriz, debido a su gran resistencia, requiere de altas temperaturas para la incorporación de otros materiales por lo que no es compatible con materiales orgánicos.
- II. Matriz cerámica.- Los materiales que cuentan con este tipo de matriz, en su gran mayoría son capaces de soportar altas temperaturas, así como esfuerzos de compresión elevados, sin embargo son frágiles a esfuerzos de tracción y esfuerzos cortantes.
- III. Matriz polimérica.- Estos materiales cuentan con una baja resistencia a las altas temperaturas, así mismo su resistencia mecánica es menor a la de los dos anteriores, sin embargo son muy socorridos debido a que al ser combinados con otros materiales su resistencia mejora significativamente, adicionalmente su bajo peso es uno de sus más grandes atractivos. Estas matrices son muy utilizadas en la industria, debido a la gran versatilidad con la que cuentan los polímeros, son fáciles de procesar, generalmente ligeros y su bajo costo generan la combinación perfecta para su uso, adicionalmente su fácil incorporación y buena compatibilidad con los demás materiales permite que esta matriz sea una de las más utilizadas en el desarrollo de nuevos materiales compuestos.

La matriz polimérica, se divide en tres sub-categorías, que se definen por la reacción al cambio de temperatura.

- Termoplástico.- Se define a un material termoplástico cuando éste tiene la capacidad de derretirse o ablandarse, tomando nuevas formas, sin que esto tenga grandes repercusiones en sus propiedades. Algunos ejemplos de estos son el PVC, el poliuretano, polietileno, entre otros.
  
- Elastómero.- Estos se definen como materiales que tienen una gran capacidad de deformación cuando se ven sometidos a esfuerzos, sin que por esto se genere alguna fractura en los enlaces o modifique su estructura, el cual recupera la forma original al retirar los esfuerzos que generaron la deformación. Los elastómeros a su vez pueden ser materiales termo estables (en mayor medida) o termoplásticos. Algunos ejemplos de estos son la goma natural, poliuretano, neopreno, silicona, entre otros.
  
- Termoestable.- Este tipo de material al calentarse pierde propiedades debido a que modifican los enlaces. Por lo general suelen ser más resistentes, a condiciones normales de uso lo cual lo convierte en un material más estable estructuralmente. Algunos ejemplos de materiales termoestables son el fenol formaldehído, la melanina, las siliconas, poliuretanos, resinas epoxi, entre otros.

### *iii. VENTAJAS Y DESVENTAJAS [7-10]*

La investigación y desarrollo de nuevos materiales a partir de varios compuestos ha permitido obtener propiedades, que con materiales convencionales sería muy difícil de conseguir, algunas de estas propiedades son:

- Alta resistencia específica (resistencia/densidad) y rigidez específica (rigidez/densidad)
- Versatilidad de formas en el diseño
- Adaptación del material a los esfuerzos requeridos debido a la anisotropía

Sin embargo, estos materiales no son perfectos ya que presentan algunas desventajas, las cuales son:

- Se requieren controles rigurosos en su fabricación ya que, de no hacerse correctamente, el material puede fallar en la aplicación designada.

- Elevados costos de desarrollo.
- Se reduce la ductilidad de los materiales

**b. MATERIALES COMERCIALES USADOS COMO FIBRA DE REFUERZO [7-11]**

El material de refuerzo por lo regular se refiere a la fase discontinua o dispersa que se le agrega a la matriz, para que en la mayoría de casos, se mejore sus propiedades mecánica, físicas o químicas.

Los materiales que se pueden emplear como materiales de refuerzos en las matrices poliméricas, metálicas o cerámicas son clasificados de acuerdo a la siguiente manera:

- Estructurales. Estos materiales están formados tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y las propiedades del compuesto no dependen de los materiales del cual está formado, si no de la geometría y/o diseño de las mismas. Estos se clasifican en 3 grupos que son compuestos laminares, estructural sándwich y estructurales no-laminares.
- Partículas: En estos las partículas restringen en movimiento de la matriz en las áreas próximas a las partículas, transfiriendo parte de los esfuerzos aplicados de la matriz a las partículas. Estos materiales a su vez se clasifican en 2 grupos que son por partículas grandes y por dispersión.
- Fibras (estas pueden ser continuas o discontinuas).

En los casos de partículas y fibras para obtener mejores resultados es preferible que se encuentren distribuidas de manera homogénea dentro de la matriz y aunque ambos refuerzos son utilizados en la fabricación de materiales compuestos, los más socorridos son los refuerzos por medio de fibras, ya que están presentan algunas ventajas como son un menor peso, así como una mayor resistencia mecánica.

Una condición importante que es necesaria considerar, es si el nuevo material estará sometido a altas temperaturas ya que de ser así el refuerzo debe soportar por si solo estas temperaturas. Adicionalmente algunas propiedades que se tienen que considerar en la fabricación de un producto compuestos son su densidad, módulo de elasticidad y su esfuerzo de cedencia, ya que estas propiedades serán transmitidas al nuevo material.

La mayor parte de los materiales que son reforzados con fibras consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y mejor relación resistencia-peso. Al mismo tiempo la matriz es capaz de transmitir la fuerza o carga a las fibras, las cuales soportarán la mayor parte de la acción mecánica aplicada.

Una de las ventajas que presenta la combinación de una matriz polimérica y un refuerzo de fibras, es que al tener una matriz polimérica el material contará con una baja densidad y el refuerzo de fibras aportará la resistencia mecánica que requiera el material compuesto, pero al encontrarse en menor porcentaje en el compuesto no se agregará un peso considerable al material compuesto.

Alguna de las fibras más comunes en la fabricación de compuestos son la fibra de vidrio, la fibra de carbono y la aramida. Estos materiales poseen una alta resistencia a la tracción, sin embargo en los últimos años se ha comenzado a experimentar más con las fibras naturales.

#### *i. FIBRA DE VIDRIO [12]*

Como lo indica su nombre, la fibra de vidrio se fabrica a partir de numerosos filamentos ultra finos de vidrio y aunque en la naturaleza existen y son conocidos con el nombre de pelo de Péle, éstos no fueron usados en la industria hasta que en 1938. Russell Games Slayter de Owens-Corning creó la lana de vidrio (fiberglass) para ser utilizada como aislante térmico.

En la actualidad, este material se sigue utilizando como aislante, sin embargo este uso no es su papel más importante, debido a que con el desarrollo de los materiales compuestos la fibra de vidrio ha tenido mucha relevancia debido a que es un material resistente y ligero y aunque no es tan fuerte o rígido como lo es la fibra de carbono, es mucho menos frágil y su costo está muy por debajo de este último.

La clasificación de la fibra de vidrio está dada por sus componentes moleculares, sin embargo el más ampliamente utilizado alrededor del mundo es la fibra de vidrio tipo E, que está formada por aluminio-borosilicato con menos del 1% p/p de óxidos alcalinos. Este material no cuenta con un punto de fusión específico pero comienza a ablandarse a los 2000°C. La fibra de vidrio es muy útil como aislante debido a su alta superficie respecto a su peso ya que genera entre cada fibra grandes bloques de aire dando como resultado un aislante con una conductividad térmica de 0.05 W/m<sup>2</sup>k.

Algunas otras propiedades son: una resistencia a la tracción de 3345 (MPa), una resistencia a la compresión de 1080(MPa) con una densidad de 2.58 (g/cm<sup>3</sup>).

En la industria, la fibra de vidrio se puede encontrar en diferentes presentaciones; estas ayudan a que su uso sea más fácil, sin embargo algunas de estas contribuyen a mejorar las propiedades mecánicas del compuesto. Algunas de estas presentaciones son:

**Roving.-** es una hebra de hilos continuos de fibra, en esta existen 2 tipos una que tiene una cierta torsión mecánica la cual es usada en propulsión y bobinado y la otra que no cuenta con torsión y generalmente se utiliza en el proceso de laminado por spray el cual es muy socorrido para la industria marítima.

**Hilo cortado.-** Está formado por hilos continuos de fibra cortados a longitudes específicas. Este tipo de presentación está diseñado para usarse en modelos moldeables, en procesos de termo-compresión e inyección, siendo usados a su vez en la industria eléctrica y de transporte.

**Fibra.-** En esta presentación la fibra es molida alcanzando longitudes promedio, esto para alcanzar una densidad específica en conjunto con resinas específicas. Este producto está diseñado para ser usado con una variedad de compuestos termoplásticos y termófilos.

**Matriz de hilos cortados.-** Esta se compone de fibras cortadas y unidas entre sí con la ayuda de aglutinantes en emulsión o polvo de poliéster. Esta presentación está diseñada para ser compresible con poliésteres insaturados, vinil éster y algunas otras resinas, esta presentación es usada en la industria marítima y para generar moldes de contacto.

**Matriz de filamento continuo.-** Estas son fibras continuas que forman una tela no tejida generando un aglomerado de felpa compacta. Esta se logra mantener aglutinada con la ayuda de una resina poliéster insaturada.

**Tejido.-** Como lo dice su nombre son telas conformadas por *rovings* entretejidos, estos cuentan con una gran resistencia debido a que la energía se distribuye en las dos direcciones en la que las fibras son tejidas. Este tipo de presentación es usada en aplicaciones estructurales, balística, en aeronaves, contenedores de transporte y puertas.

**Velos.-** Son telas finas (tejidas o no tejidas) que presentan una superficie lisa y uniforme. Esta es usada superficialmente para dar un aspecto de acabado suave a la pieza fabricada.



## *ii. FIBRA DE CARBONO [5-8]*

La fibra de carbono es una fibra sintética, la cual está constituida por la unión de finos filamentos de 5 a 10µm siendo su principal compuesto el carbono, estos filamentos están contenidos en mechas, las cuales pueden contener entre 5,000 a 12,000 filamentos. Aunque su mayor componente es el carbono es considerada una fibra sintética debido a que es obtenida a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo.

Esta fibra cuenta con propiedades mecánicas parecidas a las del acero, un ejemplo es su dureza, la cual provoca que tenga una mayor resistencia al impacto que el acero, sin embargo su peso es igualable a la de una madera o plástico.

La principal aplicación (aproximadamente el 75% de la producción mundial) es para la fabricación de materiales compuestos, siendo la resina epoxi su aglomerante por excelencia, sin embargo también se pueden usar resinas poliéster o vinilés.

La estructura atómica de la fibra es similar a la del grafito, láminas de átomos de carbono ordenadas por patrones hexagonales regulares; la diferencia radica en que el grafito es un material cristalino, dando como resultado que las hojas están paralelas unas con otras, provocando que su unión química sea extremadamente débil y por consiguiente que el material sea frágil y cristalino.

Por el contrario, la fibra de carbono es un material amorfo ya que los átomos de carbono se acomodan de manera aleatoria, apretadas unas contra otras, provocando a su vez una alta resistencia del material.

La densidad de la fibra de carbono es de 1.750 (kg/m<sup>3</sup>), este material es un conductor eléctrico y cuenta con una baja conductividad térmica. Su módulo de elasticidad de 1050 (GPa) y una resistencia a la tracción superior a 300 (GPa).

## *iii. FIBRAS DE ARAMIDA (KEVLAR) [6-8]*

Las fibras de aramida es un nylon obtenido a partir de reactivos aromáticos. Estas fibras consisten en una larga cadena de poliparafenilo teraftalamida. Esta molécula soporta altas temperaturas con la cual es posible la fabricación de equipos ligeros, resistente a la

degradación térmica. Este material cuenta con excelentes propiedades mecánicas como son: un módulo de elasticidad de 80 (GPa), resistencia a la tracción de 3.5 (GPa), tenacidad de 50 (MJ). Estas fibras mantienen sus propiedades mecánicas aún cerca de la temperatura de descomposición de las mismas, además, no se degradan en la presencia de agua salina y no presenta combustión.

#### iv. FIBRAS NATURALES [9-11]

Como su nombre lo indica este tipo de fibras se extraen de plantas, animales o minerales; al ser obtenida de medios renovables y biodegradables su impacto ambiental en comparación de las otras fibras es mucho menor y al mismo tiempo sus costes de producción son mucho más bajos que los de otras materias primas.

Las fibras vegetales están compuestas principalmente por celulosa; por otro lado las animales están compuestas por proteínas. Las propiedades mecánicas de las fibras vegetales dependen en gran medida de la familia (Fig.3), ya que esta define el tipo de celulosa y la geometría de su celda elemental con el que contara las fibras.

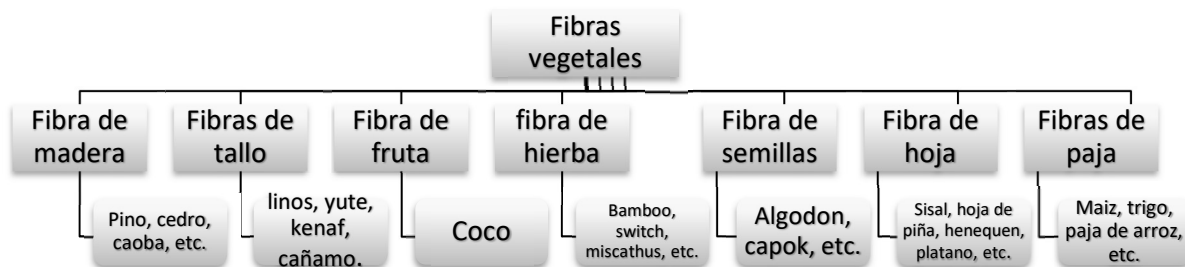


Figura 3. Familia de fibras naturales. [10, 11]

Este tipo de fibras son resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos, sin embargo los ácidos minerales más fuertes las destruyen. Adicionalmente poseen una resistencia mecánica considerable, una densidad baja y una alta absorción de resinas (comparativamente con la fibra de vidrio).

