

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidas Valles de las Palmas



“Caracterización Mecánica de un Material Compuesto Sustentable de Fibra de Coco con Matriz Polimérica”

Tesis que presentan para obtener el título de:

INGENIERO AEROESPACIAL

Presentan:

Contreras Herrera Armando

Ornelas Martínez Carlos

DIRECTOR DE TESIS:

MC. Paz González Juan Antonio

CODIRECTOR DE TESIS:

MC. Alcudia Zacarías Enrique

Tijuana, B.C.

Octubre 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis **padres**, Arturo y María Elena, por haberme apoyado durante toda la carrera, brindándome lo necesario para seguir adelante y continuar creciendo como persona. [Armando]

A mis **padres**, Jesús Carlos y Lidia Manuela, que me han brindado todo su apoyo y amor incondicional, sacrificios y esfuerzos para posibilitarme todas las herramientas necesarias para lograr mis metas en la vida. [Carlos]

A nuestro **director**, Juan Antonio Paz González por su apoyo y dedicación, al darnos la oportunidad de realizar una investigación de Tesis en su área.

Al **cuerpo académico de CENIDET**, el M.C. Enrique Alcudia, por brindarnos todo su apoyo y hospitalidad en la visita que realizamos al centro de investigación para desarrollar la caracterización del laminado por medio de un ensayo de tensión.

A la **Universidad Autónoma de Baja California**, Unidad Valle de las Palmas, por brindarnos las bases fundamentales de nuestra formación académica, y permitirnos el uso de equipo e instalaciones dentro de esta institución.

Y por último, gracias a los cocos, el sol y la vida por la ayuda proporcionada para realizar exitosamente la investigación.

Contenido

Índice de tablas	i
Índice de figuras	ii
Capítulo I – Introducción.....	8
1.1 Justificación.....	9
1.2 Objetivo.....	11
1.3 Objetivos Específicos.....	11
Capítulo II – Estado del arte	12
2.1 Clasificación de los materiales compuestos	12
2.2 Clasificación de los refuerzos	12
2.3 Clasificación de las matrices	14
2.4 Ventajas de los compuestos reforzados con fibras naturales.	16
Capítulo III – Marco Teórico	18
3.1 Fibra de coco	18
3.1.1 Propiedades Mecánicas	18
3.1.2 Ventajas y aplicaciones	18
3.2 Resinas Termoestables	19
3.2.1 Resina Poliéster.....	19
3.3 Materiales compuestos de fibras cortas.....	20
3.3.1 Influencia del largo de las fibras	20
3.3.2 Influencia de la fracción de volumen y orientación de las fibras.....	21
Capítulo IV – Metodología experimental.....	23
4.1 Materiales	24
4.1.1 Fibra de coco	24
4.1.2 Resina Poliéster.....	24
4.1.3 Catalizador para resina poliéster	26
4.2 Ensayos de tensión.....	27
4.2.1 Normas estandarizadas.....	27
4.2.2 Propiedades mecánicas	30
4.2.3 Máquina de ensayos universales	32
4.3 Laminados de estudio	32

4.4 Manufactura	33
4.4.1 Tratamiento a las fibras de coco (tratamiento alcalino y secado).....	33
4.4.3 Fabricación de los laminados	41
4.4.4. Obtención de las probetas	44
Capítulo V – Resultados y conclusiones	47
5.1 Variación de la resistencia última a tensión	51
5.2 Variación del módulo de elasticidad	52
5.3 Variación del porcentaje de elongación a la ruptura.....	53
5.4 Conclusiones	54
Bibliografía	56

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades a tracción de la fibra de coco.....	18
Tabla 2. Propiedades mecánicas de las resinas poliéster	20
Tabla 3. Propiedades típicas de resina líquida a 25°C.	25
Tabla 4. Propiedades físicas sin carga ni refuerzo	26
Tabla 5. Propiedades físicas del catalizador	26
Tabla 6. Dimensiones establecidas para la geometría de una probeta a tensión.....	28
Tabla 7. Dimensiones establecidas para la geometría de una probeta a tensión.....	29
Tabla 8. Variación sobre la resistencia última a tensión de probetas tipo hueso.....	51
Tabla 9. Variación sobre la resistencia última a tensión de probetas tipo rectangular.	51
Tabla 10. Resultados de la variación del módulo elástico de probetas tipo hueso.	52
Tabla 11. Resultados de la variación del módulo elástico de probetas tipo rectangular.	52
Tabla 12. Resultados experimentales de probetas en forma de hueso.....	53
Tabla 13. Resultados experimentales de probetas en forma rectangular.	53

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de los refuerzos.....	13
Figura 2. Clasificación de las fibras naturales.	14
Figura 3. Clasificación de las matrices.	16
Figura 4. Representación gráfica del comportamiento entre fibra y matriz.	21
Figura 5. Orientación de las fibras.....	22
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología experimental.	23
Figura 7. Cáscara de coco	24
Figura 8. Resina de poliéster (33004-00).....	25
Figura 9. Catalizador (Resina Poliéster).	27
Figura 10. Probeta tipo rectangular de ensayo a tracción según la norma ASTM D3039.....	28
Figura 11. Probeta tipo hueso de ensayo a tracción según la norma ASTM D638.	29
Figura 12. Máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X Plus 100kN.....	32
Figura 13 . Medición del volumen de NaOH.....	34
Figura 14. Medición de la masa de fibra de coco.	35
Figura 15 . Mezcla de NaOH y H ₂ O bajo baño maría dentro de un cristizador.	35
Figura 16. Matraz aforado de 1000ml con mezcla de NaOH y H ₂ O.	36
Figura 17. Vaso de precipitado de 1000ml con la mezcla y la fibra de coco.	36
Figura 18. Filtrado de la solución NaOH y agua destilada.	36
Figura 19. Prueba de acidez o alcalinidad utilizando una tira de papel PH.....	37
Figura 20. Indicador de la prueba de PH.	37
Figura 21. Depósito para el residuo de la solución alcalina.	38
Figura 22. Horno térmico para el secado de la fibra de coco.	38
Figura 23. Fibra de coco después del tratamiento de secado.....	39
Figura 24. Presentación de la fibra de coco sin hollejo.	39
Figura 25. Planchado de la fibra de coco.....	39
Figura 26. Placa hecha con material de fierro.....	40
Figura 27. Prensa hidráulica utilizada para comprimir la fibra de coco.	40
Figura 28. Presentación del material fibra de coco con dirección aleatoria.	41
Figura 29. Presentación del material fibra de coco con dirección unidireccional.	41

Figura 30. Molde de aluminio para las probetas tipo hueso.	42
Figura 31. Obtención del peso de la fibra de coco para las 5 probetas tipo hueso.	42
Figura 32. Resina poliéster es vertida dentro del molde para probeta tipo hueso.	43
Figura 33. Vidrios utilizados para la fabricación del laminado B.	43
Figura 34. Cera desmoldante.	43
Figura 35. Mezcla de la fibra de coco con resina poliéster.....	44
Figura 36. Muestra del laminado B.....	44
Figura 37. Muestra del laminado con la herramienta utilizada.....	45
Figura 38. Probetas con dirección aleatoria obtenidas del laminado.....	45
Figura 39. Probetas rectangulares enumerados (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7).	46
Figura 40. Uno de los cinco ejemplares obtenidos de probetas tipo hueso.	46
Figura 41. Probetas tipo hueso enumeradas (A1, A2, A3, A4, A5).....	46
Figura 42. Gráfica esfuerzo-elongación del laminado A.....	47
Figura 43. Fotografías vista frontal y de la sección transversal del laminado A.	48
Figura 44. Gráfica esfuerzo-elongación del laminado B.	49
Figura 45. Fotografías vista frontal y de la sección transversal del laminado B.	50

Capítulo I – Introducción

El material compuesto es la unión de dos o más materiales para conseguir una combinación de toda clase de propiedades que no es posible generar en los materiales originales. Su aplicación primordial es estructural y pueden encontrarse en diferentes sectores de la industria, en las cuales se buscan ciertas combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia térmica, peso, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad [1].

El enfoque primordial de esta investigación es la factibilidad de manufactura de material compuesto con fibras naturales. La principal razón del incremento sobre la utilización de fibras naturales fue por la conciencia ambiental y reducir la tendencia de seleccionar materia prima derivado del petróleo. Es por ello que una de las industrias que más contribuye al apoyo de utilizar fibras naturales es la automotriz, implementándolas como base para crear varios componentes, y así mismo; la producción mundial de fibras naturales se encuentra incrementando por el producto base en demanda.

A partir del año 1940, las fibras sintéticas fueron introducidas y comercializadas por los consumidores por la misma preferencia de utilizar productos sintéticos en vez de productos de fibras naturales. Esto ocasionó el decremento en la producción de productos hechos de fibra natural y una erosión sustancial en el mercado de exportación de los países en desarrollo. Desde aquel entonces, la calidad de las fibras naturales ha incrementado por medio de avances tecnológicos e investigación, y por ello se ha hecho más accesible producirlos. En el 2011, la producción anual de fibras naturales en la India fue de 6 millones de toneladas a comparación a la producción global de 25 millones de toneladas [2].

Las fibras naturales más utilizadas actualmente son las fibras de coco, el nombre común, científico y la familia que pertenece la planta se les denomina de la siguiente manera; Coco, *Cocos nucifera* y Arecáceae (Palma). Existen dos tipos de fibra de coco, las fibras cafés extraídas de cocos maduros; los cuales son gruesas, fuertes y tienen alta resistencia a la abrasión. Por otro lado las fibras blancas; provenientes de coco inmaduros, resultan ser suaves y más finos pero débiles [3].

Las características principales de las fibras de coco son las siguientes: resistentes a los hongos y putrefacción, proveen una excelente insolación contra la temperatura y sonido, difícil de incendiarse, resistente a la humedad, retoma su figura original aun cuando está en constante uso, libre de estática, fácil de limpiar y a prueba de polillas [3].

Las propiedades mecánicas de los compuestos de fibras naturales tienen como ventaja densidades bajas a comparación con las fibras sintéticas, bajo costo de producción, alta tenacidad, existe la posibilidad de ser recicladas y biodegradables. De acuerdo con estudios, diferentes partes de la fruta del coco son utilizadas para diversas aplicaciones; por ejemplo el relleno de la cáscara ha sido implementado en nuevos compuestos que se utilizan en los materiales de construcción y en aplicaciones domésticas, gracias a su alta resistencia mecánica y módulo de elasticidad. También ha sido contemplada y estudiada la cáscara del coco mejor conocida como fibra de coco para aplicaciones potenciales en el área aeroespacial [4]. La conciencia sobre el cuidado ambiental ha sido de gran interés por investigadores alrededor del mundo, y es por ello que utilizan e implementan materiales ecológicamente amigables [5].

