



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

TEMA: BIOMIMESIS DE LA ESTRUCTURA DE LA CHONTA (BACTRIS

GASIPAES) PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO

UTILIZANDO FIBRAS MICROMÉTRICAS OBTENIDAS MEDIANTE

ELECTROSPINNING

AUTORES: LOPEZ ECHEVERRÍA, WAGNER ANDRÉS

SILVA REVELO, CRISTINA PAOLA

TUTOR: ING. NARVÁEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“BIOMIMESIS DE LA ESTRUCTURA DE LA CHONTA (BACTRIS GASIPAES) PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO UTILIZANDO FIBRAS MICROMÉTRICAS OBTENIDAS MEDIANTE ELECTROSPINNING”** fue realizado por los señores **López Echeverría, Wagner Andrés y Silva Revelo, Cristina Paola** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 3 de Enero del 2019

Firma:

ING. NARVAEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO M.Phil

DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **López Echeverría, Wagner Andrés** y **Silva Revelo, Cristina Paola** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“BIOMIMESIS DE LA ESTRUCTURA DE LA CHONTA (BACTRIS GASIPAES) PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO UTILIZANDO FIBRAS MICROMÉTRICAS OBTENIDAS MEDIANTE ELECTROSPINNING”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 2 de Enero del 2019

López Echeverría Wagner Andrés

C.I. 1720544921

Silva Revelo Cristina Paola

C.I. 1724232978



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **López Echeverría, Wagner Andrés y Silva Revelo, Cristina Paola** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“BIOMIMESIS DE LA ESTRUCTURA DE LA CHONTA (BACTRIS GASIPAES) PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO UTILIZANDO FIBRAS MICROMÉTRICAS OBTENIDAS MEDIANTE ELECTROSPINNING”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 2 de Enero del 2019



López Echeverría Wagner Andrés

C.I. 1720544921



Silva Revelo Cristina Paola

C.I. 1724232978

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres y a mi hermana que siempre me han apoyado no solamente en el transcurso de este proyecto sino en toda mi vida universitaria, desde el primer día que salí de casa a la universidad.

Cristina Paola Silva Revelo

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a cada enseñanza que mis padres me han dado a lo largo de mi vida. No solo me han encaminado en un sendero de conocimiento, sino también de ser mejor persona día a día en cada aspecto de la vida. Son mis guías y modelos a seguir y superar.

Se lo dedico a Dios y la Virgen Dolorosa que me han brindado sabiduría, conocimiento, paciencia y mucho más. Lo cual me ha permitido alcanzar esta meta y saber que es solo una de muchas más que vendrán en la vida.

Wagner Andrés López Echeverría

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios que me regaló la vida, a mis padres que con su esfuerzo permitieron que yo tenga una carrera universitaria.

También quiero agradecer de manera muy enérgica a todos los profesores que formaron parte de mi formación académica en especial a los Ing. Narváez, Ing. Segura, Ing. Carrión que más que profesores para mí han sido guías de vida y verdaderos amigos.

Cristina Paola Silva Revelo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres que han sabido llevarme por el buen camino brindándome su amor y apoyo incondicional. Siempre cargado de buenos consejos y enseñanzas de vida.

Agradezco a mis hermanos Gustavo, Alina y María José que han sido un ejemplo de superación, perseverancia y lucha.

Con gran cariño quiero agradecer a una persona muy especial que me ha dado su apoyo y su amor. Alexandra Araujo, tú me has inspirado, me has apoyado y me has dado fuerzas para avanzar y crecer hasta en los días más oscuros.

Deseo agradecer de manera especial a mi compañera de tesis Cristina Silva, que con su esmero y dedicación fue un pilar muy grande para cumplir los objetivos de la meta alcanzada. Agradezco su amistad que en los años universitarios fue un gran apoyo y sé que seguirá siéndolo en los años venideros.

Wagner Andrés López Echeverría

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-------------|
| CERTIFICADO DEL DIRECTOR | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD..... | ii |
| AUTORIZACIÓN..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| GLOSARIO..... | xvii |
| RESUMEN..... | xx |
| ABSTRACT | xxi |
| CAPITULO I..... | 1 |
| 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Antecedentes..... | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 4 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 4 |
| 1.3. Alcance..... | 5 |
| 1.4. Justificación del proyecto..... | 6 |
| CAPITULO II..... | 9 |
| 2. ESTADO DEL ARTE..... | 9 |
| 2.1. Biomimética | 9 |
| 2.1.1 Biomimética de la síntesis molecular | 9 |
| 2.1.2 Fuentes de bio-inspiración | 10 |
| 2.2. Chonta | 14 |
| 2.2.1 Taxonomía..... | 15 |
| 2.2.2 Morfología..... | 16 |
| 2.2.3 Utilidades..... | 17 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 2.2.4 | Propiedades físico - mecánicas | 18 |
| 2.2.5 | Chonta como fuente de inspiración Natural | 20 |
| 2.3. | Fibras vegetales | 20 |
| 2.3.1 | Tipos..... | 21 |
| 2.3.2 | Métodos de extracción..... | 22 |
| 2.3.2.1. | Métodos químicos..... | 22 |
| 2.3.2.2. | Métodos mecánicos..... | 23 |
| 2.4. | Electrospinning | 23 |
| 2.4.1 | Técnicas de electrospinning..... | 24 |
| 2.4.2 | Parámetros de la técnica | 26 |
| 2.4.3 | Utilidades..... | 27 |
| 2.5. | Materiales Compuestos | 28 |
| 2.5.1 | Clasificación | 29 |
| 2.5.2 | Criterios de elaboración | 30 |
| 2.5.3 | Direccionamiento de las fibras | 31 |
| 2.5.4 | Utilidades de los materiales compuestos | 32 |
| 2.6. | Materiales innovadores..... | 33 |
| 2.6.1 | Electrospinning y la biomimética | 34 |
| 2.6.2 | Materiales compuestos y biomimética | 34 |
| 2.6.3 | Materiales compuestos con fibras de electrospinning | 35 |
| 2.7. | Polivinilpirrolidona..... | 36 |
| 2.8. | Poliacrilonitrilo..... | 36 |
| 2.8.1 | Propiedades de poliacrilonitrilo (PAN)..... | 37 |
| 2.9. | Resina de quitosán | 38 |
| 2.9.1 | Propiedades de la resina de quitosán | 39 |
| CAPITULO III | | 41 |
| 3. | EXPERIMENTACIÓN | 41 |
| 3.1. | Materia prima..... | 41 |
| 3.1.1 | Chonta | 41 |
| 3.1.2 | Polímeros y solventes para electrospinning | 42 |

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| 3.1.3 | Resina para el material compuesto | 42 |
| 3.1.4 | Ensayos mecánicos | 42 |
| 3.2. | Extracción de las fibras de chonta | 44 |
| 3.2.1 | Análisis de las fibras de chonta..... | 44 |
| 3.2.2 | Método químico | 45 |
| 3.2.3 | Método mecánico | 48 |
| 3.2.4 | Ensayos mecánicos fibras chonta..... | 50 |
| 3.3. | Experimentos previos | 51 |
| 3.3.1 | Experimentación del material compuesto con fibras alineadas de PVP | 52 |
| 3.3.2 | Experimentación del material compuesto con fibras alineadas de PAN | 58 |
| 3.4. | Diseño estadístico para la elaboración del material compuesto | 59 |
| 3.4.1 | Fabricación de fibras alineadas de PAN | 60 |
| 3.4.2 | Homogeneidad de diámetros de fibras de PAN | 63 |
| 3.4.3 | Estudio de la porosidad de malla de muestras de fibras de PAN | 64 |
| 3.4.4 | Proceso de formación de resina de quitosán | 65 |
| 3.4.5 | Selección de la concentración de resina de quitosán..... | 66 |
| 3.4.6 | Fabricación del material compuesto de resina de quitosán con fibras de PAN ... | 68 |
| 3.4.7 | Procedimiento..... | 68 |
| CAPITULO IV | | 72 |
| 4. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 72 |
| 4.1. | Análisis de la Chonta | 72 |
| 4.1.1 | Análisis del ensayo tracción de fibras de chonta..... | 73 |
| 4.2. | Verificación propiedades del material compuesto | 75 |
| 4.2.1 | Estudio de variables del material compuesto | 76 |
| 4.2.2 | Análisis de las propiedades mecánicas | 77 |
| 4.2.3 | Esfuerzo de Fluencia de la las fibras de PAN | 78 |
| 4.2.4 | Esfuerzo de fluencia de la resina de quitosán | 79 |
| 4.2.5 | Esfuerzo de fluencia del material compuesto | 80 |
| 4.3. | Verificación de la regla de mezclas | 82 |
| 4.4. | Análisis de las cualidades conjuntas | 83 |

| | | |
|----------------------------------|---|-----------|
| 4.5. | Verificación de la biomimesis de la chonta..... | 84 |
| 4.5.1 | Homogeneidad del material compuesto..... | 86 |
| 4.5.2 | Análisis del espesor..... | 86 |
| 4.6. | Propuesta de aplicación..... | 87 |
| CAPITULO V | | 89 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 89 |
| 5.1. | Conclusiones..... | 89 |
| 5.2. | Recomendaciones..... | 91 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA | | 93 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 <i>Variedades de Chonta en el Ecuador</i> | 15 |
| Tabla 2 <i>Promedios de las propiedades físico y mecánicas de la palma Bactris Gasipaes, cocus nucífera y bambusa vulgaris</i> | 19 |
| Tabla 3 <i>Parámetros del proceso de electrospinning con sus respectivas características.</i> | 26 |
| Tabla 4 <i>Propiedades fisicoquímicas del PAN</i> | 38 |
| Tabla 5 <i>Propiedades fisicoquímicas del quitosán</i> | 40 |
| Tabla 6 <i>Resumen de datos experimentales para determinar los mejores parámetros para PVP</i> | 56 |
| Tabla 7 <i>Resumen comprobación de parámetros</i> | 58 |
| Tabla 8 <i>Factores que afectan al material compuesto</i> | 59 |
| Tabla 9 <i>Resumen de datos experimentales para determinar los mejores parámetros para PAN</i> | 61 |
| Tabla 10 <i>Factores y puntuaciones para la formación de la resina de quitosán</i> | 67 |
| Tabla 11 <i>Matriz de decisión para la elaboración de resina</i> | 67 |
| Tabla 12 <i>Comparación de significancia de factores variables del material compuesto</i> . | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 a) EL HOMBRE DE VITRUVIO b) Boceto de máquina voladora, Leonardo Da Vinci. | 1 |
| Figura 2 Tela de araña natural, Método de segregación de la seda arácnida. | 2 |
| Figura 3 Ejemplos de fibras obtenidas por electrospinning. | 3 |
| Figura 4 a) Patrón de difracción de rayos X de las AgNPs obtenidas empleando extracto de nopal como agente reductor, b) Imagen HRTEM y patrón de difracción de las AgNPs. | 4 |
| Figura 5 Métodos de Extracción de fibras de Chonta | 5 |
| Figura 6 Muestras por electrospinning a ser ensayadas | 6 |
| Figura 7 Enfoque bottom-up | 9 |
| Figura 8 Organización supramolecular de una enzima | 10 |
| Figura 9 Capas proteicas de la concha de nácar | 11 |
| Figura 10 Patas de gecko | 11 |
| Figura 11 Estructura Interna de un hueso | 12 |
| Figura 12 Fibras biológicas de caña | 13 |
| Figura 13 Edificio Panal / ARCHIUM | 14 |
| Figura 14 Tronco de chonta Fuente: (Cisneros, 2014) | 16 |
| Figura 15 Hojas y frutos de la chonta | 17 |
| Figura 16 Cuchillo de Chonta Fuente: (Musialik, 2010) | 18 |
| Figura 17 Fibras extraídas de abacá Fuente (González & Arbo, 2013) | 21 |
| Figura 18 Ensamble del sistema de Electrospinning | 25 |
| Figura 19 Diversos ensambles de la técnica de Electrospinning. | 26 |
| Figura 20 Clasificación de materiales compuestos según Vinson y Sierakowsky (1987). | 30 |
| Figura 21 Clasificación de materiales compuestos según Matthew et al (2000). | 30 |
| Figura 22 Técnicas de moldeo | 31 |
| Figura 23 Clasificación de los materiales compuestos por tipo, orientación y geometría al refuerzo | 32 |
| Figura 24 Uso de los materiales compuestos | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 Niveles de la biomimética. | 33 |
| Figura 26 Arquitectura de tipo de diodo de emisión de luz orgánica plana (OLED) con nanofibras en forma de cinta de un polímero electroluminiscente (F8BT) como material activo, PEDOT / PSS: Poli (3,4 etilendioxitiofeno) poli (estireno sulfonato), PVK: poli (N-vinil carbazol) | 36 |
| Figura 27 Obtención del poliacrilonitrilo Fuente: (Higuera, 2015) | 38 |
| Figura 28 Estructura molecular del quitosán Fuente: (Laranjeira & Favere, 2009)..... | 40 |
| Figura 29 Zona de obtención de tronco de chonta Fuente: (Google, 2018) | 41 |
| Figura 30 Ensayo de tracción en reómetro Discovery HR-2 | 43 |
| Figura 31 Muestras de tronco de chonta con corte transversal. Vista lateral | 45 |
| Figura 32 Muestras iniciales a partir del borde externo del tronco de chonta. Dimensiones aproximadas de 25 x 15 x 80 [mm]..... | 46 |
| Figura 33 Muestras en inmersión de 24 [h] en solución de NaOH. | 47 |
| Figura 34 Muestra N° 1 posterior al secado..... | 47 |
| Figura 35 Muestras 5, 6 y 7 posteriores a tratamiento químico..... | 48 |
| Figura 36 Sección transversal tronco de chonta (cortes iniciales) | 49 |
| Figura 37 Cortes para fácil manejo de las muestras. Las medidas son aproximaciones, no es requerida mucha exactitud ni precisión. | 49 |
| Figura 38 Cizallamiento de las muestras para la separación de fibras. | 50 |
| Figura 39 Lote N°1 de fibras obtenidas por método mecánico – manual | 51 |
| Figura 40 Equipo de electrospinning del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE | 53 |
| Figura 41 Muestras de fibras de PVP al 8% en recolector tipo rejilla | 54 |
| Figura 42 Concentración de deposición en una sola placa | 55 |
| Figura 43 Deposición de fibras alineadas de PVP en placas paralelas con separación de 2,0 cm..... | 56 |
| Figura 44 Fibras muestra N°17 de PVP. Amplificación izquierda X1000 y derecha X100 Fuente: Microscopio de barrido | 57 |
| Figura 45 Material compuesto A) Con fibras de PVP y quitosán, 4% p/v en ácido acético 4%v/v B) Con fibras de PVP y quitosán, 4% p/v en ácido acético | |

| | |
|---|----|
| 40%v/v C) Con fibras de PVP y quitosán 8% p/v en ácido acético 4%v/v | |
| Fuente: Microscopio electrónico de barrido | 58 |
| Figura 46 Gráfica comparativa de resultados de esfuerzo obtenido por combinación de factores..... | 62 |
| Figura 47 Membrana con fibras alineadas de PAN al 15% de concentración v/v (muestra FB12)..... | 62 |
| Figura 48 Muestras de fibras de PAN. Amplificación izquierda X1000 y derecha X100 Fuente: Microscopio de barrido – ESPE | 63 |
| Figura 49 Histograma de diámetros de fibras de PAN 15%..... | 64 |
| Figura 50 Cálculo de áreas vacías entre fibras..... | 64 |
| Figura 51 A) Visualización de burbujas. B) Visualización de partículas. C) Forma diluidas de la resina. | 67 |
| Figura 52 Corte de 30 x 30 [mm] en las fibras alineadas | 68 |
| Figura 53 Matriz de probetas para elaboración del material compuesto | 69 |
| Figura 54 Inyección de Resina en fibras de PAN..... | 70 |
| Figura 55 Material compuesto en la matriz | 71 |
| Figura 56 Gráfica esfuerzo-deformación de la fibra FBCH18..... | 73 |
| Figura 57 Gráfica Esfuerzo - deformación de varias fibras de chonta..... | 74 |
| Figura 58 Frecuencia del esfuerzo de rotura obtenido de los ensayos de tracción. | 75 |
| Figura 59 Gráfica comparativa de resultados de esfuerzo del material compuesto obtenido por combinación de factores | 77 |
| Figura 60 Histograma de esfuerzos de fibras de PAN | 78 |
| Figura 61 gráfica esfuerzo – deformación de fibras de PAN | 78 |
| Figura 62 Histograma de esfuerzo de la resina de quitosán 4% p/v en ácido acético 4%v/v | 79 |
| Figura 63 gráfica esfuerzo – deformación de resina de quitosán | 80 |
| Figura 64 Histograma de esfuerzo de material compuesto | 80 |
| Figura 65 gráfica esfuerzo – deformación de resina del material compuesto A+B-C+ .. | 81 |
| Figura 66 gráficas conjuntas de esfuerzo deformación de las fibras (azul), resina (rojo) y el material compuesto (verde) | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 67 Vista transversal del tronco de chonta. | 84 |
| Figura 68 Izquierda) sección transversal material compuesto X100. Derecha) sección transversal tronco de chonta..... | 85 |
| Figura 69 Izquierda) Sección longitudinal material compuesto. Derecha) vista sección longitudinal del tronco de chonta. | 86 |
| Figura 70 Histograma de espesores de material compuesto | 87 |

GLOSARIO

A

Acetamida: La acetamida es la amida derivada del ácido acético. Su fórmula molecular o empírica es C_2H_5NO , y su fórmula semidesarrollada $CH_3 - CO - NH_2$, 35, 81

Acetil: es un grupo funcional, específicamente un radical, el acilo del ácido acético, con fórmula química $-COCH_3$. Algunas veces se abrevia como Ac. El radical acetilo contiene un grupo metilo unido por un enlace simple a un grupo carbonilo., 35

Amina: Compuesto orgánico derivado del amoniaco por sustitución de uno o dos átomos de hidrógeno por radicales hidrocarbonados monovalentes., 36

D

Deformación: Deformación unitaria (ϵ) - Se define como la deformación (ΔL) dividida entre la longitud inicial (L_0) del material., 65

DMA: Accesorios para uso del reómetro Discovery HR-2, 64

DMF: Dimetilformida es un compuesto orgánico de fórmula $(CH_3)_2N-CHO$.

Comúnmente abreviado como DMF (aunque este acrónimo también se usa a veces para el dimetilfurano), este líquido incoloro es miscible en agua y la mayoría de componentes orgánicos., 7

E

Esfuerzo: En el cálculo de estructuras e ingeniería se denomina tracción al esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo., 65

F

Fluoruro de polivinilideno (PVDF): El fluoruro de polivinilideno, polifluoruro de vinilideno o polivinilideno fluoruro (PVDF; Polyvinylidene fluoride) es un fluoropolímero termoplástico. Nombre por IUPAC, poli-1,1-difluoroeteno., 28

G

Glucosa: La glucosa es un monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$. Es una hexosa, es decir, contiene 6 átomos de carbono, y es una aldosa, esto es, el grupo carbonilo está en el extremo de la molécula., 81

Glucosamina: La glucosamina es un amino-azúcar que actúa especialmente como precursor en la glicosilación de las proteínas y de los lípidos., 35

H

Hidróxido de sodio: El hidróxido de sodio, hidróxido sódico o hidrato de sodio, también conocido como soda cáustica o sosa cáustica. Tiene como fórmula NaOH., 12

L

Lignina: La lignina es una clase de polímeros orgánicos complejos que forman materiales estructurales importantes en los tejidos de soporte de plantas vasculares y de algunas algas., 19

M

Módulo de elasticidad: el módulo de elasticidad (módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young). es la tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento (tensión = fuerza/área). es la deformación unitaria entendida como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial., 7

O

Oxidación: La oxidación es una reacción química donde un metal o un no metal cede electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación., 37, 90

P

Poliacrilonitrilo (PAN): es un polímero vinílico, y un derivado de la familia de los acrilatos poliméricos. Se hace a partir del monómero acrilonitrilo, por medio de una polimerización vinílica por radicales libres., 28

Policloruro de vinilo (PVC): es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Es el derivado del plástico más versátil., 28

Polivinilpirrolidona (PVP): La polivinilpirrolidona (PVP), también llamado comúnmente polividona o povidona, es un polímero soluble en agua que se obtiene a partir del monómero N-vinilpirrolidona, 3, 96

Q

Quitosán: El quitosán, también llamado chitosán, es un polisacárido lineal compuesto de cadenas distribuidas aleatoriamente de β - D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina., 35

R

Resina: Sustancia orgánica de consistencia pastosa, pegajosa, transparente o translúcida, que se solidifica en contacto con el aire, 5, 6, 7, 43, 44, 51, 60, 61, 63, 64, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la biomimesis de la chonta (*bactris gasipaes*) mediante la formación de un material compuesto con fibras de electrospinning y resina de quitosán. Para lograr esto se debe tomar en cuenta varios aspectos, como por ejemplo que las fibras de electrospinning deben estar alineadas, pues así es la distribución en la chonta. Los voltajes utilizados para la obtención de fibras fueron variando hasta conseguir el voltaje adecuado con el que la formación de las fibras sea de manera constante en el colector, de igual manera se utilizó dos tipos de polímeros el polivinilpirrolidona (PVP) y el poliacrilonitrilo (PAN) con la finalidad de establecer el polímero adecuado para formar una mezcla con la resina de quitosán el material compuesto. Finalmente se realizó un análisis de verificación de biomimesis de la chonta mediante la revisión de un corte transversal y longitudinal tanto de la chonta como del material sintético

PALABRAS CLAVES:

- **BIOMIMESIS**
- **CHONTA**
- **ELECTROSPINNING**
- **QUITOSÁN**
- **MATERIAL COMPUESTO**

ABSTRACT

The present work biomimesis of chonta (*bactris gasipaes*) is developed through the formation of a composite material with electrospinning fibers and chitosan resin. To achieve this, several aspects must be taken into account, such as the electrospinning fibers must be aligned, because that is the distribution of fibers in chonta. The voltages used to obtain fibers were varied until the adequate voltage was obtained with which the formation of the fibers is constant in the collector, in the same way two types of polymers were used, polyvinylpyrrolidone (PVP) and polyacrylonitrile (PAN) with the purpose of establishing the suitable polymer to form a mixture with the resin of chitosan the composite material. Finally, a verification analysis of chonta biomimesis was carried out by reviewing a cross-sectional and longitudinal cut of both the chonta and the synthetic material.