Otra de las ventajas es que la manipulación de este tipo de fibras es generalmente menos peligrosa que el de fibras convencionales; así mismo, este tipo de fibras no son abrasivas por lo que no genera costos adicionales por su tratamiento. Se ha demostrado que cuando

las fibras naturales son quemadas o utilizadas como composta generan una menor cantidad de CO<sub>2</sub> que las fibras convencionales. Sin embargo un factor que ha provocado que este tipo de fibras no se utilicen en grandes proporciones es porque las propiedades de las fibras naturales tienden a variar considerablemente, esto porque la calidad de las fibras depende en gran medida de factores como son: lugar de origen, edad de la planta que procede, condiciones de cuidado, cultivo, proceso de extracción, entre otras.

Por contra parte, la fabricación de fibras convencionales genera una gran cantidad de contaminantes ya que se requieren cantidades enormes de energía para su producción, lo que ha atraído nuevamente la atención a la obtención de fibras naturales para ser utilizadas como material de refuerzo, por las ventajas ambientales y económicas que representan. Así mismo, se han generado tratamientos con los cuales se pueden contrarrestar las desventajas de este tipo de fibras.

En las últimas décadas ha crecido el interés en la investigación de materiales compuestos por fibras naturales, esto como un intento de poder acoplarlo a aplicaciones industriales. Algunos de los motores de interés es su bajo costo de obtención así como el beneficio de ser un producto renovable y amigable con el ambiente.

### ***c. USO Y APLICACIONES DEL COCO [9-11]***

El coco nucifera es una palmera monoica, que puede alcanzar entre 25 y 30 m de altura. Esta palmera cuenta con una base gruesa formada de raíces con un tronco el cual tiene una circunferencia de entre 30 a 40 cm de diámetro. En la parte superior tiene hojas las cuales son capaces de alcanzar 6.5 m de largo. Esta planta tiene como fruto el coco, este fruto al acercarse a su madurez, se seca y se endurece, tomando el aspecto de una nuez.

Esta palmera es una de las plantas más cultivadas en el mundo, debido a su fruto el cual es muy útil para el ser humano.

El fruto del coco está formado por varias capas, la primera capa es una capa ligera llamada epicarpio, inmediatamente después se encuentra una capa la cual es fibrosa y se le conoce como mesocarpio también conocida como mesocarpio. Posteriormente se encuentra el endocarpio que es una semilla con aproximadamente 5 mm de espesor; esta semilla cubre

el interior con una pulpa la cual es llamada endoesperma que se encuentra en dos estados, uno solido suave de color blanco y otro líquido este último ocupa  $\frac{3}{4}$  partes de la cavidad interior del fruto, ambas secciones son comestibles(Fig.4).

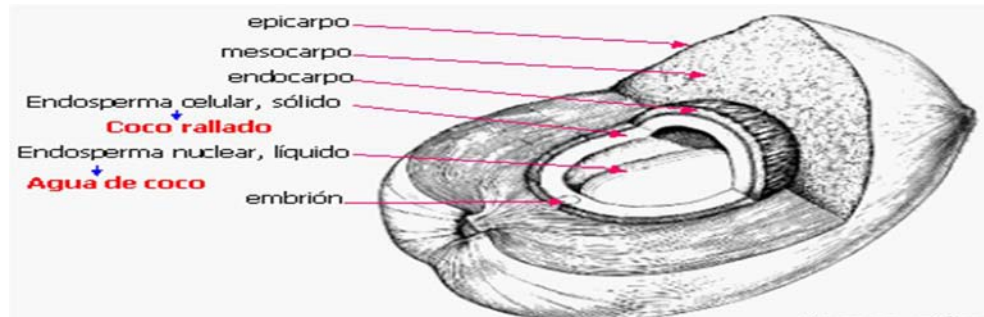


Figura 4. Composición de coco.

Por lo general la parte más aprovechada del coco por la industria es el endoesperma en sus dos secciones, sólido (pulpa de coco) y líquido (agua de coco), debido a que es posible obtener varios subproductos como son dulces (fig.5), aceites, cremas, aromatizantes (fig.6), etc.



Figura 6.  
Cocada, dulce tradicional mexicano.



Figura 5.  
Aceite de coco.

Existen varios sub-productos del coco como son la cuerda del coco, sustrato de coco, etc. éstos son creados a partir de la corteza o mesocarpio, también conocido popularmente como capacho. La corteza representa el 35% del total del coco, de éste, el 90% está conformado por fibras las cuales están constituidas principalmente por lignina y celulosa.

Estas fibras cuentan con una longitud de 15 a 30 cm, tomando en cuenta sus propiedades físicas y químicas las fibras son utilizadas en diversas aplicaciones que van desde el relleno de colchones, fabricación de macetas, cuerdas, abono, pisos, entre muchos otros (fig. 7).



Figura 7. Maceta fabricada con fibras de coco.

i. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA FIBRA DE COCO [9-11, 13-19]

Por el creciente interés en este fruto y en generar tecnologías sustentables se han generado estudios de las fibras que conforman el masocarpio. De la literatura se pueden obtener los siguientes datos.

Propiedades mecánicas:

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la fibra de coco.

Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformación de falla [%]
120-220	4 a 6	25-40

Propiedades físicas:

Tabla 2. Propiedades físicas de la fibra de coco.

Densidad [g/m <sup>3</sup> ]	Diámetro [μm]	Absorción de agua [%wt]	Ángulo microfibrilar [grados]
1.15-1.46	80-460	169	30-49

La fibra de coco no es una estructura sólida ni es homogénea ya que presenta espacios huecos formados entre las paredes celulares. En algunos estudios se menciona que la fibra tiene una porosidad mayor al 80% y una densidad aparente del 0.3 g/m<sup>3</sup>. Esta característica genera una propiedad aislante (térmica y acústica) en el material.

ii. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA FIBRA DE COCO [9-11, 13-19]

La composición química de la fibra de coco permite que la degradación de ésta sea relativamente lenta (20 a 30 años) debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina

las cuales son difíciles de degradar; adicionalmente cuenta con una estructura celular cerrada la cual permite contar con una mejor resistencia a los ataques alcalinos y microbiológicos. La fibra también es rica en carbono, lo que le da una gran resistencia a la degradación siendo al mismo tiempo amigable con el ambiente.

La composición de la fibra de coco se muestra en la tabla 3:

*Tabla 3. Propiedades químicas de la fibra de coco.*

Contenido de ceniza [%wt]	Contenido de carbono [%wt]	Lignina [%wt]	Celulosa [%wt]	Hemicelulosa [%wt]
1.15-1.46	51.5	59.4	32.65	7.95

La fibra cuenta con la ventaja de no ser atacable por roedores o termitas, adicionalmente si a la fibra se le da un proceso de secado, no se generan hongos a partir de ella, lo que hace que el material no se pudra.

### *iii. PRODUCCIÓN DE PALMA DE COCO EN EL ESTADO DE COLIMA [26]*

El estado de Colima cuenta con uno de los cultivos más antiguos de cocoteros, contando con una producción aproximada de 21,454 toneladas anuales de copra (pulpa seca del coco), teniendo el segundo lugar de producción de este producto solo después del estado de Guerrero.

El servicio de información agroalimentaria y pesquera por medio de su dependencia del estado de Colima dio a conocer que cuentan con 850 productores agremiados que se dedican a esta actividad los cuales cuentan con una superficie cultivada de 19,395 hectáreas, en las que los municipios con mayor capacidad productiva son Tecomán, Armería, Manzanillo y Coquimatlán.

Colima cuenta con la más alta concentración de la industria cocotera de América Latina, lo cual coloca al estado como un lugar idóneo para el procesamiento y comercialización de este producto. Esta industria genera una derrama económica cercana a los 500 millones de pesos, colocándose como una de las actividades agrícolas más importantes del estado. En

la actualidad la producción de coco está enfocada en la generación de aceites, los cuales se obtienen de la copra del coco.

Sin embargo, se generan otros productos derivados del coco como son: el carbón, pulpa fresca y deshidratada, copra, cascarilla para aceites, agua de coco, dulces tradicionales, fibras, etc. siendo exportados la mayor parte de esta producción fuera del estado para su comercialización, siendo la industria alimenticia la de mayor demanda de productos dentro del país. En los últimos años se ha comenzado a exportar carbón activado a base de coco y aceite destilado a países de Asia y Europa.

Algunos cálculos de las dependencias estatales señalan que el 75% de la producción se canaliza a la industria derivada de la copra, el 20% se utiliza para productos derivados de la fruta seca y el 5% para la producción de dulces y cremas.

#### *iv. RESINA EPÓXICA (RESINA EPOXI-VINILÉSTER) [20-23]*

La resina epoxi pertenece a la familia de los polímeros termoestables. Esta resina tiene la capacidad de endurecer al ser mezclada con un catalizador, los cuales están constituidos por una resina de baja viscosidad y otra resina sólida que cuenta con un alto peso molecular. Las resinas epoxi son utilizadas principalmente en la industria como protectores para ambientes marinos e industriales.

Las resinas epoxi son caras en comparación con otros plásticos equivalentes, sin embargo éstas son muy socorridas por su facilidad de aplicación y por las propiedades que le trasfiere a los materiales en los que son incorporada, estas propiedades incluyen tenacidad, menor contracción durante el curado, buena resistencia a la intemperie, baja absorción de humedad, buena adhesión a una gran variedad de superficies, una buena capacidad termal, una excelente resistencia a la fatiga, buenas propiedades eléctricas en temperaturas altas y bajas, una excepcional resistencia a la corrosión, entre otras características.

Debido a las propiedades que trasfiere a los materiales, su facilidad de aplicación y su buena adhesión a una gran cantidad de superficies, esta resina es muy socorrida para la fabricación de materiales compuestos al adicionar algún material de refuerzo. Existen

algunos tratamientos térmicos que permiten que el material cuente con propiedades eléctricas.

**d. TECNICAS DE CARACTERIZACION:**

***TENSION, FATIGA Y MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO [23]***

La aceptación de los nuevos desarrollos en materiales (polímeros, metales, compuestos y cerámicos) está asociada a la garantía de buena calidad basada en los conocimientos que los diferentes ensayos proporcionan sobre su durabilidad, siendo estos ensayos a su vez fiables. Los ensayos cuentan con altos controles de calidad apropiados para cada tipo de material, el diseño de éstos, son generados por diferentes asociaciones las cuales estandarizan las pruebas, con lo que se consigue tener certidumbre en cada una de ellas.

Existen varios tipos de ensayos como son los estáticos, dinámicos, destructivos, no destructivos, eléctricos, térmicos, entre muchos otros. La elección del tipo de ensayo que se realizará dependerá en gran medida de las condiciones a las cuales se aplicará el nuevo desarrolló durante su vida útil.

Los ensayos estáticos más comunes son de compresión, tracción y flexión, debido a que en la vida útil de la mayor parte de materiales se verán sometidos a cargas de estos tres tipos.

***i. ENSAYO DE TENSION [13-24]***

El ensayo de tensión consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial de tracción, llevándola hasta el punto de rotura, esto se realiza sujetando los dos extremos de las probetas por medio de unas mordazas, una de estas mordazas queda fija mientras la otra se desplaza de manera cuasi estática, esto se logra aumentando gradualmente la fuerza siendo a su vez las velocidades de deformación muy pequeñas.

La tensión no produce un efecto permanente en la zona elástica, sin embargo en la zona plástica es probable que genere grandes deformaciones en los materiales. Los valores de



los efectos elásticos son solo de una centésima parte de lo que se encuentra en la región plástica, sin embargo, estos pequeños efectos son de sumo interés para los ingenieros debido a dos razones principales.

- En la mayor parte de las aplicaciones a las que serán sometidos los nuevos desarrollos es de suma importancia que la tensión se encuentre dentro de la zona elástica, para evitar deformaciones, por lo que es importante determinar el límite de fluencia ya que representa la tensión por debajo de la cual la deformación es casi en su totalidad elástica.
- Para varias aplicaciones es preciso controlar incluso las deformaciones elásticas más pequeñas debido a las bajas tolerancias permisibles en algunos dispositivos.

En este ensayo se mide la deformación axial de la probeta y la carga aplicada a la misma, obteniéndose una gráfica de esfuerzo-deformación.

A la relación del esfuerzo aplicado y la deformación se le llama módulo de Young, también llamado módulo de tracción o módulo de elasticidad. Este se obtiene de la siguiente manera.

$$\text{Modulo de Young} = \frac{\text{esfuerzo aplicado (Pa)}}{\text{Deformacion } \left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)} \dots\dots\dots(1)$$

Esta es una de las propiedades elásticas más importantes debido a que valores elevados indican que el material es rígido y resistente al alargamiento (poco elástico). Varios polímeros tienen valores alrededor de los  $10^5$  psi (0.689 GPa), por otro lado, los metales como son el hierro fundido tiene valores de  $10^6$  psi (6.894 GPa) y el diamante tiene valores de  $10^8$  psi (689.457 GPa).

Algunas clasificaciones de los polímeros se basan en el número de Poisson, el cual está definido como la relación entre la contracción y el alargamiento en la zona elástica.

$$\text{Numero de poisson} = \frac{\text{Contraccion } \left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)}{\text{Alargamiento } \left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)} \dots\dots\dots(2)$$

Esta clasificación los divide en 5 diferentes:

**Tipo A.**- El módulo de Poisson para estos polímeros es de 0.5; estos son muy parecidos a los líquidos, estos incluyen polímeros débiles y blandos comprendiendo polímeros con bajo

número de elasticidad, así como un bajo punto de fluencia, teniendo al mismo tiempo un moderado alargamiento con respecto al tiempo.