1.1 Justificación

Actualmente existe un crecimiento exponencial en la utilización de los materiales compuestos en casi todas las áreas que representa la industria manufacturera. Haciendo énfasis en los materiales compuestos derivados de polímeros; los cuales son las más concurrentes en la actualidad. Como todo material emergente, tienen sus propiedades positivas y sus negativas, pero aun así; cabe mencionar que las aplicaciones que se le han asignado a estos materiales, han podido demostrar que son eficientes, fácil de manufacturar y resistentes.

La importancia de sustituir las fibras sintéticas a fibras naturales es enorme; ya que las fibras naturales no solamente son fuertes y livianas, también son relativamente baratas a comparación de las fibras sintéticas; así como los procesos de elaboración son controlados específicamente para no generar cantidades exuberantes de desechos contaminantes hacia el medio ambiente, y el desecho generado se trata de volver a utilizar o reciclar para darle otra aplicación positiva. Ahora en día, las tecnologías y disciplinas que se derivan de la misma, se inclinan por crear procesos o productos que no impacten directamente al entorno ecológico al que se le rodea.

La industria de los materiales compuestos formados por polímeros reforzados con fibras se inició en 1908 con fenólicos con fibras de celulosa. Más tarde se usaron la urea y melanina como matrices, y alcanzó un estatus alto en 1940 con poliésteres insaturados reforzados con fibra de vidrio. La manufactura de los compuestos tradicionales, hechos comúnmente con fibras de vidrio están siendo escrutados desde una perspectiva ambiental y legislativa. La disposición de compuestos después de su vida útil se está convirtiendo en objeto crítico y costoso. El reciclaje, así como la reutilización de materiales compuestos no es fácil ya que ellos están hechos de dos o más materiales diferentes. Las alternativas de disposición más comunes son en vertedero e incineración [6].

En el centro del país de México en los estados de Michoacán y Zacatecas, existe una producción de coco para distribuir el agua y la fruta que contiene dentro del mismo. Con lo que no se cuenta en esa producción es el desperdicio que se genera al botar los caparazones de los cocos y es ahí donde entra el beneficio de utilizar las fibras naturales del coco para introducirlos al mercado mexicano, creando productos reutilizables con fibras naturales o investigaciones por parte de universidades y centros de investigación alrededor del país, ayudando al medio ambiente a que ese desperdicio no se tire en depósitos de basura o simplemente lo quemen; creando contaminación en la tierra como en el aire para los habitantes de esos lugares. Por lo tanto, en el presente trabajo se propone estudiar diversas variables que influyen en el desempeño mecánico de un material compuesto de fibras de coco sometido a cargas estáticas, con el propósito de comprender la fenomenología y así mejorar el proceso de diseño de estructuras de material compuesto [6].

1.2 Objetivo

Determinar la influencia del método de manufactura y la orientación de los refuerzos en las propiedades mecánicas de un material compuesto sustentable de fibras de coco y resina poliéster, a través de una caracterización mecánica experimental.

1.3 Objetivos Específicos

- 1.- Manufacturar materiales compuestos sustentables
- 2.- Tratar químicamente las fibras de coco para mejorar adhesión con la matriz.
- 3.- Caracterizar mecánicamente el material compuesto sustentable.

Capítulo II – Estado del arte

2.1 Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se pueden agrupar a través de la naturaleza de su matriz, es decir, pueden ser de origen polimérico, metálico o cerámico que son los más comunes en la industria. También son clasificados por la forma del refuerzo los cuales son reforzados con partículas, fibras y estructurales. Los métodos de fabricación varían de acuerdo a sus propiedades químicas y físicas de las matrices y las fibras reforzantes [7].

2.2 Clasificación de los refuerzos

Los refuerzos utilizados en los materiales compuestos se pueden clasificar de la siguiente manera: metales, cerámicas y poliméricas (figura 1). La fibra de vidrio se distingue por tener un buen desempeño en la resistencia a tensión, dureza, flexibilidad y resistencia a los ataques químicos. Se elaboran a partir de la sílice (del 50% al 70% de su composición) y se le añaden otros componentes en función de las propiedades deseadas, clasificándose como[7]:

- Vidrio – E: Para aplicaciones generales.
- Vidrio – S: Para mayor resistencia y rigidez.
- Vidrio – C: Para estabilidad química.
- Vidrio – M: Para muy alta rigidez.
- Vidrio – D: Para muy baja constante dieléctrica.

Por otro lado existe la fibra de carbono que se caracteriza por tener una muy alta resistencia y rigidez, por la estructura cristalográfica del grafito. Se clasifican en las siguientes categorías: Muy alto módulo de elasticidad (se asigna para aplicaciones que requieran rigidez, 500 GPa de módulo elástico), alto módulo (400 GPa), módulo intermedio (300 GPa); por último de alta resistencia (200GPa) [7].

A su vez las fibras cerámicas pueden ser de cuarzo o sílice, los cuales son flexibles con muy bajo alargamiento y resistencia al choque térmico. En las estructuras radio transparentes son donde principalmente sus aplicaciones son utilizadas en la industria [7]. Las fibras orgánicas se obtienen a partir de polímeros y una de las más utilizadas es el kevlar con las siguientes características: tiene un comportamiento muy rígido, baja densidad, demuestra ser un excelente resistente al impacto y el coeficiente de dilatación térmica longitudinal nulo. Habiendo también fibras metálicas que se manufacturan a partir de aluminio, acero y titanio, más densas que las anteriores, y de elevado coste.

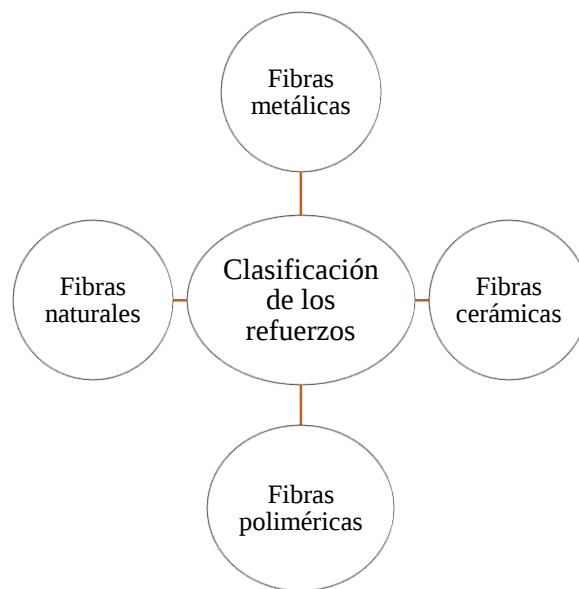


Figura 1. Clasificación de los refuerzos.

Los materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo de fibra han jugado un papel muy dominante por un largo tiempo en una cantidad considerable de aplicaciones por su módulo de elasticidad y alta resistencia. La manufactura que se utiliza en el uso y fabricación de plásticos reforzados con fibras sintéticas (vidrio, aramida y carbón) son consideradas críticos para los problemas acerca del ambiente.

Por compuestos de fibras naturales, se refiere a un material compuesto que es reforzado con fibras, partículas o placas que provenga de recursos naturales o renovables; a cambio de los materiales compuestos reforzados con fibras de aramida o carbono que son de origen sintético.

Las fibras naturales incluyen los que se encuentran constituidos de plantas, animales o recursos minerales. Las fibras naturales pueden ser clasificadas acorde a sus orígenes. Una clasificación detallada que se muestra en la figura 2 [8].

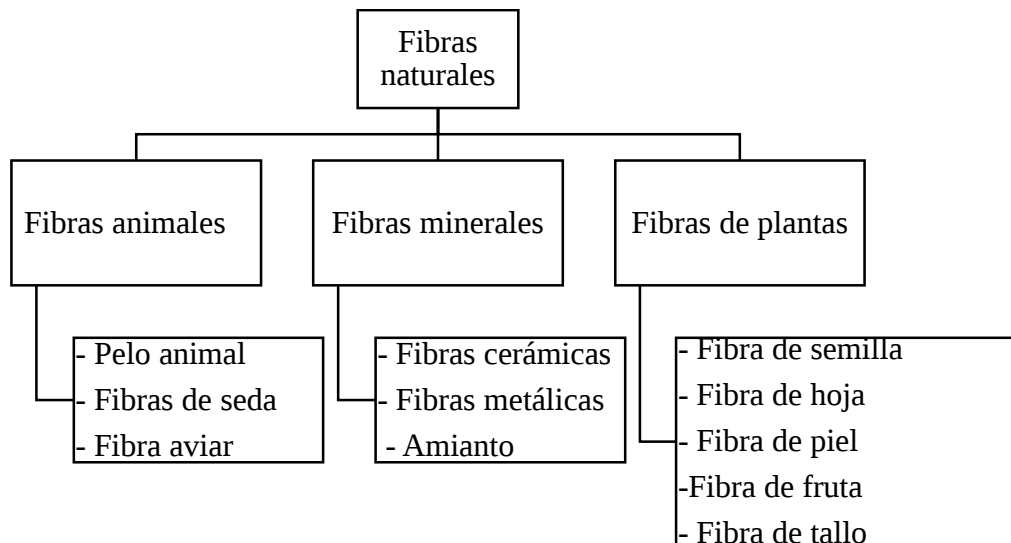


Figura 2. Clasificación de las fibras naturales.

2.3 Clasificación de las matrices

La matriz proporciona estabilidad al material compuesto transfiriendo las cargas al refuerzo, y protege al refuerzo del deterioro mecánico y químico, también evita la propagación de grietas, para que estas funciones se realicen de forma efectiva, debe existir una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo. Las matrices se pueden clasificar de la siguiente manera: compuesto de matriz polimérica (CMP), compuesto de matriz cerámica (CMC), compuesto de matriz metálica (CMM), ver figura 3. Los compuestos de matriz metálica (CMM), están conformados por una matriz hecha de metal, algunos ejemplos de las matrices que componen a los compuestos pueden ser aluminio, titanio y magnesio. Las fibras que incluyen éste tipo de matriz, son la fibra de carbón y silicón. Los metales son primordialmente reforzados para satisfacer las necesidades de diseño. Por ejemplo, la dureza elástica y esfuerzo de los metales pueden ser aumentados, mientras que el coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica y eléctrica de dichos metales; pueden reducirse a causa de la adición de fibras como las de silicón [8]. Los compuestos con matriz cerámica (CMC) mayormente utilizados son la alúmina,

calcio y silicato de aluminio reforzado por silicón. Dentro de las ventajas de utilizar este tipo de matriz se encuentran: dureza, altos límites de temperatura para cerámicos, bajo contenido de químicos. Los compuestos hechos con matriz cerámica son reforzados con fibras de silicón exitosamente. También ofrecen la misma resistencia de altas temperaturas de las súper aleaciones, pero con menor densidad del material. La naturaleza quebradiza de los cerámicos hace que la fabricación del compuesto se realice con dificultad. Usualmente la mayoría de los procesos de producción se realizan empezando con materiales en forma de polvo. Existen cuatro clases de matrices cerámicos: vidrio (fácil de fabricar por su bajo nivel de temperaturas de ablandamiento, incluye el silicato de boro y silicatos de aluminio); cerámicos convencionales (silicón, nitritos de silicón, óxido de aluminio y óxido de zirconio son totalmente cristalinos); cemento y componentes de carbón concretado [8].