KEYWORDS:

- **BIOMIMESIS**
- **CHONTA**
- **ELECTROSPINNING**
- **CHITOSAN**
- **COMPOSITE MATERIAL**

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Uno de los precursores más distintivos en el estudio de la naturaleza y la imitación de la misma, es Leonardo Da Vinci. En sus obras ingenieriles y bocetos, podemos apreciar el estudio de la naturaleza y su trabajo por imitarla con el fin de obtener grandes aplicaciones. Sus estudios dieron como resultados aplicaciones desde armamentistas hasta médicas. Sus trabajos se enfocaron en la anatomía y movilidad humana (ver figura 1. a), movimiento de las alas de las aves (ver figura 1. b), entre otras. (Glorieta González Palencia, 2007)

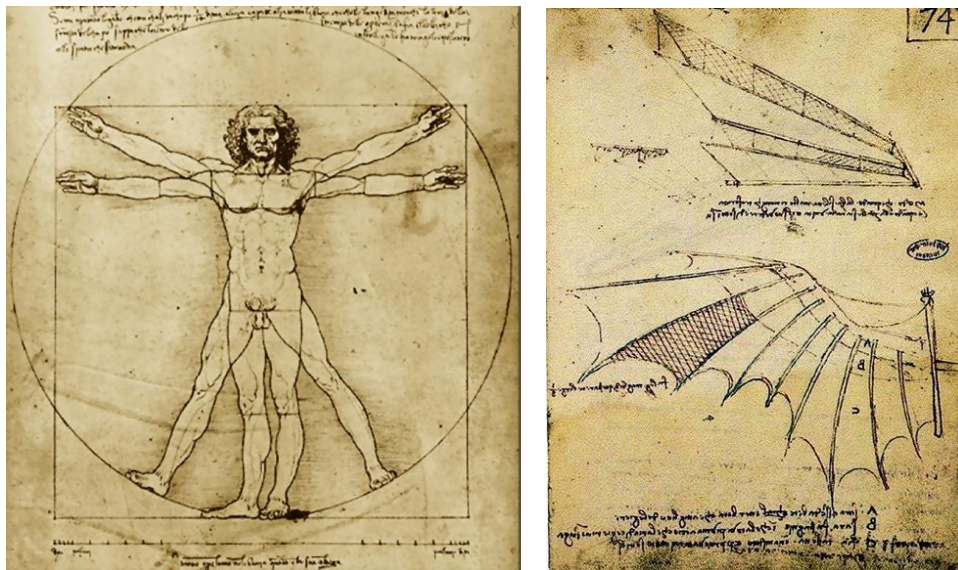


Figura 1 a) EL HOMBRE DE VITRUVIO
b) Boceto de máquina voladora, Leonardo Da Vinci.
Fuente: (Glorieta González Palencia, 2007)

La naturaleza puede ser considerada como un centro de entretenimiento para ingenieros y científicos que buscan innovaciones tecnológicas. Ella ha desarrollado

numerosos y cuasi-perfectos materiales, procesos y sistemas a nano, micro y macro-escalas después de miles de millones de años de existencia. Por ello es una fuente de inspiración para el desarrollo de innovaciones tecnológicas. Este nuevo campo científico se conoce como biomimética (Favret, 2008).

En la actualidad el estudio de la naturaleza y su imitación, comúnmente llamado biomimesis o biomimética, se pueden mencionar varios ejemplos. Tales como el proyecto enfocado en la tela de araña y su forma de fabricación natural (ver figura 2). Para el desarrollo de hilos de micro fibras de alta resistencia. El estudio es conocido como Modelling of the stress-strain behavior of spider dragline (Termonia, 2000). Como se puede apreciar en la figura 2.b la forma en la que la tela de araña se fabrica tiene gran parecido al electrospinning.



Figura 2 Tela de araña natural, Método de segregación de la seda arácnida.
Fuente: (Termonia, 2000)

Con la nueva tecnología en nuestro país y en especial en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, el electrospinning es un método de obtención de fibras de polímeros de mejores propiedades mecánicas a las del polímero generalmente utilizado (Haider, Haider, & Kang, 2015). Tal como podemos apreciar en la tesis previa a la obtención del

título de ingeniero mecánico del señor Narváez Cadena Diego Andrés con el tema Influencia de solventes orgánicos en la morfología y propiedades mecánicas de fibras de polivilpirrolidona (PVP) fabricadas mediante electrospinning. En la cual se realizó un estudio de la mejor obtención de propiedades mecánicas de las fibras en base a la solución utilizada (ver figura 3).

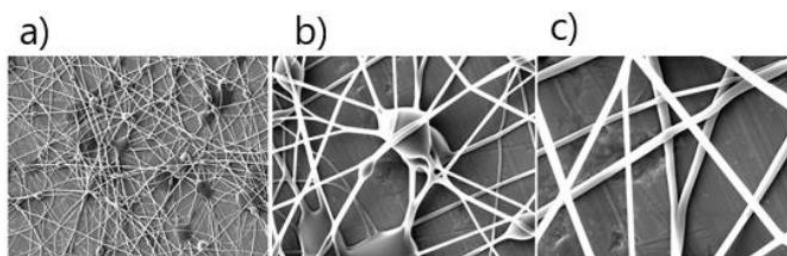


Figura 3 Ejemplos de fibras obtenidas por electrospinning.

Fuente: (Narvaez Cadena, 2017)

Alrededor del mundo la técnica de electrospinning ha sido ampliamente utilizada con un enfoque biomimético. Tal es el caso del trabajo de investigación Técnicas empleadas en síntesis de nanocompuestos en ingeniería de tejido óseo realizado por Alis Yovana Pataquiva Mateus en la Universidad Jorge Tadeo Lozano. En la cual se aplicó dicha técnica con fin de recrear tejido óseo. La técnica fue aplicada con policaprolactona (PCL) con varios contenidos de *phlorotanning* (extracto de alga). La combinación de dichos materiales permitió obtener las propiedades biomédicas, biomecánicas y de regeneración celular deseadas para la aplicación (Pataquiva Mateus, 2014).

Otro caso de aplicación de biomimética con electrospinning, es la investigación Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso de nopal (*Opuntia sp*) y su electrohilado polimérico, desarrollada por un equipo de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales. En la figura 4 se aprecia

el desarrollo de nanofibras de plata de dicho estudio, con fin de cumplir una actividad antibacteriana. (Ledezma, y otros, 2014)

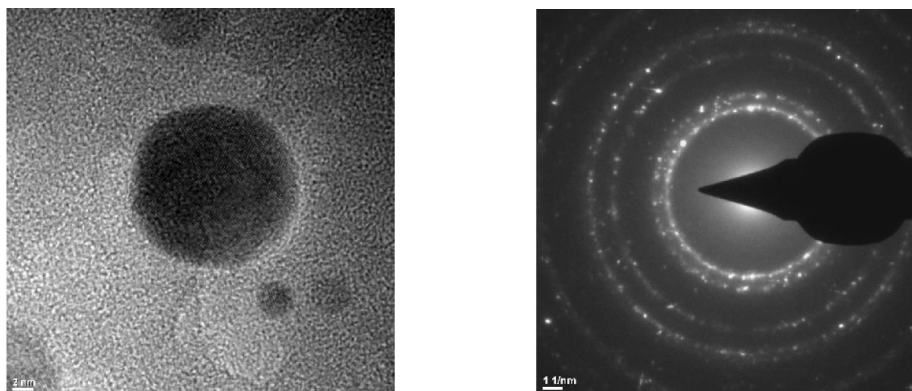


Figura 4 a) Patrón de difracción de rayos X de las AgNPs obtenidas empleando extracto de nopal como agente reductor, b) Imagen HRTEM y patrón de difracción de las AgNPs.

Fuente: (Ledezma, y otros, 2014)

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar la biomimética de la estructura de la chonta (*BACTRIS GASIPAES*) simulando su distribución geométrica y características mecánicas en fibras obtenidas por electrospinning.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un material compuesto biomimético por medio de la técnica de electrospinning para replicar las propiedades macroscópicas a escala micrométrica de la chonta.
- Determinar el método adecuado para la extracción de fibras de chonta, sin afectar sus características mecánicas.

- Determinar el esfuerzo de fluencia obtenido del material compuesto, reforzado con fibras poliméricas.
- Definir potenciales aplicaciones para el material biomimético de resina con refuerzo de fibras de electrospinning.

1.3. Alcance

Para poder cumplir con la finalidad de la investigación, lo primero a ser realizado es la extracción de fibras de chonta, para lo que existen dos métodos, como se muestra en la figura 5. Los métodos mecánicos, como el cepillado, que consiste en raspar la madera con un cepillo hasta llegar a la parte en donde se encuentran las fibras y realizar la extracción. También tenemos métodos Químicos que consiste en eliminar la sabia del tronco de chonta, dejando así las fibras libres (Bonilla, Repositorio Digital EPN , 2009)

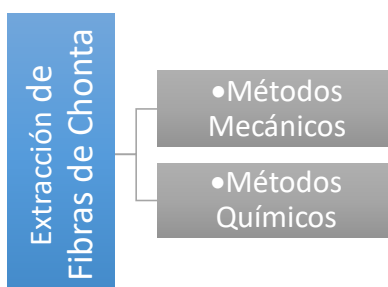


Figura 5 Métodos de Extracción de fibras de Chonta

La extracción de las fibras por ambos métodos permitirá realizar la caracterización de las fibras y determinar cuál es el método que conserva de mejor manera las características de las fibras de chonta. Mediante el proceso de electrospinning se fabricará las fibras con la forma tradicional del método.

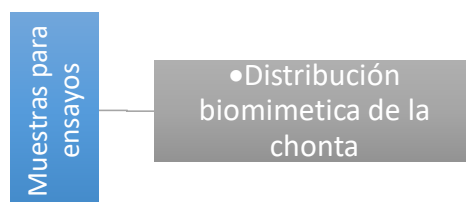


Figura 6 Muestras por electrospinning a ser ensayadas

Luego de realizar la caracterización de las fibras se procederá a formar el material compuesto mezclando las fibras con una resina polimérica en la que las fibras serán ordenadas de tal manera que la distribución sea muy similar a la de las fibras de chonta en la madera. Esta parte de la investigación cederá las propiedades mecánicas, encontradas mediante ensayo, las cuales permitirán aclarar las aplicaciones que se le puede dar al material conseguido.

1.4. Justificación del proyecto

En la amazonia ecuatoriana la chonta ha sido un elemento natural ampliamente utilizado por las culturas indígenas. Los beneficios que se han generado gracias a este árbol son varios, los cuales van desde la alimenticia con el cultivo de los chontaduros (fruto) y chontacuros (insecto), pasando por aplicaciones de herramientas como palas, lanzas, utensilios de cocina, entre otros hasta la utilización del tronco para la construcción. Estas técnicas ancestrales de la construcción las mantienen los habitantes de las comunidades indígenas como la comunidad Shuar, Kichwas, Paz Yaku (Río de la Paz en español). El propósito es que las 'chozas toquillas', como se conocen a estas edificaciones de madera de una planta, entreguen frescura y seguridad a sus ocupantes

(Moreta, 2016). Es por esto que se considera a la chonta como una madera estructural pues posee buenas propiedades de flexión, compresión y dureza.

Son justamente estas propiedades mecánicas del tronco de chonta las cuales han llamado la atención para el desarrollo de nuevos materiales. Al visualizar el corte transversal del tronco se aprecia que éste dispone de dos fases. Por lo que se lo considera un material compuesto natural. Siendo formado por una matriz de resina blanca reforzado con fibras alineadas de forma vertical en su interior.

Estas propiedades geométricas y mecánicas al poder ser reproducidas de forma controlada y a la escala deseada para ciertas aplicaciones permitirían desarrollar materiales con excelentes valores de esfuerzo e impermeabilidad. Por lo cual al aplicar la biomimética a escala nanométrica en utilización de la técnica de electrospinning para el desarrollo de fibras nanométrica o micrométricas generaríamos un material con excelentes propiedades a escala micrométricas.

Las fibras que se han logrado obtener mediante el proceso de electrospinning en la tesis publicada en el año 2018. Demuestra que “las fibras con 5 PVP 8% Etanol reportó un valor promedio de 40,08 [MPa] con una desviación estándar de 7,4 para el módulo de elasticidad. Mientras que la muestra con 11 PVP 14% Dimetilformamida (DMF) obtuvo un valor promedio de 8,8 [MPa] con una desviación estándar de 2”. (Narvaez Cadena, 2017)

La aplicación biomimética del electrospinning ya ha sido evaluada y aplicada para la recuperación de tejido óseo aplicando principalmente policaprolactona (PCL) obteniendo resultados muy favorables, con tejidos y materiales finales capaces de soportar las diversas cargas a las cuales están sometidos los huesos sin sufrir deformación

considerable (Pataquiva Mateus, 2014). Además de las propiedades mecánicas, las propiedades químicas en relación permiten mejorar sus características y ampliar su campo de aplicación. El campo de aplicación corresponderá a las propiedades conjuntas de los elementos finales del material compuesto.

CAPITULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Biomimética

La biomimética o biomimesis se define como “el estudio de la formación, estructura o función de sustancias y materiales biológicamente producidos (como enzimas o seda), mecanismos y procesos biológicos (como la síntesis proteica o la fotosíntesis) especialmente con el fin de sintetizar productos similares mediante mecanismos artificiales que imitan los mecanismos naturales” (Merriam-Webster, 2018)

2.1.1 Biomimética de la síntesis molecular

Para realizar la biomimética de la síntesis molecular se tienen los principios de:

- **Imitación de distribución de moléculas:** Aquí se imita la distribución de cada molécula en el conjunto de moléculas, siguiendo estructuras tales como las de aminoácidos, ácidos nucleicos, carbohidratos, dendrímeros, lípidos y proteínas.

- **Arreglos bottom-up:** “El enfoque bottom-up en la biomimética se produce cuando las unidades atómicas y moleculares son ensambladas para formar estructuras moleculares que van desde dimensiones a nivel atómico hasta estructuras de tamaño nanométrico o superior” (Trung Dung , 2015)

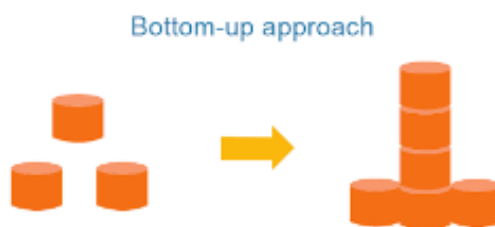


Figura 7 Enfoque bottom-up

Fuente: (Trung Dung , 2015)

• **Organización supramolecular:** Es la agregación de moléculas o iones que se mantienen juntos por fuerzas nanocovalentes formando objetos funcionales a nanoescala. La organización supramolecular tiene una gran inspiración en sistemas biológicos logrando un gran desarrollo en la implementación de materiales biológicos. Un ejemplo de esta organización es la imitación de enzimas. (Trung Dung , 2015)

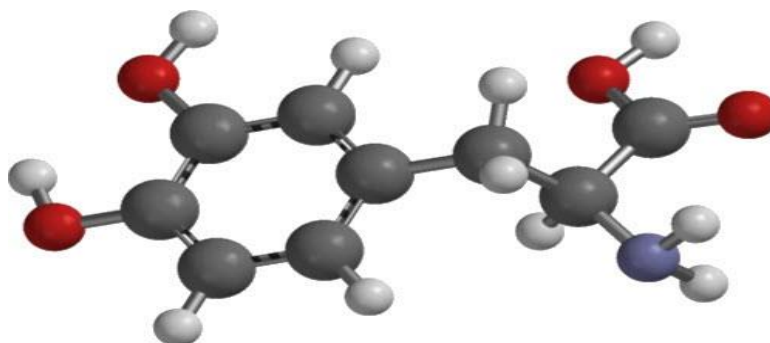


Figura 8 Organización supramolecular de una enzima

Fuente: (Google.inc, s.f.)

2.1.2 Fuentes de bio-inspiración

Las estructuras biológicas que sirven de inspiración para la realización de compuestos tienen diferentes propósitos. Las dos principales características que se observa para realizar compuestos son la distribución y la morfología de las fibras en la estructura natural las cuales dan lugar a la nanoestructuración como consecuencia del auto ensamblaje y la presencia de agujeros. Existe una serie de artefactos biológicos de los que se ha realizado la bio-inspiración, entre los cuales tenemos los siguientes.

- **Concha de Nácar**

“La estructura del nácar constituye una prueba de diseño plasmado en un diseño de un material extraordinario; añadamos a esto el diseño de la concha, que es una extraordinaria aproximación material de la sucesión de Fibonacci” (Coppedge, 2010). Sus

extraordinarias propiedades mecánicas derivan de una estructuración organizada jerárquicamente, empezando por una gruesa capa proteica, formada por proteínas orgánicas como la quitina y la lustrina entre otras, prosiguiendo con cristales individuales de aragonito polimorfo, en forma de bloques de 0.5–10 micras de espesor. (Doblaré Castellanos, 2014)

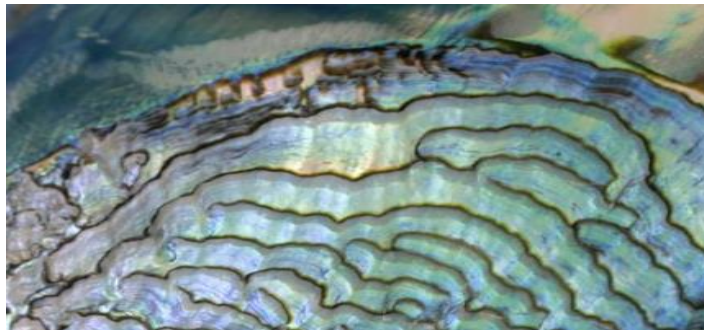


Figura 9 Capas proteicas de la concha de nácar
Fuente: (Doblaré Castellanos, 2014)

- **Lagartija Gecko**

La lagartija gecko puede caminar en cualquier superficie sin caerse incluyendo el vidrio, aun cuando sólo uno de los dedos de sus patas toque la superficie. El secreto radica en los millones de diminutos pelos cortos de queratina ubicados en la superficie de los dedos de la pata que adhieren al gecko firmemente a la superficie. (Rocha Rangel , Rodríguez García , Martínez , & López Henández, 2012)



Figura 10 Patas de gecko
Fuente: (Cabezas , 2017)

- **Hueso**

El hueso es otro ejemplo de material biológico de alto rendimiento que combina materiales orgánicos blandos (colágeno, proteoglicanos y proteínas no colágenas) que contribuyen a sus propiedades a tracción, con un mineral (hidroxiapatita) que le confieren la rigidez y resistencia a compresión. La estructura del hueso está organizada en varias escalas, con seis o siete niveles de jerarquía. A nivel molecular, filamentos de colágeno se unen para formar una molécula de tropo colágeno.

Una secuencia de tales moléculas constituye una micro fibrilla, que a su vez se agrupan en grandes fibrillas. Dentro de estas se incrustan los cristales minerales nanoscópicos de hidroxiapatita. Estas fibrillas alineadas forman fibras que sirven como el bloque principal para la conformación de estructuras más grandes como las lamelas y osteonas. (Doblaré Castellanos, 2014)



Figura 11 Estructura Interna de un hueso

Fuente: (Nature Inspire Us, 2017)

- **Fibras Biológicas**

Las fibras lignocelulósicas a nivel macroscópico están formadas entre matrices de polímero, dando lugar a compuestos de fibras vegetales. A nano escala es posible extraer

nano cristales de celulosa a partir de fibras vegetales mediante un proceso de extracción con ácido. La replicación de la distribución estructural abarca también la fabricación de óxido de metal poroso/ polímero híbrido y materiales poliméricos con una solución de hidróxido de sodio.

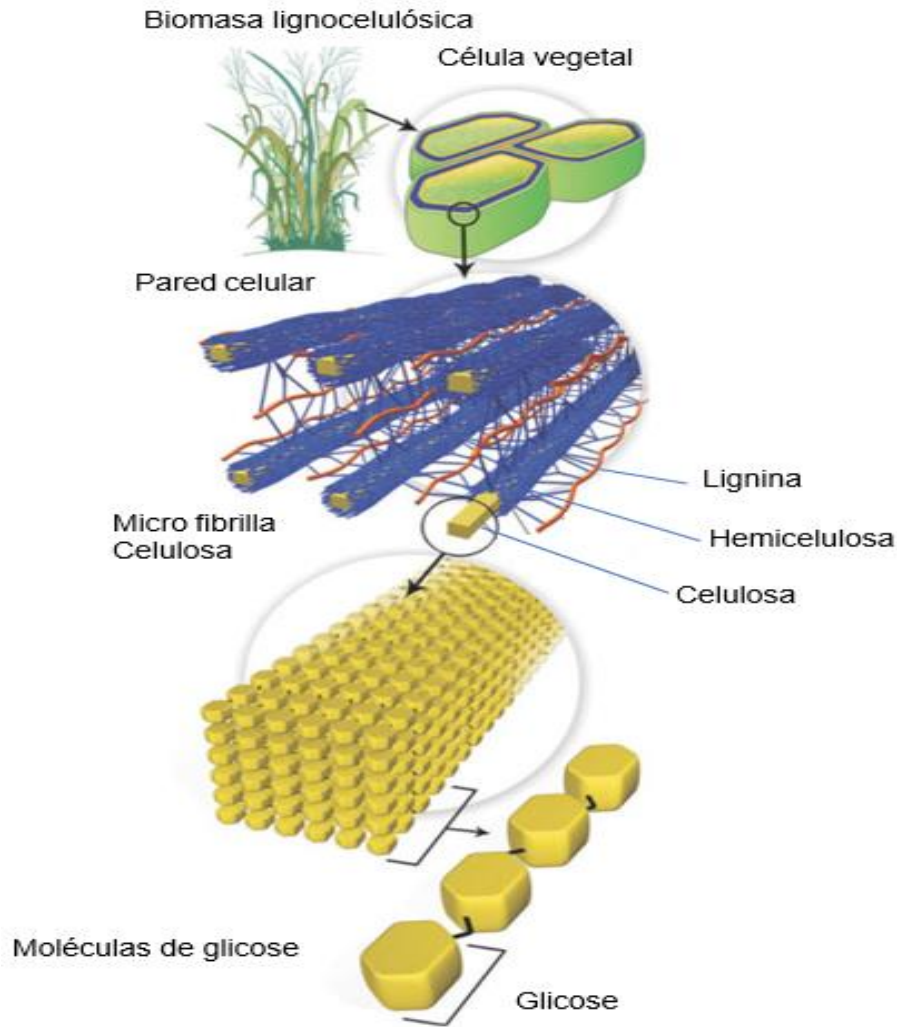


Figura 12 Fibras biológicas de caña

Fuente: (A Santos , de Queriróz, & Colodette, 2012)

- **Bio – inspiración en núcleos y matrices de panales de abejas**

“Las celdas hexagonales de las abejas y las avispas crean un marco estructural extraordinariamente fuerte, sobre todo en el panal de abeja vertical donde crean una

estructura piramidal en tres dimensiones. La fuerza es extraordinaria: un peine de 37 centímetros por 22,5 centímetros de tamaño, que está hecho de 40 gramos de cera, puede contener alrededor de 1,8 kilogramos de miel”. (Pallasmaa, 1995)



Figura 13 Edificio Panal / ARCHIUM
Fuente: (Vega, 2014)

2.2. Chonta

Bactris Gasipaes es una palma arborescente de tallo solitario, que puede alcanzar hasta 30 m de altura y 0.3 m de diámetro, aunque con frecuencia se presenta un ensanchamiento o barriga hacia la mitad del tallo, donde puede alcanzar 0.7 m de diámetro (Henderson, 1990; Henderson et al., 1995; Galeano & Bernal, 2010).