**Tipo B.-** El módulo de Poisson de éstos es de 0.3; estos polímeros se caracterizan por un módulo de elasticidad alto, un punto de fluencia poco definido y deformaciones menores ante la rotura.

**Tipo C.-** El módulo de Poisson de estos materiales oscila entre 0.5-0.6; estos cuentan con un módulo de elasticidad bajo, gran alargamiento, un punto de fluencia bien definido y cuentan con una tenacidad mayor que la del tipo B.

**Tipo D.-** Cuentan con un módulo de elasticidad alto y alta resistencia a la fluencia.

**Tipo E.-** Son los polímeros duros y tenaces; estos experimentan una deformación moderada, esto antes del punto de fluencia.

Es importante mencionar que después del punto de fluencia, el mecanismo predominante es el deslizamiento irreversible de las cadenas del polímero, antes de este punto los esfuerzos dentro de las cadenas son recuperables en algunos polímeros.

Por otro lado, la resistencia a la tracción del polímero es la medida de la capacidad de un material a resistir los esfuerzos axiales siendo la resistencia a la tracción máxima el esfuerzo necesario para causar la ruptura en el material, este esfuerzo se determina de la siguiente manera:

$$\text{Resistencia a la tracción (Pascales)} = \frac{\text{fuerza necesaria para romper la probeta}(N)}{\text{área de la sección transversal (m}^2\text{)}} \dots\dots(3)$$

Es conveniente en los materiales que éstos presenten un alargamiento durante la prueba ya que esto permite absorción de choques a impactos rápidos. Así mismo, en la gráfica esfuerzo-deformación, el área bajo la curva, indica el nivel de la tenacidad total.

Un alargamiento o deformación recuperable se llama deformación elástica, en esta situación las moléculas tensionadas regresan a tomar su posición original (casi original), después de la desaparición de la fuerza que causa la deformación. El movimiento global de la cadena polimérica se denomina fluencia o deformación plástica, en este caso la deformación no es reversible, dando como resultado una deformación permanente.

ii. ENSAYO DE FLEXIÓN [13-24]

El ensayo de flexión es una medida de resistencia al doblado o a la rigidez; en este ensayo la probeta es apoyada en dos soportes, posteriormente se aplica una carga en medio de la probeta por un tiempo determinado, la carga que genera la rotura en la probeta se le denomina resistencia a la flexión. Estos ensayos también son denominados ensayos de viga transversal.

En este ensayo se determinan las propiedades de módulo de elasticidad y resistencia a la flexión (similar a la resistencia a la tensión), resistencia a la flexión y alargamiento en el límite elástico; estos datos son obtenidos con la ayuda de una curva carga-desplazamiento que se obtiene del ensayo, siendo la resistencia a la flexión el esfuerzo máximo de la viga, el esfuerzo causante de la flexión es llamado momento flector.

El momento flector máximo en la viga es igual a:

$$M_{f_{max}} = \frac{P(L-d)}{4} \dots\dots\dots(4)$$

Siendo P la carga total dada en pascales, L la distancia entre apoyos dada en metros y d la separación entre los apoyos a la carga dada en metros.

Si el momento de inercia de la sección transversal ( $W_z$ ) es:

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} \dots\dots\dots(5)$$

Remplazando en la fórmula que determina la tensión y considerando el momento flector máximo, obtenemos la “resistencia estática” o “módulo de rotura de la flexión”.

$$\sigma_{fp} = \frac{M_{fp}}{W_z} \left( \frac{kg}{mm^2} \right) \dots\dots\dots(6)$$

En comparación con el ensayo de tracción, las flexiones medidas en el ensayo de flexión son aproximadamente cuatro veces mayores que los cambios longitudinales en el ensayo de tracción.

El comportamiento de cualquier probeta sometida a flexión es que en el lado contrario a la aplicación de la carga, el material se alarga y en el lado de la aplicación de la carga el

material se comprime, en consecuencia existe una superficie neutra entre estas dos regiones, en esta región el material no sufre ningún cambio de longitud.

Sin embargo, en varios materiales no se rompen aún después de haber experimentado grandes flexiones, la resistencia a la flexión real no puede calcularse en estos casos. Para estas muestras en lugar de este procedimiento, se usa por convenio, el módulo para una deformación del 5% como medida a la resistencia a la flexión, es decir, el cociente de esfuerzo y deformación cuando la deformación es del 5%.

### *iii. ENSAYO DE FATIGA EN TENSION [24]*

Para el diseño de aplicaciones donde las cargas se encuentran estáticas, el límite de fluencia es una muy buena referencia, sin embargo, para aplicaciones en las que se aplican y se retiran las cargas constantemente se requiere una medida diferente. Para este tipo de requerimientos existe la prueba de fatiga.

La resistencia a la fatiga se refiere al esfuerzo “S” que genera la rotura de un material después de aplicar una fuerza un número “N” de veces. En este tipo de pruebas se espera que el valor de “S” dependa del número de “N”, obteniéndose de esta manera una gráfica N-S.

La gráfica N-S es la representación de la fatiga, en función del número de ciclos a un esfuerzo requerido para romper el material. En este tipo de pruebas los materiales pueden soportar un número indefinido de repeticiones siempre y cuando las cargas se encuentren por debajo del límite de fatiga. Estas pruebas se realizan en máquinas para ensayos de pruebas mecánicas universales (INSTRON por mencionar alguna marca); ésta aplica cargas cíclicas durante un número indefinido de veces, en intervalos de tiempo constantes, llevando la probeta a valores máximos de fuerza para posteriormente disminuir los valores a un punto menor.

### *iv. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO [25]*

El microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM: Scanning Electron Microscopy), es un microscopio el cual cuenta con una gran profundidad de campo, lo que permite formar una

imagen ampliada de la superficie de objetos sólidos orgánicos e inorgánicos, logrando a su vez caracterizar los materiales, esto se logra debido a que en vez de usar un rayo de luz convencional utiliza un haz de electrones.

Las imágenes generadas por el SEM se logran gracias a la reconstrucción de imágenes digitales tridimensional es que logran los sensores que se encuentran dentro de éste. Los sensores miden la cantidad e intensidad de los electrones que devuelven las muestras al ser bombardeadas con los electrones. Algunos de los sensores más importantes son:

- **SEI** (Secondary Electron Image) o detector de electrones secundarios, este sensor permite obtener imágenes de alta resolución. Este es el sensor con mayor capacidad para detectar los electrones, siendo el más adecuado para la observación ya que es la de mejor resolución.
- **BEI** (Backscattered Electron Image) o detector de electrones retro dispersados; este permite obtener imágenes de composición y topografía de una superficie, debido a que este sensor es muy sensible a la variación en el número atómico de los elementos presentes en la superficie de la muestra.
- **EDS** (Energy Dispersive Spectromer) o detector de energía dispersiva; este permite recolectar los rayos x generados en la muestra. Como la energía de cada rayo X es característico de cada elemento, se puede obtener información cuantitativa y cualitativa y de dispersión de elementos en la superficie.
- **WDS** o detector de rayos X, similar al sensor anterior, sin embargo, este mide únicamente la señal generada de elementos específicos, permitiendo un análisis más sensible y preciso que el de EDS. Este sensor complementario permite obtener información de picos de elementos cuyas energías de emisión están muy cercanas, así como detectar concentraciones mucho más pequeñas de algún elemento presente en la muestra, sobre todos los más ligeros.
- **BSED** o detector de electrones retro dispersados difractados; este sensor recibe solo los electrones difractados por la superficie que cumplen la ley de Bragg en el punto que son generados, este tipo de electrones aporta información sobre muestras con estructura cristalina.

Alguna de las grandes ventajas del SEM es su alta resolución en las imágenes obtenidas teniéndose en el mercado equipos con resoluciones que oscilan entre los 0.4 nm y 20 nm.

Otra de sus grandes ventajas es su facilidad para la preparación de las muestras ya que, con solo ser una muestra solida conductora, éstas se pueden utilizar sin ninguna preparación adicional. Sin embargo, si la muestra no es conductora, la muestra se puede recubrir con una capa delgada de algún metal como el oro o con una capa de carbono, en su defecto es posible usar muestras no conductoras sin recubrir las muestras si estas se trabajan en bajo vacío.

Durante la microscopia el haz de electrones incide sobre la muestra, esto provoca diferentes interacciones entre los electrones y los átomos.

Algunas de estas interacciones provocan la generación de rayos X, la cuales provocada por el choque de electrones con la muestra originando que otros electrones salgan desprendidos (electrones secundarios) de los átomos de la muestra. Gracias a este desprendimiento de átomos secundarios es posible crear la mayoría de las imágenes generadas por el SEM. Debido a la generación de rayos X, es posible obtener un análisis espectro-gráfico para saber la composición de la muestra.

## II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describirá el procedimiento que se llevó a cabo para el estudio de la incorporación de fibra de coco en una resina epóxica. La metodología se llevó a cabo en tres etapas:

- Fabricación de probetas
- Evaluación mecánica
- Caracterización morfológica

Cada etapa se subdivide en secciones que se describirán en el siguiente apartado.

### a. FABRICACION DE PROBETAS

#### i. METODOLOGIA: EXTRACCION DE LA FIBRA DE COCO

La materia prima que se utilizó fue la cáscara del coco, que como ya se describió correspondió a la capa media fibrosa del coco denominado masocarpio. Para la extracción de las fibras se empleó un procedimiento de secado de aproximadamente 3 días, con temperatura ambiente directo al sol (fig.8).



*Figura 8. Masocarpio seco.*

La extracción de la fibra se realizó por medio de un proceso manual por la dificultad de la naturaleza del coco; por sus características, las fibras se encuentran aglomeradas por medio de una resina orgánica (celulosa). Fig.9



*Figura 9. Aglomeración de fibras por celulosa.*

Para eliminar la celulosa se realizaron una serie de impactos en el masocarpio con la ayuda de un martillo, provocando con esto el desprendimiento de la resina aglomerante y a su vez dejando únicamente las fibras (fig.10).



*Figura 10. Fibra de coco desprendida de la celulosa*

Durante todo el proceso de extracción de las fibras no se aplicó ningún tratamiento químico, esto con la finalidad de no alterar en ningún sentido las propiedades físicas ni químicas de la fibra de coco.



ii. *METODOLOGÍA: FABRICACION DE PROBETAS DE FIBRA DE COCO Y RESINA EPOXI*

Debido a la necesidad de garantizar la buena calidad de los nuevos desarrollos, existen varias asociaciones, las cuales cuentan con comisiones especiales, que proporcionan los estándares para los diferentes tipos de materiales o las diferentes pruebas a realizar en cada material.

Estas asociaciones son: la American Society for Testing and Materials (ASTM), el American Standard Institute (ANSI) estos dos en Estados Unidos de America, la International Standard Organization (ISO), el British Standard Institution (BSI) en Inglaterra, el Deutsche Normenausschuss (DNA) en Alemania, la Normatividad Mexicana (NOM) en México y las asociaciones equivalentes en cada país, las cuales tienen que ser referidas por los fabricantes y los usuarios de los nuevos desarrollos, para garantizar que la información proporcionada cuanta con estándares internacionales. [25]

Por lo que, para la realización de los ensayos, así como para la correcta fabricación de las probetas utilizadas durante este estudio, se consultaron las siguientes normas de la ASTM:

- D4762-11a Standard polymer matrix composite materials.
- D3039-D3039M-00 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- D3479-D3479M-96 Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite.
- D790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

Estas normas proporcionan los lineamientos que se tendrán que acatar durante la caracterización de los materiales. Estos lineamientos contemplan las dimensiones de las probetas que se utilizaron para los diferentes tipos de ensayos.

Para la realización de los ensayos se fabricaron 5 diferentes tipos de probetas, las cuales fueron las siguientes:

- Tipo long. - estas probetas se fabricaron únicamente con fibra de coco en las que todas las fibras fueron colocadas longitudinalmente (Fig.11).



*Figura 11. Probeta tipo coco long.*

- Tipo epo. - estas probetas se fabricaron con material epóxico, sin ningún tipo de material de refuerzo (Fig.12).



*Figura 12. Probeta tipo epo*

- Tipo epo ale. - estas probetas se fabricaron con material epoxi como matriz y fibra de coco como refuerzo. Las fibras en las probetas no contaron con una orientación específica (orientación al azar) (Fig.13).



*Figura 13. Probeta tipo epo ale.*

- Tipo epo long. - estas probetas se fabricaron con material epoxi como matriz y fibra de coco como refuerzo. Todas las fibras fueron colocadas longitudinalmente (Fig. 14).



*Figura 14. Probeta tipo epo long.*

- Tipo epo trans. - estas probetas se fabricaron con material epoxi como matriz y fibra de coco como refuerzo. Las fibras se colocadas transversalmente en la probeta (Fig. 15).



*Figura 15. Probeta tipo epo trans.*

Para la fabricación de las probetas anteriormente mencionadas se realizaron diferentes procesos, los cuales se detallan a continuación:

Para las probetas tipo *coco long*, *epo long* y *epo trans* fue necesario alinear la fibra con la finalidad de direccionarlas en un solo sentido como se muestra en la Fig. 16.



Figura 16. Fibra de coco alineado.

Para las probetas que en su composición contaban con resina epóxica (tipo epo, epo ale, epo long y epo trans), se utilizó una resina epoxi de bisfenol comercial (Fig. 17).



Figura 17. Resina epoxi.

Esta resina epóxica se eligió debido a que cuenta con una baja viscosidad, esto con la finalidad de lograr una mejor penetración en las fibras. Algunas de las propiedades de la resina se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de la resina epoxi.

Viscosidad (Cps a 25°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Equivalente epoxi en peso EEW (%en peso)
500-700	1.14	190-210

Otras propiedades que resultaron benéficas para el desarrollo de este trabajo, fue su facilidad para su aplicación, así como su característica de solidificar a bajas temperaturas.