Los compuestos de matriz polimérica (PMC) son los más comunes. Consisten en polímeros termoestables o termoplásticos reforzados con fibra. Estos materiales pueden ser utilizados en una gran gama de tamaños y figuras. Proveen gran esfuerzo y rigidez con resistencia a la corrosión. Las razones principales por las cuales, éstas son las más comunes; es por su bajo costo, alto esfuerzo y principios simples de manufactura. De acuerdo a su baja densidad, se obtienen excelentes propiedades específicas [8]. Una de las resinas más utilizadas es el epoxi, que son las de uso más general en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso alrededor de 170 °C. La cual tiene mayor fuerza de adhesión y resistencia química que el poliéster. Sin embargo, estas son costosas, las matrices bismaleimidas son para aplicaciones con altas temperaturas (hasta 250 °C), utilizada en los bordes de ataque de las alas del Eurofighter-2000 (aeronave para uso militar). Las poliamidas se utilizan para aplicaciones de altas temperaturas, que figuran los 300 °C. Las fenólicas son resistentes al fuego y normalmente utilizadas en mamparas contra incendios o paneles interiores de aviones [7].

Por otro lado, se encuentran las matrices poliméricas termoestables, las cuales son comúnmente utilizadas en compuestos, estas se pueden encontrar en cubiertas de instrumentos musicales, aspas de molinos, tanques de almacenamiento, etc. Las matrices cianoesteres son utilizadas en aplicaciones radioeléctricas (antenas), por sus propiedades de baja absorción de humedad y buena “tangente de perdidas” (característica radioeléctrica de los materiales). Las resinas de vinil

éster son un material de forma híbrido que contiene resina de poliéster y que es reforzados por la adición de resina epoxi. Con la conciencia ambiental sobre los residuos químicos que se presentan ahora en día, éstos son especialmente utilizados con un solvente orgánico ambiental. Tienen una resistencia mayor a las cargas vibratorias; y que son mucho más tolerantes al estiramiento que las resinas de poliéster, mostrando menos esfuerzos de fractura y son capaces de absorber grandes impactos sin recibir algún daño [9].

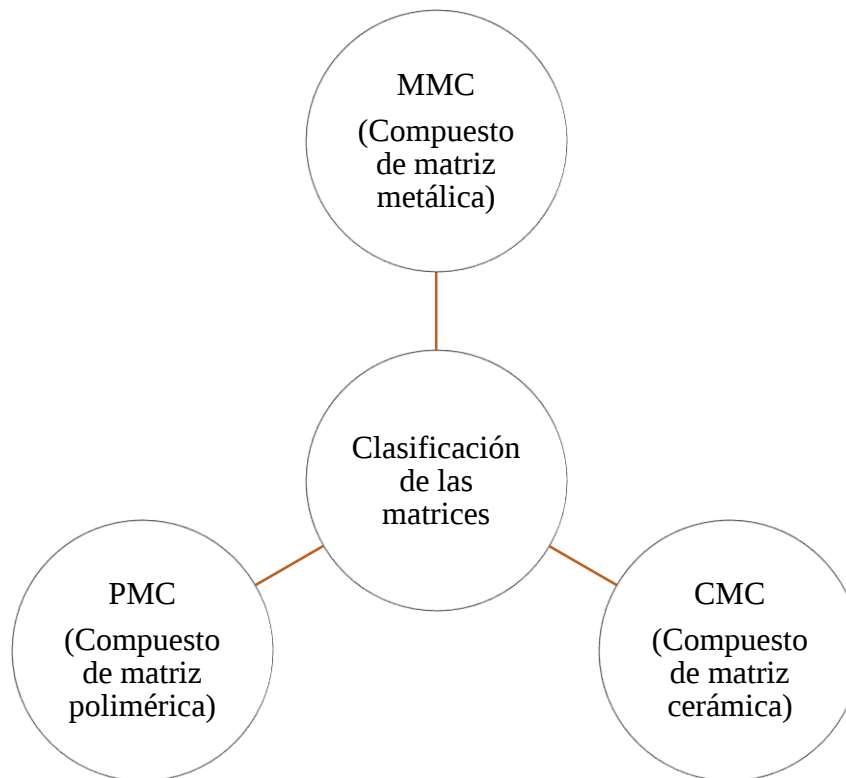


Figura 3. Clasificación de las matrices.

2.4 Ventajas de los compuestos reforzados con fibras naturales.

Se le reconoce como un material industrial, los materiales compuestos con fibras naturales son utilizados por sus excelentes resistencias a los químicos y corrosión. Esta propiedad, toma parte en un conglomerado de propiedades mecánicas, físicas y químicas como:

- Bajo Peso
- Manufacturas únicas y posibilidades de proceso.
- Estiramiento de propiedades.

- Figuras complejas son hechas fácilmente.
- Es aplicable a productos tan grandes o pequeños que se requiera.
- Se puede adquirir un buen acabado superficial.

Proveen propiedades que permite ser un material que pesa menos que los metales; su resistencia específica y el módulo específico por unidad de peso es cerca de 5 veces más que el acero o aluminio. Quiere decir que la estructura será más ligera, y en dispositivos críticos de peso como las aeronaves terrestres y espacial, se ahorraría en todos los aspectos posibles que el peso sea menor por medio de estos materiales [8]. Los materiales compuestos son considerados anisotrópicos, quiere decir, que tienen propiedades distintas en diferentes direcciones, y esto puede ser utilizado para diseñar una estructura más eficiente. Los materiales compuestos ofrecen una mayor flexibilidad en el procesado y control de propiedad, al igual que ofrece posibilidades de reducción material y manufactura simple [8].

Capítulo III – Marco Teórico

3.1 Fibra de coco

La fibra de coco se obtiene a partir del fruto de la palma llamada *cocos nucifera*. El coco (el fruto), está constituido por fuera de una envoltura fibrosa llamada mesocarpio, en la cual el 90% está conformado por las fibras, constituidas principalmente por lignina y celulosa. El desfibrado del coco es el proceso con el cual obtenemos las fibras, para este proceso es necesario hacer una selección rigurosa basándose en el estado de maduración del fruto. Cuando el fruto está más maduro las fibras son de color marrón y menos flexibles, cuando es blanca (menos maduro) las fibras son más suaves y finas, pero más débiles. Las fibras tienen una longitud comprendida entre 15 y 30 centímetros [6].

3.1.1 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de la fibra de coco se muestran en la tabla 1, donde; la resistencia, es el esfuerzo máximo que puede soportar el material antes de romperse; el módulo de Young, la capacidad del material a deformarse y la elongación de falla [8].

Tabla 1. Propiedades a tracción de la fibra de coco

Resistencia [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Elongación de Falla [%]
130-220	4-6	25-40

3.1.2 Ventajas y aplicaciones

Algunas de las ventajas de utilizar la fibra de coco son las siguientes:

- Lleva procesos amigables que no afectan a la persona que trabaja con el material.
- No requiere de maquinaria pesada.
- El costo del material es bajo.
- Tiene Buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico.

- Es una fuente renovable, la cual requiere de poca energía para su producción, en donde el CO₂ es usado mientras se devuelve oxígeno al ambiente.
- Es de bajo peso específico.
- Es un material biodegradable.

Actualmente, debido a su calidad de resistencia y durabilidad, las fibras de coco han sido de gran uso para la fabricación de materiales para decoración, pisos, sogas, construcción de casas, entre otras cosas [8].

3.2 Resinas Termoestables

La consideración primaria para seleccionar una matriz son las propiedades mecánicas básicas, las resinas o polímeros termoestables han sido usadas como un material matriz para los compuestos reforzados con fibras. Estas son usualmente de químicos líquidos de peso molecular bajo y viscosidad baja. La ventaja de utilizar este tipo de material es su estabilidad térmica y resistencia química. También exhiben mucho menos fluencia y relajación al esfuerzo. Sin embargo algunas de las desventajas de este tipo de materiales son que tienen un tiempo limitado de almacenamiento a temperatura ambiente, el tiempo de fabricación en el molde, baja elongación a la fractura. Algunas de las resinas termoestables utilizadas en la industria son las epóxicas, poliésteres, vinylesteres, fenólicas, entre otras [10].

3.2.1 Resina Poliéster

Las resinas de poliéster son los sistemas de resinas más utilizados, sobre todo en la industria marina. Por mucho, la mayoría de los botes, yates y barcos de trabajo, contruidos con materiales compuestos, hacen uso de este sistema de resina. Las resinas de poliéster tales como éstas son del tipo “insaturado”. Esta resina de poliéster insaturada es un termoestable, capaz de curarse de un estado líquido a sólido cuando se someten a las condiciones adecuadas. Es habitual referirse a resinas de poliéster insaturado como “resinas de poliéster”, o simplemente como “poliésteres”. Hay toda una gama de poliésteres elaborados a partir de diferentes ácidos, glicoles y monómeros, todos con propiedades diferentes. Hay dos tipos principales de resina de poliéster

utilizadas como sistemas de laminación estándar en la industria de los compuestos. Resina de poliéster ortoftálico es la resina económica estándar utilizado por muchas personas. Resina de poliéster isoftálico se está convirtiendo en el material preferido en industrias tales como marinas, porque su resistencia al agua es deseable. En la tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas de la resina poliéster según el tipo de material [8].

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las resinas poliéster

Material	Resistencia a la tracción	Módulo de tracción	Elongación	Resistencia a la flexión	Módulo de flexión	Resistencia a la compresión
	<i>MPa</i> <i>Ksi</i>	<i>GPa</i> <i>Msi</i>	%	<i>MPa</i> <i>Ksi</i>	<i>GPa</i> <i>Msi</i>	<i>MPa</i> <i>Ksi</i>
Ortoftálica	55 8	3.45 0.50	2.1	80 12	3.45 0.50	. . .
Isoftálico	75 11	3.38 0.49	3.3	130 19	3.59 0.52	120 17
Tereftálica	54.1369 7.851	3.5522 0.515	1.8	117 17	3.63 .527	. . .
Cloréndico	20 3	3.38 0.49	...	120 17	3.93 0.57	100 15
Viniléster	80 12	3.59 0.52	4	140 20	3.72 0.54	. . .

3.3 Materiales compuestos de fibras cortas

3.3.1 Influencia del largo de las fibras

Las características mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también en el grado en el que se transmite una carga aplicada a las fibras de la fase de matriz. Es importante en el grado de la transmisión de carga la magnitud de la unión interfacial entre las fases de la fibra y la matriz. Bajo una tensión aplicada, esta unión fibra-matriz cesa en los extremos de las fibras, produciendo una elongación del patrón en la matriz como se muestra esquemáticamente en la figura 4; en otras palabras, no hay transmisión de carga de la matriz en cada extremidad de la fibra[10].