“El tallo está sostenido por un cono denso de raíces epigeas de hasta 3.5 m de alto. La corona está compuesta por 4-8 hojas grandes y pinnadas, con las pinnas premorsas (recortadas de forma irregular) en las márgenes y en el ápice y orientadas en varios planos.” (Navarro, Galeano, & Bernal, 2014)

2.2.1 Taxonomía

La chonta, chontaduro o pejibaye pertenece a la familia Palmae. Se han estimado cerca de 230 géneros y alrededor de 2.600 especies en esta familia, lo cual él considera muy alto. Las especies están casi restringidas a los trópicos. (Yangüez Bernal, 1973)

El Ecuador tiene una variedad de 132 especies de palmas que se encuentran distribuidas en la Costa y el Oriente de las cuales se denomina chonta a las siguientes:

Tabla 1

Variedades de Chonta en el Ecuador

| Nombre Común | Características | Usos |
|---|---|--|
| <i>Chonta Irartea</i> (DELTOIDEA) | <ul style="list-style-type: none"> • Altura de tronco: 25m • DAP: 30cm • Raíz forma del órgano reproductor masculino • Hojas: 3m de largo • Inflorescencia: 1.5m de largo curvada hacia abajo 80 cm • Fruto: liso, drupa globosa, de 2 a 2.5cm, no comestible | <ul style="list-style-type: none"> • Construcción de casas • Elaboración de parquet y muebles |
| <i>Chonta Wettinia</i> (QUINARIA) | <ul style="list-style-type: none"> • Altura de tronco: 18m • DAP: 20cm • Hojas: 4m de largo • Inflorescencia: Compacta como mazorca | <ul style="list-style-type: none"> • Construcción, hojas y tronco • Fruto: Alimento para roedores • Elaborar artesanías |
| <i>Chonta Bactris</i> (GASIPAES) | <ul style="list-style-type: none"> • Espinas aplanadas y puntiagudas • Fruto: carnosos, dulce, de color amarillo o rojo, comestible | <ul style="list-style-type: none"> • Construcción • Fruto: nutrición Shuar • Elaborar lanzas |

Fuente: (Palacios, 2011)

2.2.2 Morfología

En el sistema radicular se considera tanto la raíz como la semilla de la planta. La semilla puede germinar de uno a diez brotes, de los cuales es posible que tres o cuatro alcancen la madurez al mismo tiempo; sin embargo cuando germina un solo tallo, los nuevos brotes aparecen luego que este ha sido cortado. (Herrera, 2008)

El estípite o tronco es recto y adquiere una altura entre 12 y 20 [m], con un diámetro de 0.15 a 0.30 [m], presenta anillos o cicatrices que han dejado hojas o follaje previos. Alrededor del tallo surgen perpendicularmente espinas puntiagudas de color negro o marrón, de diferentes tamaños, diámetros; densidades y formas. Aproximadamente a la mitad del tronco surge una hinchazón o engrosamiento. (Cisneros, 2014)



Figura 14 Tronco de chonta

Fuente: (Cisneros, 2014)

Las hojas pueden tener espinas frecuentemente negras o negruzcas; pero a veces solo en los ápices de los foliolos, que forman generalmente grupitos, y están insertos irregularmente a cada lado del raquis (aunque no en todas las especies), formando uno o varios planos, es decir, las hojas son lo que hemos dado de llamar plumosas. En general los folios son agudos y no premorsos (como mordisqueados) y las inflorescencias

son bisexuales, se ramifican hasta un orden o no se ramifican y se presentan en su péndulo el profolio, generalmente corto y oculto o semioculto entre las vainas foliares y solamente otra bráctea pendular habitualmente larga, gruesa y leñosa, nacida en la base del péndulo, y persistente. (Del Cañizo, 2011)



Figura 15 Hojas y frutos de la chonta

Fuente: (Universidad Técnica de Manabí, 2017)

2.2.3 Utilidades

Fuera de su amplia distribución, el valor alimenticio es un rasgo muy importante de la chonta. Hasta el momento no hay referencias escritas o tradiciones acerca del uso de las raíces. El tronco es usado en múltiples formas, tales como en la construcción de empalizadas ya que las espinas son un medio excelente de protección. La madera también fue usada para hacer dardos. Lanzas, arcos, puntas de flecha, porras, cayados y telares. A pesar de que algunas referencias acerca de la madera chonta son engañosas, se sabe que la madera de chonta ha sido utilizada en la manufactura de los artículos antes mencionados. (Yangüez Bernal, 1973)

La fruta es la parte más importante de la palma. Es consumida en diversas formas: hervida, tostada o en chicha. La época de la cosecha varía de tal modo que entre los

indios Chocó ésta es de Enero a Abril; de Septiembre a Diciembre entre los Guaymi y entre los Yanomamos, en Febrero y Junio.

Las artesanías que más se elaboran aparte de los barriles de licor son de gran variedad pero hasta hoy los indígenas amazónicos elaboran armas corto punzante como lanzas, flechas, dardos, cuchillos, machetes, bodoqueras, etc. (Vargas Polo, 2011)



Figura 16 Cuchillo de Chonta

Fuente: (Musialik, 2010)

2.2.4 Propiedades físico - mecánicas

La Chonta es un material que posee una gran dureza, esto se debe a su conformación natural la cual está formada por filamentos que le permiten desarrollar esta cualidad. La madera entre más gruesa sea su dureza es mayor y viceversa.

Su flexión se desarrolla más en piezas largas y delgadas que en piezas gruesas y cortas. Esta característica permite generar diseños arquitectónicos especiales tales como cáscaras de cubiertas, artesanías y varias cosas más. (Muñoz Jimenez, 2006)

La tabla siguiente indica los valores de las propiedades físicas y mecánicas de la planta, acorde a los estudios realizados por la Universidad de Costa Rica, Escuela de Biología, con árboles cuyo periodo de vida ha superado los 20 años. (Ramírez et al, 2005; Avalos, Salazar & Araya, 2004; Barrantes, 1997; Cirad, 1994)

La palma chonta (*Bactris Gasipaes*), ha sido comparada con la palma de coco (*conusucífera*) y la caña guadua o bambú (*bambusa vulgaris*) de manera que se puedan confrontar los valores de sus propiedades físico —mecánicas. Teniendo en cuenta la tabla 2, se puede decir que la chonta presenta un promedio superior a otras palmeras. (Ramírez et al, 2005)

Tabla 2

Promedios de las propiedades físico y mecánicas de la palma Bactris Gasipaes, cocus nucífera y bambusa vulgaris

| | Especie | Bactris Gasipaes H=12% | Cocus Nucífera H=12% | Bambusa Vulgaris H=12% |
|-----------------------|---|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Propiedades Físicas | Densidad básica (g/cm³) | 0.861 | 1.03 | 0.666 |
| | Densidad anhidra (g/cm³) | 0.995 | 1.14 | 0.636 |
| | Contracción Radial (%) | 4.63 | 3.0 - 5.3 | 4.6 – 6.6 |
| | Contracción Tangencial (%) | 4.69 | 2.9 – 5.7 | 3.7 – 6.1 |
| | Contracción Volumétrica (%) | 9.73 | 7.0 - 9.0 | 8.5- 13.0 |
| Propiedades Mecánicas | Flexión estática M.O.R Kg/cm² | 1900 | 1290 | 1042.21 |
| | Flexión estática M.O.E Kg/cm² | 222965 | 116000 | 914030 |
| | Flexión estática E.F.L.P Kg/cm² | 1073 | - | - |
| | Compresión perpendicular E.F.L.P Kg/cm² | 265 | 855 | 538.08 |
| | Cizallamiento Kg/cm² | 131 | - | - |
| | Dureza lados Kg/cm² | 1247 | - | - |
| | Dureza extremos Kg/cm² | 1236 | 1100 | - |
| H= Humedad | EFPL= Esfuerzo de las fibras al límite | | | |
| MOR= Módulo de rotura | proporcional | | | |
| | MOE= Módulo de elasticidad | | | |

Fuente: (Anales Científicos , 2005)

2.2.5 Chonta como fuente de inspiración Natural

La chonta, ha generado varios beneficios, que van desde la alimenticia con el cultivo de la fruta, pasando por aplicaciones de herramientas como palas, lanzas, y aplicaciones de utensilios hasta la utilización del tronco para la construcción pues posee buena resistencia e impermeabilidad, propiedades adquiridas gracias a la morfología que presenta el tronco. (Herrera, 2008)

La morfología del tronco de chonta está compuesta de una capa delgada de resina más fibras y en el centro la mayor concentración de resina. Esta morfología permite realizar materiales que se compongan de la misma estructura morfológica, y que permitan desarrollar aplicaciones que requieran impermeabilidad y resistencia.

2.3. Fibras vegetales

“Las plantas poseen un tipo de células especializadas cuya función principal consiste en proporcionarles sostén, éstas son las células esclerenquimáticas y su característica principal es una pared secundaria engrosada compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina. Existe un tipo de células esclerenquimáticas, también llamadas células prosenquimáticas, que son alargadas, esbeltas y estrechas, tienen los extremos afilados y generalmente forman grupos, que son llamadas fibras.” (Hernández, y otros)

Las fibras textiles naturales o las fibras que provienen de una especie vegetal o planta, son el material vegetal fibroso producido como el resultado de la fotosíntesis. (Gómez Tobar, 2015)



Figura 17 Fibras extraídas de abacá

Fuente (González & Arbo, 2013)

2.3.1 Tipos

Comercialmente las fibras se pueden clasificar en duras o suaves y botánicamente hablando las fibras pueden ser liberianas, de hoja, de semilla, de núcleo central (tallo), de hierba (tallo), de madera (tallo).

- **Fibras Duras**

Son las fibras de hojas de monocotiledóneas. Cada fibra es un cordón fibroso o un haz vascular con las fibras asociadas. Los cordones tienen generalmente un curso largo y recto con muy pocas y débiles anastomosis. Las fibras tienen un alto contenido de lignina y son de textura rígida. (González & Arbo, 2013)

Entre las fibras duras tenemos:

- *Musa textiles* (cáñamo de Manila, abacá)
- *Sansevieria spp.* (cola de tigre)
- *Ananas spp*
- *Phormium tenax* (formio)
- *Agave sisalana*

- *Bromelia balanza, B.smithii, B.hieronymi, B.serra* (caraguatá)
- *Deinacanthon urbanianum* (chaguaré, tamomá)
- *Pseudananas macrodentes* (ihvirá, piña de monte)
- *Trithrinax campestris* (carandá).

- **Fibras Blandas**

Son las fibras floemáticas de tallos de dicotiledóneas, que pueden estar más o menos lignificadas, pero son suaves, elásticas y flexibles. Los cordones de fibras del floema forman una red donde no se individualizan los distintos grupos. (González & Arbo, 2013)

Entre las fibras blandas tenemos:

- *Linum usitatissimum* (lino)
- *Boehmeria nivea*, ramio (Dicot)
- *Cannabis sativa*, cáñamo (Dicot)
- *Corchorus capsularis*, yute (Dicot)
- *Urena lobata*, malva blanca, cadillo (Dicot)

2.3.2 Métodos de extracción

2.3.2.1. Métodos químicos

Para realizar la extracción de fibras mediante el método químico se tiene la extracción con baño en hidróxido de sodio.

- **Extracción con hidróxido de sodio**

Una vez cortadas las hojas se realiza inmersiones en 2 baños distintos, la primera en un baño de impregnación y la segunda en un baño de deslignificación. Para estos baños se trabaja con relaciones licor (litros de solución/g de material seco) de 2:1 para el baño

de impregnación y 6:1 para el baño de deslignificación. Estos baños consisten en soluciones acuosas de hidróxido de sodio de concentración. Después de cada inmersión, se procede al lavado y neutralización de las hojas, agregando ácido acético hasta alcanzar un pH cercano a 7. Posteriormente se realiza el cardado y lavado de las fibras extraídas, para luego secarlas (Bonilla, Guerra, Guevara, & López, 2009)

2.3.2.2. Métodos mecánicos

Los métodos mecánicos que se ocupan para la extracción de fibras son varios entre los que se revisó el siguiente.

- **Método de extracción manual**

Este método generalmente se utiliza para la extracción de fibras de hojas las cuales se cortan de abajo hacia arriba y de adentro hacia afuera. Posteriormente, se procede a la remoción de la quilla (nervio central) de cada hoja.

A continuación, las fracciones son cepilladas con una cardadora metálica con lo que se logra la separación de las fibras del resto de materiales. Al terminar con la totalidad de la hoja, las fibras son sometidas a un proceso de limpieza manual para tratar de retirar el material de soporte adherido a las fibras. (Bonilla, Guerra, Guevara, & López, 2009)

2.4. Electrospinning

Electrospinning es un método efectivo para producir fibras de tamaño nanométrico. Muchos polímeros sintéticos, naturales y sus mezclas han sido exitosamente electrospinning para hacer nanofibras (Huang, Zhang, Kotaki, & Ramakrishna, 2003).

En los últimos años, el electrospinning ha encontrado un uso cada vez mayor en diferentes aplicaciones potenciales tales como andamios diseñados con tejidos,

administración de fármacos, filtración, sensores, indumentaria protectora y vendaje de heridas (Dotti, y otros, 2007).

Las propiedades estructurales como el diámetro, la morfología de la fibra y la estabilidad del proceso de electrospinning dependen de varios factores como las propiedades de la solución (concentración del polímero, viscosidad de la solución, etc.), los parámetros del proceso (caudal, voltaje aplicado, distancia de trabajo, etc.) y las condiciones ambientales (temperatura, humedad, flujo de aire, etc.) (Doshi & Reneker, 1995).

2.4.1 Técnicas de electrospinning

Electrospinning es un proceso sencillo y de bajo costo que produce finas fibras continuas de diámetro microscópico hasta la escala nanométrica, a través de un jet de carga eléctrica de la solución de polímero constituido por moléculas de cadena lo suficientemente larga. La carga electrostática del líquido en la punta de la aguja, forma una gota conocida como: cono Taylor y cuando se somete a un campo eléctrico fuerte, con un gradiente de campo apropiado, la gota se vuelve inestable, y un jet de fluido único se extrae desde la punta del cono de Taylor. (Calderón & Martínez, 2012)

Una vez que el jet fluye fuera del cono de Taylor en casi una línea recta, es sometido a una variedad de fuerzas; mientras tanto, el tramo fuerzas eléctricas interactúa con el jet de proporciones muy grandes, y finalmente se evapora el disolvente y las nanofibras se recogen en el objetivo receptor. (J., Angamma, H., & Jayaram)

El típico montaje para la ejecución de la técnica se muestra en la Figura 18.

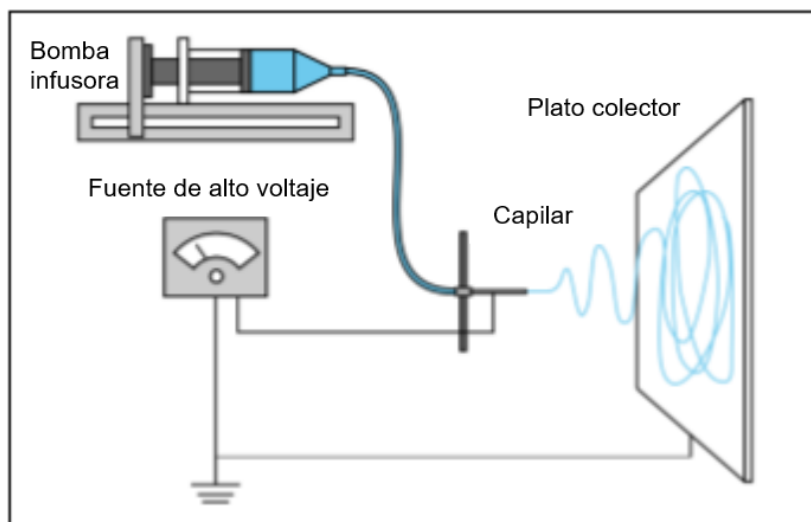


Figura 18 Ensamble del sistema de Electrospinning.

Fuente: (Duque, Rodríguez , & López , 2014)

Consta de un capilar a través del cual debe ser expulsada la solución polimérica (aguja, cono, etc.); una fuente de alto voltaje que posee dos electrodos los cuales deben conectarse uno al lugar de salida de la solución y otro directamente al plato colector (lámina de metal conductor, mandril rotativo, etc.) donde se depositarán las fibras posteriores a la evaporación del solvente.

La técnica puede ser desarrollada de forma horizontal o vertical según se desee como se muestra en la Figura 19, el principal inconveniente al trabajar en posición vertical es la posible salida de gotas de solución desde el capilar hacia el plato colector las cuales pueden caer sobre las fibras depositadas haciendo defectuosa la superficie de las mismas e interrumpiendo el proceso. Para impulsar la solución a través del capilar puede utilizarse una bomba de infusión; si se trabaja de forma horizontal con cono como capilar, la salida de la solución puede estar determinada por la fuerza de gravedad ligada a la viscosidad de la solución.

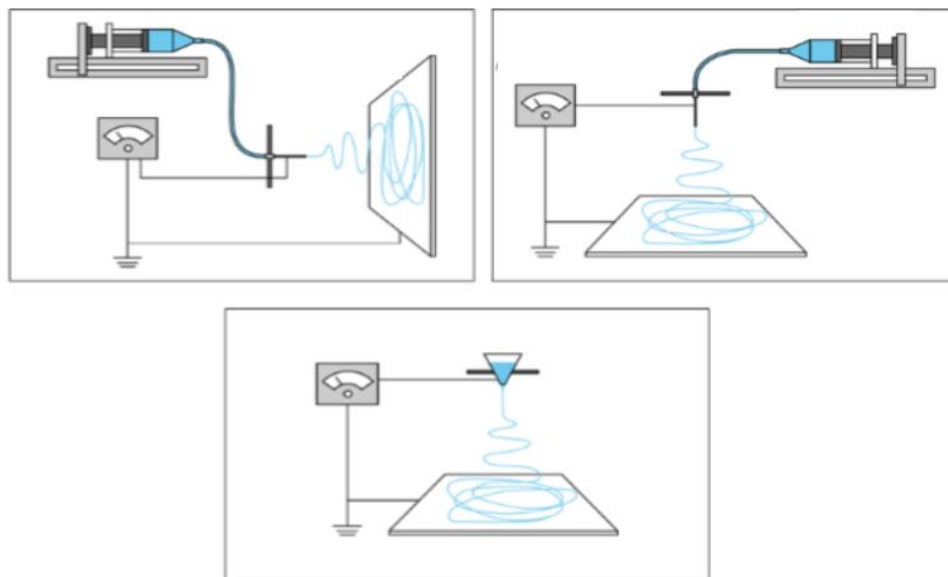


Figura 19 Diversos ensambles de la técnica de Electrospinning.

Fuente: (Duque, Rodríguez , & López , 2014)

2.4.2 Parámetros de la técnica

El proceso de electrospinning está regido por tres parámetros: parámetros de la solución (concentración, peso molecular, viscosidad, tensión superficial y conductividad), parámetros del proceso (campo eléctrico aplicado, distancia de punta a colector y alimentación o la tasa de flujo) y parámetros ambientales (humedad y la temperatura de los alrededores); todo esto determina la morfología y diámetro de las fibras. (Calderón & Martínez, 2012)

Tabla 3

Parámetros del proceso de electrospinning con sus respectivas características.

| Parámetro | | Característica que aporta |
|---|---|---|
| Concentración de la solución de polímero | ↑ | Dificulta el paso de la solución a través del capilar. |
| | ↓ | Las fibras se rompen en gotas antes de llegar al plato colector. |
| Tensión Superficial | ↑ | Aparición de defectos (beads) en las fibras. |
| | ↓ | Obtención de fibras lisas, para disminuir la tensión superficial se pueden adicionar solventes con baja tensión como el etanol. |
| Conductividad de la solución | ↑ | Mayor transporte de cargas, mayor estiramiento de la solución, fibras más delgadas. |

Continúa

| | | |
|---------------------------------|-------|--|
| | ↓ | Menor transporte de cargas, menor estiramiento de la solución, fibras más gruesas. |
| Voltaje | ↑↑ | Fibras gruesas, distorsión del jet, aparición de beads. |
| | ↓ | Poco impulso para llegada de la solución al plato colector. |
| Flujo de Salida | ↑ | Fibras más gruesas, beads con mayores tamaños. |
| | ↓ | Mayor tiempo para evaporación del solvente, fibras sin defectos. |
| Distancia aguja-colector | ↑ | Las fibras pueden romperse debido a su propio peso. Mayor estiramiento de la solución , obtención de fibras delgadas |
| | ↑↑ ↓↓ | Aparición de defectos (beads) en las fibras al trabajar con muy altas o muy bajas distancias |
| | ↓ | Poco tiempo para la evaporación del solvente por tanto, las fibras llegan húmedas al plato colector. |
| Humedad Relativa | ↑ | Aparición de poros en las nanofibras. |

Fuente: (Duque, Rodríguez , & López , 2014)

2.4.3 Utilidades

Los investigadores de nanofibras son capaces de controlar de forma flexible la morfología de las fibras, el diámetro de las fibras y el patrón de deposición de las fibras. Las principales aplicaciones posibles se clasifican en Bioingeniería, Ingeniería Ambiental y Biotecnología, Energía y Electrónica y Defensa y Seguridad. En todas las áreas, la demanda de nuevos materiales nuevos se ha aspirado y las nanofibras de polímero fabricadas por electrospinning podrían hacer la nueva ola de investigación. (Ramakrishna, Fujihara, Teo, Lim, & Ma, 2005)

- **Fármacos**

La liberación controlada es un proceso eficiente de liberación de medicamentos durante los tratamientos médicos. El objetivo es balancear la cinética de liberación del medicamento, minimizar la toxicidad y los efectos secundarios, todo enfocado a la comodidad del paciente. En general entre más pequeñas sean las dimensiones de la

droga a encapsular y el revestimiento necesario para encapsular el fármaco, mejor será la absorción de este en el organismo. (Yih & Al-Fandi, 2006)

- **Tejidos**

Las fibras de electrospinning están adquiriendo una importancia creciente como biomateriales utilizados para ingeniería de tejidos. Son unas candidatas excelentes para usar en medicina regenerativa y presentan gran versatilidad dado que se pueden modificar sus propiedades y bio-actividad mediante el diseño adecuado. (Calzón, 2016)

- **Energía y aplicaciones eléctricas**

Dentro del campo energético las fibras de electrospinning han ido adquiriendo grandes e importantes aplicaciones. Existen aplicaciones tales como baterías portátiles de polímero y condensadores. Las baterías comunes utilizan soluciones de polímeros conductores como fluoruro de polivinilideno (PVDF), poliacrilonitrilo (PAN) y policloruro de vinilo (PVC) en estado de gel con solución de electrolito. La aplicación de las fibras, supliendo al gel, permite que las baterías sean transportables y colocadas en casi cualquier posición. Estas aplicaciones abran campos de aplicación como celulares y PC portátiles. (Choi, y otros, 2004)

2.5. Materiales Compuestos

Un material compuesto es un sistema material integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí. Asimismo, si los materiales compuestos son usados por sus peculiares propiedades estructurales, la definición de materiales compuestos se puede restringir a aquellos en los que una

sustancia componente es el refuerzo (conocido por fibra o partícula) soportado por la otra fase que actúa como material aglutinante (conocido como matriz). (Tino Ramos, 2010)

Los principales factores que afectan el desempeño de materiales poliméricos reforzados con fibras naturales incluyen: (Pickering, Efendy, & Le, 2016)

- Tipo de matriz
- Fibra seleccionada (tipo, método de extracción, relación de aspecto)
- Fracción de volumen de las fibras en el compuesto
- Estructura y propiedades de la unión fibra-matriz
- Dispersión y orientación de las fibras
- Proceso de manufactura

Al usar estas fibras como refuerzo en materiales poliméricos es posible obtener materiales resistentes y de bajo peso, con propiedades aislantes y de amortiguamiento, reduciendo el consumo de materiales fósiles. (Jaramillo, 2016)

2.5.1 Clasificación

Según Vinson y Sierakowsky (1987), conforme a la clasificación estructural de los materiales compuestos, existen tres niveles: Básico elemental, que son las moléculas individuales, células de cristales, etc.; Microestructural, que son los cristales, fases, y compuestos; Macroestructural, que son matrices, partículas, y fibras. La clasificación de los tipos de compuestos está en función de la geometría que describen en su mayoría los refuerzos, sin importar la matriz en la cual están constituidos, o en la relación morfológica de la matriz con el refuerzo.