Como catalizador de la resina epóxica, se utilizó un endurecedor de amina cicloalifática (Fig. 18).



Figura 18. Resina catalizadora.

Algunas de sus propiedades se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del catalizador.

Viscosidad (Cps a 25°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Valor amínico total (mgKOH/g)
80-180	0.99-1.02	380-325

Los dos compuestos (resina epóxica y catalizador) se combinaron en proporciones volumétricas de 2/3 de resina epoxi, por 1/3 de catalizador; posteriormente se vertieron en un recipiente y con la ayuda de un agitador se mezclaron los 2 compuestos, durante 2 minutos, evitando en lo posible la generación de burbujas de aire. Finalmente, esta mezcla (sistema epoxi) se vertió en el molde correspondiente.

Para las probetas tipo *epo*, el sistema epoxi fue vertido en un molde rectangular, posteriormente se dejó reposar hasta que solidificó y finalmente las probetas se cortaron acorde a las medidas recomendadas por las normas ASTM (25mm de ancho, 250mm de largo y 2.5mm de grosor), con la ayuda de una segueta (Fig. 19).



Figura 19. Probetas tipo epo con las medidas de las normas ASTM.

Para las probetas tipo *epo ale*, *coco long*, *epo long*, *epo trans*, las fibras de coco fueron comprimidas con la ayuda de una prensa hidráulica con la cual se generó una presión de 4,000 psi (27.579 MPa), simultáneamente la placa de la prensa se calentó hasta una temperatura de 110°C (Fig. 20).



Figura 20. Prensa hidráulica.

Para las probetas tipo *coco long*, posterior a la compresión se cortaron las probetas al tamaño definido por las normas ASTM (25mm de ancho, 175 de largo y 2 mm de espesor), por medio de cortes realizados con la ayuda de tijeras convencionales. (Fig. 21.)



Figura 21.  
Probeta tipo *coco long* cortada con la ayuda de tijeras.

Para las probetas tipo *epo ale*, *epo long* y *epo trans* después de la compresión, las fibras fueron colocadas en un molde, añadiendo posteriormente el sistema epoxi, dejándose solidificar por aproximadamente 10 horas.

Para todas las probetas con sistema epoxi la relación volumétrica de la matriz y el material de refuerzo fue de 70% y 30% respectivamente.

Debido a que el molde fue de tipo abierto, al vertir el sistema se generaron defectos causados por la generación de burbujas en las probetas (fig. 22).



Figura 22.  
Burbujas de aire en una probeta.

Finalmente, las probetas fueron cortadas con la ayuda de una segueta (Fig. 23), de acuerdo a las normas ASTM, siendo las medidas para las probetas tipo *epo ale* de 25mm de ancho, 250 de largo y 2.5 de grosor; para las probetas tipo *epo long* 25 mm de ancho, 175 de largo y 2.5 de grosor y para las probetas tipo *epo trans* de 15mm de ancho, 250mm de largo y 2.5 mm de grosor.



*Figura 23.*  
*Corte de probetas tipo epo ale del molde principal con la ayuda de una segueta.*

### **b. EVALUACIÓN MECÁNICA**

Al tratarse de un nuevo desarrollo, fue de suma importancia conocer su comportamiento en condiciones normales; por dicha razón fue necesario determinar las propiedades mecánicas.

Los valores de las propiedades mecánicas darán la pauta para la aplicación en el diseño y selección del material para la generación de productos o bienes útiles y funcionales para la sociedad.

La preparación de las probetas para los ensayos de tracción, flexión, fatiga y validación, estuvo basada en las normas ASTM que se mencionaron en los capítulos anteriores.



i. ENSAYOS MECÁNICOS APLICADOS AL MATERIAL COMPUESTO

Las normas ASTM dan recomendaciones para los ensayos, estas normas no cuentan con valores exactos de velocidades o frecuencias (fatiga), debido a que aplican para una gran variedad de materiales compuestos, los cuales únicamente tienen que contar con una matriz polimérica. Por lo que en todos los ensayos se generaron pruebas piloto para determinar los parámetros para los ensayos.

El número de muestras por cada prueba fue de un mínimo de 5 según lo establecen las normas ASTM.

- Ensayo de tensión

Los parámetros utilizados para los ensayos de tracción estuvieron sustentados en las normas ASTM D3039-D3039M-00.

Los ensayos se realizaron con una máquina INSTRON modelo 5567, a la cual se sometieron 8 probetas tipo *long*, 7 probetas tipo *epo*, 13 probetas tipo *epo ale*, 8 probetas tipo *epo long* y 5 para el tipo *epo trans*.

La velocidad que se determinó para todas las probetas fue de 50 mm/s.

- Ensayo de flexión

Los parámetros utilizados para los ensayos de flexión estuvieron sustentados en las normas ASTM D790-03.

Los ensayos se realizaron en una máquina INSTRON modelo 5567.

Para este ensayo se probaron 5 muestras de las probetas de tipo *epo ale* y *epo long*.

La velocidad que se determinó para la prueba fue de 50 mm/s. Las normas marcan un radio mínimo de 3.2 mm y máximo de 8 mm y un radio máximo de los soportes de 3.2 mm.

- Ensayo de fatiga

Los parámetros utilizados para los ensayos de tracción estuvieron sustentados en las normas ASTM D3479-D3479M.

Los ensayos se realizaron en una máquina Material Test System (MTS) modelo 810 con una celda de carga de 250 kN en un intervalo de 10 kN.

La norma pide determinar un valor de R, el cual está definido de la siguiente manera:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

R es la relación entre la carga mínima y la carga máxima.

$\sigma_{min}$  es el esfuerzo mínimo de tracción a la que se sometió la probeta durante el ensayo.

$\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo de tracción a la que se sometió la probeta durante los ensayos.

Para este trabajo se definió a una R de 0.4, debido a las limitantes del equipo, así mismo se determinó una frecuencia de 1 Hz.

ii. *CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA*

- **Microscopia electrónica de barrido**

Se ocuparon 2 diferentes microscopios electrónicos de barrido.

El primer microscopio fue un Philips serie xl20, el cual se utilizó para ver la interacción de las fibras de coco con el sistema epoxi.

El segundo microscopio es un modelo SEM JEOL 7600, con este microscopio se realizaron varios análisis superficiales de la fibra de coco, así como análisis espectrográficos de las mismas.

### III. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION

#### a. ENSAYOS MECÁNICOS

##### i. TENSIÓN

A continuación, se muestra un ejemplo que ilustra el procedimiento de cálculo de los datos. Con la gráfica carga-desplazamiento obtenida a partir de los ensayos realizados, se realizaron las siguientes operaciones.

$$\sigma = \frac{\text{carga (P)}}{\text{Area transversal de la probeta}} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{deformación} = \frac{\text{desplazamiento (d)}}{\text{Area transversal de la probeta}} \dots\dots\dots(9)$$

Con los datos obtenidos se generó una gráfica esfuerzo-deformación (Fig.24.)



Figura 24. Gráfica esfuerzo-deformación.

A partir de la relación esfuerzo-deformación, se identificó la zona lineal (zona elástica) y con los valores al límite de la zona plástica se calculó una regresión lineal para obtener la ecuación de la recta (Fig. 25.), con lo que se obtuvo la pendiente que corresponde al módulo de elasticidad aparente (módulo de Young).

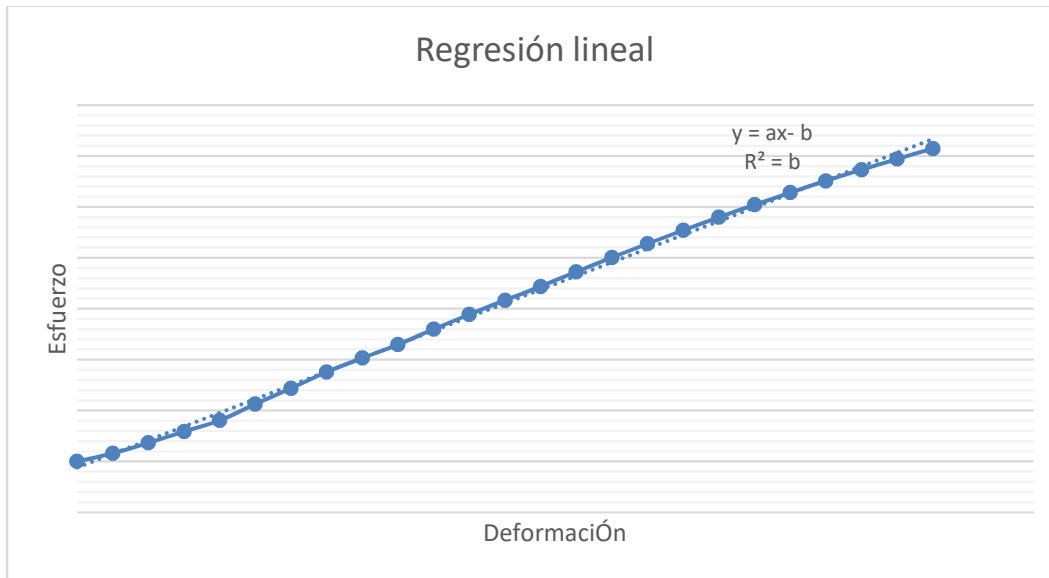


Figura 25.  
Regresión lineal para la obtención del módulo de Young.

Con los resultados se determinó el punto de fluencia, el cual se obtuvo trazando una recta con la pendiente de la recta obtenida de la regresión lineal; esta recta se desplazó al punto 0.002 en el eje de la deformación, la intersección con la curva esfuerzo-deformación fue el punto de fluencia (Fig.26).

El esfuerzo último (máximo) así como su correspondiente deformación máxima se obtienen al analizar los datos procesados.

A partir de los valores obtenidos durante los ensayos de tracción, se generaron las gráficas esfuerzo-deformación de los diferentes tipos de probetas.

En la figura 27 se muestran las curvas esfuerzo-deformación características de los diferentes tipos de probetas. En esta figura se observa que las probetas tipo *epo trans* tuvieron la menor resistencia a la tracción, así como las menores capacidades a la deformación. Por otro lado, se observa que las probetas con mayor resistencia a la tracción fueron las de tipo *epo ale*, sin embargo, las probetas con mayor capacidad de deformación fueron las tipo *epo*.

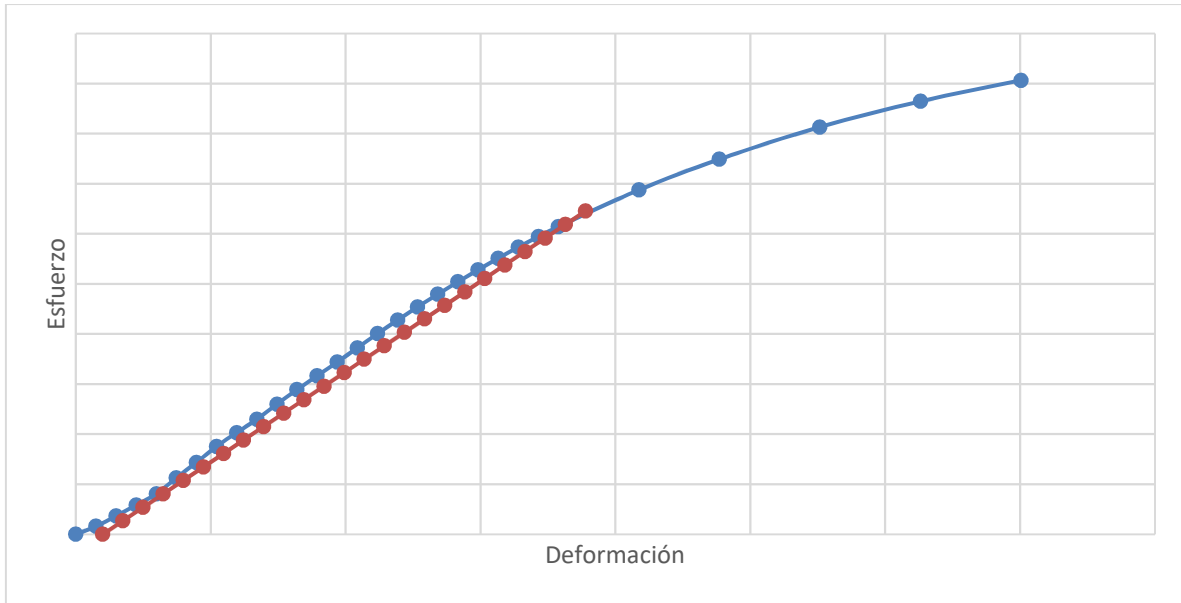


Figura 26.  
 Grafica esfuerzo-deformación para la obtención del punto de fluencia.