Algunas longitudes críticas de la fibra son necesarias para el fortalecimiento y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica (l_c) depende del diámetro de la fibra (d) y su esfuerzo última (σ_f) y en la fuerza de la unión fibra-matriz (o la resistencia a la cizalladura de la matriz, lo que sea menor) (τ_c) según la ecuación 1 [11]:

$$l_c = \frac{\sigma_f * d}{2 * \tau_c}$$

Ecuación 1.

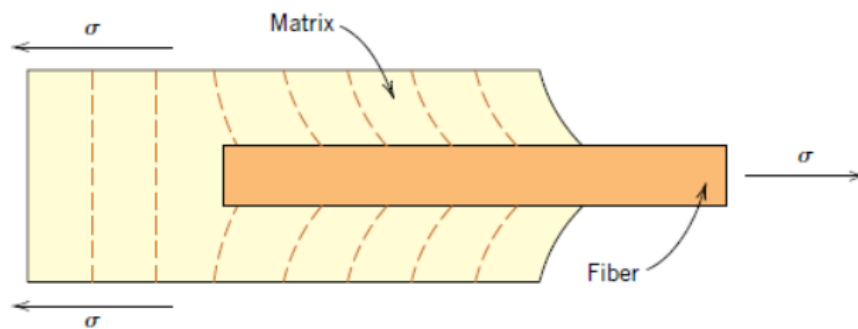


Figura 4. Representación gráfica del comportamiento entre fibra y matriz.

3.3.2 Influencia de la fracción de volumen y orientación de las fibras

La distribución, la concentración y orientación de las fibras tienen una influencia significativa en la resistencia y otras propiedades de los materiales compuestos reforzados. Con respecto a la orientación, dos extremos son posibles: (1) una alineación paralela del eje longitudinal de las fibras en una sola dirección, y (2) una alineación totalmente al azar.

Las fibras continuas son normalmente alineados (Figura 5a), mientras que las fibras discontinuas pueden estar alineados (Figura 5b), orientadas al azar (Figura 5c), o parcialmente orientadas. Se generan mejores propiedades generales de los compuestos cuando la distribución de la fibra es uniforme [11].

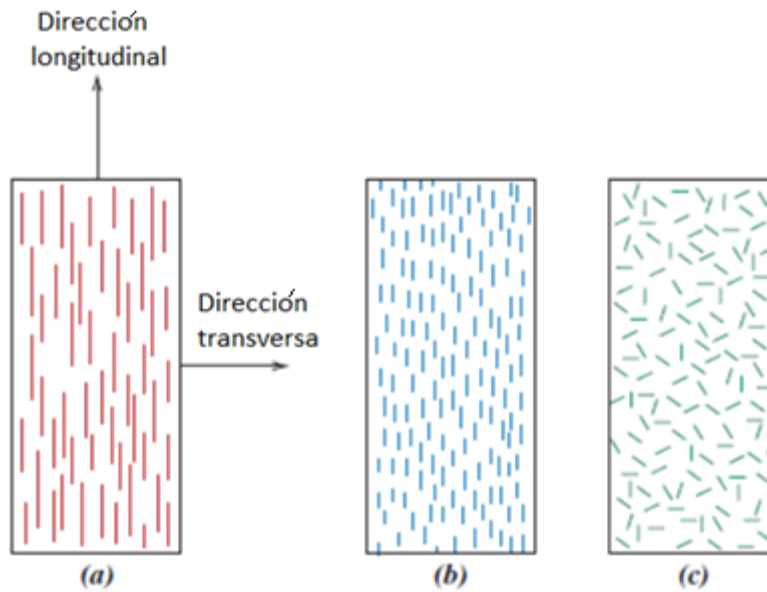


Figura 5. Orientación de las fibras.

Capítulo IV – Metodología experimental

La metodología que se llevará a cabo para la manufactura de las probetas experimentales realizadas se muestra en el siguiente diagrama, así como las normas que rigen la sociedad americana de pruebas y materiales *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*).

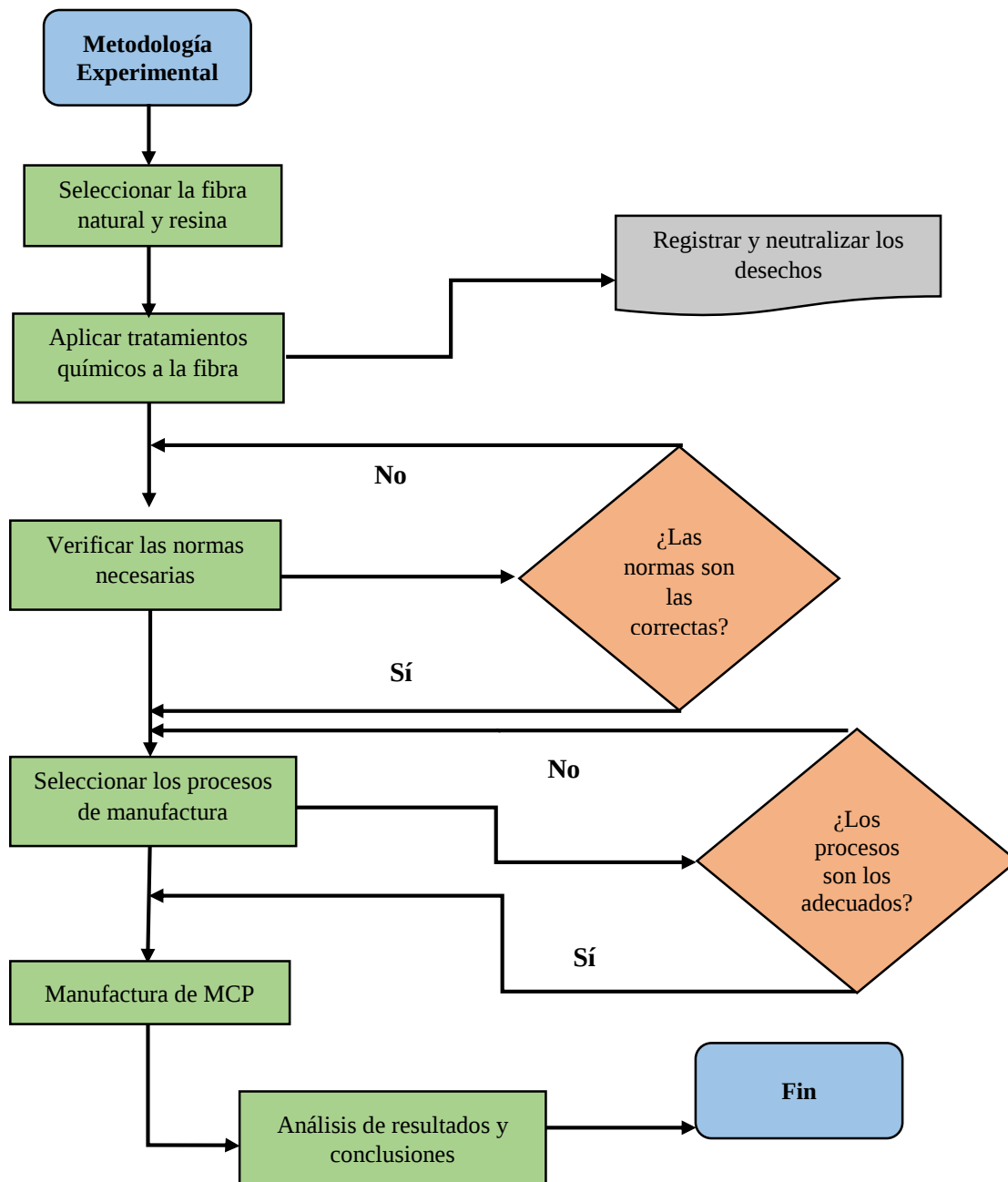


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

4.1 Materiales

El material que se utilizará para elaborar el material compuesto de esta investigación será la fibra de coco extraída manualmente de la cáscara del coco natural, que posteriormente será sometida a procesos químicos, y después se impregnara con resina de poliéster para generar el MCP.

4.1.1 Fibra de coco

La fibra de coco que se utilizará contiene 100% de fibra de coco pura que proviene de la corteza del coco y viene en configuración de fibra discontinua con orientación aleatoria (figura 7). La materia prima proviene de un local ubicado en un central de abastos llamado “Mercado Hidalgo”, en la ciudad de Tijuana, Baja California, México. Las propiedades mecánica que se tomarán en cuenta para estas fibras serán las mostradas en la tabla 1.



Figura 7. Cáscara de coco

4.1.2 Resina Poliéster

La resina poliéster adquirido por la empresa denominada Reichhold, se le conoce como Polylite 33004-00 (figura 8), es una resina no saturada tereftálica modificada, tixotrópica, de reactividad media y baja viscosidad. Tiene como características principales tener buena

humectación del refuerzo, buen acabado de las piezas a construir con la adhesión de un refuerzo óptimo y versátil a la vez.



Figura 8. Resina de poliéster (33004-00).

La resina PolyLite 33004-00 tiene propiedades específicas químicas y físicas; las cuales se muestran en la tabla 3 y 4.

Tabla 3. Propiedades típicas de resina líquida a 25°C.

Propiedades	Unidades	Especificaciones	Métodos de Análisis
No volátiles	%	Registro	RQMPEA-0041
Viscosidad Brookfield, LVF, 3/60	cPs	300-400	RQMPEA-0002
Índice de tixotropía (3/6) / (3/60) (mínimo)	s/u	2	RQMPEA-0006
Color de la resina líquida	s/u	Registro	RQMPEA-0019
Tiempo de gel *	minutos	15-16	RQMPEA-0066
Intervalo gel-curado *	minutos	Registro	RQMPEA-0066
Temperatura de exotermia *	°C	Registro	RQMPEA-0066
Estabilidad @ 105 °C (mínimo)	horas	4	RQMPEA-0118
Tiempo de vida mínimo en almacenamiento	meses	3	

Tabla 4. Propiedades físicas sin carga ni refuerzo

Propiedades	Unidades	Valor Típico	Métodos de Análisis
Dureza Barcol	s/u	30 – 34	ASTM D-2583-07
HDT	°C	75.5	ASTM D-648-07
Absorción de agua @ 23°C (24 hr)	%	0.2595	ASTM D-570-98
Absorción de agua @ 100°C (2 hr)	%	0.7243	ASTM D-570-98
Resistencia a la tensión	Psi	7,851.9	ASTM D-638-10
Elongación a la ruptura	kPsi	515.2	ASTM D-638-10
Resistencia a la flexión	Psi	16,995.7	ASTM D-790-10
Módulo de flexión	kPsi	527.4	ASTM D-790-10
Resistencia de impacto (Izod) Tipo “A”, Tipo de falla: Completa (C)	Ft – lb/in	0.167	ASTM D-256-10
Resistencia al impacto (Izod) Tipo “E”, Tipo de Falla: Completa (C)	Ft- lb/in	1.069	ASTM D-256-10

4.1.3 Catalizador para resina poliéster

En la tabla 5 se muestran las propiedades físicas del catalizador que utilizará en la resina polylite 33004-00 (figura 9), la cual de acuerdo a la hoja técnica deberá tener una proporción de mezclado de 1 % por cada 100 % de resina.