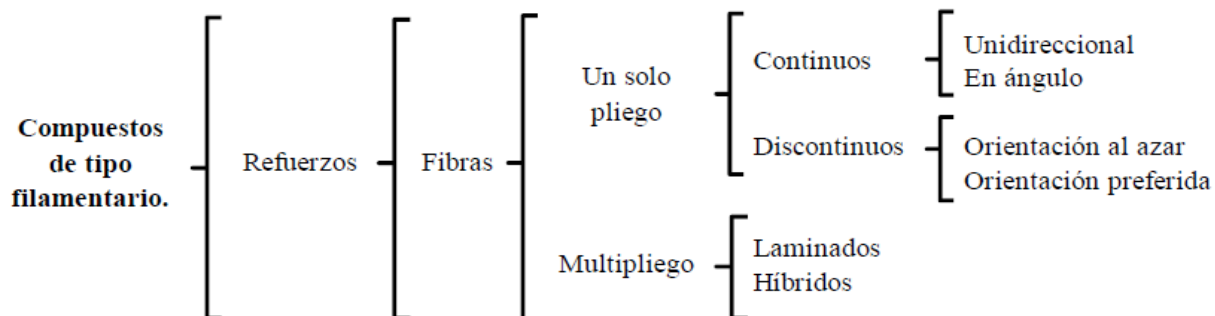


Figura 20 Clasificación de materiales compuestos según Vinson y Sierakowsky (1987).

Fuente: (Vargas, 2007)

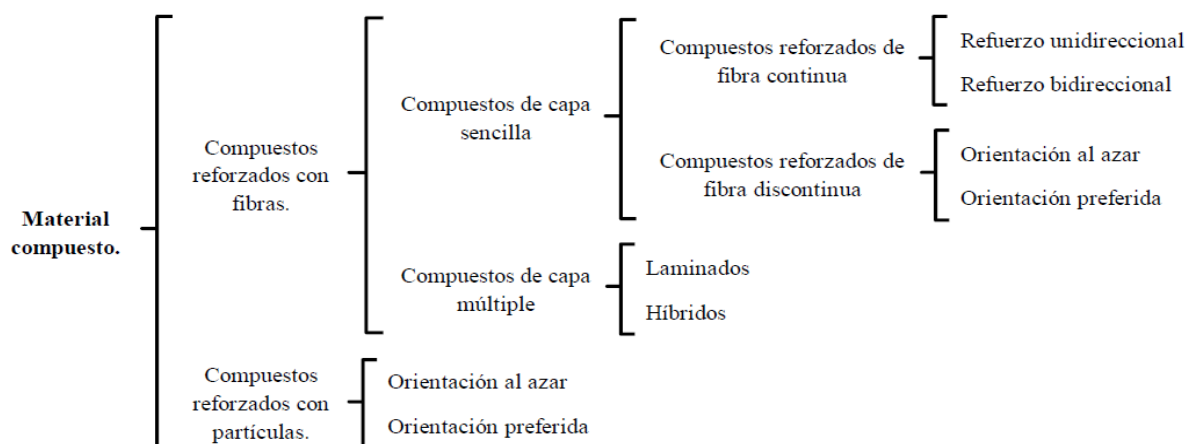


Figura 21 Clasificación de materiales compuestos según Matthew et al (2000).

Fuente: (Vargas, 2007)

2.5.2 Criterios de elaboración

Un material compuesto no surge solamente de mezclar al azar componentes, si no que existe un diseño previo basado en suponer en principio las propiedades que el material tendrá, como resultado de las ventajas que ofrezca cada agregado. El uso que se le dé, está en relación de los componentes que constituyen al material, y las características que resulten de la combinación. (Tino Ramos, 2010)

La forma de elaboración (figura 22) del material compuesto tiene una alta influencia en las características del mismo.

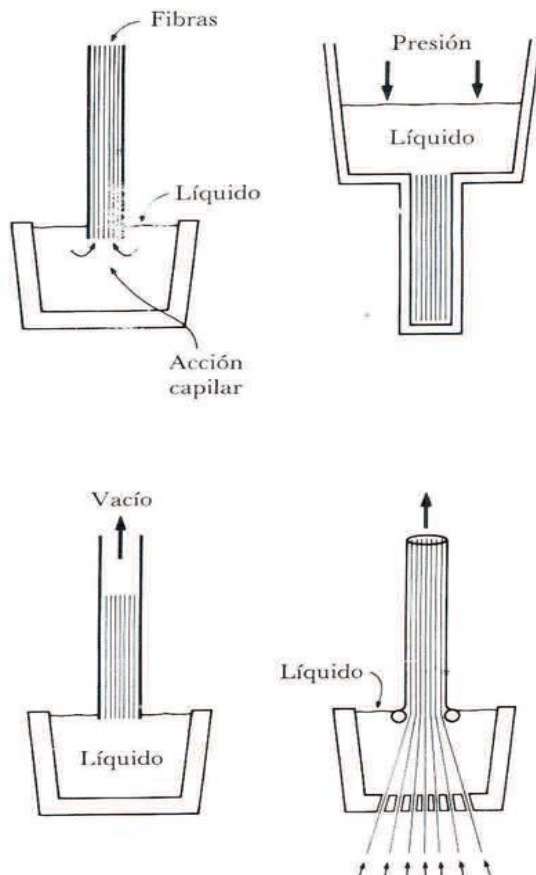


Figura 22 Técnicas de moldeo

Fuente: (Askeland, 1998)

Asimismo el direccionamiento de las fibras o distribución de partículas dentro de la matriz serán de alta influencia en sus propiedades. Por lo tanto dichas técnicas y distribuciones son diseñadas acorde el propósito final del material. (Vargas, 2007)

2.5.3 Direccionamiento de las fibras

La forma y dimensiones del refuerzo determinan las propiedades mecánicas del material compuesto (Figura 23), los refuerzos de partículas por lo general son del mismo tamaño en todas sus direcciones, donde su forma puede ser cualquier geometría regular o irregular, el arreglo de las partículas puede ser al azar o con orientación definida para

fines prácticos, los refuerzos de las fibras se caracterizan por su longitud que es mayor que su sección transversal. Se pueden utilizar fibras largas o cortas, lo cual depende del tipo de refuerzo que se busque, pueden ser continuos o discontinuos. El refuerzo continuo suele encontrarse en forma unidireccional, y bidireccional si es en tejido; el refuerzo discontinuo suele ser al azar.



Figura 23 Clasificación de los materiales compuestos por tipo, orientación y geometría al refuerzo

Fuente: (Estrada, 2010)

2.5.4 Utilidades de los materiales compuestos

La mayoría de elementos utilizados tanto en la industria como en la vida cotidiana son materiales compuestos y sus aplicaciones son extremadamente variables (Lucena, Suarez, & Zamudio, 2009). Según se realice el material tanto en su método de fabricación como en su composición se podrá definir las propiedades deseadas.

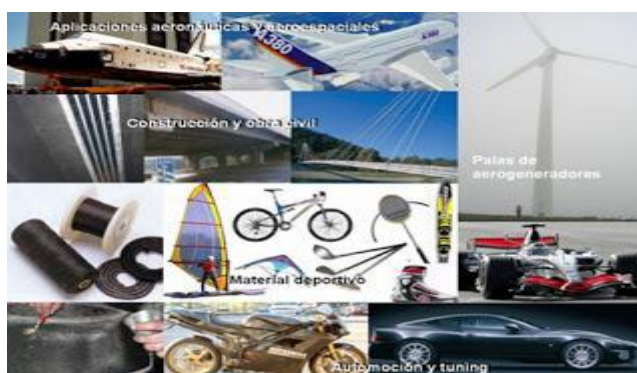


Figura 24 Uso de los materiales compuestos

Fuente: (FibraPlus, 2018)

Dentro de los campos de aplicación tenemos los siguientes (Salazar, 2015), por nombrar algunos:

- Deportes
- Medicina
- Electrónica
- Transporte
- Construcción

2.6. Materiales innovadores

Para el diseño de nuevos objetos generalmente se centra en la conceptualización de la problemática funcional y de funcionamiento. Sin embargo las nuevas tecnologías buscan también armonizar los aspectos funcionales y de funcionamiento con los formales, tecnológicos, estéticos, psicológicos, anatómicos, fisiológicos, ergonómicos, antisépticos, entre otros (Parras & Domínguez, 2016). Por lo cual el diseñador debe satisfacer ya no solo los enfoques iniciales, sino también los aspectos nuevos ya mencionados para la elaboración de nuevos productos. Por lo cual la profundidad de la biomimética de un producto, representado en la figura 25, da un valor extra al mismo.



Figura 25 Niveles de la biomimética.

Fuente: (Parras & Domínguez, 2016)

2.6.1 Electrospinning y la biomimética

La nanotecnología para el desarrollo de nuevos materiales y productos, es un campo en el cual se tienen grandes exponentes de la biomimética y el desarrollo de nuevos objetos. En particular el electrospinning es una técnica para el desarrollo de tejidos, membranas y fibras a escala micro y nanométrica. Dentro de sus aplicaciones tenemos el desarrollo de tejidos de huesos (Pataquiva Mateus, 2014), aplicación de membranas de seda con sangre de drago para una mejor función antiséptica (Melo Altamirano, 2018), entre otras.

Estos desarrollos nanotecnológicos han permitido obtener materiales mejorados debido a las cualidades mismas de la tecnología. Es decir, al obtener nanofibras o nanopartículas de un material o elemento, estos tienen propiedades mejoradas a las de sus elementos en macro (Pataquiva Mateus, 2014). Esto hace que su desarrollo y aplicación sea muy llamativo para los investigadores.

2.6.2 Materiales compuestos y biomimética

Los materiales desarrollados por biomimética, generalmente tienen un enfoque de fabricación de materiales compuestos. Los materiales o elementos en la naturaleza no están dispersos o sueltos de forma individual, su forma, función y utilidad en la naturaleza es siempre en conjunto. Por ejemplo en el caso del tejido óseo se aprecia un doble tejido. Uno externo más macizo y otro interno el cual es poroso, es la combinación de ambos la cual da la funcionalidad completa del hueso (Pataquiva Mateus, 2014). El desarrollo de las nuevas tecnologías exige obtener nuevos materiales, por lo cual para dicha obtención la naturaleza es la fuente más grande de inspiración.

2.6.3 Materiales compuestos con fibras de electrospinning

En el año 1995 comienzan los estudios acerca del método de electrospinning, una publicación realizada por la universidad de Akron, Ohio, USA dice que las fibras con diámetros muy pequeños pueden ser hiladas a partir de biopolímeros sintéticos o por fuerzas de campos eléctricos aplicados. Se están investigando aplicaciones comerciales de fibras de electrospinning en agricultura, compuestos médicos y otras áreas. (Doshi & Reneker, 1995).

En el año de 1999 se realizó un estudio que presenta a las fibras de electrospinning como un refuerzo en una matriz epoxica. “El diámetro promedio de las fibras de electrospinning fue de alrededor de 300 nanómetros, que es menos de una décima parte del diámetro y 1/100 del área de la sección transversal de las fibras de refuerzo ordinarias. Las fibras ultra finas proporcionan una proporción muy alta de área de superficie a volumen. Las nanofibras endurecieron la resina epoxi quebradiza. La resistencia a la fractura y el módulo del compuesto epoxi reforzado con nanofibra fueron ambos más altos que para un compuesto epoxi hecho con fibras de PBI” (Kim & Reneker, 1999)

Un estudio realizado en el año 2013, indica que el enfoque de realizar un compuesto cambia pues para esta fecha el estudio se encuentra en la obtención de una fibra compuesta con componentes luminiscentes orgánicos e inorgánicos, metales, óxidos de metales, cerámicos y con polímeros orgánicos. Con la finalidad de obtener fibras de electrospinning como elementos clave en dispositivos optoelectrónicos e implementarlas en las arquitecturas de los dispositivos mencionados, tal como lo muestra la figura 26.

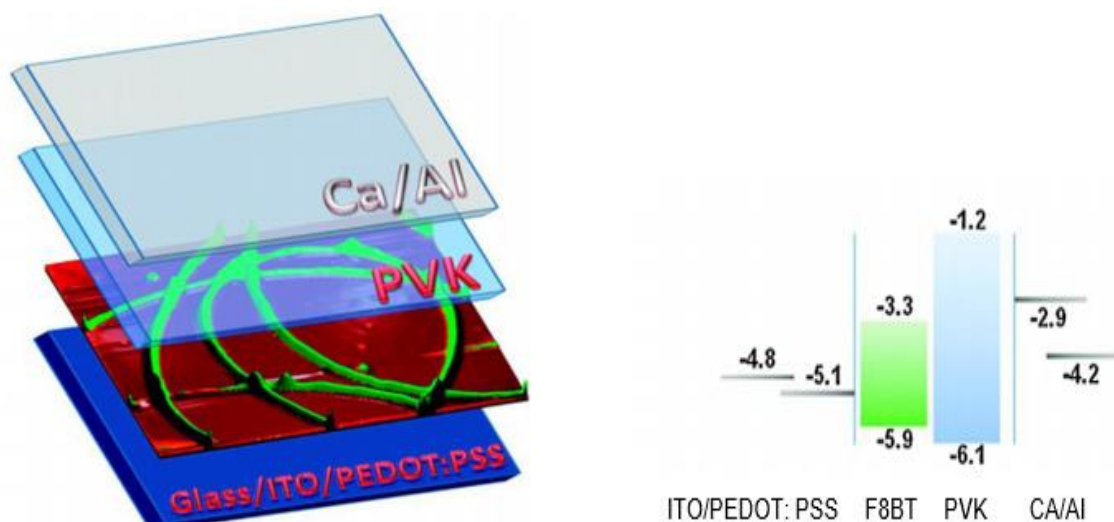


Figura 26 Arquitectura de tipo de diodo de emisión de luz orgánica plana (OLED) con nanofibras en forma de cinta de un polímero electroluminiscente (F8BT) como material activo, PEDOT / PSS: Poli (3,4 etilendioxitiofeno) poli (estireno sulfonato), PVK: poli (N-vinil carbazol)
Fuente: (Agarwall, Greiner , & Wendorff, 2013)

2.7. Polivinilpirrolidona

El PVP es soluble en agua y otros disolventes polares. Por ejemplo, es soluble en varios alcoholes, como metanol y etanol (Wohlfarth, 2010), así como en solventes más exóticos como el solvente eutéctico profundo formado por cloruro de colina y urea (Relin). Cuando está seco, es un polvo higroscópico ligero y escamoso, que absorbe fácilmente hasta un 40% de su peso en agua atmosférica. En solución, tiene excelentes propiedades humectantes y forma fácilmente películas. Esto lo hace bueno como un recubrimiento o un aditivo para recubrimientos. (Sapir, Stanley, & Harries, 2016)

2.8. Poliacrilonitrilo

El poliacrilonitrilo (PAN), también conocido como Creslan, es una resina sintética semicristalina de polímero orgánico. Aunque es termoplástico, no se derrite en condiciones normales. Se degrada antes de fundirse. Casi todas las resinas PAN son

copolímeros hechos de mezclas de monómeros con acrilonitrilo como el principal monómero. Es un polímero versátil que se utiliza para producir una gran variedad de productos que incluyen membranas de ultrafiltración, fibras huecas para ósmosis inversa, fibras para textiles, fibras PAN oxidadas. Las fibras PAN son el precursor químico de la fibra de carbono de alta calidad. El PAN primero se oxida térmicamente en el aire a 230 grados centígrados para formar una fibra PAN oxidada y luego se carboniza a más de 1000 grados centígrados en una atmósfera inerte para producir fibras de carbono que se encuentran en una variedad de aplicaciones diarias comunes y de alta tecnología, como aviones civiles y militares. (Gupta, Paliwal, & Bajaj, 1998)

2.8.1 Propiedades de poliacrilonitrilo (PAN)

El Poliacrilonitrilo es un polímero vinílico, y un derivado de la familia de los acrilatos poliméricos. Se hace a partir del monómero acrilonitrilo, por medio de una polimerización vinílica por radicales libres. Los copolímeros que contienen principalmente, se utilizan como fibras para hacer tejidos, como medias y suéteres, o también productos para ser expuestos a la intemperie, como carpas y otros. El acrilonitrilo es producido en cantidades comerciales casi exclusivamente por un método desarrollado en fase vapor en el que se produce la oxidación del propileno y amoníaco con catalizadores. (Higuera, 2015)



Figura 27 Obtención del poliacrilonitrilo

Fuente: (Higuera, 2015)

Dentro de sus características esta la alta resistencia a la exposición a agentes oxidantes tales como ácidos diluidos o peróxido de hidrogeno. Gracias a estos factores se aplicado para el desarrollo de vestimenta y protección de equipos a la intemperie. (Tema Fantástico, S.A., 2013)

Tabla 4

Propiedades fisicoquímicas del PAN

| Parámetros | Poliacrilonitrilo |
|---------------------------------|-------------------|
| densidad (g/cm ³) | 1,18 |
| Humedad | 2% |
| Temperatura de degradación (°C) | 200 |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 40 |

Fuente: (Tema Fantástico, S.A., 2013)

2.9. Resina de quitosán

El quitosán, es un polisacárido que se obtiene de la quitina parcialmente desacetilada y es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza, es un copolímero lineal formado por unidades de glucosamina y en menor medida de N-acetil D-glucosamina unidos por enlaces β 1-4, cuya denominación química, según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), es 2 amino 2 desoxi - D-glucopiranososa (D-glucosamina GlcN) y 2 acetamida- 2 desoxi- D glucopiranososa N-acetil glucosamina. El quitosán y sus

derivados, a diferencia de otros inductores, tienen la doble propiedad de inhibir el crecimiento de hongos, bacterias y virus fitopatógenos, así como la de activar in vivo diversos mecanismos vinculados con la resistencia sistémica adquirida. (Sato, y otros, 1998)

El quitosán tiene un contenido de nitrógeno (N) mayor al 7 % y posee una distribución regular de los grupos aminos libres, que pueden ser protonados por ciertos ácidos cargándose positivamente lo que le confiere un comportamiento de policación. (GLASSER, 1997) Este hecho permite explicar algunas propiedades del quitosán como son: la habilidad de enlazarse con sustancias cargadas negativamente tales como lípidos, proteínas, colorantes, entre otras; así como su comportamiento como floculante, adherente y adsorbente, adicionales a las reacciones típicas de las aminas. (SUGIMOTO, 1999)

2.9.1 Propiedades de la resina de quitosán

El quitosán es un derivado de la quitina, el cual se lo obtiene por la reacción de desacetilación de la misma en un medio alcalino. Está compuesto por celdas monoméricas β -2-amino-2-desoxi-D-glucosa y β -2-acetamida-2-desoxi-D-glucosa, además posee una estructura cristalina altamente organizada. (González, Valbuena, Celis, Perentena, & Colina, 2015) Permite una gran gama de aplicaciones debido a su facilidad de solubilidad en ácidos diluidos. Además de no ser toxico, es biodegradable y permita biocompatibilidad.

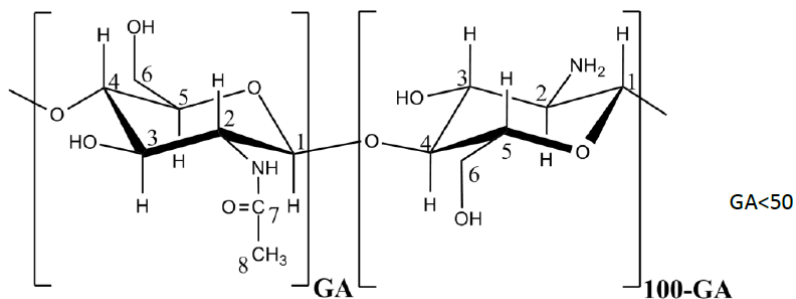


Figura 28 Estructura molecular del quitosán

Fuente: (Laranjeira & Favere, 2009)

Su degradación es realizada principalmente por peróxido de hidrogeno (H_2O_2) ya que permite un tratamiento simple. Además que su generación es amigable con el ambiente. Por lo que solo se forma como subproducto el agua. La degradación con peróxido de hidrogeno se base en la formación de radicales libres que atacan los enlaces del quitosán.

(González, Valbuena, Celis, Perentena, & Colina, 2015)

Tabla 5

Propiedades fisicoquímicas del quitosán

| Parámetros | Marca A | Marca B |
|------------------------|---------|--------------|
| Apariencia | Blanco | Polvo blanco |
| Viscosidad (cps) | 5 - 20 | < 5 |
| Humedad | <10% | <10% |
| Metales pesados | <2ppm | 10ppm |
| Temp. Degradación (°C) | 82 | 85 |

Fuente: (Soro, 2007)

CAPITULO III

3. EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo se realizará una explicación detallada de los métodos y procesos aplicados para el desarrollo experimental de los materiales propuestos. Los estudios y ensayos realizados fueron elaborados en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

3.1. Materia prima

3.1.1 Chonta

Los troncos de chonta se obtuvieron del cantón El Pangui ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe de la región amazónica del Ecuador.

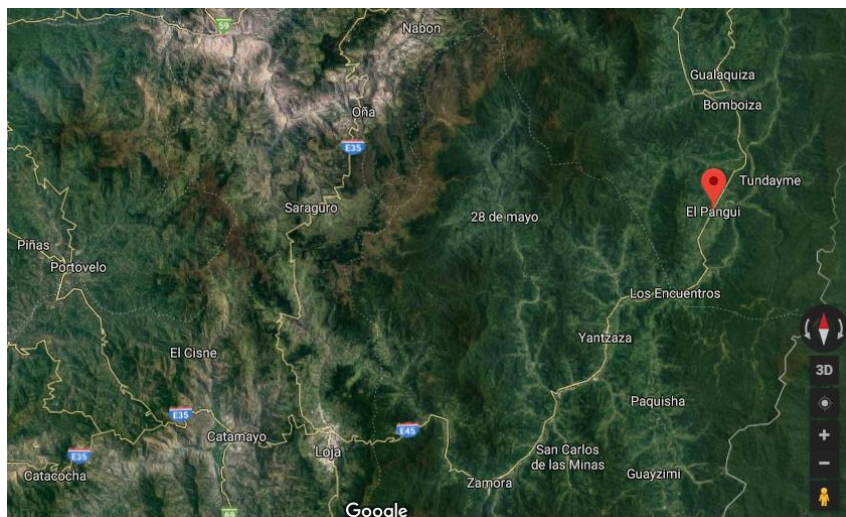


Figura 29 Zona de obtención de tronco de chonta

Fuente: (Google, 2018)

Gracias a convenios por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE con la comunidad El Pangui, fue posible la adquisición en forma de donación para estudios de investigación de troncos de chonta de edad aproximada de 25 años.

3.1.2 Polímeros y solventes para electrospinning

Para la fabricación de electrospinning primero se utilizó PVP (Sigma-Adrich, Saint Louis, USA) de 1'300 000 Dalton, con solvente etanol (J. T. Baker, Londres, UK) y luego se ocupó PAN (Sigma-Adrich, Saint Louis, USA), con solvente DMF (J. T. Baker, Londres, UK) los elementos químicos utilizados en el presente proyecto de titulación fueron proporcionados para usos de investigación en el laboratorio de mecánica de fluidos y reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

3.1.3 Resina para el material compuesto

La resina con la que se fabricó el material compuesto se obtuvo mediante una mezcla de quitosán (Sigma-Adrich, Saint Louis, USA) adquirida para fines investigativos por el laboratorio de Reología y una solución de ácido acético (J. T. Baker, Londres, UK) con agua destilada, suministrada por el laboratorio de biotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Todos los materiales químicos utilizados fueron acompañados con sus respectivas fichas de identificación y seguridad.