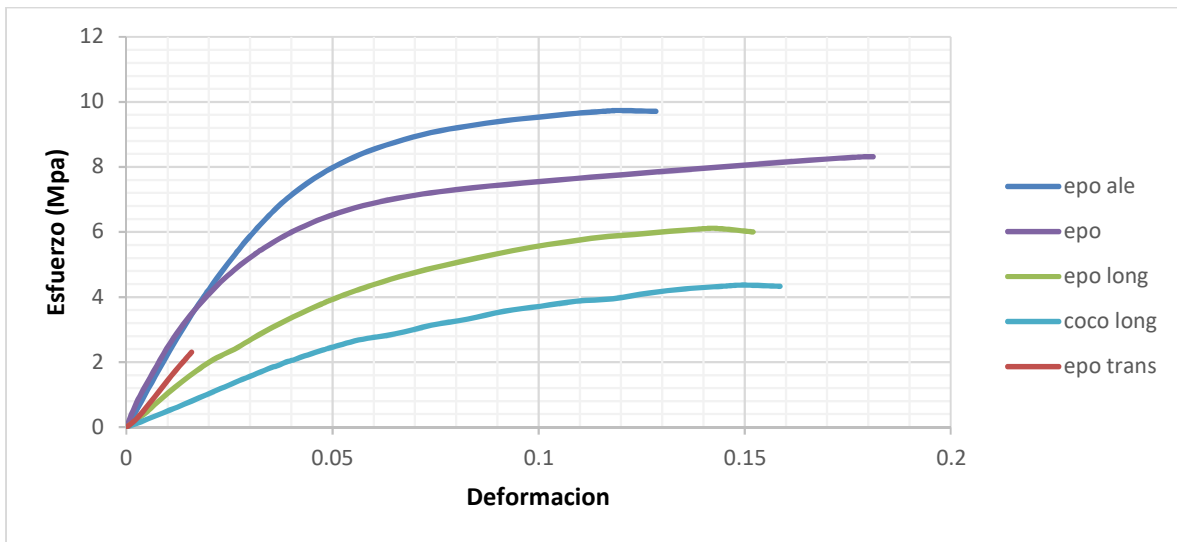


Figura 27. Graficas esfuerzo-deformación de las

En la tabla 6 se pueden observar los valores promedio de las propiedades mecánicas evaluadas durante este ensayo (tracción) de los diferentes tipos de probetas.

Tabla 6.  
Valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción.

Probeta tipo	Módulo de Young (MPa)	Deformación de fluencia (mm/mm)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)
Coco long	63.092	0.041	2.402	0.132	4.245
Epo long	94.936	0.043	3.825	0.122	5.711
Epo trans	120.425	0.025	2.679	0.034	2.896
Epo	181.644	0.035	5.918	0.181	8.264
Epo ale	197.807	0.030	5.426	0.104	9.006

Para validar los valores obtenidos durante los ensayos se utilizó la ecuación 8, la cual define de manera teórica la resistencia del material:

$$\sigma_{Cu} = v_m \sigma_{mu} \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

$\sigma_{Cu}$ = Esfuerzo máximo a la tensión del material compuesto.

$v_m$ =Cantidad de la matriz en el material compuesto en fracción volumétrica.

$\sigma_{mu}$ =Esfuerzo máximo de la matriz.

Se aplicó la ecuación 11 en las probetas tipo *epo long* debido, a que la orientación de las fibras no efecto el comportamiento de las probetas durante las pruebas.

Considerando que la probeta tuvo un 30% de volumen de fibra de coco y tomando al esfuerzo máximo como 8.264 MPa (valor obtenido por la probeta tipo **epo**), obtenemos que la resistencia teórica del material es:

$$\sigma_{Cu} = (1 - 0.7)8.264 = 5.785 \text{ MPa} \dots \dots \dots (11)$$

El valor es muy cercano al obtenido de manera experimental, el cual fue de 5.711 MPa, por lo que se considera que las pruebas son validadas respecto al modelo teórico.

En la figura 28 se observan de manera clara los esfuerzos máximos que mostraron durante los ensayos los diferentes tipos de probetas. Como ya se mencionó anteriormente las probetas que tuvieron los resultados más bajos fueron las tipo *epo trans*.

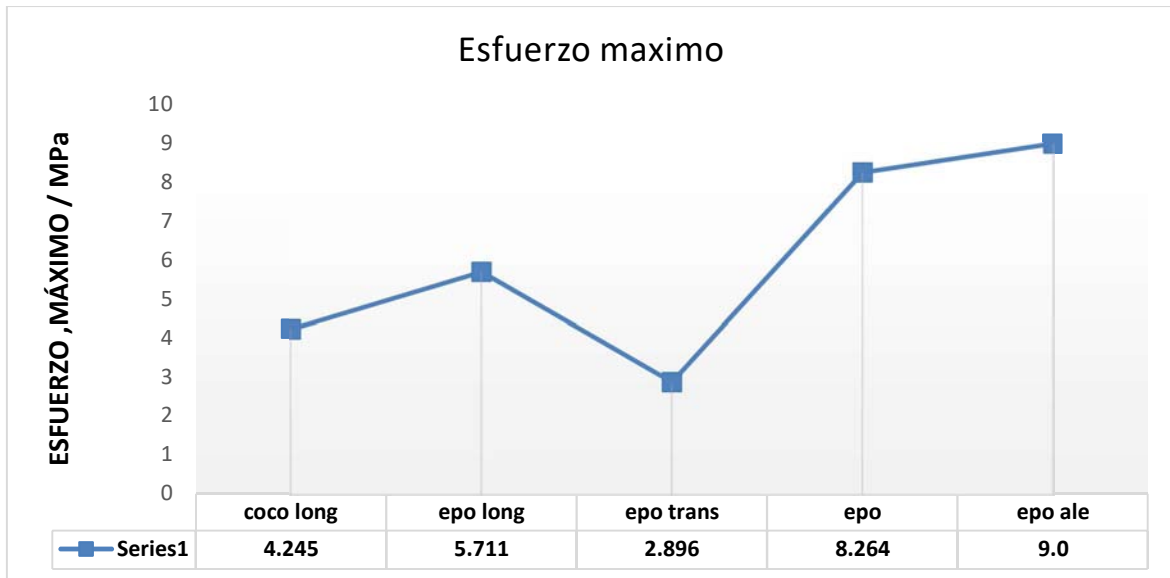


Figura 28. Gráfica comparativa esfuerzos máximos-deformación.

Los resultados obtenidos de las probetas *epo trans*, estuvieron por debajo de todas las demás probetas, estos resultados se atribuyen a la orientación del material de refuerzo, debido a que la posición en la que se encuentran las fibras, no fueron capaz de ayudar a distribuir los esfuerzos debido a que la carga generada durante el ensayo se aplicó transversalmente respecto a la orientación de las fibras.

Como se muestra en la figura 29, la fractura en las probetas tipo *epo trans* se generó con una línea casi perpendicular a la carga de los esfuerzos aplicados, por lo que es posible que la orientación de las fibras en estas probetas afectará de forma negativa la resistencia del compuesto ya que las fibras pudieron ayudar a la propagación de la falla.



Figura 29. Probeta tipo *epo trans* fracturada

La probeta tipo *epo* al fracturarse durante el ensayo de tracción generó una línea casi perfecta (Fig. 30), perpendicular a la fuerza generada por la máquina INSTRON.



Figura 30.  
Probetas tipo *epo* Fracturadas.

Como se observa en la figura 31 las probetas tipo *epo ale* tuvieron una mayor resistencia a los esfuerzos con un 9% por arriba de los obtenidos con las probetas tipo *epo*, sin embargo su capacidad de deformación disminuyó en un 43% en comparación a las probetas tipo *epo*.

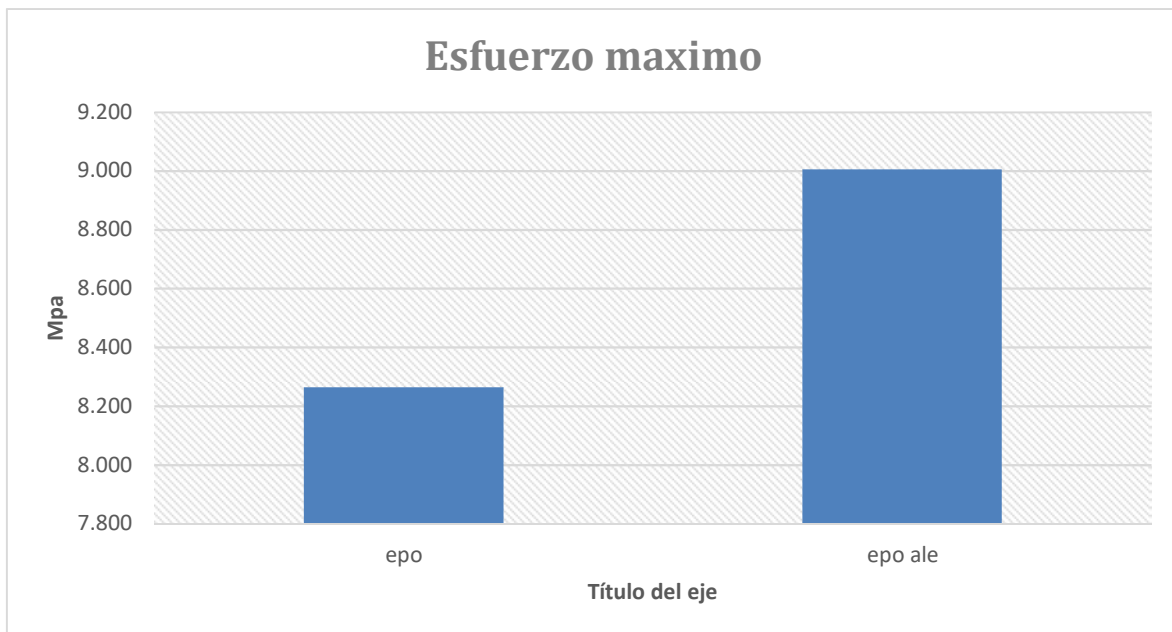


Figura 31. Gráfica comparativa de esfuerzos máximos en probetas tipo *epo* y *epo ale*.



En la figura 32 se muestran los valores obtenidos del módulo de Young para los diferentes tipos de probetas. Se puede apreciar que los mejores resultados fueron de las probetas tipo *epo ale* y los más bajos fueron para las probetas tipo *epo trans*.

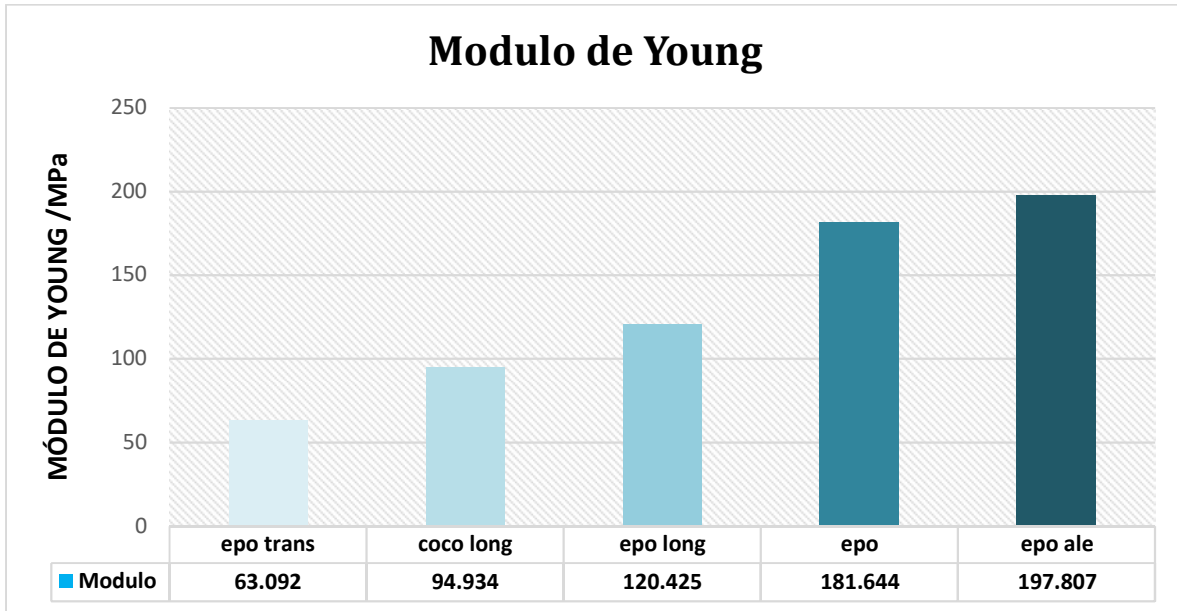


Figura 32.  
Gráfica comparativa del módulo de Young para las diferentes probetas.

Con los resultados anteriores se puede concluir que las probetas que mostraron mejores resultados fueron del tipo **epo ale**; sin embargo aunque las probetas tipo *epo long* y *epo trans* contaron con la misma matriz y fueron reforzados con el mismo tipo de fibra, sus resultados están por debajo de la probeta tipo *epo ale*. Estos resultados se deben a que al colocarlas en un solo sentido las fibras trabajan individualmente generando un decaimiento en las propiedades del compuesto. Sin embargo, en el arreglo aleatorio las fibras trabajan en conjunto debido a las interacciones que existen entre ellas, logrando generar un material más resistente a las fuerzas de tracción, mejorando las propiedades elásticas, en comparación de los otros tipos de probetas reforzadas con fibras. Con lo que se concluye que el arreglo (orientación) de las fibras es determinante en el comportamiento del material compuesto.

## ii. FLEXIÓN

Con los resultados obtenidos durante los ensayos de tensión, se decidió probar únicamente las probetas tipo *epo long* y *epo ale*, debido a los bajos resultados obtenidos de las probetas tipo *epo trans* durante los ensayos de tracción.

De igual manera se descartó el ensayo de flexión para las probetas tipo *coco long* debido a que al ser solo fibra de coco éstas jamás podrían llegar a su punto de ruptura ya que al tener una gran capacidad de deformación su punto de ruptura difícilmente se evidenciaría con este ensayo como se muestra en la Fig. 33. De igual forma se realizó el ensayo de flexión en las probetas tipo *epo long* y *epo ale* y al ver que, en estas probetas, igualmente mostraron grandes deformaciones plásticas (fig. 33), estas no tuvieron ruptura, ni mostraron ningún tipo de agrietamiento. Finalmente, al consultarse los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, se concluyó que las probetas tipo *epo* tampoco llegarían al punto de ruptura, por lo que su ensayo en esta prueba se descartó.