Tabla 5. Propiedades físicas del catalizador

Propiedades	Unidades	Valor Típico
Estado físico a 20°C	-	Líquido
Presión de vapor a 20°C	Pa	1048
Presión de vapor a 50°C	Pa	4686
Densidad a 20°C	kg/m ³	1172
Viscosidad dinámica a 20°C	cP	13.35
Viscosidad cinemática a 20°C	cSt	11.39
Temperatura de inflamación	°C	146
Temperatura de autoignición	°C	516
Temperatura de ebullición a presión atmosférica	°C	254



Figura 9. Catalizador (Resina Poliéster).

4.2 Ensayos de tensión

Este procedimiento tiene por objetivo determinar el comportamiento de un material bajo carga axial y construir su gráfica de esfuerzo vs elongación para determinar sus propiedades mecánicas. La experimentación en las probetas se realiza a través de una máquina de ensayos de tensión.

4.2.1 Normas estandarizadas

Las normas internacionales establecidas para los ensayos a tensión para un material compuesto con matriz polimérica, se rige por la norma ASTM D3039[12] donde las dimensiones características de la probeta se pueden determinar de acuerdo a la tabla 6; la cual se basa en los requerimientos generales como geometría, espesor y tolerancias. Por otro lado, en la tabla 7 se muestran las especificaciones para las probetas tipo hueso según la norma ASTM D638-02 [13].

4.2.1.1 Geometría de las probetas y cantidad de probetas

Las recomendaciones de la norma ASTM D3039 para el tipo de ensayo mecánico en un material reforzado con fibras se muestran en la figura 10 y en la tabla 6 la cual se basa en una forma geométrica rectangular. La cantidad total de probetas requeridas para realizar los ensayos es de 5 especímenes para cada tipo de laminado de acuerdo a la norma.

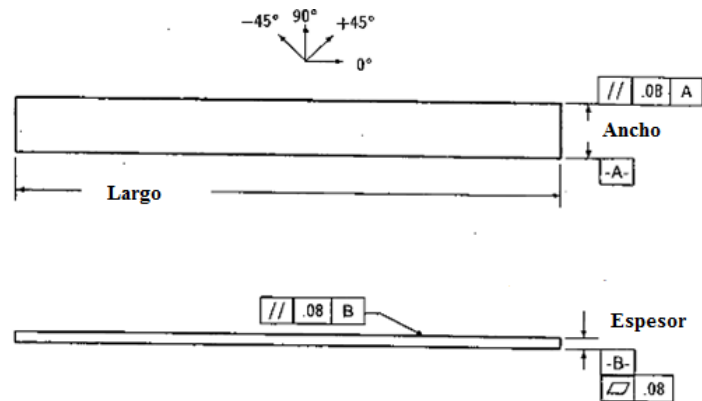


Figura 10. Probeta tipo rectangular de ensayo a tracción según la norma ASTM D3039.

Tabla 6. Dimensiones establecidas para la geometría de una probeta a tensión.

Orientación de la fibra	Ancho mm [in.]	Longitud mm [in.]	Espesor mm [in.]	Longitud de pestaña mm [in.]	Espesor de pestaña mm [in.]	Ángulo de pestaña °
0° unidireccional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.082]	7 o 90
90° unidireccional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanceado y simétrico	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	Lija	—	—
aleatorio – discontinuo	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	Lija	—	—

Por otro lado, la norma ASTM D638 recomienda que las probetas se realicen de forma geométrica de tipo hueso, en la figura 11 y la tabla 7. se describen las principales características del espécimen.

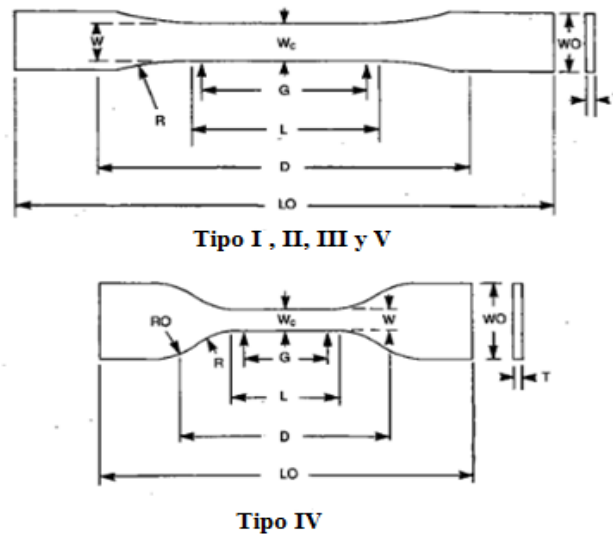


Figura 11. Probeta tipo hueso de ensayo a tracción según la norma ASTM D638.

Tabla 7. Dimensiones establecidas para la geometría de una probeta a tensión.

Dimensiones mm [in.]	Tipo I 7 [0.28] o menor espesor	Tipo II 7 [0.28] o menor espesor	Tipo III 7 – 14 [0.28 -0.55]	Tipo IV 4 [0.16] o menor espesor	Tipo V 4 [0.16] o menor espesor	Tolerancias
W – Ancho de la sección	13 [0.50]	6 [0.25]	19 [0.75]	6 [0.25]	3.18 [0.125]	± 0.5 [± 0.02]
L – Longitud de la sección	57 [2.25]	57 [2.25]	57 [2.25]	33 [1.30]	9.53 [0.375]	± 0.5 [± 0.02]
WO – Ancho total	19 [0.75]	19 [0.75]	29 [1.13]	19 [0.75]	...	+ 6.4 [+0.25]
WO – Ancho total	...	...	...	...	9.53 [0.375]	+ 3.18 [0.125]
LO – Longitud total	165 [6.5]	183 [7.2]	246 [9.7]	115 [4.5]	63.5 [2.5]	no máx. [no máx.]
G – Longitud del calibrador	50 [2.00]	50 [2.00]	50 [2.00]	...	7.62 [0.300]	± 0.25 [± 0.010]
G – Longitud del calibrador	...	...	...	25 [1.00]	...	± 0.13 [± 0.005]
D – Distancia entre mordazas	115 [4.5]	135 [5.3]	115 [4.5]	65 [2.5]	25.4 [1.0]	± 5 [± 0.2]
R – Radio de redondeo	76 [3.00]	76 [3.00]	76 [3.00]	14 [0.56]	12.7 [0.5]	± 1 [± 0.04]
RO – Radio externo (Tipo IV)	...	...	...	25 [1.00]	...	± 1 [± 0.04]

4.2.2 Propiedades mecánicas

A continuación se muestran las ecuaciones de resistencia última (ecuación 2) y esfuerzo normal (ecuación 3) las cuales servirán para construir la gráfica de esfuerzo vs elongación de acuerdo a las normas ASTM D3039 y ASTM D638.

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\sigma_i = P_i / A \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

F^{tu} = resistencia última a tensión [MPa];

P^{max} = carga máxima antes de la ruptura [N];

σ_i = esfuerzo a tensión en el enésimo dato de prueba [MPa];

P_i = carga en el enésimo dato de prueba [N];

A = área promedio de la sección transversal [m²].

Para calcular la elongación en el enésimo dato de prueba se deberá de usar la siguiente ecuación, de acuerdo a las normas ASTM D3039 y ASTM D638.

$$\epsilon_i = \delta_i / L_g \quad \text{Ecuación 4}$$

dónde:

ϵ_i = elongación a tensión en el enésimo dato de prueba [$\mu \epsilon$];

δ_i = desplazamiento del extensómetro en el enésimo dato de prueba [mm];

L_g = longitud de calibración en la probeta [mm].

Para calcular el módulo de elasticidad se deberá de usar la siguiente ecuación, de acuerdo a las normas ASTM D3039 y ASTM D638.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{d}\sigma}{\mathbf{d}\varepsilon} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

E = módulo de elasticidad [GPa];

$d\sigma$ = incrementos de esfuerzo en el ensayo a tracción [MPa];

$d\varepsilon$ = incrementos de elongación longitudinal unitaria [$\mu\epsilon$].

Para determinar el valor representativo de las pruebas realizadas se deberá determinar el valor promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación para cada propiedad mecánica del material de acuerdo a las ecuaciones 6, 7, y 8.

$$X_m = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad \text{Ecuación 6}$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - nX_m^2 \right) / (n - 1)} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$CV = \frac{s_{n-1}}{X_m} \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

X_m = variable de muestra promedio;

s_{n-1} = muestra de desviación estándar;

CV = muestra del coeficiente de variación en porcentaje;

n = número de especímenes;

x_i = propiedad derivada.

4.2.3 Máquina de ensayos universales

Para los ensayos de tensión que se utilizará en la presente investigación será la máquina Shimadzu AG-X Plus 100kN (figura 12) a una velocidad de prueba de 2mm/min, conforme a la norma ASTM D3039 [12].



Figura 12. Máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X Plus 100kN.

4.3 Laminados de estudio

Los laminados de estudio de esta investigación se basan en determinar la influencia de orientación de las fibras y la manufactura en las propiedades mecánicas de un material compuesto sustentable de fibras de coco, a través de una caracterización mecánica experimental. Por lo tanto, se proponen dos laminados, el laminado A serán probetas de tipo hueso con fibras unidireccionales de acuerdo a la norma D638 y el laminado B serán probetas tipo rectangular con fibras dispersas de acuerdo a la norma D3039.

4.4 Manufactura

4.4.1 Tratamiento a las fibras de coco (tratamiento alcalino y secado)

Para iniciar el proceso de impregnación de las fibras se realiza un tratamiento alcalino a las fibras. El cual consiste en hacer un baño de 5% Hidróxido de Sodio (NaOH) y 95% agua destilada (H₂O) y sumergir las fibras durante 2 horas. Este tratamiento se utiliza para reducir la cantidad de lignina y ceras que contiene la fibra, con el propósito de mejorar la compatibilidad entre la resina polyester con la fibra natural, o matriz-refuerzo. Dicho tratamiento se realizó en el laboratorio de química que cuenta con la cabina extractora en UABC ECITEC Valle de las Palmas. Primero se realizó el cálculo de la cantidad de hidróxido de sodio y la cantidad de fibra de coco, como se muestra en a continuación. Para el cálculo de las concentraciones de hidróxido de sodio es necesario conocer las siguientes variables:

Densidad del agua: $\rho_{agua}=1 \text{ g/cm}^3$

Densidad del hidróxido de sodio: $\rho_{NaOH}=2,13 \text{ g/cm}^3$

Volumen de la Solución: $V_{solución}=1000 \text{ cm}^3$

Concentración de hidróxido de sodio en fracción de masa: $M_{NaOH}=0,05$

Las cantidades de hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada (H₂O) requeridas con las especificaciones anteriores se establecen a partir de la ecuación que se conoce comúnmente como “Regla de mezclas”.

$$v_{NaOH} = \frac{(M_{NaOH} \times \rho_{NaOH})}{(M_{NaOH} \times \rho_{NaOH} + (1 - M_{NaOH}) \rho_{agua})} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde:

v_{NaOH} = Concentración de hidróxido de sodio en fracción de volumen

Y aplicando la ecuación 9 se tiene que:

$$v_{NaOH} = (0,05 \times 2,13 \text{ g/cm}^3) / (0,05 \times 2,13 \text{ g/cm}^3 + (1 - 0,05) \times 1 \text{ g/cm}^3) = 0,02411$$

El volumen de hidróxido de sodio V_{NaOH} y de agua V_{agua} es:

$$V_{sust1} = v_{sust1} \times V_{cm}^3 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$V_{NaOH} = 0,0241138 \times 1000 \text{ cm}^3 = 24,11 \text{ cm}^3$$

$$V_{agua} = (1 - 0,0241138) \times 1000 \text{ cm}^3 = 975,89 \text{ cm}^3$$

Como el hidróxido de sodio se encuentra en partículas (sólidos), es preferible obtener su cantidad en masa:

$$\text{Masa de Hidróxido de Sodio: } m_{NaOH} = 24,11 \text{ cm}^3 \times 2,13 \text{ g/cm}^3 = 51,35 \text{ g}$$

Una vez calculado la cantidad de hidróxido, se pesa con la balanza analítica, con la ayuda de un vaso de precipitado ya que el hidróxido de sodio que utilizamos fue líquido, véase figura 13.