3.1.4 Ensayos mecánicos

El ensayo mecánico que se realizó tanto en las fibras sintéticas, resina y finalmente material compuesto, fue el ensayo de tensión en el reómetro Discovery HR-2 (TA Instruments, New Castle, USA) con la ayuda de los accesorios DMA para tensión en fibras y películas.

Para realizar este ensayo se realiza un corte con bisturí de 10 x 30 [mm] en la parte alineada de la membrana para las fibras y en la sección más regular para la resina y el

material compuesto. Posteriormente las muestras se colocan de manera vertical en las mordazas como se muestra en la figura 51.

Finalmente se configuran los parámetros del ensayo tales como tipo de ensayo y geometría de la muestra en el software *Trios* (TA Instruments, New Castle, USA) del reómetro y se da inicio al ensayo aplicando una tasa de elongación de 1×10^{-3} [1/s] como lo recomienda. (Mehmet, 2018)

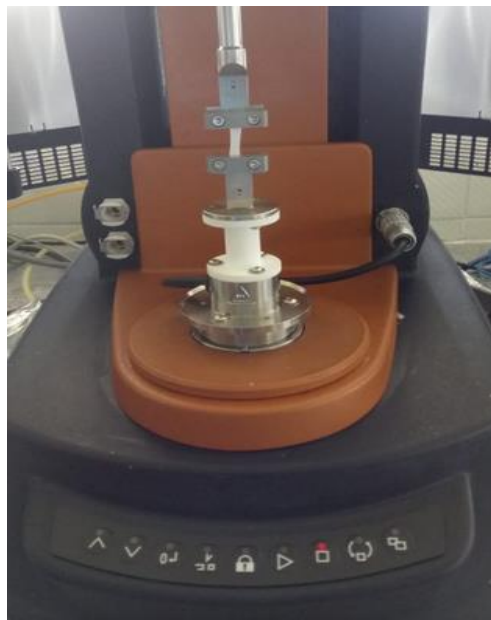


Figura 30 Ensayo de tracción en reómetro Discovery HR-2

Por medio de los ensayos descritos en el software *Trios* permite visualizar gráficas de esfuerzo deformación con alta precisión. Además de poder realizar comparaciones de las mismas. Permitiendo incluso tener varias gráficas en un mismo cuadro para una mejor comparación. Esto permitirá comprobar que el material compuesto cumple las leyes generales descritas por (Askeland, 1998) en su libro con relación a la mezcla de propiedades en un material compuesto.

3.2. Extracción de las fibras de chonta

Para la obtención de muestras se ensayaron varios métodos para poder determinar aquella técnica que permita extraer fibras de forma completa y simple. Para lo cual se aplicaron (1) el método químico con hidróxido de sodio (J. T. Baker, Londres, UK) explicado en la sección 2.3.2 y (2) el método mecánico de extracción manual descrito en la sección 2.3.2 con la ayuda de una cizalla. La variedad y combinación de los mismos fue analizada para llegar a indicar la técnica adecuada para la extracción de fibras de chonta (*bactris gasipaes*).

3.2.1 Análisis de las fibras de chonta

Una vez realizados los ensayos de las fibras de chonta, queda analizar su distribución geométrica en el material natural. Esto permitirá comprobar que la geometría natural de la chonta es un factor muy importante para sus propiedades mecánicas finales. Cabe recalcar que el tronco de chonta es considerado un material compuesto natural. Tal como se puede ver en la figura 31 el tronco posee fibras naturales de manera alineada a lo largo de su estructura, unidas por resina propia del árbol.

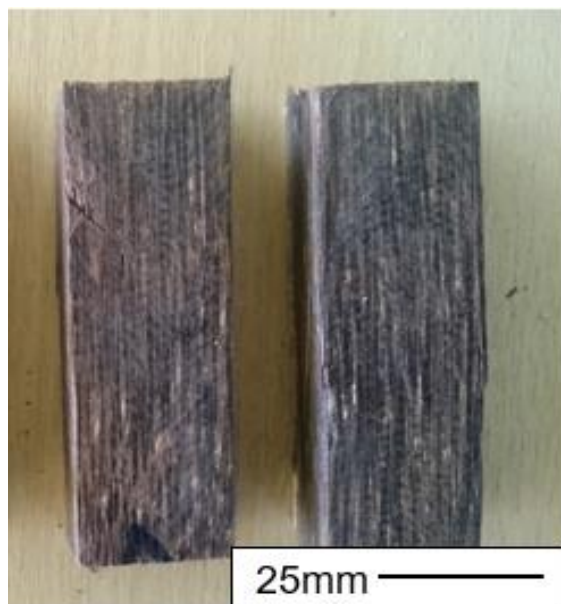


Figura 31 Muestras de tronco de chonta con corte transversal. Vista lateral

3.2.2 Método químico

Primero al indicar que las fibras deseadas son de carácter duro. Es decir su naturaleza y origen, al ser de tronco, dirige a realizar procesos para fibras duras. Al revisar la bibliografía referente a trabajos previos para la extracción de fibras en especial el realizado por Bonilla O., Trujillo H., Guerra S., Guevara V. y López V. en el cual realizaron la extracción de fibras de la hoja de lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*). Los cuales indican que para fibras duras se puede realizar inmersiones en solución de hidróxido de sodio (NaOH), con la finalidad de disolver la lignina presente alrededor de las fibras, permitiendo que posteriormente se realice una extracción de forma manual.

Para lo cual se realizaron pruebas con diversas concentraciones y preparaciones previas para las muestras. Debido a la dureza de las fibras y revisando los trabajos previos se decidió comenzar con una solución de NaOH de 100 [g/l] de concentración. Siguiendo el procedimiento previsto en el trabajo de investigación Extracción y

Caracterización de la fibra de la hoja de la Lengua de Suegra (*Sansevieria trifasciata*) (Bonilla, Guerra, Guevara, & López, 2009), el cual indica lo siguiente.

1. Realizar una inmersión inicial de las muestras en relación de volumen 2:1.
2. Tiempo de reposo 10 [min].
3. Retirar muestra.
4. Neutralizar la muestra con solución de ácido acético al 5% de volumen.
5. Lavar con agua destilada.
6. Realizar una segunda inmersión de las muestras en relación de volumen 6:1.
7. Tiempo de reposo 30 [min].
8. Repetir los pasos 3, 4 y 5.
9. Realizar una última inmersión sin tiempo definido hasta visualizar desprendimiento.



Figura 32 Muestras iniciales a partir del borde externo del tronco de chonta. Dimensiones aproximadas de 25 x 15 x 80 [mm].

Posterior al tratamiento descrito, la última inmersión fue de 24 [h] (ver figura 33), observando un ligero desprendimiento de material. Por lo cual, después de sumergir las

muestras se realizó una extracción manual y con herramientas de corte (tijeras y estilete) de las fibras. En donde se apreció una gran debilidad de las fibras por lo cual el proceso fue extenso y con pocos resultados.



Figura 33 Muestras en inmersión de 24 [h] en solución de NaOH.

Posteriormente se observa que las muestras no permiten que la solución penetre en toda la muestra, además de que la parte atacada resulta extremadamente dañada como se puede apreciar en la figura 34.



Figura 34 Muestra N° 1 posterior al secado

Con la intención de reducir tiempos de exposición de las muestras se realizaron cortes para reducción de espesor de la muestra. Generando muestras con las siguientes dimensiones 50 x 25 x 4 [mm] y pesos aproximados de 6.5 [gr]. Para la realización del tratamiento químico de las muestras de la figura 35, se realizó una única inmersión de 12

horas en solución 50 [g/l] de NaOH. Sin embargo en este caso las muestras se aprecian carbonizadas y no permiten una extracción manual posterior.

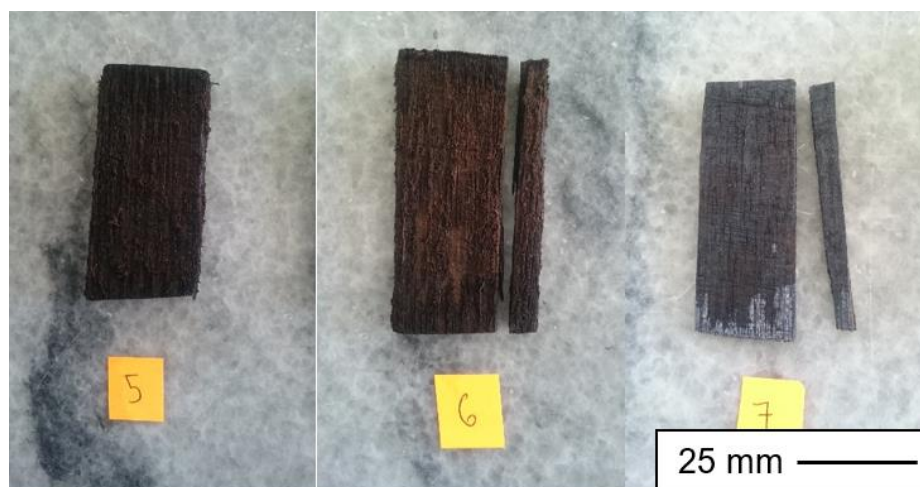


Figura 35 Muestras 5, 6 y 7 posteriores a tratamiento químico.

El método químico no fue factible para la obtención de fibras. Es posible que los tratamientos químicos ayuden a limpiar las fibras de residuos indeseados para otras aplicaciones. Sin embargo su aplicación para el presente proyecto no es necesaria.

3.2.3 Método mecánico

El método descrito en la sección 2.3.2.2 es una extracción manual de las fibras, el cuál es el resultado del método de prueba y error. Con el que se definió el proceso aplicado para la extracción de las fibras sin mayores daños a las mismas. El cual se describe a continuación.

1. Realizar cortes con el fin de extraer la corteza, tal como se muestran en la figura 36. Se recomiendan cortes lo más próximos al borde posible, pero que abarquen gran cantidad de fibras.

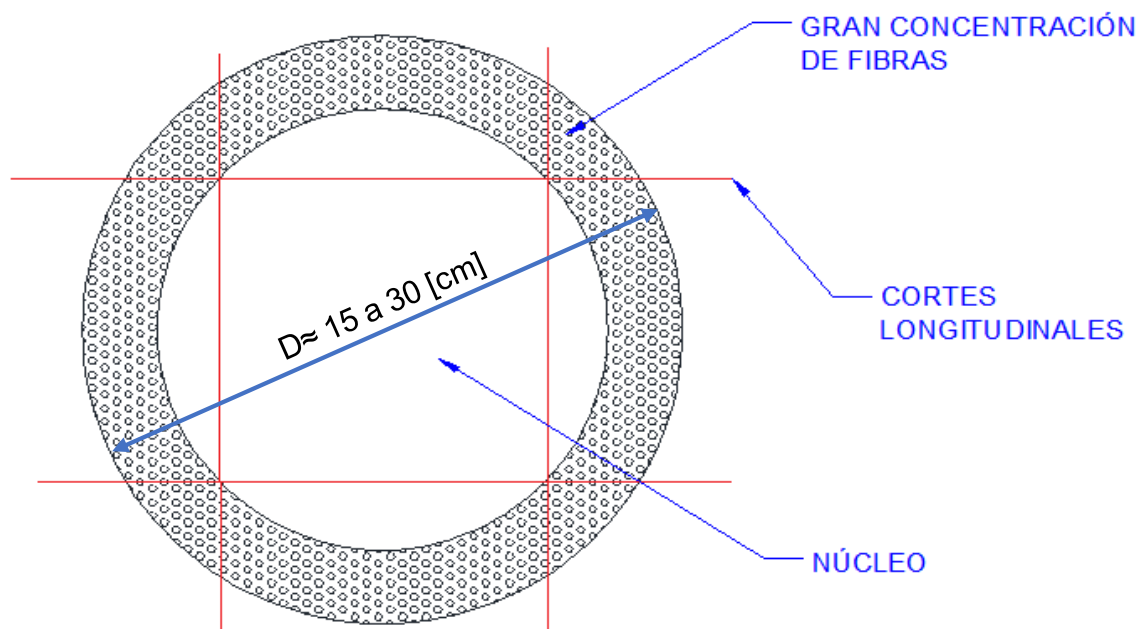


Figura 36 Sección transversal tronco de chonta (cortes iniciales)

2. Cortar la parte de interés del tronco definida desde el exterior hasta 25 [mm] al interior. Esta zona de interés se estableció empíricamente debido a la observación de gran acumulación de fibras en la parte externa del tronco.

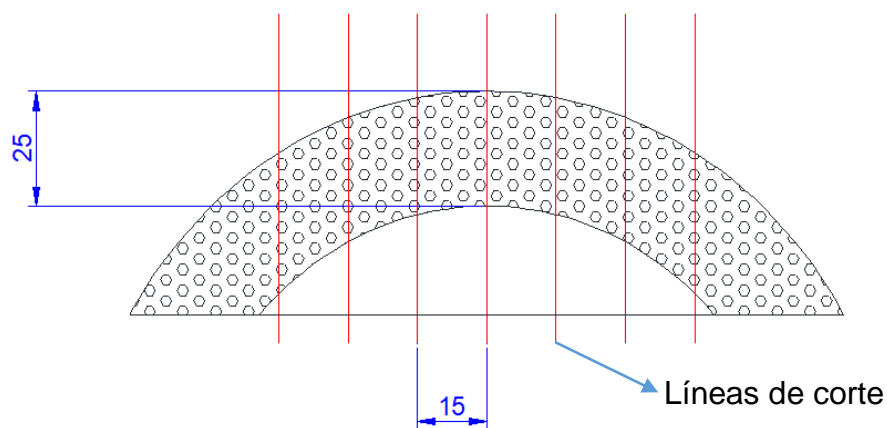


Figura 37 Cortes para fácil manejo de las muestras.
Las medidas son aproximaciones.

3. Realizar cizallamientos de forma longitudinal a las muestras para lograr la separación de las fibras. Esta operación se repite en cada separación entre

fibras y en diversas direcciones según la necesidad de cada caso, con el fin de obtener fibras individuales.

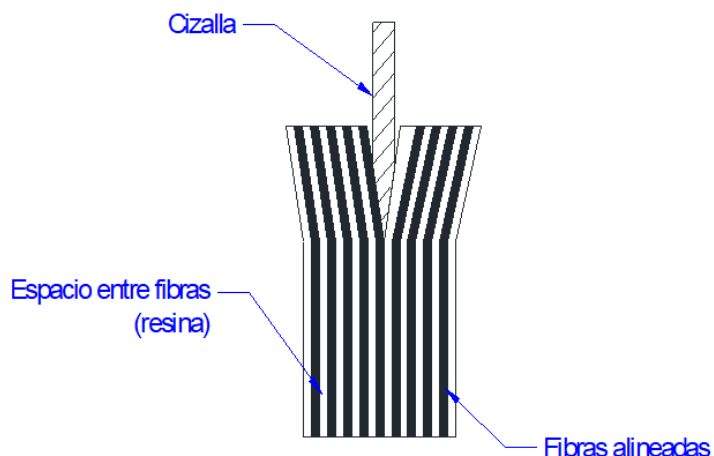


Figura 38 Cizallamiento de las muestras para la separación de fibras.

4. Limpieza de las fibras obtenidas por medio de un raspado con herramientas corto punzantes (tijera, estilete, cuchillo, entre otros).

Este proceso permitió apreciar la forma de las fibras y su distribución a lo largo del tronco. Además de obtener fibras casi sin afectación, para poder realizar su análisis correspondiente.

3.2.4 Ensayos mecánicos fibras chonta

Una vez obtenidas las fibras individuales se procedió a cortarlas con una longitud entre 35 a 50 [mm] para ser ensayadas a tracción en la máquina de ensayos universales (Pinzuar, Lima, Perú).

Posteriormente al corte cada fibra es medida su longitud, pesadas y etiquetadas, tal como se muestra en la figura 38 que se muestra a continuación, para su posterior análisis.

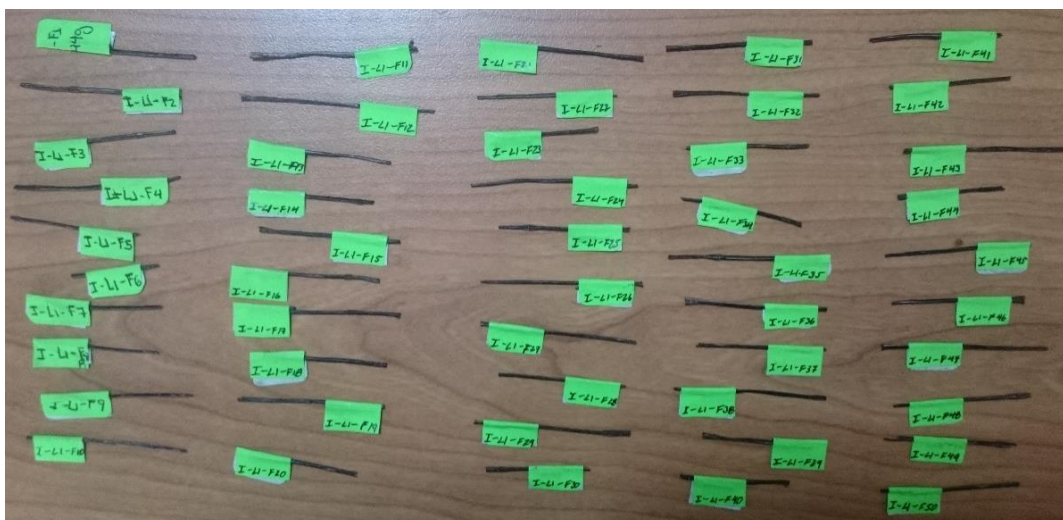


Figura 39 Lote N°1 de fibras obtenidas por método mecánico – manual

3.3. Experimentos previos

Para realizar la biomimesis de la chonta fueron necesarios una serie de experimentos previos con la finalidad de seleccionar que polímero es el mejor para realizar un material compuesto con resina de quitosán. A continuación se describe la realización de estos.

Para realizar la biomimesis del tronco de chonta se siguió la siguiente secuencia de pasos:

- Obtención de fibras alineadas de PVP, ya que en el corte longitudinal de la chonta indica que esta está compuesta por fibras alineadas.
- Como se explicó en la sección 2.1, la biomimesis trata de replicar estructuras de la naturaleza por medios artificiales, por lo que para complementar el paso anterior es necesario la formación de un material compuesto, pues el tronco de chonta aparte de fibras se compone de una resina. Es por esto que se mezcló las fibras de PVP con resina de quitosán. Al momento de formar este material

compuesto las fibras de PVP se disolvieron en la resina de quitosán, por lo que se optó por usar fibras de PAN.

- Se obtuvieron fibras alineadas de PAN.
- Se realizó la mezcla de fibras de PAN con resina de quitosán de varias concentraciones y estas no se disolvieron, por lo que el diseño experimental estadístico se hizo en función de la formación de fibras de PAN y resina de quitosán

3.3.1 Experimentación del material compuesto con fibras alineadas de PVP

Para la obtención de fibras alineadas primero se dispuso el sistema como se indica en la figura 40, que posee los siguientes elementos:

- Bomba (Cole Parmer, Illinois, Estados Unidos)
- Jeringa (Nipro MR, Quito, Ecuador)
- Capilar (New Era Pump Systems, USA)
- Cámara (Nikon, Tokio, Japón)
- Colector (SM, Quito, Ecuador)
- Lámpara (Ikelite, Barcelona, España)
- Fuente (Genvolt, New Road, Reino Unido)



Figura 40 Equipo de electrospinning del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

Los parámetros del sistema para PVP se basaron en datos de experimentos anteriores (Narvaez Cadena, 2017). En el cual permite identificar y limitar ciertas variables para la aplicación de los equipos. Tales como la distancia de la punta de la aguja al plato colector, voltaje, caudal, tiempo de recolección, entre otros. Dentro de estos parámetros se estandarizó la distancia en 15 [cm], un caudal de 3 [ml/h] y un voltaje entre 6 a 9 [KV].

Para la placa colectoras inicialmente se propusieron dos opciones. La primera un colector tipo rejilla en el cual se podrían extraer una mayor cantidad de muestras, sin embargo su longitud sería muy limitada. La segunda opción, placas paralelas con separación ajustable. Estas últimas permiten variar la separación logrando así obtener fibras más manejables.

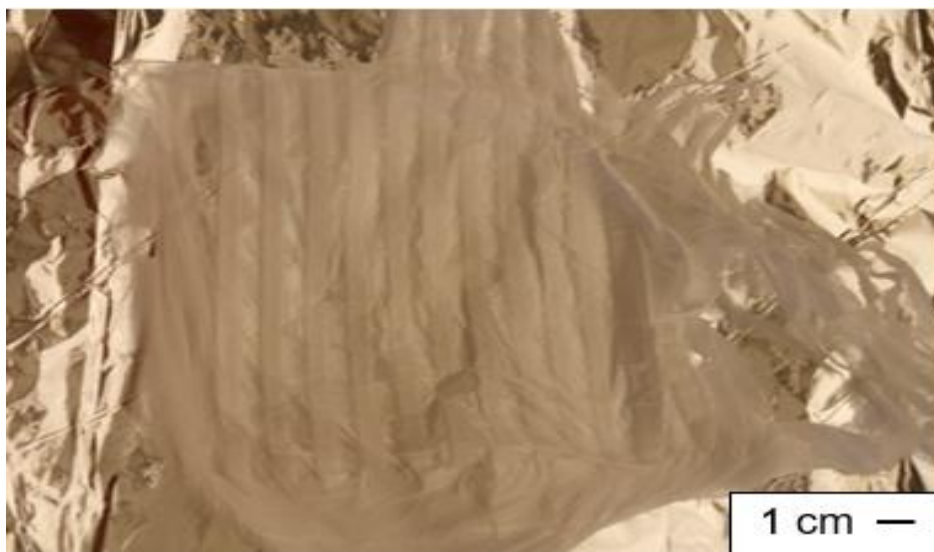


Figura 41 Muestras de fibras de PVP al 8% en recolector tipo rejilla

Como se aprecia en la figura 41 las fibras recolectadas se ven altamente afectadas al momento de la extracción del recolector. Además al momento de su realización se apreció que en un principio entre los espacios vacíos del colector las fibras si se depositaban de forma alineada. No obstante al transcurrir el tiempo las fibras empezaron a depositarse como si se tratase de un colector plano. Esto causo que se decidiera dejar de utilizar este tipo de colector.

La segunda opción de colector, se utilizó un colector de placas paralelas con distancia variable. El cual permitió una obtención de fibras más largas y con mayor tiempo de deposición que con el colector antes mencionado. Dando también mayor facilidad para su extracción y posterior manejo. La distancia inicial utilizada fue de 2 [cm]. Esta distancia fue tomada de un trabajo de fin de grado, en el cual indica que para la obtención de fibras alineadas la distancia debe ser entre 1 a 5 [cm] para una óptima recolección y un alineamiento adecuado (J., Angamma, H., & Jayaram).

En base a dicha recomendación se empezó a variar la distancia entre placas. Con valores de 2, 2.5, 2.7 y 3 [cm]. A partir de los 3 [cm] se visualizó que la deposición de las fibras se concentraba más en una de las dos placas.