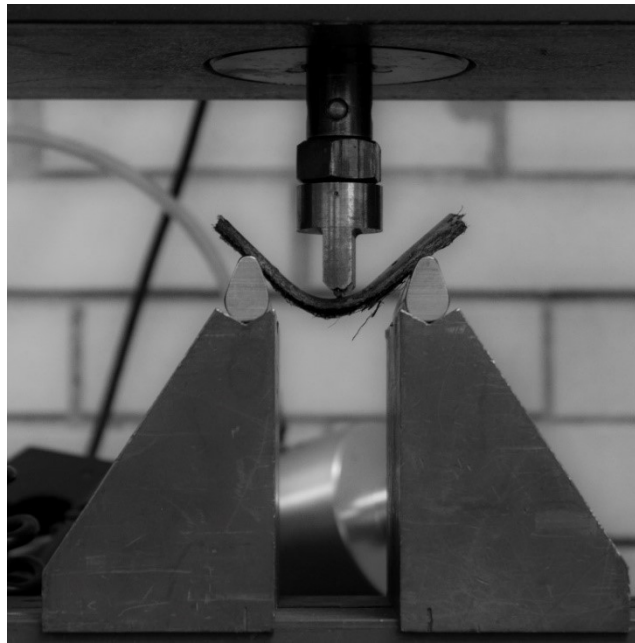


Figura 33. Probeta sometida a ensayo de flexión.

En la figura 34 se muestran las curvas carga-flexión generadas durante el desarrollo del ensayo; las curvas corresponden a las probetas tipo *epo ale* y *epo long*. Como se observa

las probetas tipo *epo long* mostraron mayor resistencia a la flexión, sin embargo ninguna de las dos llegó a la ruptura.

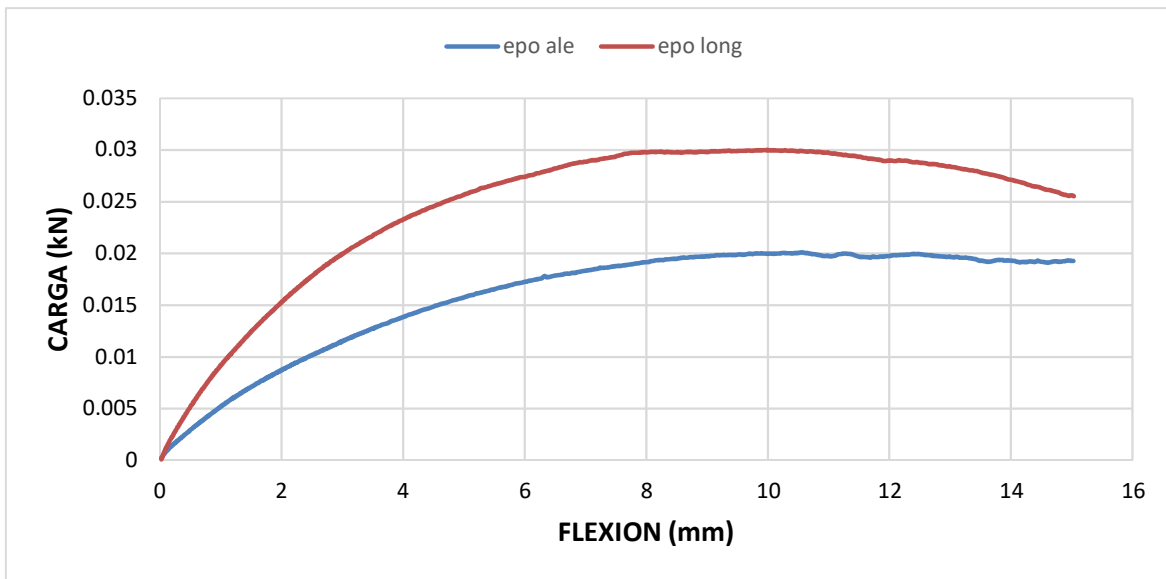


Figura 34. Probeta sometida a ensayo de flexión.

Tal y como se indicó en la sección referente a la flexión, existen varios materiales los cuales no se rompen, aunque experimenten grandes de flexiones, debido a esto no es posible calcular de manera experimental su resistencia a la flexión, por ello se utiliza el módulo para una deformación al 5% como medida a la resistencia a la flexión, es decir, el cociente de esfuerzo y deformación cuando la deformación es del 5%. En la tabla 7 se muestran los valores calculados por medio de este procedimiento.

Tabla 7. Valores promedio obtenidos del ensayo de flexión. -

Tipo de probeta	Deformación máxima (m)	5% Deformación máxima (m)	Carga máxima en deformación al 5% (N)	Resistencia a la flexión (kPa)
Epo ale	0.018	>0.001	4.749	5.322
Epo long	0.015	>0.001	7.379	9.768

Los resultados se explican debido a que la matriz al ser un material epoxi es capaz de soportar grandes deformaciones plásticas sin perder sus propiedades, adicionalmente el epoxi con el que se trabajó, es utilizado en la industria como recubrimiento de pisos en los que se requiere una gran resistencia a los impactos, así como a cargas cíclicas.

Por otro lado, las fibras de coco son altamente flexibles, cuentan con una gran capacidad de deformación, con esto se puede decir que los resultados obtenidos en las pruebas de flexión son acordes a lo esperado.

### iii. FATIGA

Debido a que la frecuencia que se determinó para el funcionamiento óptimo del equipo fue de 1 Hz y porque el tipo de matriz es un termo plástico (este tipo de materiales resisten hasta 100,000 repeticiones), se determinó que solo se someterían 2 diferentes tipos de probetas a este ensayo.

Las probetas sometidas a este ensayo fueron las de tipo *epo ale* (Fig.35) debido a sus buenos resultados en las pruebas anteriores mientras que las probetas tipo *epo* se usaron con la finalidad de tener una referencia del comportamiento de la matriz sin material de refuerzo.



Figura 35. Probeta tipo *epo ale* sometida a ensayo de fatiga.

Para este ensayo se utilizaron los valores obtenidos del punto de fluencia durante los ensayos de tensión; estos valores fueron usados a un 80% de su fuerza. Tabla 8.

Tabla 8. Punto de fluencia al 80%.

Muestra	Deformación de fluencia (mm/mm)	Punto de fluencia (Mpa)	80% Punto de fluencia (Mpa)
epo	0.035	5.918	4.7344
epo ale	0.0300	5.426	4.3408

Fue necesario determinar un valor para la relación entre el esfuerzo máximo y mínimo a la cual se sometieron las probetas.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots\dots\dots(10)$$

Debido a las limitaciones de velocidad del equipo y que los materiales usados como matriz para la fabricación de las probetas tuvieron grandes propiedades elásticas, se determinó el valor de R=0.4, dando como resultados los valores mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Esfuerzo máximo y mínimo usados para pruebas de fatiga.

Muestra	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$
epo	4.734	1.894
epo ale	4.341	1.736

Estos valores se multiplicaron por el área transversal de las probetas para determinar las fuerzas a las cuales se sometieron a las probetas. Estos valores y todas las condiciones antes mencionadas se mantuvieron durante todo el desarrollo del ensayo.

Como se observa en la figura 36 la probeta tipo *epo ale* mostró una disminución en sus propiedades elásticas.

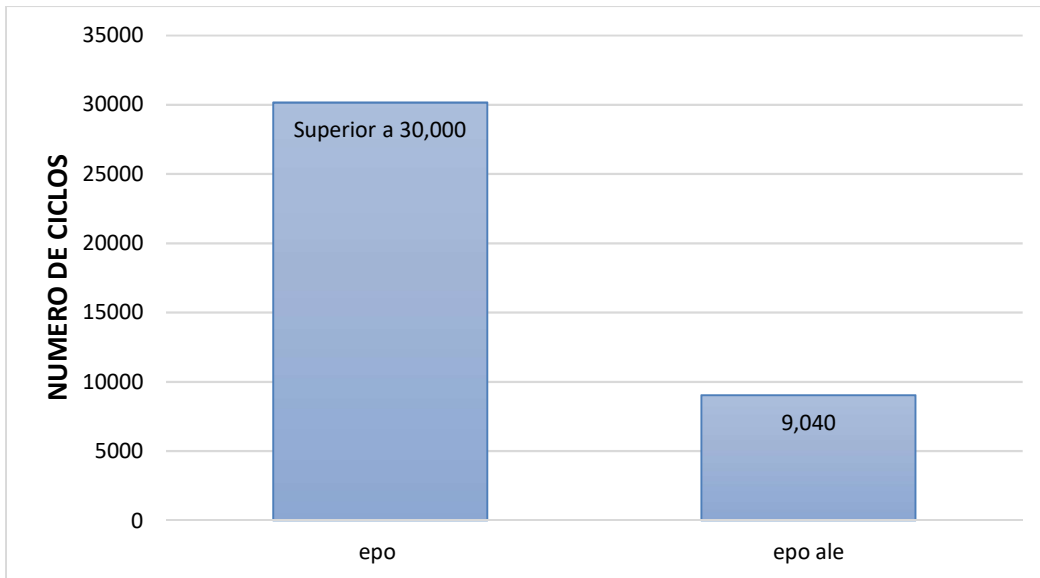


Figura 36.  
Gráfica comparativa de probetas durante ensayo de fatiga.

Este comportamiento, como se explicó en capítulos anteriores, se debe a la combinación de las propiedades de los materiales que componen las probetas, la existencia de fibras de coco dentro de la probeta redujo la capacidad de deformación de la probeta tipo *epo ale*, teniendo resultados muy por debajo de los obtenidos con la probeta tipo *epo*.

Un punto que pudo afectar los resultados de las propiedades mecánicas, fueron las burbujas en las probetas, las cuales se formaron durante el proceso de fabricación, este defecto de fabricación generado por el uso de moldes abiertos, provocó que en las zonas dónde se formaron las burbujas correspondiera a una zona de concentración de esfuerzos pudiendo provocar fracturas prematuras.

#### **b. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO**

La preparación de las fibras para la microscopia consistió en el aglutinamiento, para esto se utilizó el sistema epoxi como adhesivo, únicamente en la zona inferior de la muestra, dejando libre de resina la parte superior de la misma, esto con el fin de que el sistema epoxi no interfiriera durante el proceso, tal y como se muestra en la Fig.37.



Figura 37. Muestra usada para la microscopía.

En la figura 38 se aprecia que, para poder medir los diámetros de las fibras, fue necesario realizar un aumento de 85x, adicionalmente se puede observar rugosidades en la superficie de las fibras.

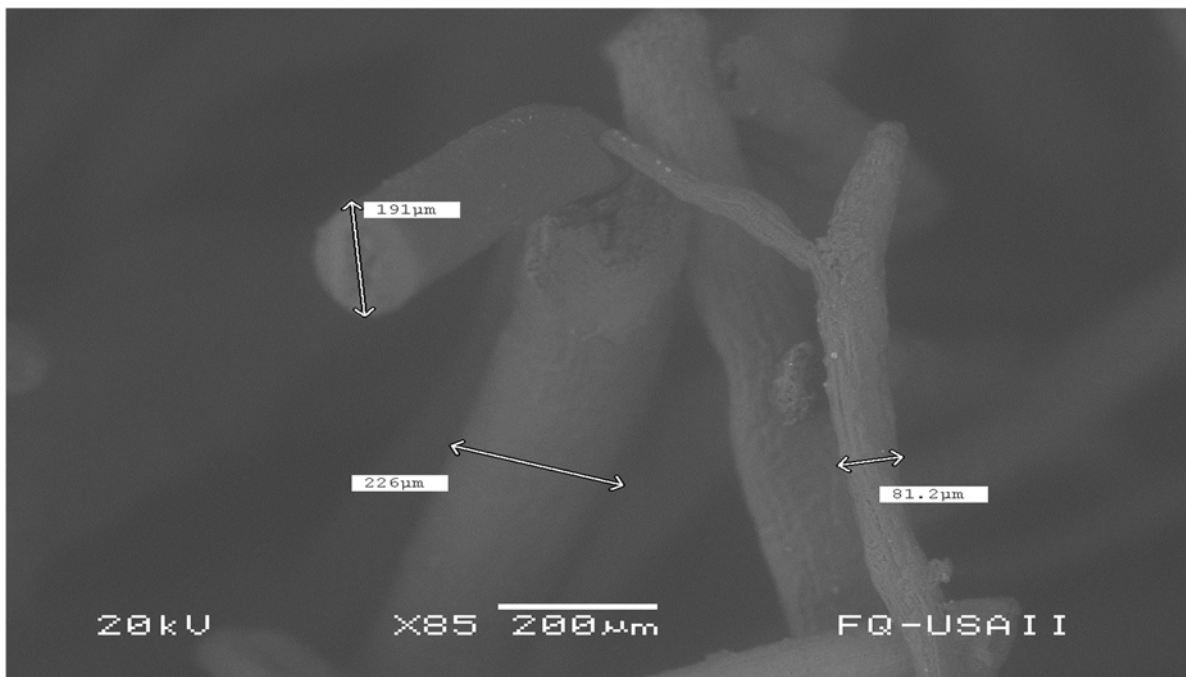


Figura 38. Dimensionamiento de fibras delgadas.

Como se puede observar en las figuras 38 y 39, los diámetros de las fibras de la muestra oscilan entre 81.2 μm y 287 μm, valores que están entre los rangos reportados en la tabla 2.