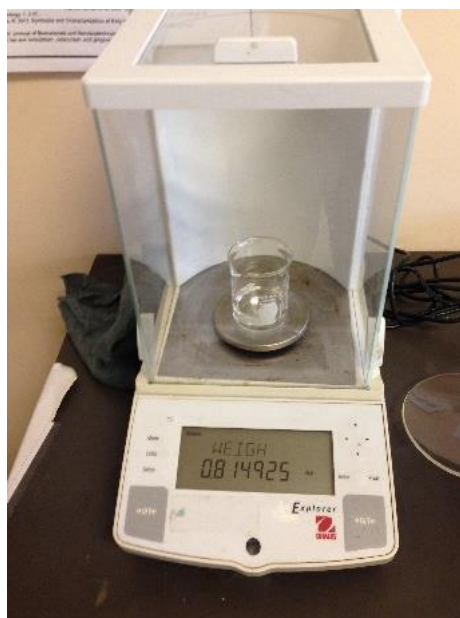


Figura 13 . Medición del volumen de NaOH.

Se pesó la fibra con la ayuda de un vidrio de reloj, como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Medición de la masa de fibra de coco.

Luego se procedió a colocar el NaOH a baño maría dentro de un cristizador colocado en la cabina extractora. (El baño maría se realiza para evitar una reacción química cuando se combina con agua destilada y la cabina extractora se utiliza para evitar los vapores que genera el reactivo). Se añade una cantidad de agua destilada a la solución de NaOH y se mezcló durante 6 minutos, véase figura 15.

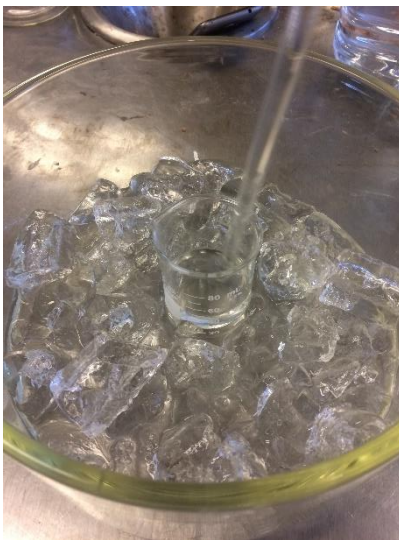


Figura 15 . Mezcla de NaOH y H₂O bajo baño maría dentro de un cristizador.

Se traspasó la mezcla del vaso de precipitado, una vez transcurrido el tiempo, al matraz aforado de 1000 ml y se añadió agua destilada con una cantidad de 1000 ml (figura 16). Se mezcló la solución y se añadió al vaso precipitado de 1000 ml junto con la fibra (figura 17).



Figura 16. Matraz aforado de 1000ml con mezcla de NaOH y H₂O.



Figura 17. Vaso de precipitado de 1000ml con la mezcla y la fibra de coco.

Las fibras se dejaron sumergidas durante 22 horas en la solución dentro de la cabina extractora. Al haber transcurrido el tiempo, se extrajo el residuo de la solución, como se muestra en la figura 18, se exprimieron las fibras para deshacerse del sobrante líquido que absorbieron.



Figura 18. Filtrado de la solución NaOH y agua destilada.

Una vez filtrado el residuo químico producido por el tratamiento alcalino, se realizó una prueba para medir el grado de acidez o alcalinidad (PH) en la sustancia (figura 19).



Figura 19. Prueba de acidez o alcalinidad utilizando una tira de papel PH.

Después de haber introducido el papel PH dentro de la solución, se dejó reposar por 3 minutos hasta que la tira de papel se secase completamente y obtuviera un color asignado; que en este caso fue de color azul oscuro, indicando que el nivel de PH de la sustancia era de 10, afirmando que la solución es una sustancia alcalina (figura 20).



Figura 20. Indicador de la prueba de PH.

Antes de neutralizar la solución alcalina, se decidió pesar el residuo para saber la cantidad exacta del desecho; dando como resultado un peso 0.540 kg de solución alcalina, el cual se considera un desecho tóxico, corrosivo. Finalmente, se vertió el desecho en el contenedor de plástico con nombre de Bases (figura 21), para neutralizar la solución y mantenerlo en un lugar seguro, de acuerdo a las medidas de seguridad del laboratorio.

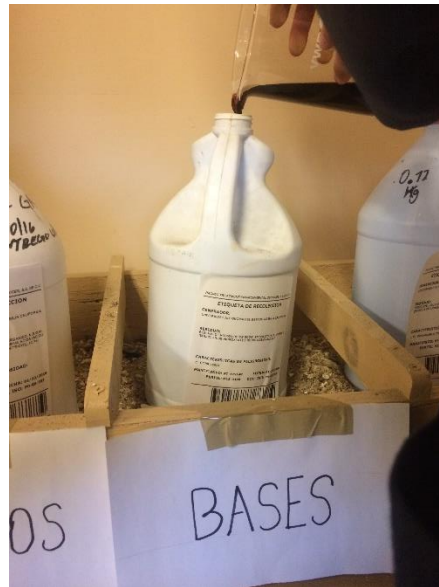


Figura 21. Depósito para el residuo de la solución alcalina.

Se deja remojando la fibra durante 24 horas en agua destilada para remover los restos de la solución alcalina que pudiera absorber la fibra. Después de haber dejado remojando las fibras en agua destilada, se introdujeron dentro de un horno durante 5 horas a una temperatura de 65 °C (figura 22) para secar la fibra sin dañarla.



Figura 22. Horno térmico para el secado de la fibra de coco.

Se procede a separar los restos de hollejo que se localizaban entre cada una de las fibras como se puede apreciar en las siguientes figuras.



Figura 23. Fibra de coco después del tratamiento de secado.



Figura 24. Presentación de la fibra de coco sin hollejo.

Para extraer detalladamente cada de una de las fibras de coco y poder realizar las probetas con fibra de coco con orientación unidireccional, se añadió un tratamiento de planchado a las fibras con una plancha común para el cabello. Logrando con ello endurecer las fibras para facilitar la colocación de las mismas dentro del molde para las probetas tipo hueso.



Figura 25. Planchado de la fibra de coco.

Con la ayuda de dos placas de acero 1018 como se muestra como ejemplo en la figura 26, se procedió a compactar la fibra para facilitar la orientación y fabricación de las probetas.



Figura 26. Placa hecha con material de fierro.

Se utilizó una prensa hidráulica para obtener una compresión uniforme sobre todo el área que abarcaba la fibra de coco. Este mismo procedimiento se realizó 4 veces hasta alcanzar la mayor compactación del material.

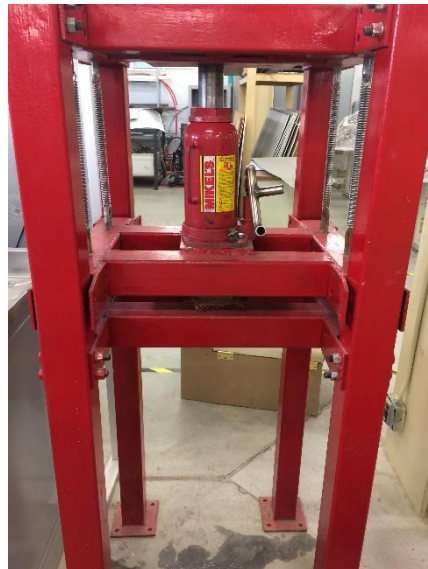


Figura 27. Prensa hidráulica utilizada para comprimir la fibra de coco.

En las siguientes figuras se puede apreciar la forma física final que tomó la fibra unidireccional y aleatoria después de estar sometidas al proceso de compresión explicado en los párrafos anteriores.



Figura 28. Presentación del material fibra de coco con dirección aleatoria.



Figura 29. Presentación del material fibra de coco con dirección unidireccional.

4.4.3 Fabricación de los laminados

Se realizaron dos tipos de laminados con diferentes direcciones (unidireccional y aleatoria) para determinar la influencia de la manufactura y la orientación en las propiedades mecánicas de un material compuesto sustentable de fibras de coco, a través de una caracterización mecánica experimental sobre la combinación de propiedades que existen entre la fibra de coco y resina poliéster.

En el laminado A se utilizará la manufactura con molde hueso de perro, es decir la forma de la probeta se obtendrá directamente de la fabricación del laminado sin la necesidad de realizar un proceso de arranque de viruta u otro, con dirección unidireccional. Por lo tanto el molde diseñó con la forma indicada en la norma D638 (figura 30).

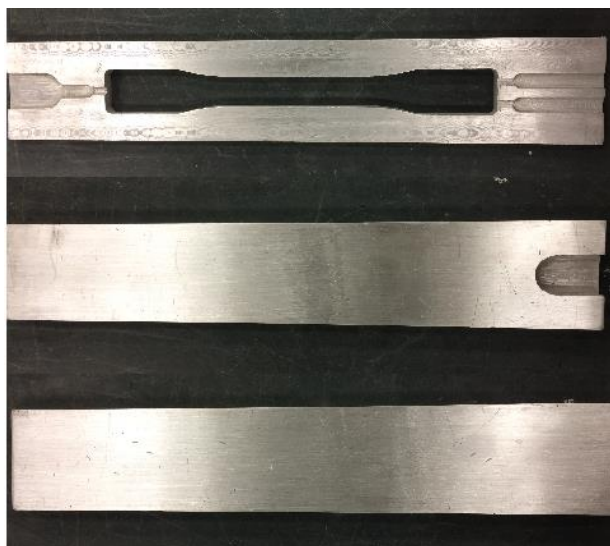


Figura 30. Molde de aluminio para las probetas tipo hueso.

Para iniciar la fabricación de las probetas se realizó la medición de peso de fibra de coco (figura 31) y que cada probeta tenga las mismas proporciones en peso y resina.