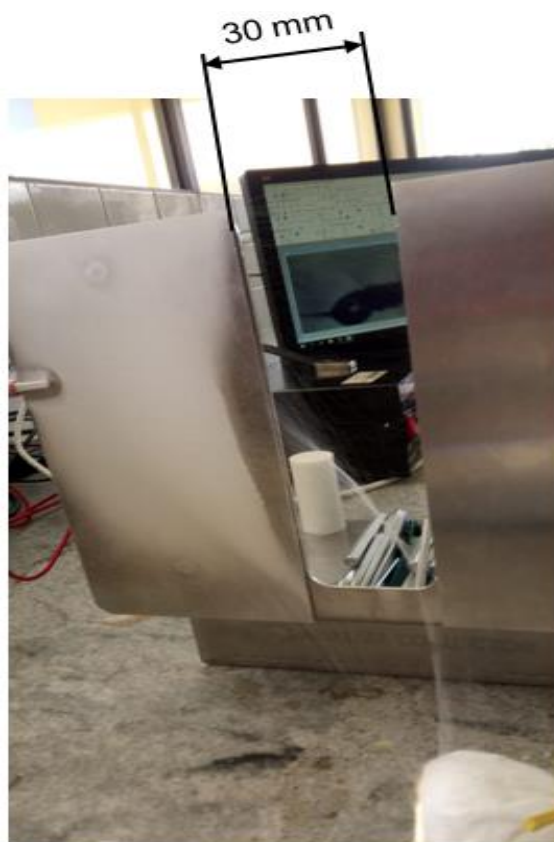


Figura 42 Concentración de deposición en una sola placa

Posteriormente se propuso definir una distancia óptima de separación para una buena recolección de fibras alineadas, Se definió una alineación aceptable cuando al menos el 80% de fibras presentes en un pedazo de muestra se encuentren en línea recta. Para lo cual, se varió la distancia desde 2,5 a 3 [cm]. Realizando esta variación (ver tabla 6) se comprobó que al alcanzar una distancia de 2,7 [cm] se obtuvieron fibras alineadas como

lo muestra la figura 43 y con deposición uniforme, es decir que en el colector existan fibras en todas las partes del mismo.



Figura 43 Deposición de fibras alineadas de PVP en placas paralelas con separación de 2,0 cm

Tabla 6

Resumen de datos experimentales para determinar los mejores parámetros para PVP

| N° | Separación (cm) | Voltaje (KV) | Caudal (ml/h) | Material | Observación |
|-----------|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|---|
| 1 | 6 | 6 | 3 | PVP 8% w/w | No hubo alineación |
| 2 | 4 | 7.2 | 3 | PVP 8% | Deposición irregular, concentración en una sola placa |
| 3 | 2 | 7 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 4 | 3 | 7 | 3 | PVP 8% | Deposición irregular, concentración en una sola placa |
| 5 | 2.6 | 8.2 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 6 | 2.6 | 8.2 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 7 | 2.6 | 8 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 8 | 2.6 | 8 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 9 | 2.6 | 8 | 3 | PVP 8% | Buena deposición y alineación adecuada |
| 10 | 2.7 | 8 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 11 | 2.7 | 8 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 12 | 2.7 | 8 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 13 | 2.7 | 7.9 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 14 | 2.7 | 7.9 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 15 | 2.7 | 7.9 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 16 | 2.7 | 7.9 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |
| 17 | 2.7 | 7.9 | 3 | PVP | Buena deposición y alineación adecuada |

Se llevaron las muestras 11 a 17 al microscopio de barrido (Tescan, Libušina třída, República Checa) puesto que en estas fibras se demostró la repetitividad de la experimentación y se verificó el estado de alineamiento de las fibras, además se observó que no existen defectos en la formación, deposición y recolección de fibras.

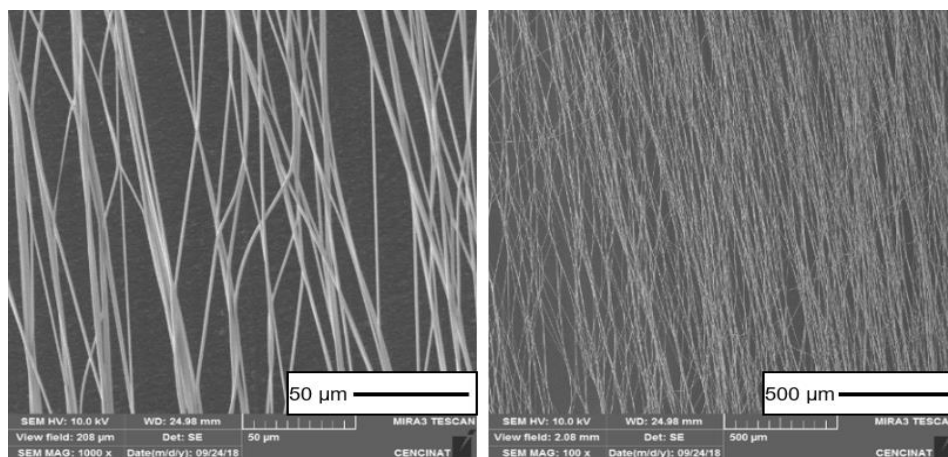


Figura 44 Fibras muestra N°17 de PVP.
Amplificación izquierda X1000 y derecha X100
Fuente: Microscopio de barrido

Por lo que se afirma que los parámetros establecidos son los adecuados para la obtención de fibras alineadas por el proceso de electrospinning.

Una vez obtenidas fibras alineadas de PVP se procedió a mezclarlas con resina de quitosán con las concentraciones quitosán, 4% p/v en ácido acético 4%v/v, quitosán 4% p/v en ácido acético 40%v/v y quitosán 8% p/v en ácido acético 4%v/v. Sin embargo, en ninguno de los casos se obtuvo un material compuesto pues al realizar la microscopía en el microscopio de barrido no se visualizan fibras en el material, como se muestra en la figura 45.

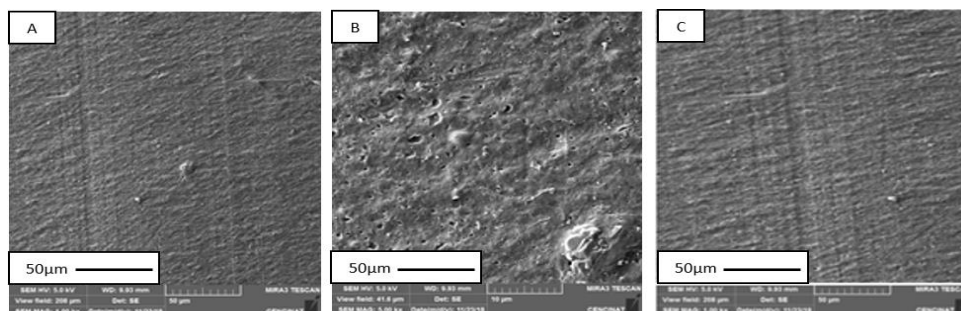


Figura 45 Material compuesto A) Con fibras de PVP y quitosán, 4% p/v en ácido acético 4%v/v B) Con fibras de PVP y quitosán, 4% p/v en ácido acético 40%v/v C) Con fibras de PVP y quitosán 8% p/v en ácido acético 4%v/v

Fuente: Microscopio electrónico de barrido

3.3.2 Experimentación del material compuesto con fibras alineadas de PAN

Con el fin de elaborar el material compuesto se propuso como segunda alternativa la utilización de fibras de PAN, el cual permite la compatibilidad de materiales compuestos con la resina de quitosán.

Para la aplicación de electrospinning con PAN, el cual es el polímetro utilizado en la fabricación del material compuesto. Se verificaron los factores óptimos para el proceso como se muestra en la tabla 7. Partiendo de los parámetros revisados en trabajos previos como el de Fundamental Parameters Affecting Electrospinning of PAN Nanofibers as Uniaxially Aligned Fibers. (Jalili, Morshed, & Ravandi, 2006)

Tabla 7

Resumen comprobación de parámetros.

| N° | Separación (cm) | Voltaje (KV) | Caudal (ml/h) | Deposición (ml) | Distancia (cm) | Material |
|-----------|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 | 2.5 | 14.2 | 1.32 | 3 | 15 | PAN 15% |
| 2 | 3 | 14.2 | 1.32 | 5 | 20 | PAN 15% |
| 3 | 3 | 17.9 | 1.32 | 3 | 20 | PAN 15% |
| 4 | 3 | 17.9 | 1.32 | 5 | 20 | PAN 15% |

Con dichos parámetros se estableció aquellos que son los indicados para generar un proceso adecuado. Por lo que los parámetros se establecieron de voltaje entre 14,2 y 17,9 [KV], de caudal se fijó en 1,32 [ml/h], la deposición entre 3 y 5 [ml] con una distancia al colector de 20 [cm] y separación de las placas de 3 [cm].

3.4. Diseño estadístico para la elaboración del material compuesto

Para el diseño experimental estadístico para la elaboración del material compuesto es necesario un modelo que permita relacionar variables para identificar su relación, significación y valores deseados, por lo cual se analizó y aplicó el modelo de Dorian Shainin. El cual está basado en la reducción de la variabilidad de los factores experimentales. (Medina, Cruz, & Restrepo, 2007) Para la correcta aplicación del método estadístico es necesario definir los factores que afectan la obtención del material compuesto así como sus propiedades mecánicas. Dichos factores inicialmente son el voltaje aplicado para las fibras de electrospinning, cantidad de deposición de fibras de PAN y la fracción entre resina y fibras. Estos factores se describen en la tabla 8.

Tabla 8

Factores que afectan al material compuesto

| Afectación | Factor | Código | Nivel Bajo (-) | Nivel Alto (+) | Respuesta esperada |
|------------------------------------|-----------------|--------|----------------|----------------|----------------------|
| Fibras y material compuesto | Voltaje (KV) | A | 14.2 | 17.9 | Esfuerzo de fluencia |
| | Deposición (ml) | B | 3 | 5 | Esfuerzo de fluencia |
| Material compuesto | Fracción | C | 0.08 | 0.10 | Esfuerzo de fluencia |

Como se puede apreciar los factores tienen niveles mínimos y máximos definidos, en el caso del voltaje (A) se seleccionó un nivel mínimo de 14.2 [KV] y un máximo de 17.9

[KV], pues son los valores que se utiliza en el trabajo de Fundamental Parameters Affecting Electrospinning of PAN Nanofibers as Uniaxially Aligned Fibers (Jalili, Morshed, & Ravandi, 2006), además de haber sido verificados en experimentos previos.

La deposición de fibras (B) varía entre los valores de 3 [ml] y 5 [ml], puesto a que a partir de 3 [ml] de deposición del polímero es factible medir el peso de la muestra y hasta 5 [ml] se pueden obtener fibras alineadas.

La fracción (C) hace referencia a la relación entre fibras y resina presente en el material, indicando que 0,08 sería una muestra con 8% de fibras y 0,10 indica un 10% de fibras presentes en el material compuesto. El valor de 8% es el mínimo recomendado para elaboración de material compuesto reforzado con fibras (Askeland, 1998), mientras que el 10% es el factor que se logró obtener de control con la tecnología disponible para la inyección de resina en el laboratorio de reología.

3.4.1 Fabricación de fibras alineadas de PAN

Como se mencionó en la sección 3.3.2 las fibras de PVP no formaron ningún material compuesto al mezclarlas con la resina de quitosán, por lo que se realizó el material compuesto con fibras de PAN. El proceso de formación de fibras alineadas es el mismo en lo que refiere a los elementos utilizados para la obtención de fibras alineadas por electrospinning.

En la elaboración del material compuestos hay factores que afectan directamente a las fibras estos son el voltaje y la deposición. Los cuáles serán combinados con sus valores máximos y mínimos mostrados en la tabla 8 obteniendo así cuatro combinaciones y para cada una se realizaron 5 repeticiones.

Tabla 9

Resumen de datos experimentales para determinar los mejores parámetros para PAN

| <i>Muestra</i> | <i>Combinación</i> | <i>% Deformación</i> | <i>Esfuerzo (MPa)</i> | <i>Módulo de Elasticidad (MPa)</i> |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| FB1 | | 15.44 | 13.85 | 0.90 |
| FB2 | | 16.32 | 13.67 | 0.84 |
| FB2 | A+B+ | 15.52 | 13.21 | 0.85 |
| FB4 | | 15.89 | 13.72 | 0.86 |
| FB5 | | 16.07 | 14.04 | 0.87 |
| Promedio | | 15.85 | 13.70 | 0.86 |
| Desviación estándar | | 0.37 | 0.31 | 0.02 |
| FB6 | | 16.77 | 6.98 | 0.42 |
| FB7 | | 15.78 | 7.45 | 0.47 |
| FB8 | A-B+ | 16.26 | 7.21 | 0.44 |
| FB9 | | 16.43 | 7.03 | 0.43 |
| FB10 | | 16.80 | 6.99 | 0.42 |
| Promedio | | 16.41 | 7.13 | 0.44 |
| Desviación estándar | | 0.42 | 0.20 | 0.02 |
| FB11 | | 18.46 | 15.56 | 0.84 |
| FB12 | | 18.09 | 15.92 | 0.88 |
| FB13 | A+B- | 17.94 | 15.87 | 0.88 |
| FB14 | | 18.56 | 15.58 | 0.84 |
| FB15 | | 18.45 | 16.88 | 0.91 |
| Promedio | | 18.30 | 15.96 | 0.87 |
| Desviación estándar | | 0.27 | 0.54 | 0.03 |
| FB16 | | 10.58 | 9.36 | 0.88 |
| FB17 | | 12.03 | 10.15 | 0.84 |
| FB18 | A-B- | 11.73 | 9.85 | 0.84 |
| FB19 | | 10.84 | 9.03 | 0.83 |
| FB20 | | 11.23 | 9.54 | 0.85 |
| Promedio | | 11.28 | 9.59 | 0.85 |
| Desviación estándar | | 0.60 | 0.43 | 0.02 |

Al visualizar la tabla 9, se aprecia que al realizar la obtención de fibras con los parámetros de 17,9 [KV] de voltaje (A+) y deposición de 3 [ml] (B-) se obtiene el mayor esfuerzo de fluencia que en promedio es 15.96 [MPa].

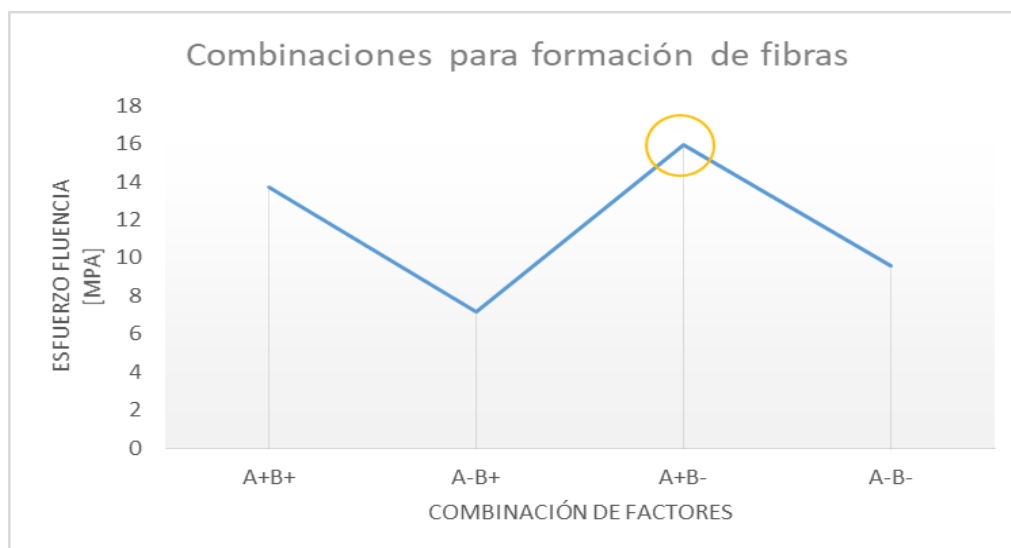


Figura 46 Gráfica comparativa de resultados de esfuerzo obtenido por combinación de factores

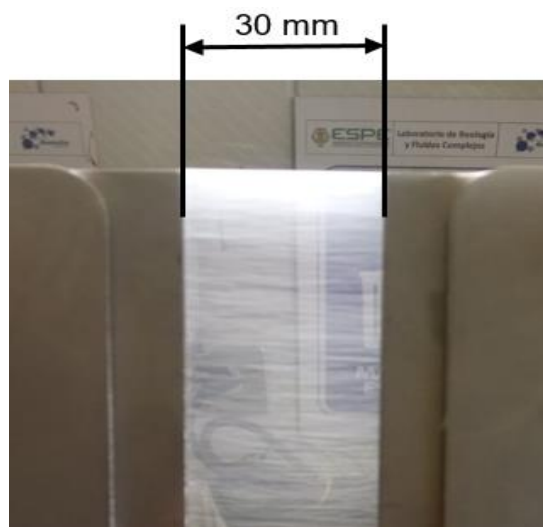


Figura 47 Membrana con fibras alineadas de PAN al 15% de concentración v/v (muestra FB12)

Al revisar las fibras en el microscopio de barrido, se aprecia que son fibras alineadas que cumplen con lo deseado, es decir el 80% de las fibras tienden a estar de forma paralela entre sí formando una línea recta (Calzón, 2016). Además de que se muestra uniformidad en su formación y diámetros. También se observa la ausencia de beads (defectos), lo cual muestra que los parámetros conseguidos son los adecuados para la experimentación.

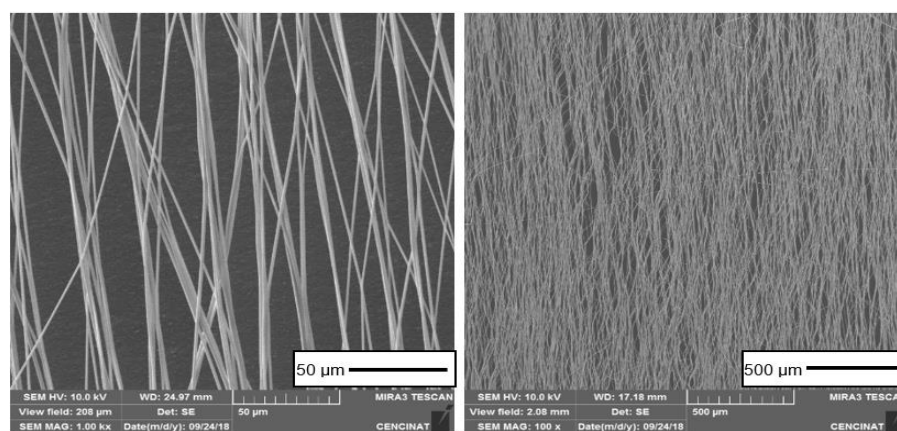


Figura 48 Muestras de fibras de PAN. Amplificación

izquierda X1000 y derecha X100

Fuente: Microscopio de barrido – ESPE

3.4.2 Homogeneidad de diámetros de fibras de PAN

Para el estudio de la homogeneidad de los diámetros de fibras de PAN se realizó, 8 mediciones a varias fibras de las muestras 11 a la 15 obteniendo un total de 105 mediciones, realizadas con la herramienta diameter del programa ImageJ (National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA) que permite realizar una medición de diámetros en imágenes, para este caso se utilizaron las imágenes proporcionadas por el microscopio de barrido.

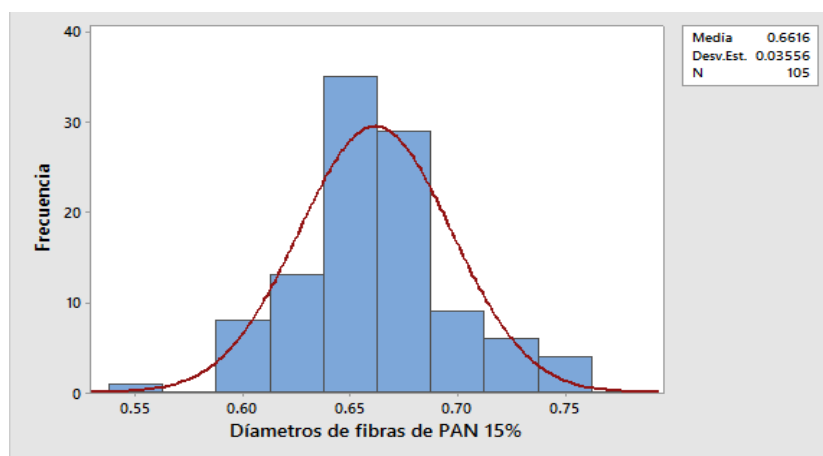


Figura 49 Histograma de diámetros de fibras de PAN 15%

El promedio de diámetros es de 0,661 [um], con una desviación estándar de 0,035 [um], con lo que se concluye que existe regularidad en los diámetros de fibras de PAN.

3.4.3 Estudio de la porosidad de malla de muestras de fibras de PAN

Para realizar el estudio de porosidad se utilizó la herramienta de selección de áreas en el programa ImageJ, en el cuál se seleccionó las áreas que no presentan fibras, como se indica en la figura 50.

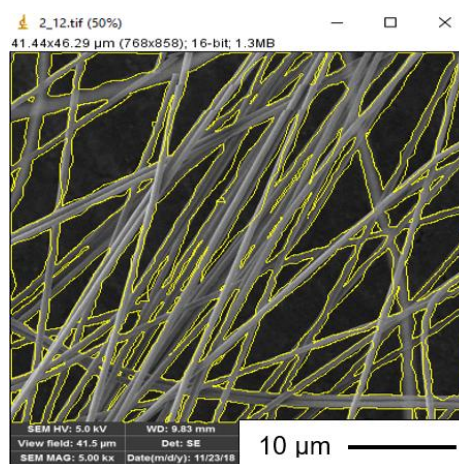


Figura 50 Cálculo de áreas vacías entre fibras

Posteriormente se midió el área en el que no hay fibras que encierran las líneas amarillas y se estableció para encontrar el porcentaje de porosidad en la malla una relación con el área total de la siguiente manera:

$$A_{sinfibras} = 829.527 \mu m^2 \quad (1)$$

$$A_{total} = 1708.123 \mu m^2 \quad (2)$$

$$Porosidad = \frac{A_{sinfibras}}{A_{total}} \quad (3)$$

$$Porosidad = \frac{829.527 \mu m^2}{1708.123 \mu m^2} \quad (4)$$

$$Porosidad = 0.4856 \quad (5)$$

Como se explicó en la sección 3.3.1 se fabricó el material compuesto con fibras de electrospinning y tres tipos de resina de quitosán, con la finalidad de optimizar la experimentación se realizó un proceso de selección para conocer que concentración de resina de quitosán es la adecuada para cumplir con el objetivo de bio mimetización de la chonta. Este proceso se explica a continuación.

3.4.4 Proceso de formación de resina de quitosán

Para su elaboración, es necesario primero hacer una solución de ácido acético con agua destilada. Los porcentajes de solución se seleccionan de acuerdo al uso que se le va a dar al quitosán, para la solución los porcentajes son de 4% o 40% v/v estos nos aseguran que la solución estará en estado líquido tal cual una resina sintética.

Posteriormente se realiza la solución de quitosán en la solución de ácido acético p/v con porcentajes que pueden estar entre 4% y 8% p/v, dependiendo de la solución de

ácido acético con la que se va a mezclar, teniendo siempre pendiente que la solución debe estar en estado líquido.

Finalmente se mezcla el quitosán con la solución de ácido acético durante 24 horas en el agitador magnético (Thermo Scientific, Illinois, USA).