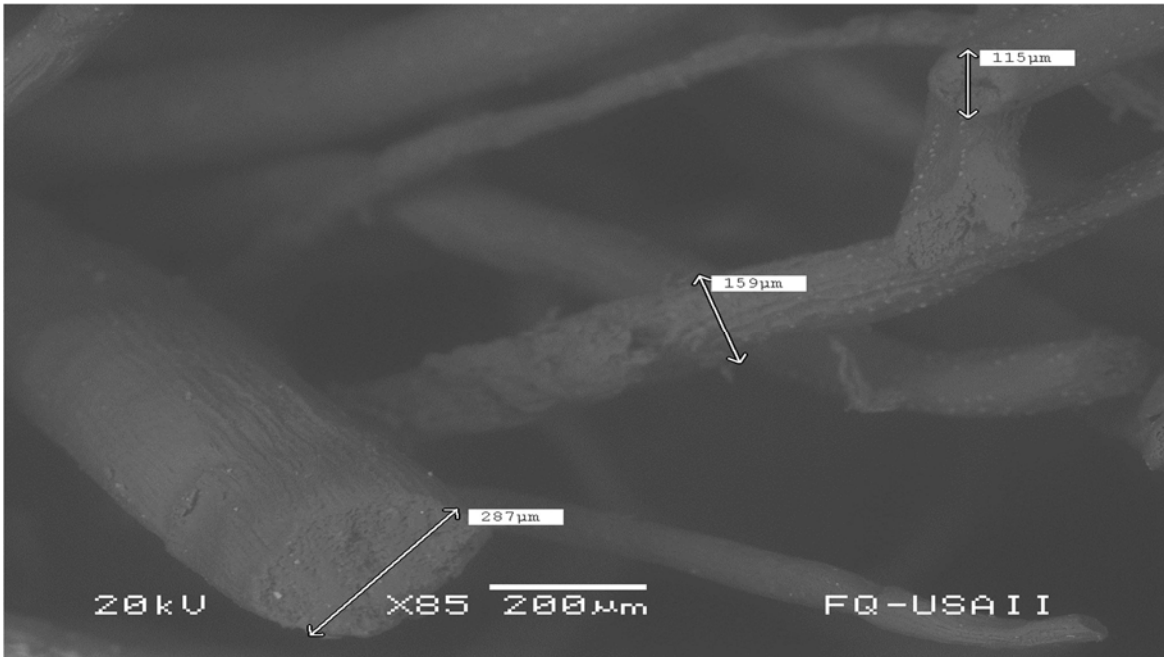


Figura 39. Dimensionamiento de fibras gruesas.

En la figura 40 se muestra a un aumento de 350X, una fibra de coco con un corte transversal, con el que es posible observar espacios vacíos entre las paredes celulares de la fibra. Estos espacios permiten que las fibras de coco cuenten con propiedades de aislante térmico y acústico.

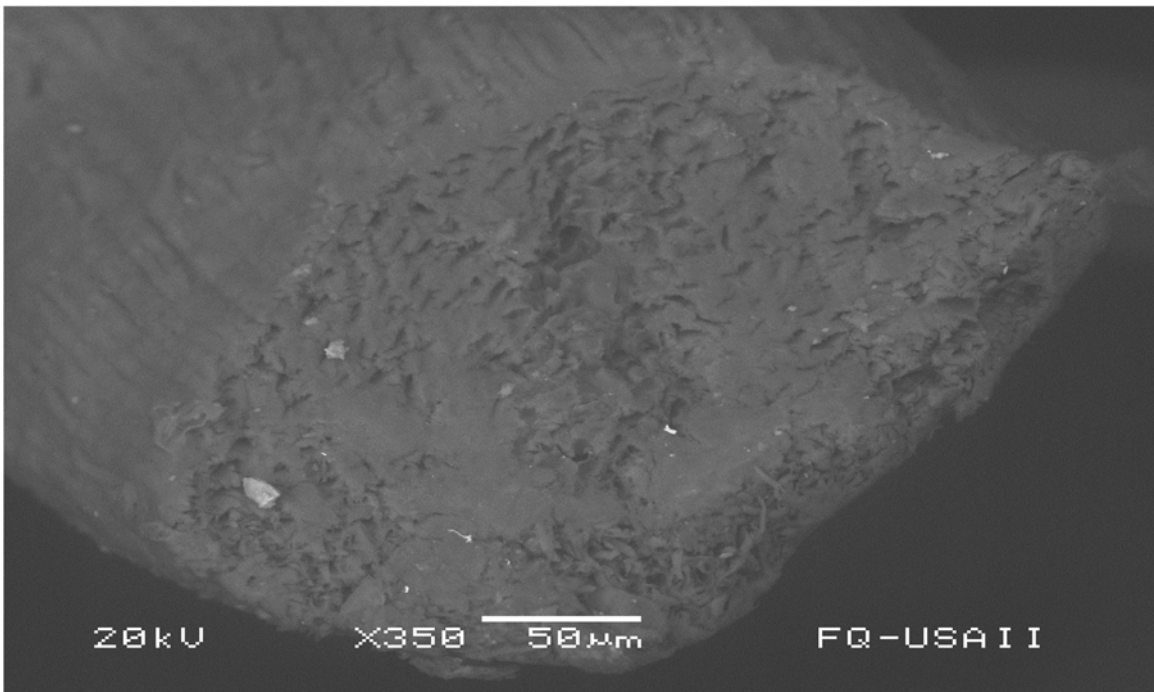


Figura 40. Porosidades dentro de la fibra de coco, observada con un aumento de 350x.



En la figura 41 se muestran las diferentes áreas en donde se generaron el análisis espectrografico de la fibra.

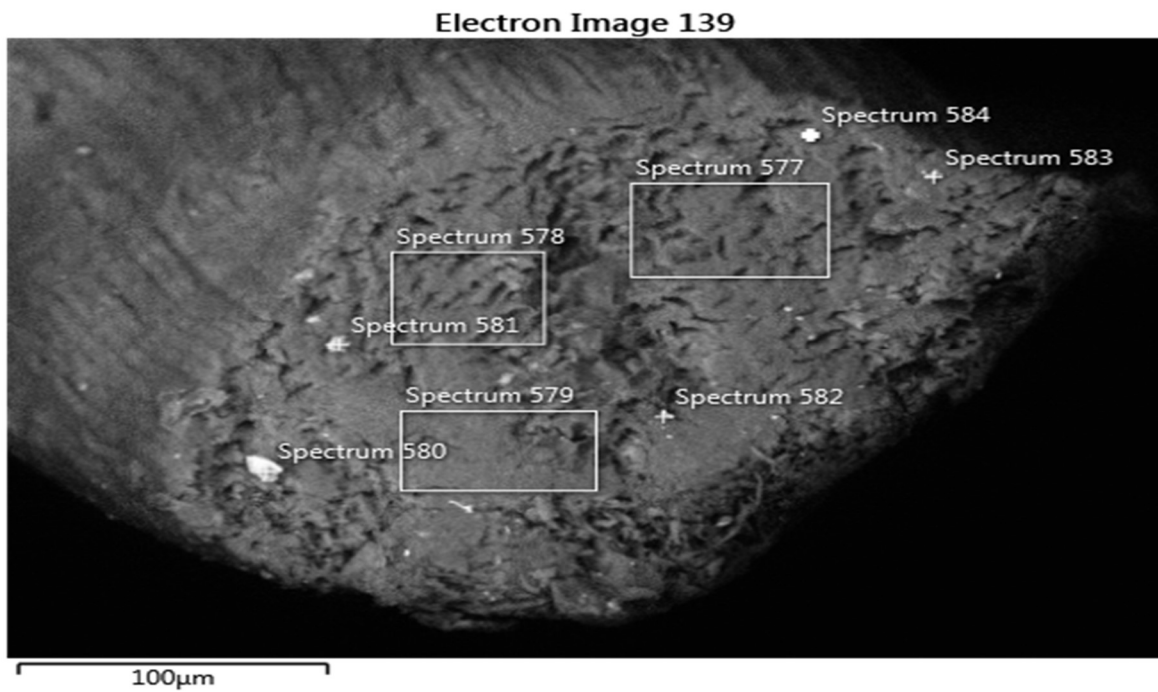


Figura 41. Espectrometría.

Apartir de la composición química de las fibras se obtienen gráficas, en las que indican las concentraciones de los elementos (Fig. 42).

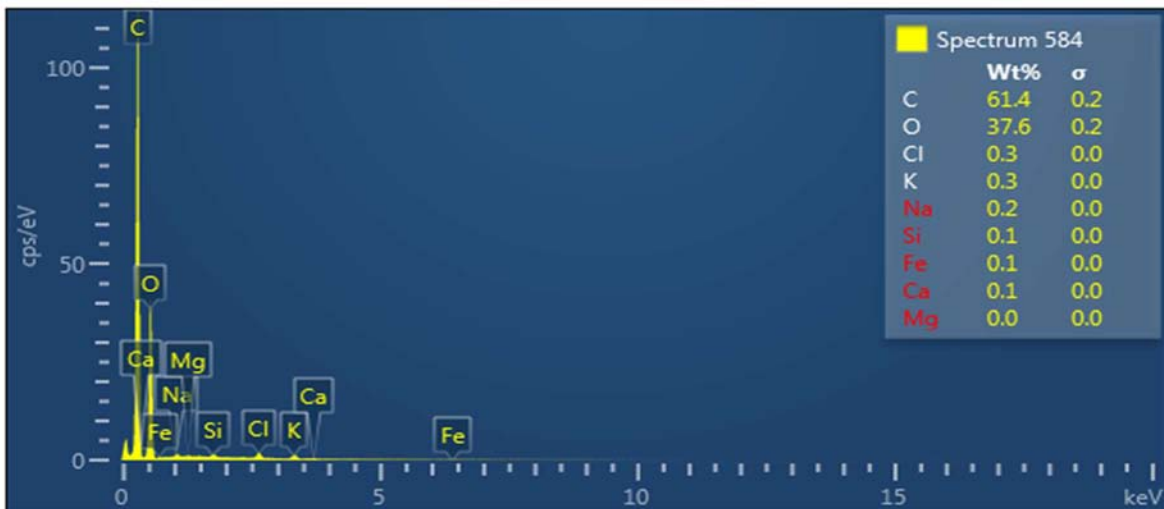


Figura 42.  
Concentración de elementos en las fibras.

Los resultados mostraron una concentración predominante de 2 elementos, sin embargo las fibras cuentan con concentraciones menores de otros elementos. El promedio de las concentraciones promedio obtenidas por microscopia electrónica de barrido con la sonda EDX se muestra en la tabla 10.

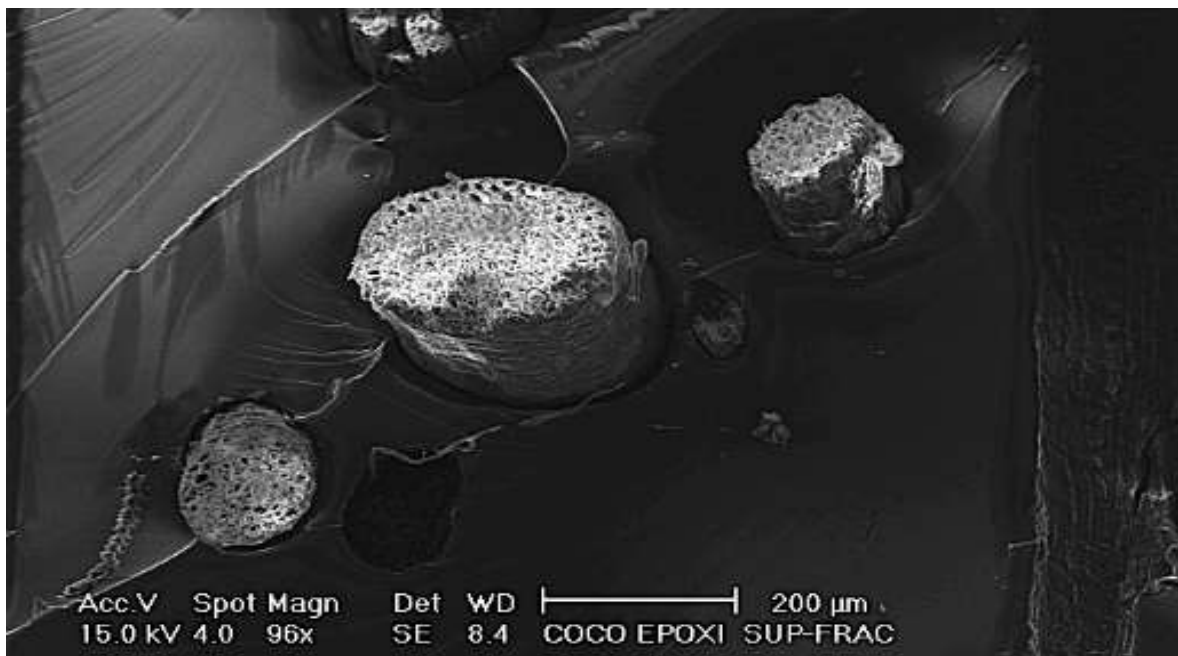
*Tabla 10.  
Promedio de concentración de elementos.*

C	O	Cl	K	Na	Si	Ca	Fe	Mg	S
61.775	37.399	0.250	0.225	0.188	0.075	0.038	0.038	0.001	0.013

Esta composición corresponden a un material organico siendo las predominantes el carbono y el oxigeno, sin embargo las fibras tuvieron impurezas en su composicion, seguramente características del lugar de origen.