Figura 31. Obtención del peso de la fibra de coco para las 5 probetas tipo hueso.

Como siguiente paso, se aplicó varias capas de cera desmoldante en el molde de aluminio donde se colocó la fibra de coco y con la ayuda de 2 prensas tipo C se unieron las 3 partes del ensamble que constituye el molde para la probeta tipo hueso. Asegurando que el molde estuviera fijo, se vertió el porcentaje de resina poliéster calculado para cada probeta, como se puede apreciar en la figura 32. Se dejó curar el laminado dentro del molde tipo hueso de perro por 24 horas.



Figura 32. Resina poliéster es vertida dentro del molde para probeta tipo hueso.

El laminado B, se denominará manufactura con molde plano, ya que se obtendrá una placa plana a la cual se deberá realizar un proceso de remoción de material para obtener las probetas de acuerdo a la norma D3039. Como primer paso se limpió con alcohol de 95% caña la superficie de los vidrios; que se utilizaron como base y compactador. Como paso siguiente, se aplicó la primera capa de cera desmoldante para evitar que se adhiriera el vidrio con el laminado (figura 33, 34) y poder retirarlo después del proceso de curado.



Figura 33. Vidrios utilizados para la fabricación del laminado B.



Figura 34. Cera desmoldante.

Una vez aplicada la primera capa de cera, se pulió con una tela delgada alrededor de toda la superficie que se utilizaría. Este mismo procedimiento se repitió por 3 ocasiones con base a las instrucciones de uso de la cera desmoldante. Posteriormente, se colocó la fibra de coco sobre la base de vidrio (figura 35) e impregnar la fibra con la resina poliéster.



Figura 35. Mezcla de la fibra de coco con resina poliéster.

4.4.4. Obtención de las probetas

Después de la impregnación de la fibra con resina del laminado B se deja curar por 24 horas, posterior a ese tiempo se separó la parte compactador base; para obtener como resultado como se aprecia en la figura 36.



Figura 36. Muestra del laminado B.

Utilizando una herramienta rotativa de corte (figura 37), Dremmel 3000 y un disco de corte con diámetro de 3/4' se procedió a delimitar un tamaño del laminado obtenido con un marcador rojo.



Figura 37. Muestra del laminado con la herramienta utilizada.

Posteriormente, se obtuvieron 7 probetas rectangulares que pertenecen al laminado B, a través de cortes longitudinales (figura 38). Después de ser recortadas las probetas, se procedió a lijar los bordes con el propósito de mejorar el acabado superficial, este procedimiento se realizó con un banco de lijado manual.



Figura 38. Probetas con dirección aleatoria obtenidas del laminado.

Como último paso, se enumeraron cada una de las probetas (figura 39) para tener un control sobre la información que se obtendrá en la máquina universal de ensayos.



Figura 39. Probetas rectangulares enumerados (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7).

Se fabricaron 5 especímenes (figura 40, 41) de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM D638, para posteriormente someterlas a pruebas de tensión y obtener la caracterización mecánica.



Figura 40. Uno de los cinco ejemplares obtenidos de probetas tipo hueso.



Figura 41. Probetas tipo hueso enumeradas (A1, A2, A3, A4, A5).

Capítulo V – Resultados y conclusiones

El comportamiento mecánico del material compuesto del laminado A se muestra en la figura 42, en la cual se observan 5 gráficas correspondientes a las probetas fabricadas.

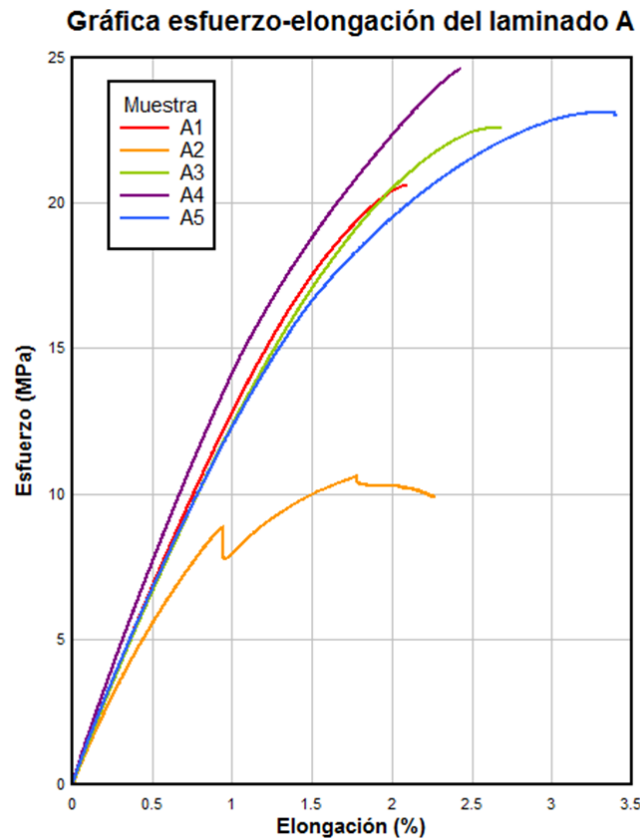


Figura 42. Gráfica esfuerzo-elongación del laminado A

En la figura 43 se muestran las fotografías de las muestras A1, A2, A3, A4, A5 en su zona de fractura del laminado A, realizadas a través del equipo Aven 26700-520 iLoupe XL2 (microscopio digital portátil), al comparar la probeta A2 con las otras muestras se puede observar una falta de fibras alineadas de manera unidireccional, por lo tanto, las fibras no se encuentran distribuidas de manera uniforme dentro de la probeta. Este comportamiento ocasiona que existan zonas dentro del laminado donde el desempeño mecánico se debe solamente a las propiedades mecánicas de la resina, y no de un efecto sinérgico entre la fibra y la resina, por lo cual, las

propiedades mecánicas de la probeta A2 son inferiores a las otras muestras del laminado por lo tanto esta probeta no es representativa del laminado.

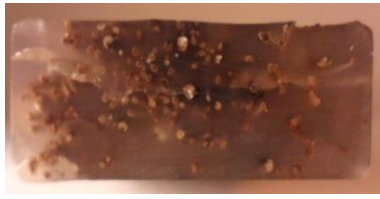
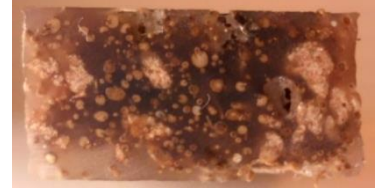
Probetas	Vista frontal	Sección transversal
A1		
A2		
A3		
A4		
A5		

Figura 43. Fotografías vista frontal y de la sección transversal del laminado A.

El comportamiento mecánico del material compuesto del laminado B se muestra en la figura 44, en la cual se observan las gráficas correspondientes a las probetas fabricadas.

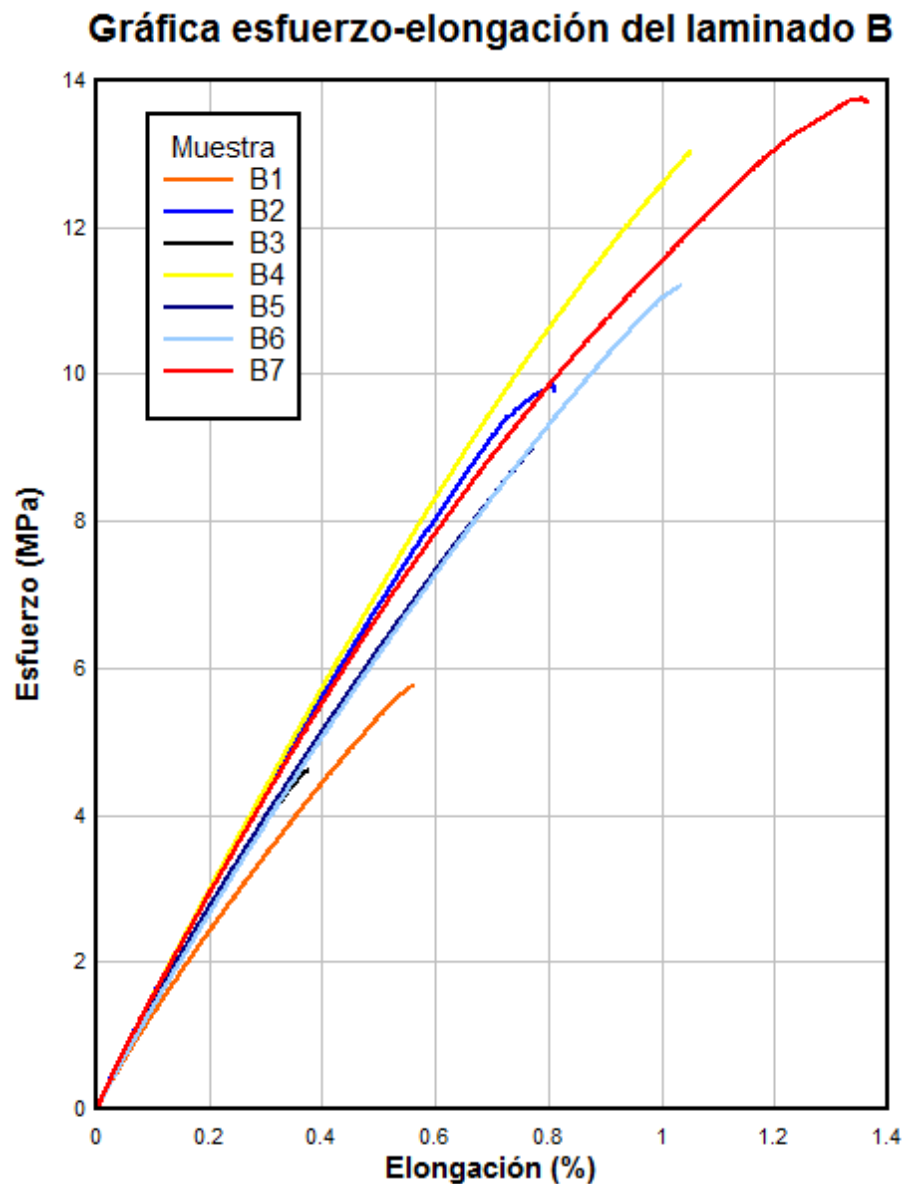


Figura 44. Gráfica esfuerzo-elongación del laminado B.

En la figura 44, se presenta la curva esfuerzo-elongación de las probetas que pertenecen al laminado B. Al igual que en la sección anterior, se muestran los resultados del laminado; las probeta B1 y B3 no se tomarán en cuenta para determinar el promedio de las propiedades mecánicas de este laminado (figura 45), por tener un comportamiento inusual a comparación con

las demás probetas; el principal factor de este comportamiento fue la distribución no uniforme de la resina y las fibras que ocasionó una fractura anticipada.