3.4.5 Selección de la concentración de resina de quitosán

El quitosán para ser utilizado es necesario disolverlo en una solución de ácido acético. Lo cual permite que este sea vertido en la matriz de moldeo y así obtener el material compuesto deseado. Una vez que se deja secar a la intemperie este toma sus propiedades mecánicas tales como flexibilidad y resistencia.

La capacidad de que la solución obtenida de quitosán y ácido acético tenga para ocupar los espacios en la malla de fibras obtenidas de electrospinning estará directamente relacionada a la concentración de dicha solución. Para realizar la selección de la concentración resina - ácido acético, se realizó una matriz de selección tomando en cuenta los siguientes factores:

1. Solubilidad de quitosán en ácido acético. (inexistencia de partículas visibles en la solución)
2. Formación de burbujas al momento de inyección. (inexistencia de burbujas posterior a ser inyectadas o vertidas en el molde)
3. Tiempo de secado de la resina. (tiempo hasta que la resina se haya adaptado a la forma del molde y sea posible su extracción sin daño de su forma)

Tabla 10*Factores y puntuaciones para la formación de la resina de quitosán*

| Puntajes | 5pts | 4pts | 3pts | 2pts | 1pt |
|--------------------------------|--|---|--|--|--------------------------------------|
| Solubilidad de quitosán | Excelente (no hay partículas) | Muy Bueno (poca cantidad de partículas) | Bueno (cantidad de partículas regular) | Regular (gran cantidad de partículas) | Malo (no se disuelve en la solución) |
| Formación de burbujas | Nula (no existe presencia de burbujas) | Baja (poca cantidad de burbujas) | Media (cantidad moderada de burbujas) | Alta (presencia muy notable de burbujas) | Excesiva (gran cantidad de burbujas) |
| Tiempo de secado | Bajo (menor a 6 horas) | Medio (entre 6 y 8 horas) | Alto (de 8 a 10 horas) | Muy Alto (10 a 12 horas) | Excesivo (más de 12 horas) |

La puntuación se la realiza de forma subjetiva y con mutuo acuerdo al momento de decisión. Los factores como presencia de burbujas y de partículas no son factibles de medición a causa de la gran cantidad y de la irregularidad con la que estas se forman.

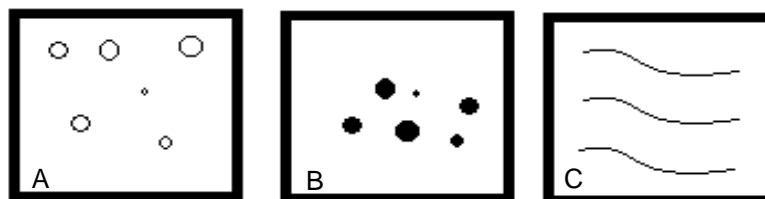


Figura 51 A) Visualización de burbujas. B) Visualización de partículas. C) Forma diluidas de la resina.

Tabla 11*Matriz de decisión para la elaboración de resina*

| Criterios | Alternativas | | |
|--------------------------------|--|---|--|
| | Quitosán 4% p/v en ácido acético 4%v/v | Quitosán 4% p/v en ácido acético 40%v/v | Quitosán 8% p/v en ácido acético 4%v/v |
| Solubilidad de quitosán | 4 | 3 | 5 |
| Formación de burbujas | 4 | 2 | 3 |
| Tiempo de secado | 5 | 2 | 3 |
| Total | 13 | 7 | 11 |

Al realizar la matriz de selección mostrada en la tabla 10, la opción escogida es quitosán 4% p/v en ácido acético 4%v/v.

3.4.6 Fabricación del material compuesto de resina de quitosán con fibras de PAN

Para la preparación del material compuesto se debe recordar la idea de la biomimesis que se desea obtener. Con este fin se obtuvieron las fibras de PAN. Además de la utilización de resina de quitosán para la aglomeración de las fibras en un solo cuerpo uniforme.

3.4.7 Procedimiento

Una vez obtenidas las fibras de PAN en el colector de placas paralelas, estas se colocan en un pedazo de papel aluminio y se procede a realizar cortes de 30 x 30 [mm] en la zona donde las fibras se encuentran alineadas.

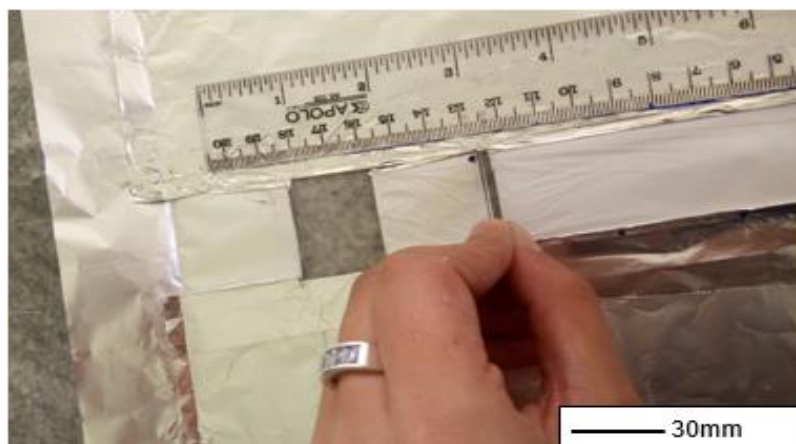


Figura 52 Corte de 30 x 30 [mm] en las fibras alineadas

Posteriormente se da lugar al proceso de moldeado, en el cual se utilizaran matrices en impresión 3D, en base a las dimensiones necesarias para la elaboración de las probetas posteriormente utilizadas para la determinación de propiedades mecánicas. Dichas probetas serán de 30 x 30 x 2 [mm].

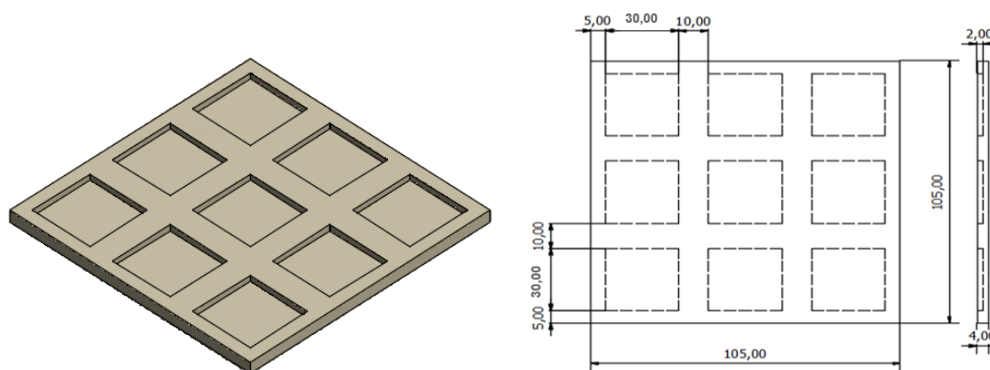


Figura 53 Matriz de probetas para elaboración del material compuesto

La matriz de la figura 50 muestra que por lote se conseguirán 18 muestras para ser analizadas. Esto debido a que es necesario eliminar los bordes por falta de confiabilidad, ya que no se puede asegurar que existan únicamente fibras alineadas. Además, de que cada una de las probetas serán divididas con la finalidad de que se obtenga las dimensiones indicadas para el ensayo según lo mencionado en el manual del reómetro HR-2 (Ver Anexo 7) las cuales son de 25 x 10 [mm].

En estas probetas es vertida la resina para ser acoplada con las fibras de PAN obtenidas por electrospinning como indica la figura 51.

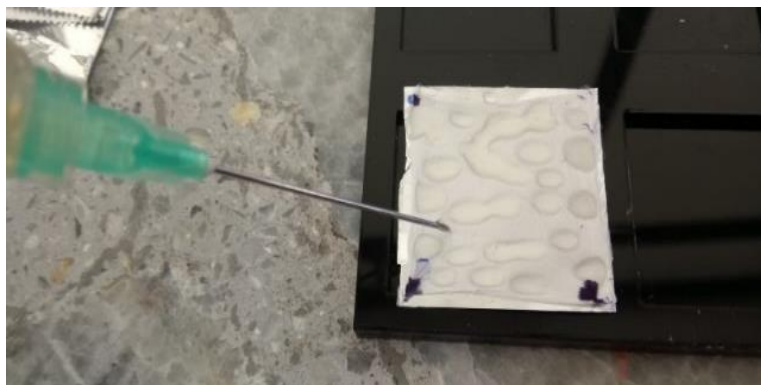


Figura 54 Inyección de Resina en fibras de PAN

La regla de mezclas para un material compuesto indica que $\sigma_c = f_f \sigma_f + f_m \sigma_m$, tomando esto en cuenta se seleccionó $f_f = 0.1$ y $f_m = 0.9$. Es decir para 10 gramos de material compuesto se requiere 1 gramo de fibras y 9 gramos de resina. (Askeland, 1998)

De la zona de fibras alineadas se corta con un bisturí un cuadrado de 30 x 30 [mm] que tiene un peso aproximado de 0.0255 [g] correspondiente al 0.1 del material compuesto y se las coloca en la matriz, cubriendo la superficie libre para la deposición de material compuesto.

$$\frac{m_f}{m_r} = \frac{0.1}{0.9} \quad (6)$$

$$\frac{0.0255}{m_r} = \frac{0.1}{0.9} \quad (7)$$

$$m_r = 0.2295 \text{ [gr]} \quad (8)$$

Realizando la relación con la densidad de la resina que es de 1.05 [g/ml]. Queda un volumen de 0.2186 [ml] a ser inyectados por medio de una jeringa. Finalmente se deja secar el material por 24 [h].

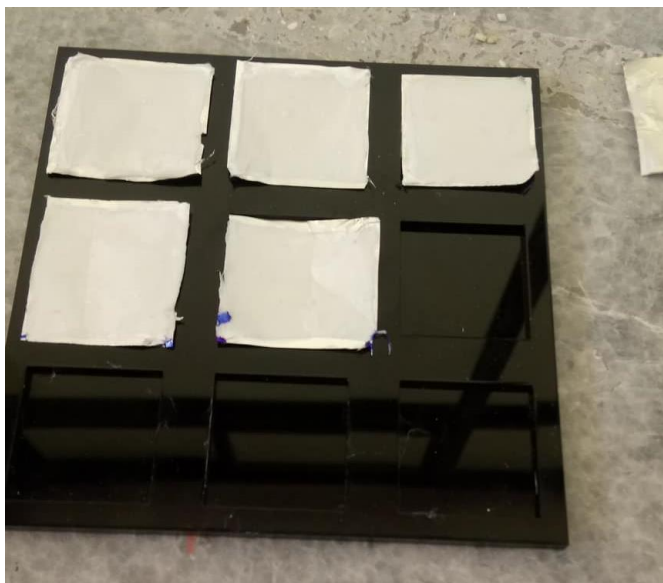


Figura 55 Material compuesto en la matriz

CAPITULO IV

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de la Chonta

Al comenzar con la extracción de las fibras de chonta se pudo identificar que su alineamiento en dirección longitudinal del tronco es casi paralelo y que en pocas cantidades estas fibras están torcidas, aplastadas entre sí e incluso interrumpidas. Por lo cual al compararlas con las obtenidas de forma experimental en el proceso de electrospinning, podemos afirmar que geoméricamente cumplen con su relación.

El método de extracción químico para las fibras vegetales es altamente invasivo. Las muestras obtenidas fueron gravemente afectadas en sus propiedades de forma sensorial. Como por ejemplo en su rigidez, anterior a un tratamiento químico invasivo las fibras de chonta prácticamente no flejaban, mientras que posterior al tratamiento, estas se doblaban bajo la acción de su propio peso.

El método de extracción mecánico que se aplicó demostró ser poco o casi nada invasivos o dañinos para las mismas. Por lo cual fue el método escogido para extracción de las fibras de chonta. Debido a la forma de extracción, estas fibras resultan en un proceso largo y de mucho cuidado para no afectar a las mismas y no tener alteraciones en su forma. Como se explicó en la sección 3.2.2 del presente trabajo

El método aplicado fue el resultado de la experimentación y experiencias obtenidas. Por lo cual se definió el uso de un cuchillo cortando en el mismo sentido de las fibras, con el fin de separarlas. Posteriormente se procedió a eliminar los residuos del aglomerante

propio del tronco por medio de raspados, estos últimos con alta delicadeza para no dañar las muestras obtenidas.

En los métodos de obtención de fibras de chonta, también se apreció que las fibras son un aglomerado de fibras más delgadas, lo que no fue considerado para la elaboración del material compuesto, debido a que se busca generar la estructura macroscópica del tronco de chonta a una escala microscópica.

4.1.1 Análisis del ensayo tracción de fibras de chonta

Las fibras ensayadas de forma individual, generan los siguientes datos de esfuerzo y deformación. Dichos datos al ser analizados es posible obtener la gráfica típica necesaria para un análisis a tracción, la gráfica de esfuerzo-deformación unitaria siguiente.

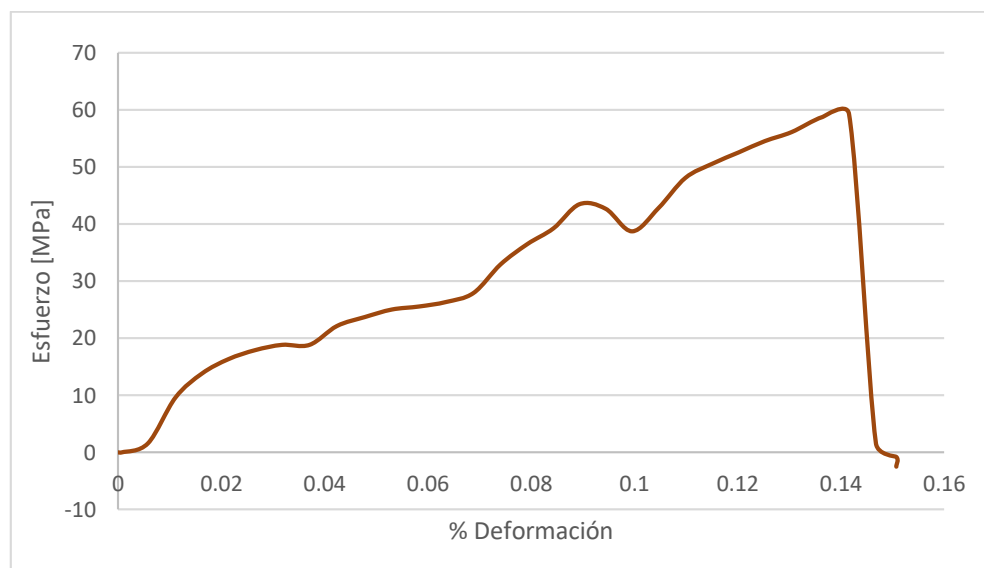


Figura 56 Gráfica esfuerzo-deformación de la fibra FBCH18

Las gráficas entre fibras varían unas de otras con una tendencia similar. Siendo este la densidad lineal propia de cada fibra. Por lo que al dividir el esfuerzo de cada fibra para su respectiva densidad, se aprecia una tendencia de todas las gráficas a converger.

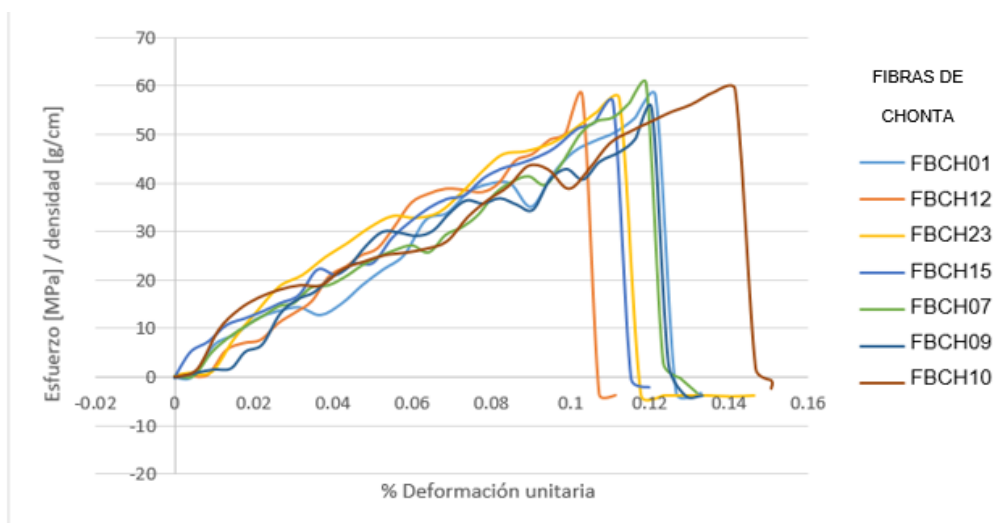


Figura 57 Gráfica Esfuerzo - deformación de varias fibras de chonta.

Como se puede apreciar en la figura 53, las gráficas de esfuerzo deformación son altamente parecidas al momento de realizar las correspondientes correcciones para su comparación. Dichas consideraciones permiten ver que las fibras de forma individual tienen un comportamiento muy parecido entre sí. Por lo cual la densidad lineal es un factor de alta importancia para el comportamiento de las mismas.

Una vez definido el comportamiento de las fibras. Se procede a realizar un análisis para determinar el esfuerzo de rotura de las mismas por medios estadísticos. Para lo cual se realizó el siguiente análisis.

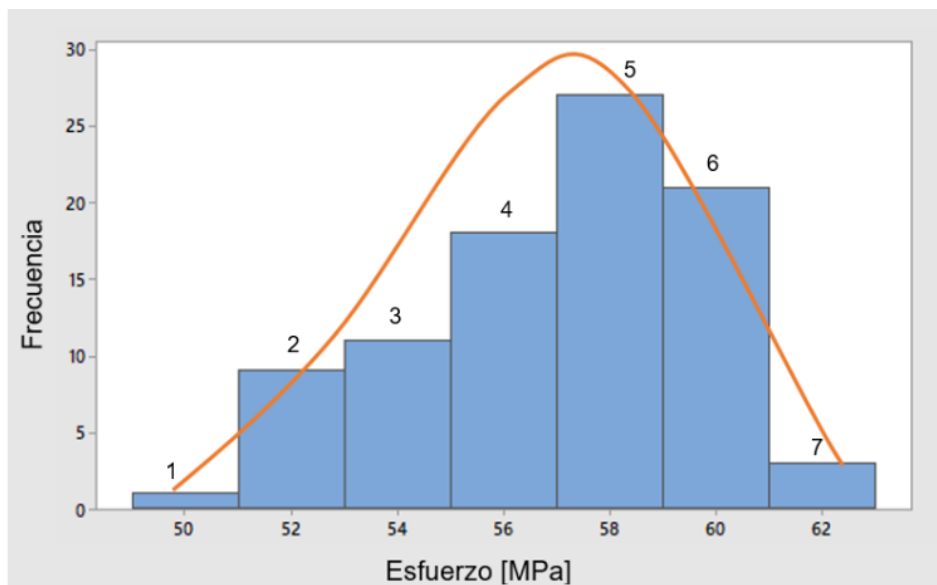


Figura 58 Frecuencia del esfuerzo de rotura obtenido de los ensayos de tracción.

El esfuerzo de rotura promedio obtenido es de 57.05Mpa. El cual coincide con la clase 5 de la figura 54 que tiene un rango de 56.86 a 58.42Mpa. Estos valores fueron obtenidos con un total de 120 ensayos. Los cuales fueron revisados y filtrados bajo parámetros de funcionamiento y resultados adecuados. Quedando así un total de 90 ensayos aceptados. La desviación estándar resultante de los 90 ensayos es de 2.65 [MPa]. El error que permite este modelo estadístico de distribución normal indica una confiabilidad del 96%. (Morales, 2012)

4.2. Verificación propiedades del material compuesto

En la elaboración de fibras se determinaron los valores óptimos para los factores A y B respectivamente de 17,9 [KV] y 3 [ml]. Por lo que en la formación del material se procede a combinar estos valores con los valores de fracción (C) máximo y mínimo, teniendo así dos combinaciones para el moldeado del material compuesto.

Para realizar la verificación de propiedades es necesario realizar un previo estudio de las variables A, B y C, planteadas en la sección 3.3.2

4.2.1 Estudio de variables del material compuesto

Las variables son relacionadas con los valores obtenidos del esfuerzo de fluencia de las muestras del material compuesto. Con ello se realiza un análisis de afectación a las propiedades mecánicas.

Para lo cual siguiendo el método de Shainin se realiza un análisis de la relevancia de las variables en relación a sus condiciones máximas y mínimas. El cual podemos verlo en la tabla 12.

Tabla 12

Comparación de significancia de factores variables del material compuesto

| <i>Muestra</i> | <i>Combinación</i> | <i>% Deformación</i> | <i>Esfuerzo (MPa)</i> | <i>Módulo de Elasticidad (MPa)</i> |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| MC1 | A+B-C+ | 6.13 | 29.54 | 4.82 |
| MC2 | | 7.13 | 28.71 | 4.03 |
| MC3 | | 6.11 | 28.98 | 4.74 |
| MC4 | | 5.78 | 29.65 | 5.13 |
| MC5 | | 6.54 | 28.89 | 4.42 |
| Promedio | | 6.34 | 29.15 | 4.63 |
| Desviación estándar | | 0.52 | 0.42 | 0.42 |
| MC6 | A+B-C- | 6.18 | 29.95 | 4.84 |
| MC7 | | 6.80 | 28.91 | 4.25 |
| MC8 | | 5.35 | 30.05 | 5.61 |
| MC9 | | 5.55 | 30.41 | 5.48 |
| MC10 | | 5.57 | 29.57 | 5.31 |
| Promedio | | 5.89 | 29.78 | 5.10 |
| Desviación estándar | | 0.60 | 0.57 | 0.56 |

La variación que se hizo para la verificación de la afectación en el esfuerzo de fluencia del material compuesto fue en el parámetro C, puesto a que en la sección 3.3.3 se

determinó que los factores A y B van directamente relacionados con la fabricación por electrospinning de fibras de PAN. Determinando que para la fabricación del material compuesto en orden a la aplicación, la combinación de factores ideal es A+B-C+ como se muestra en la figura 57.

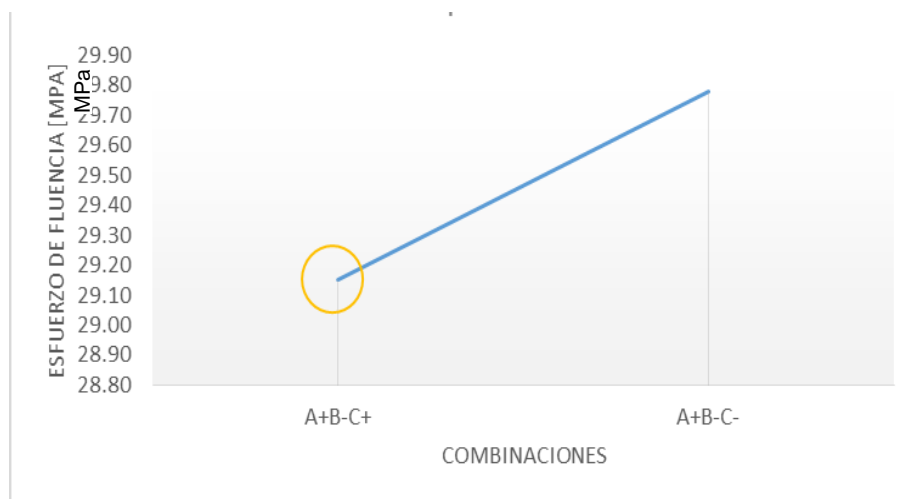


Figura 59 Gráfica comparativa de resultados de esfuerzo del material compuesto obtenido por combinación de factores

Una vez revisados los factores para la elaboración del material compuesto y verificación de que el proceso utilizado es el adecuado. Se procede a realizar una comparación de las propiedades mecánicas de la resina al ser agregado el refuerzo de fibras.