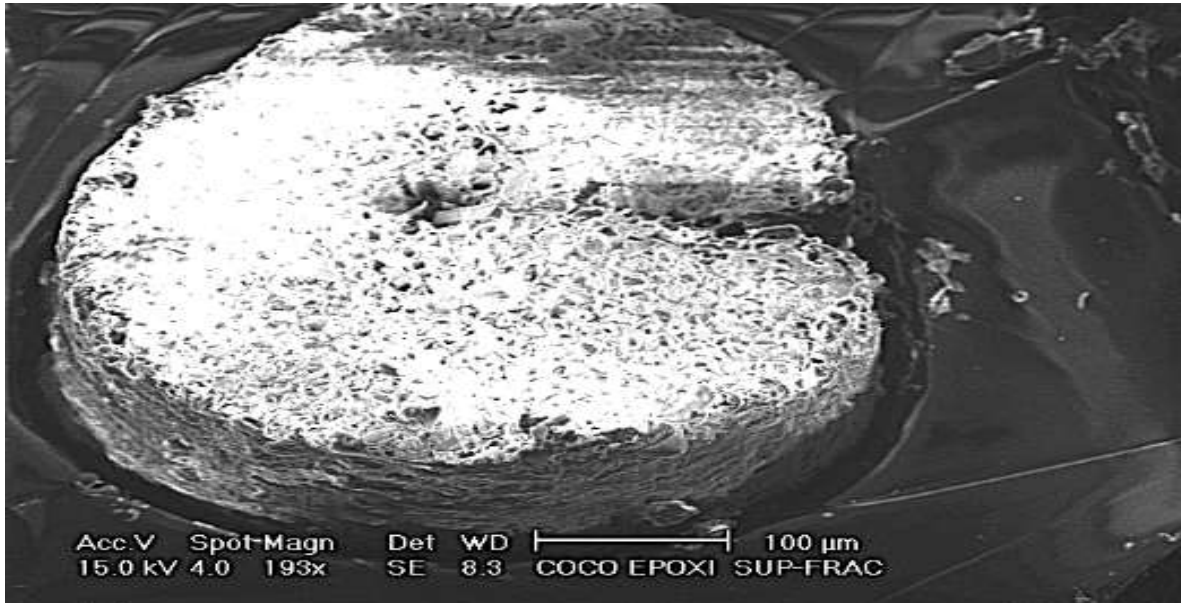
Finalmente se tomaron otras imágenes con otro microscopio electrónico con la finalidad de observar la interaccion entre las fibras de coco con el sistema epoxi.

En la figura 43 se aprecian las fibras embebidas dentro de la matriz epoxi, donde la matriz se identifica como una masa solida, también en la misma figura es posible observar los espacios huecos dentro de la fibras de coco. Esta imagen tuvo un aumento de 96x.



*Figura 43. Microscopia del material compuesto.*

La figura 44 muestra de forma local la interacción de una fibra con la matriz; se puede ver que aparentemente existe un espacio entre la matriz y la fibra de coco, sin embargo esta primera impresión es incorrecta ya que de ser así las fibras se desprenderían de la matriz con una mínima carga.



*Figura 44. Interacción fibra-resina.*

En la figura 45 se observa una fibra la cual fue desprendida de la matriz epoxi y posteriormente cortada. Como se observa en la imagen, el sistema epoxi se adhirió a las paredes celulares de la fibra de coco, dando como resultado que la fibra se encuentre totalmente cubierta con una capa de resina. La imagen presenta una coloración oscura en la sección donde se encuentra la resina epoxi.

Por otro lado, la figura 46 muestra la buena compatibilidad entre el sistema epoxi y la fibra de coco, se observa que el sistema epoxi tuvo una penetración de 26.5 μm en las fibras de coco.

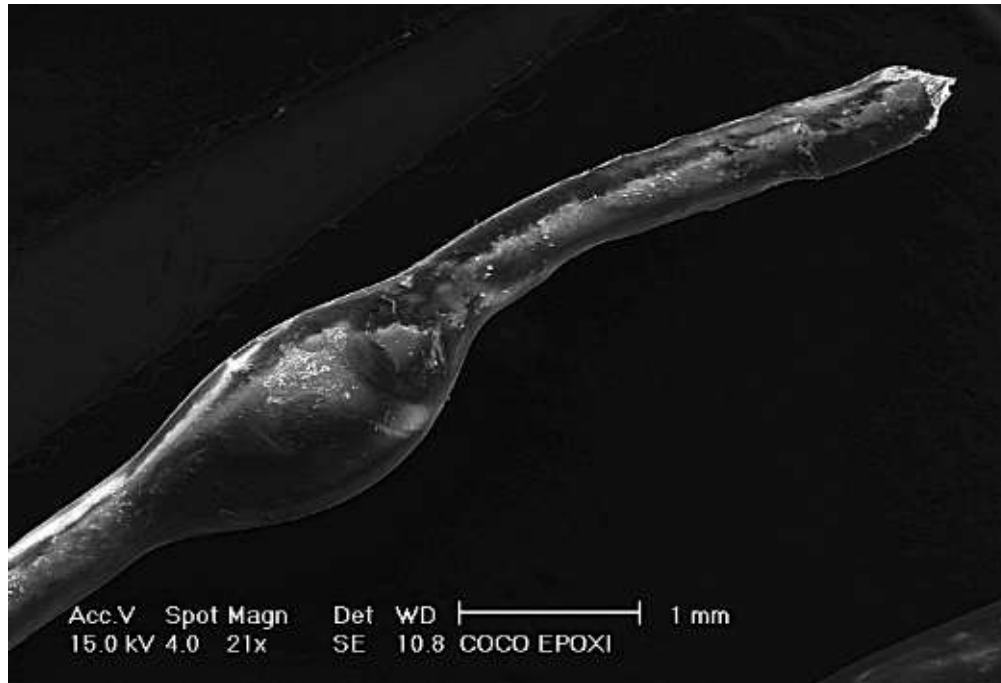


Figura 45. Fibra recubierta por resina epoxi.

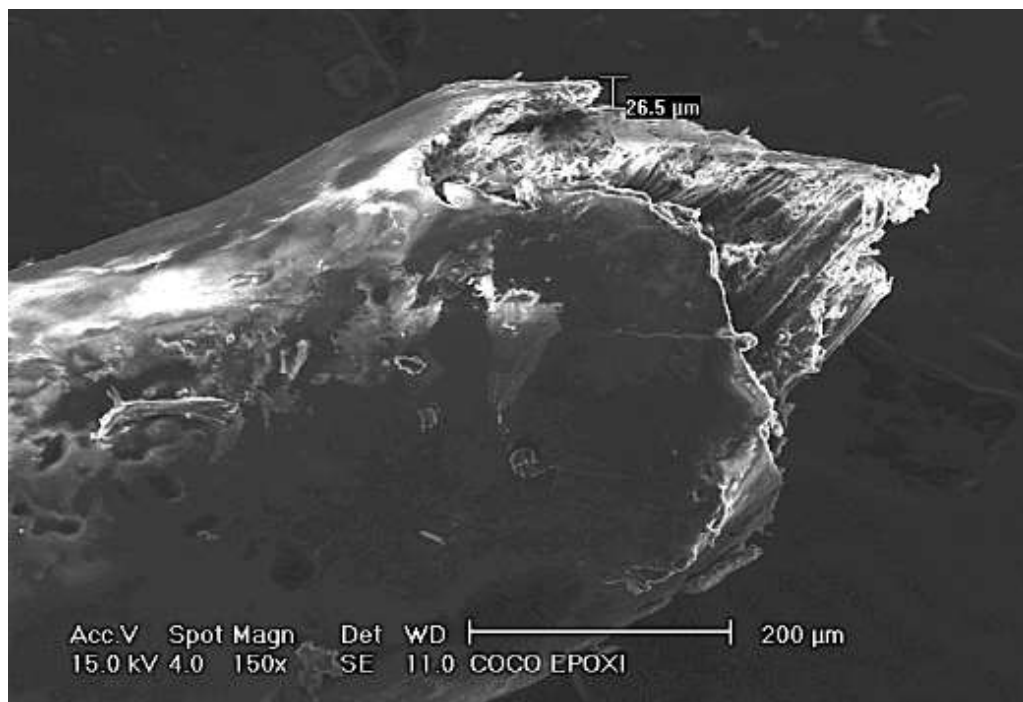


Figura 46. Penetración d resina en la fibra de coco.

La interacción entre la fibra y la matriz es satisfactoria, debido a que existió una compatibilidad química la cual permitió la penetración de la resina dentro de la fibra.

#### IV. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción mostraron que las probetas tipo *epo ale* (matriz epoxi con refuerzo de fibras en arreglo aleatorio), presentaron la mayor resistencia a los esfuerzos de tracción, así como los mejores resultados en cuanto al módulo de Young.
- La mayor resistencia de las probetas tipo *epo ale* se debió a la orientación de las fibras las cuales fueron capaces de distribuir las cargas de una forma más eficaz que los otros tipos de arreglos de las fibras. Esta capacidad se ve reflejada en los resultados obtenidos, teniendo un aumento en la capacidad para soportar los esfuerzos máximos en un 9% con referencia a la probeta tipo *epo* (probeta de referencia, fabricada únicamente con resina epoxi); sin embargo, su capacidad de deformación disminuyó en un 43% con respecto a la misma probeta de referencia.
- Los resultados obtenidos de las probetas tipo *epo long* y *epo trans* estuvieron por debajo de lo esperado, con esto se puede concluir que la orientación de las fibras es determinante para la eficaz distribución de esfuerzos. Por otro lado las pruebas de flexión no mostraron diferencia entre los diferentes tipos de probetas, esto debido a que los materiales con las que se fabricó el material compuesto tuvieron una gran capacidad de deformación a la flexión.
- Con los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga, fue evidente la combinación de las propiedades mecánicas de ambos materiales, dando como resultado que la probeta tipo *epo ale* tuviese una menor capacidad de resistencia a la fatiga que la probeta *epo*. Por lo que se puede concluir que la combinación de las propiedades de ambos materiales es bastante aceptable, ya que se generó un material con una buena capacidad de deformación y una superior capacidad de carga, que el material de referencia.
- Las imágenes obtenidas por la microscopia mostraron una penetración de la resina en la fibra; esta penetración mostró una excelente compatibilidad entre el sistema epoxi y la fibra de coco, ya que esta combinación permitió tener una buena

interacción entre los dos elementos que conformaron el material, logrando a su vez una mejor combinación de propiedades mecánicas entre sus elementos.

- Los resultados obtenidos durante los diferentes ensayos son satisfactorios, ya que brindan una orientación definida para futuras líneas de investigación. También se concluye que la compatibilidad entre la matriz y el material de refuerzo es satisfactoria. Por lo tanto, la implementación de la fibra de coco como material de refuerzo es una buena alternativa para aplicaciones con bajos requerimientos mecánicos.

## **V. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION**

Con base en las conclusiones anteriores y esta rama de la investigación, este trabajo puede tener continuidad en los siguientes temas:

- Fabricación de paneles de fibra de coco comprimida, como alternativa a los paneles de madera comprimida.
- Uso de la fibra de coco como aislante térmico y acústico, en viviendas de bajo costo.

## VI. BIBLIOGRAFIA Y/O REFERENCIAS

1. William D Callister, "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales", Barcelona Reverté D.L. 1995.
2. William F. Smith, "Ciencia e ingeniería de materiales", McGraw-Hill.
3. Derek Hull "An Introduction to composite materials" Cambridge University Press, TrumpingtonStreed, Cambrige.
4. Franco Stupenengo, "Materiales y materias primas" Buenos Aires, Ministerio de educacion, 2011.
5. Donal U. Rosato "Designing whit plastics and composite" Van nostrad. Reinhold. New York.
6. Santiago Porveda Martínez, "Presentación normalizada de piezas de material compuesto", Universidad Politécnica de Madrid.
7. HARRIS, Bryan. Engineering composite materials. London : The Institute of Materials, 1999.
8. HULL, D y CLYNE, T. W.. An introduction to composite materials. New York : Cambridge University Press, 1996.
9. Sandra Liliana Quintero. "Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto", Universidad del Norte, 2006.
10. Sayra Conde Rito, "Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de las palas de aerogeneradores de pequeña potencia" Universidad del Istmo Oaxaca, 2010.
11. Jose Fidel Navarro Arellano, "Elaboración de tableros aglomerados a base de plásticos de alta densidad y fibra de estopa de coco", Universidad de Colima, julio 2005.
12. Sergio Alejandro Morales Ortuño, "Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones", México D.F., Instituto Politécnico Nacional, (2008).
13. S. Harish, Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite, Materials characterization. 2009.

14. KALIA, S.; KAITH, B. S. y KAURA, I.. Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites – A Review. [s.l.]: Polymer Engineering and Science, 2009.
15. Abdul Nazeer, To study the mechanical properties of coconut coir fiber reinforced with epoxy resin AW 106 & HV 953IN, Of modern engineering research (IJMER).
16. BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C. y PILLAI, R. M.. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. Thiruvananthapuram: Elsevier Ltda, 2005.
17. GELFUSO, Maria Virginia, GURGE da SILVA, Pedro Vieira y THOMAZINI, Daniel. Polypropylene matrix composites reinforced with coconut fibers. [s.l.]: Materials Research, 2011. 10.1590/S1516-14392011005000056.
18. MONTEIRO, S. N.; TERRONES, L. H. y D'ALMEIDA, J. R.. Mechanical performance of coir fibre/polyester composites. Rio de Janeiro: Elsevier Ltda, 2008, Vol. 27. 0142-9418.
19. Juan Daniel Trejos taborda, "Propiedades mecánicas de una matriz poliéster reforzada con fibra de coco comparada con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio", Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
20. MESA GRAJALES, Dairo Hernán. Introducción a los materiales no metálicos: Polímeros, cerámicos y compuestos. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2003.
21. Majid Ali "Coconut fibre- A Versatile material and its applications in engineering" National Engineering services Pakistan.
22. Raimond B. Seymour "Introducción a la química de polímeros" Reverte, University of Southern Mississipi.
23. R. Seymour, "Introduction to polymer Chemistry" McGraw-Hill, New York, 1971.
24. ALBERT G. GUY, "Physical Metallurgy For Engineers", Fondo Educativo Interamericano, University of Florida.
25. Viviana S. de Lozano, "Principios y práctica de la microscopía electrónica", Bahía Blanca, E-book, 2014
26. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>