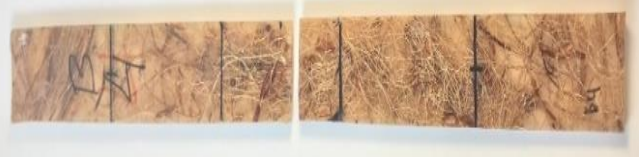
Probetas	Vista frontal	Sección transversal
B1		
B2		
B3		
B4		
B5		
B6		
B7		

Figura 45. Fotografías vista frontal y de la sección transversal del laminado B.

5.1 Variación de la resistencia última a tensión

En la tabla 8 se muestran los resultados de la resistencia última de cada probeta del laminado A, esta caracterización se obtuvo de la máquina Shimadzu AG-X Plus 100 kN, así como el promedio y la desviación estándar de estos.

Tabla 8. Variación sobre la resistencia última a tensión de probetas tipo hueso.

Espécimen	Resistencia última a tensión (MPa)
A1	20.606
A3	22.608
A4	24.608
A5	23.134
Promedio	22.739
Desviación estándar	01.655
Coeficiente variable	7.27%

Por otro lado, en la tabla 9 se muestran los resultados de la resistencia última de cada probeta del laminado B, esta caracterización se obtuvo con la misma máquina de ensayos universales, así como el promedio y la desviación estándar de estos.

Tabla 9. Variación sobre la resistencia última a tensión de probetas tipo rectangular.

Espécimen	Resistencia última a tensión (MPa)
B2	9.853
B4	13.042
B5	9.014
B6	11.210
B7	13.755
Promedio	11.375
Desviación estándar	2.022
Coeficiente variable	17.77 %

Al comparar los resultados entre ambos laminados se puede observar una diferencia notable en la resistencia última, es decir el laminado A ($\sigma=22.739$ MPa) tiene una mayor resistencia mecánica comparado con el laminado B ($\sigma=11.37$ MPa). Este comportamiento se debe a que las fibras

unidireccionales tienen mayores propiedades mecánicas que las fibras dispersas, como se menciona en la sección 3.3.2.

5.2 Variación del módulo de elasticidad

En la tabla 10 se muestran los resultados del módulo elástico de cada probeta del laminado A, esta caracterización se obtuvo de la máquina Shimadzu AG-X Plus 100 kN, así como el promedio y la desviación estándar de estos.

Tabla 10. Resultados de la variación del módulo elástico de probetas tipo hueso.

Espécimen	Módulo elástico (GPa)
A1	1.383
A3	1.633
A4	1.531
A5	1.357
Promedio	1.476
Desviación estándar	0.129
Coefficiente variable	8.78 %

Por otro lado, en la tabla 11 se muestran los resultados del módulo elástico de cada probeta del laminado B, esta caracterización se obtuvo con la misma máquina de ensayos universales, así como el promedio y la desviación estándar de estos.

Tabla 11. Resultados de la variación del módulo elástico de probetas tipo rectangular.

Espécimen	Módulo elástico (GPa)
B2	1.390
B4	1.419
B5	1.273
B6	1.252
B7	1.362
Promedio	1.339
Desviación estándar	0.073
Coefficiente variable	5.45 %

Al comparar los resultados entre ambos laminados se puede observar que existe una diferencia porcentual del 10 % entre los valores del módulo de elasticidad, es decir el laminado A ($E=1.476$ GPa) tiene un mayor módulo de elasticidad comparado con el laminado B ($E=1.339$ GPa). Este comportamiento se debe a que las fibras unidireccionales tienen mayores propiedades mecánicas que las fibras dispersas, como se menciona en la sección 3.3.2.

5.3 Variación del porcentaje de elongación a la ruptura

En la tabla 12 y 13 podemos observar las propiedades mecánicas obtenidas de cada una de las probetas, como es el resistencia última, fuerza última, módulo elástico y elongación a la ruptura de los laminados, así como el promedio y la desviación estándar de estas propiedades.

Tabla 12. Resultados experimentales de probetas en forma de hueso.

Espécimen	Resistencia última (MPa)	Fuerza última (N)	Módulo elástico (GPa)	Elongación a la ruptura (%)
A1	20.606	1815.271	1.383	2.143
A3	22.608	1983.786	1.633	2.681
A4	24.608	2246.030	1.531	2.423
A5	23.134	2072.938	1.357	3.425
Promedio:	22.739	2029.506	1.476	2.668
Desviación estándar:	01.655	179.588	0.129	0.550

Tabla 13. Resultados experimentales de probetas en forma rectangular.

Espécimen	Resistencia última (MPa)	Fuerza última (N)	Módulo elástico (GPa)	Elongación a la ruptura (%)
B2	9.853	1150.942	1.390	0.811
B4	13.042	1293.055	1.419	1.052
B5	9.014	1047.277	1.273	0.772
B6	11.210	1213.281	1.252	1.033
B7	13.755	1488.942	1.362	1.363
Promedio:	11.375	1238.698	1.339	1.006
Desviación estándar:	2.022	166.256	0.073	0.236

Al comparar los resultados entre ambos laminados se puede observar que existe una diferencia porcentual del 165% entre los valores de elongación, es decir el laminado A (**elongación=2.668 %**), con el laminado B (**elongación=1.006 %**). Este comportamiento se debe principalmente a la resistencia última de cada laminado.

5.4 Conclusiones

Actualmente, en la búsqueda del cuidado del medio ambiente, las fibras naturales permiten reducir el impacto negativo al entorno ambiental en comparación con las fibras sintéticas. Por lo tanto, son utilizadas como material emergente en reforzamientos de elementos y estructuras de material compuesto, ya sea en el sector aeroespacial, aeronáutico, automotriz, energías renovables, etc. Sin embargo, se reconoce dentro del sector industrial y académico la necesidad de comprender la fenomenología del efecto sinérgico fibra/matriz en el desempeño mecánico y las mejoras dentro del proceso de manufactura de materiales compuestos estructurales utilizando como refuerzos las fibras naturales.

Por lo tanto, en el presente trabajo se evaluó la influencia de la orientación de las fibras y la manufactura en el material compuesto fibra de coco/resina poliéster a través de dos configuraciones de laminados que se obtuvieron por medio de un molde hueso de perro y molde plano. La caracterización mecánica se realizó a través de las normas ASTM D3039 y ASTM D638.

En el laminado A, el cual consiste en probetas tipo hueso de perro, se realizaron mediciones en las 5 probetas que lo conforman los cuales dieron como resultado las propiedades geométricas promedio: largo de probeta (165.00mm), ancho de probeta (13.00mm) y el espesor (7.00mm), y para el laminado B, el cual consiste de 7 probetas de tipo rectangular se midieron las propiedades geométricas de cada probeta, los cuales dieron como resultado las propiedades geométricas promedio: largo de probeta (250.00mm), ancho de probeta (25.00mm) y el espesor (2.45mm).

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas de tensión muestran que el comportamiento mecánico del laminado A proporciona una curva esfuerzo-elongación en la cual se puede apreciar el módulo de elasticidad de **$E = 1.476 \text{ GPa}$** , resistencia última promedio de **$\sigma_u = 22.739 \text{ MPa}$** , y porcentaje de elongación de **2.668%**. Y en el caso del laminado B se obtuvo una

curva esfuerzo-elongación en la cual se puede apreciar el módulo de elasticidad de $E = 1.339$ **GPa**, resistencia última promedio de $\sigma_u = 11.375$ **MPa**, y porcentaje de elongación de **1.006%**.

La comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas del laminado A y B en los ensayos de tensión, muestra que la resistencia última del laminado A es superior en un **99.9 %** comparado con el laminado B. Para el caso del módulo de elasticidad, se concluyó que el laminado A es superior un **10.23 %** comparado con el laminado B. Y por último, la variación del porcentaje de elongación entre el A y B es de **99.25 %**. Y esta diferencia se debe principalmente a la orientación de la fibra, debido a que las fibras unidireccionales tienen mejores propiedades mecánicas que la fibra dispersa con respecto a la dirección de la carga aplicada.

Sin embargo, existe una diferencia notable entre los laminados A, B, con respecto a los componentes individuales (fibra, resina), este comportamiento se puede explicar a través de los factores siguientes: a) Adhesión pobre de las fibras a la resina debido a que, al momento de hacer el tratamiento alcalino, no se haya retirado completamente la lignina (célula que refuerza y proporciona rigidez a los tejidos vegetales) que contiene el coco por su misma naturaleza; b) Deficiente distribución de las fibras y la resina dentro del laminado, por ejemplo en el laminado B se presentaron zonas con baja fracción de volumen de fibras y aumento de fracción de vacío; c) Proceso de obtención de las probetas.

Una de las aplicaciones posibles para este tipo de material compuesto es fabricar componentes que no comprometan la estructura de una aeronave o algún dispositivo mecánico; como por ejemplo, las mesas de apoyo que se encuentran en cada uno de los asientos de los pasajeros, también en los soportes de los brazos (que se encuentran en el asiento). Otra de las aplicaciones que se le puede dar es en el área automotriz, por ejemplo en el modelo i3 (BMW) se han utilizado este material para crear tableros y guanteras para cada uno de los vehículos manufacturados.

Bibliografía

- [1] Donald R. Askeland, “Materiales Cerámicos,” *Ciencia e ingeniería de los materiales*. pp. 400–440, 2005.
- [2] R. Dunne, D. Desai, R. Sadiku, and J. Jayaramudu, “A review of natural fibres, their sustainability and automotive applications,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 13, pp. 1041–1050, 2016.
- [3] T. U. Onuegbu and U. E. T. O. N. C, “Tensile Behaviour and Hardness of Coconut Fibre-OrthoUnsaturated Polyester Composites,” *Glob. J. Sci. Front. Res. Chem.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [4] F. I. Romli, A. N. Alias, A. S. M. Rafie, and D. L. A. A. Majid, “Factorial Study on the Tensile Strength of a Coir Fiber-Reinforced Epoxy Composite,” *AASRI Procedia*, vol. 3, pp. 242–247, 2012.
- [5] N. A. S. Priya, P. V. Raju, and P. N. E. Naveen, “Experimental testing of polymer reinforced with coconut coir fiber composites,” vol. 4, no. 12, pp. 453–460, 2014.
- [6] J. Trejos, “Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio,” pp. 1–116, 2014.
- [7] M. Santiago Poveda, “Lecturas complementarias - Materiales compuestos,” *Mater. compuestos*, p. 123–139, Vol 1., 2000.
- [8] a T. Submitted, I. N. Partial, F. Of, T. H. E. Requirements, F. O. R. The, and D. Of, “Study on Mechanical Behavior of,” *Mech. Eng.*, no. May, 2010.
- [9] E. Bennett-Huntley, “Epoxy Resin vs Vinylester vs Polyester: Use and Application Overview,” *Compos. Resin Dev.*, no. July, 2014.
- [10] P. K. Mallick, *Fiber- Reinforced Composites*. 2007.
- [11] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, “Fundamentals of Material Scienec and Engineering An Integrated Approach,” p. 1087, 2012.

- [12] D 3039/D3039M ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15.03, pp. 105–116, 2000.
- [13] ASTM International, “Standard test method for tensile properties of plastics,” *ASTM Int.*, vol. 08, pp. 46–58, 2003.