4.2.2 Análisis de las propiedades mecánicas

En el análisis de las propiedades mecánicas que se realizó mediante el modelo de diseño experimental de Shainin como se puede observar el punto anterior 4.3.1 y con fin de realizar una comparación de las gráficas esfuerzo – deformación obtenidas tanto de fibras, resina y material compuesto.

4.2.3 Esfuerzo de Fluencia de las fibras de PAN

En la figura 58 podemos apreciar un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las fibras sintéticas de PAN. En la cual las muestras fueron tratadas tal como se lo explica en el punto 3.3.4 correspondiente a ensayos mecánicos.

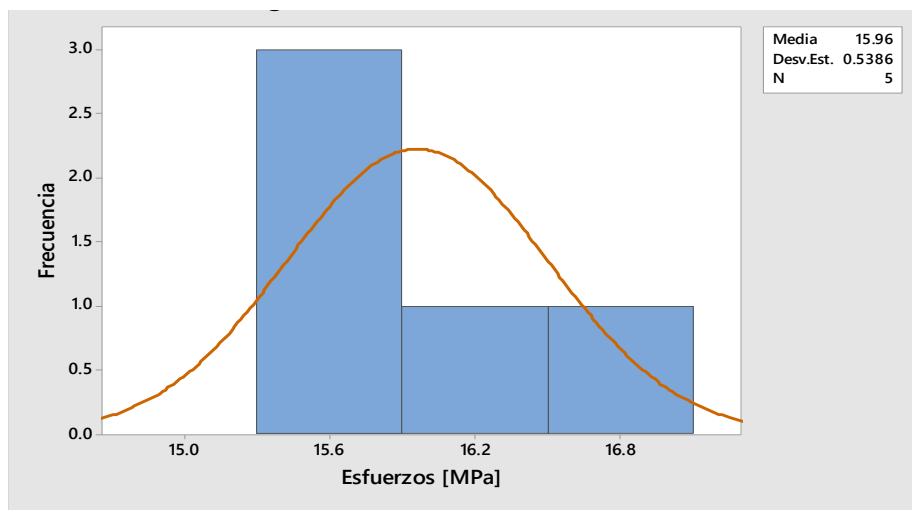


Figura 60 Histograma de esfuerzos de fibras de PAN

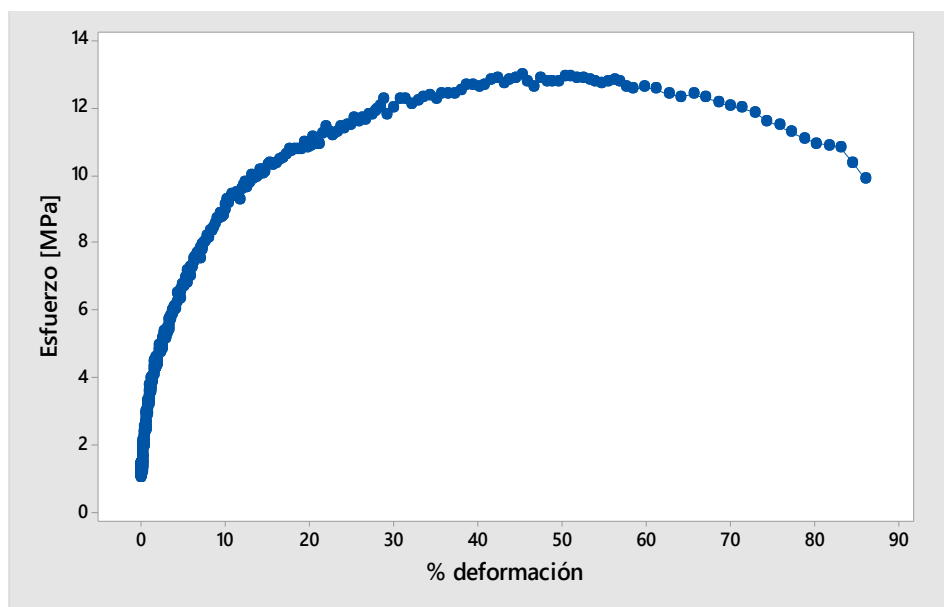


Figura 61 gráfica esfuerzo – deformación de fibras de PAN

El comportamiento de las fibras de PAN como se puede observar en la figura 59 es muy similar al comportamiento de un termoplástico. En la cual se aprecia una pendiente inicial alta para ser un elastómero y baja para ser frágil. Además su deformación continúa teniendo una tendencia a la forma de la gráfica de los metales. Por lo que se puede afirmar que el comportamiento natural del PAN se mantiene.

4.2.4 Esfuerzo de fluencia de la resina de quitosán

Como ya se explicó en la sección 3.3.3 se realizó una matriz de selección para utilizar la resina que se ajuste mejor a las necesidades del proyecto, la resina seleccionada fue quitosán 4% p/v en ácido acético 4%v/v , las muestras de esta resina fueron ensayadas mostrando los siguientes resultados.

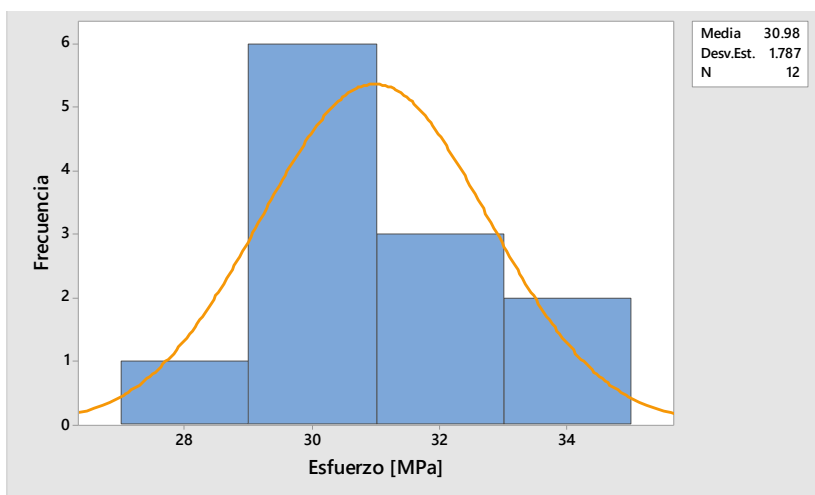


Figura 62 Histograma de esfuerzo de la resina de quitosán 4% p/v en ácido acético 4%v/v

Teniendo como resultados un esfuerzo de fluencia promedio de 30.98 [MPa] con una desviación estándar de 1.78 [MPa].

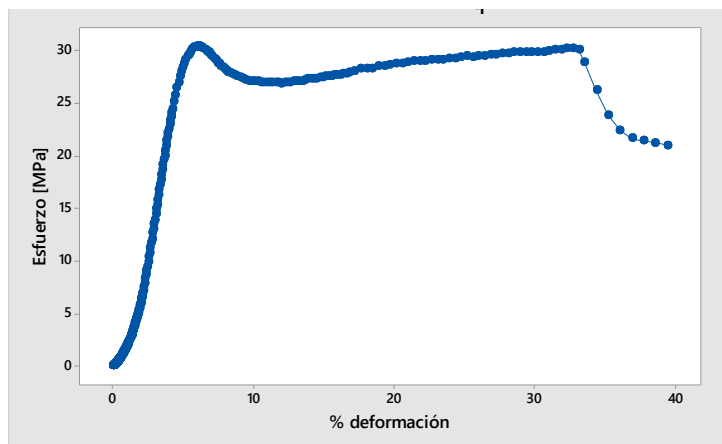


Figura 63 gráfica esfuerzo – deformación de resina de quitosán

El comportamiento de la resina es muy similar al de un material frágil, pues como se observa en la figura 61, esta posee una zona elástica reducida mostrando una deformación menor del 10% y una ruptura brusca.

4.2.5 Esfuerzo de fluencia del material compuesto

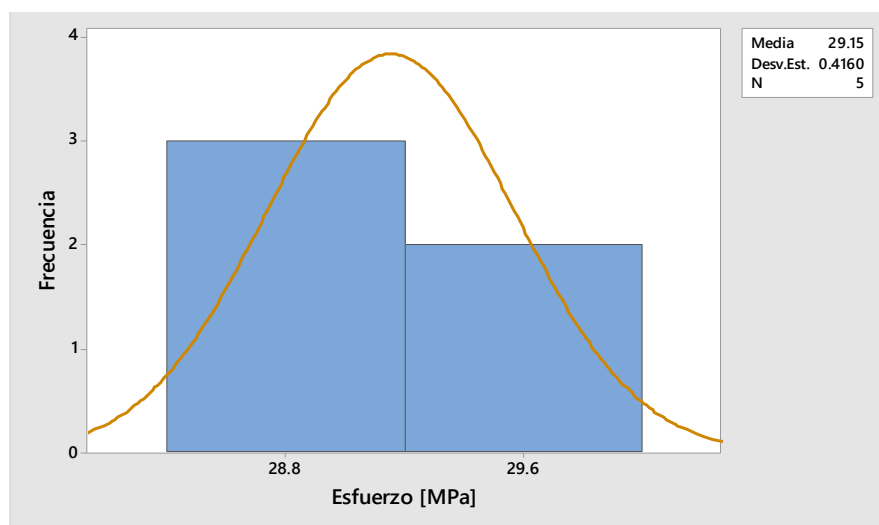


Figura 64 Histograma de esfuerzo de material compuesto

Como se observa en la figura 62 la tendencia indica que el esfuerzo del material tiene un valor promedio de 29.15 [MPa] con una desviación estándar de 0.41 [MPa].

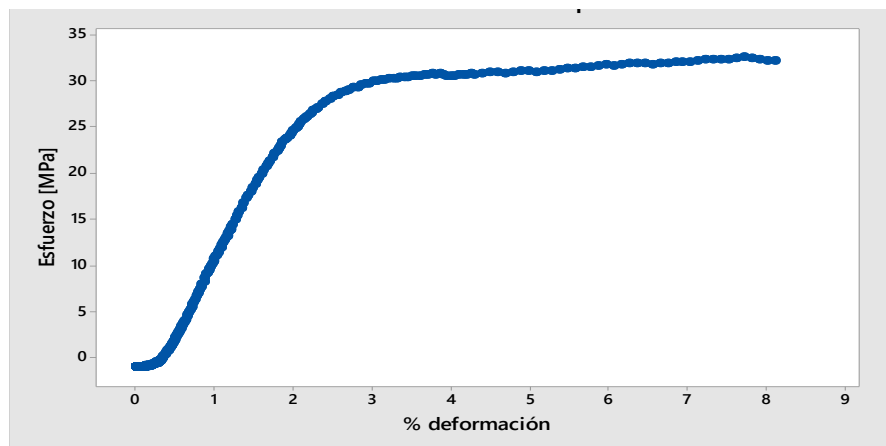


Figura 65 gráfica esfuerzo – deformación de resina del material compuesto A+B-C+

Como se observa en la gráfica, el comportamiento del material compuesto es una combinación entre el comportamiento de las fibras de PAN y la resina de quitosán.

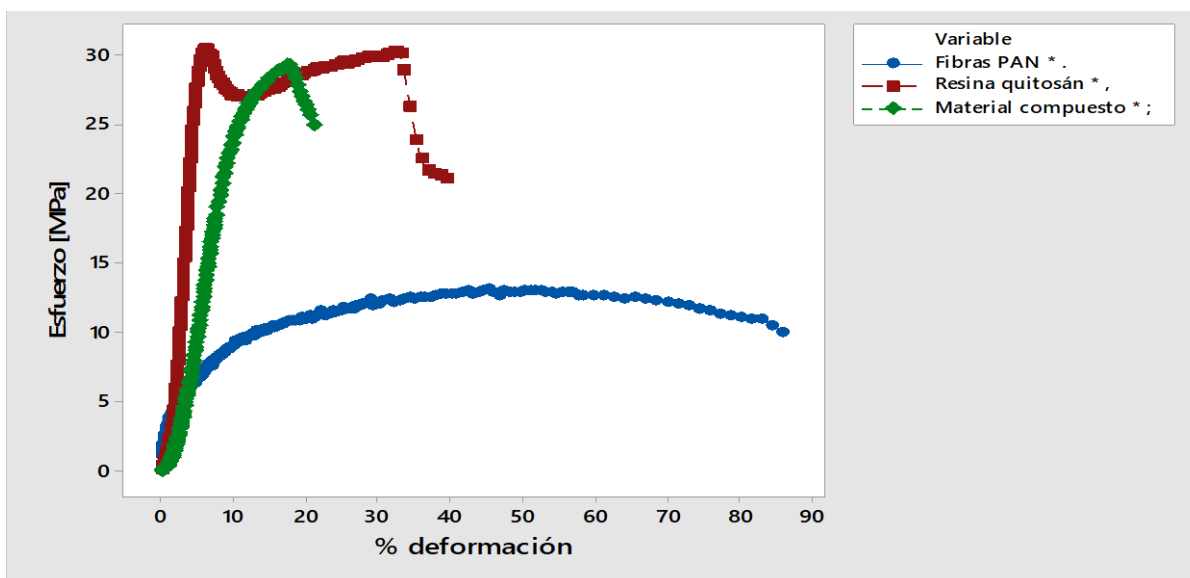


Figura 66 gráficas conjuntas de esfuerzo deformación de las fibras (azul), resina (rojo) y el material compuesto (verde)

4.3. Verificación de la regla de mezclas

Teniendo presente que las fibras están alineadas y que se escogió una fracción de fibras de 0.1 y de 0.9 de resina, vamos a aplicar la regla de mezclas para materiales compuestos por fibras dada por la ecuación:

$$\sigma_{mc} = f_f \sigma_f + f_r \sigma_r \quad (9)$$

El valor promedio del esfuerzo de fluencia de las fibras es $\sigma_f = 15.96$ [MPa]

El valor promedio del esfuerzo de fluencia de la resina es $\sigma_r = 30.98$ [MPa]

$$\sigma_{mc} = 0.1(15.96) + 0.9(30.98) \quad (10)$$

$$\sigma_{mc} = 29.48 \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Para la obtención del error el valor aproximado que se toma es el valor promedio obtenido mediante los ensayos, por lo que $\sigma_{mc} = 29.15$ [MPa]

$$e = \frac{|V_{real} - V_{aprox}|}{V_{real}} \times 100\% \quad (12)$$

$$e = \frac{|29.48 - 29.15|}{28.48} \times 100\% \quad (13)$$

$$e = 1.17\% \quad (14)$$

La diferencia entre el valor real y el aproximado que indica el error está dentro rango de valor aceptado por el método científico por lo que se puede afirmar que la regla de mezclas para este material compuesto con fibras de PAN al 15% y resina de quitosán se cumple.

4.4. Análisis de las cualidades conjuntas

Las propiedades químicas de un material compuesto van directamente relacionado con las propiedades inherentes de los elementos que lo componen. Para este caso se tiene la resina de quitosán en un 90% y las fibras de PAN en un 10%.

- **Propiedades conjuntas**

Al realizar un análisis de las propiedades fisicoquímicas de ambos elementos podemos apreciar que una de las grandes diferencias es la resistencia a agentes específicos. En el caso de la resina de quitosán, esta se degrada al estar expuesta por tiempos extensos al peróxido de hidrogeno o ácidos diluidos. Mientras que el PAN soporta el contacto de estos agentes. Por lo que aporta a que el material compuesto logre resistir estos agentes.

Para alcanzar esta meta se organiza el refuerzo del material con el mismo concepto que el tronco de chonta. En el cual las fibras están aglomeradas en la parte externa del tronco, tal como se aprecia en la figura 65, e impiden que el exceso de humedad se filtre al interior del mismo. Así mismo las fibras son colocadas en la parte que tendría contacto con los agentes que degradan al quitosán y así se evita una degradación de la matriz.

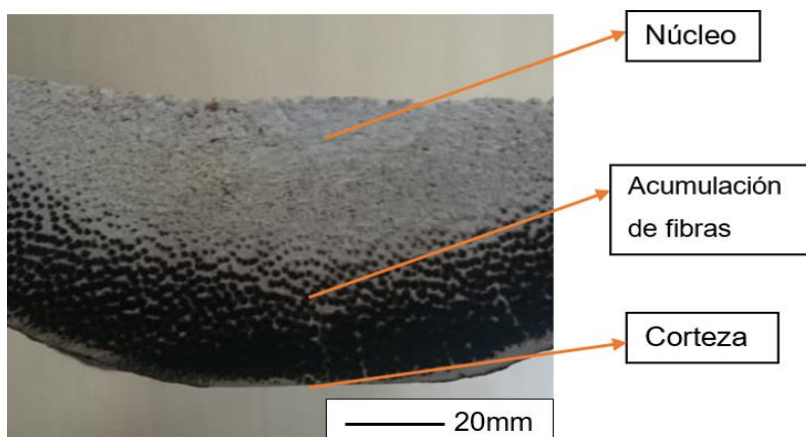


Figura 67 Vista transversal del tronco de chonta.

4.5. Verificación de la biomimesis de la chonta

Como ya se explicó en el literal 2.1 del estado del arte, la biomimesis consiste en la obtención por medio de un proceso artificial un elemento de la naturaleza, con el fin de resguardar los recursos naturales a su vez explotar sus mejores propiedades.

Para cumplir con este fin se realizó un material compuesto con fibras de electrospinning y resina de quitosán en el que cuál se puede observar la biomimesis de la chonta pues tal como lo indica la figura 66 esta se conforma por una capa delgada de resina más fibras y en el centro la mayor concentración de resina.

Mediante el uso del microscopio de barrido de barrido del laboratorio de biotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se puede observar tal como lo indica la figura 67 que transversalmente el material compuesto cumple con tener las características del tronco de chonta

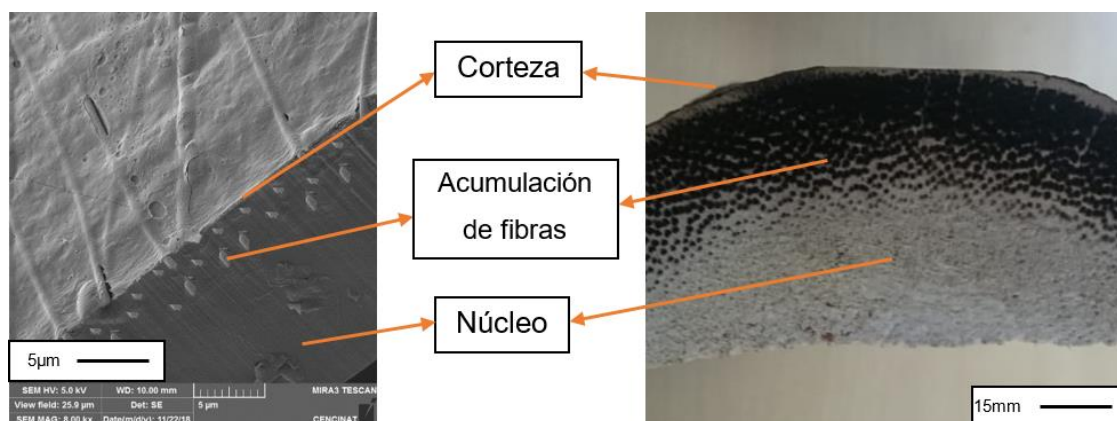


Figura 68 (Izquierda) sección transversal material compuesto X100.
 (Derecha) sección transversal tronco de chonta.

En las secciones transversales de los materiales natural y sintético existe una aglomeración de fibras en una de las caras. Lo cual genera que dicha superficie tenga propiedades distintas a las de su contraparte. En esta sección se verificó el porcentaje de fibras que existe en cada material mediante el software AutoCAD 2017 (AutoDesk, California, USA), realizando una réplica de cada imagen diferenciando las fibras de la resina para posteriormente medir el área de resina y el área de fibras. Obteniendo un porcentaje de fibras de 8.3% en el material compuesto sintético. Mientras que en el material natural (chonta) un porcentaje de fibras de 30.8%.

El porcentaje obtenido en el material compuesto sintético comprueba la relación mencionada anteriormente en el punto 3.3.1 de 8 a 10%. No fue posible aumentar el porcentaje para alcanzar el del material natural por limitaciones tecnológicas.

En el sentido longitudinal también se puede observar el cumplimiento de la biomimesis de la chonta. Pues como se muestra en la figura 67 la chonta posee fibras alineadas y no alineadas recubiertas por la resina, tal y como se obtuvo en la fabricación del material compuesto sintético con fibras de PAN al 15%.

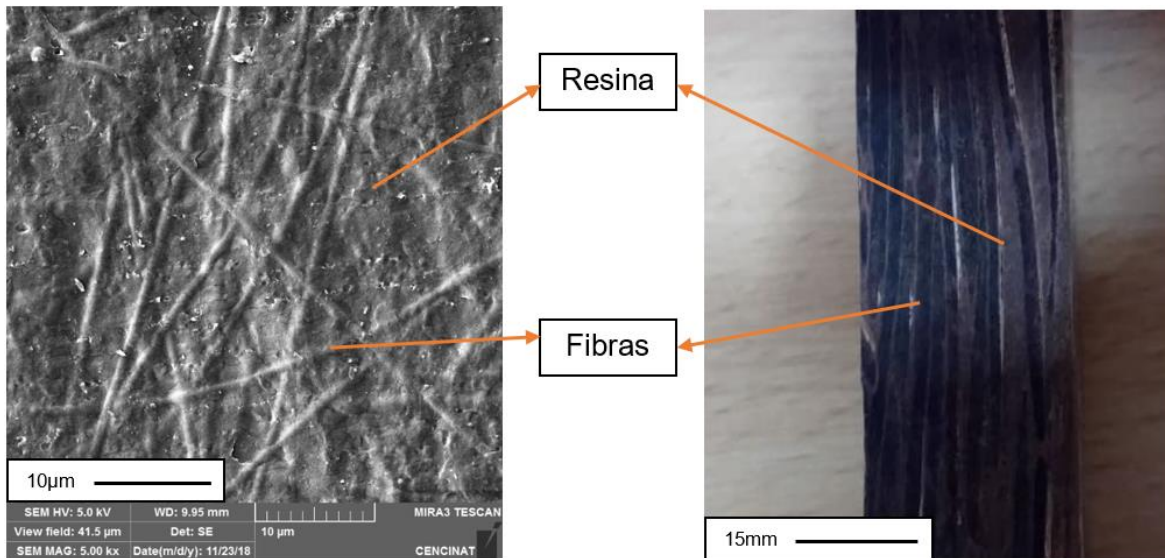


Figura 69 Izquierda) Sección longitudinal material compuesto.
Derecha) vista sección longitudinal del tronco de chonta.

4.5.1 Homogeneidad del material compuesto

Para verificar la homogeneidad del material compuesto se presenta un análisis del espesor del mismo.

4.5.2 Análisis del espesor

Para la comprobación del proceso de moldeo se verifica la variación del espesor, para lo cual es necesario realizar un análisis de varianza del espesor de las muestras, las cuales fueron medidas con un micrómetro electrónico (Mauser, Múnich, Alemania). Con lo cual se midieron un total de 24 muestras en 5 puntos distintos, obteniendo los resultados mostrados a continuación.

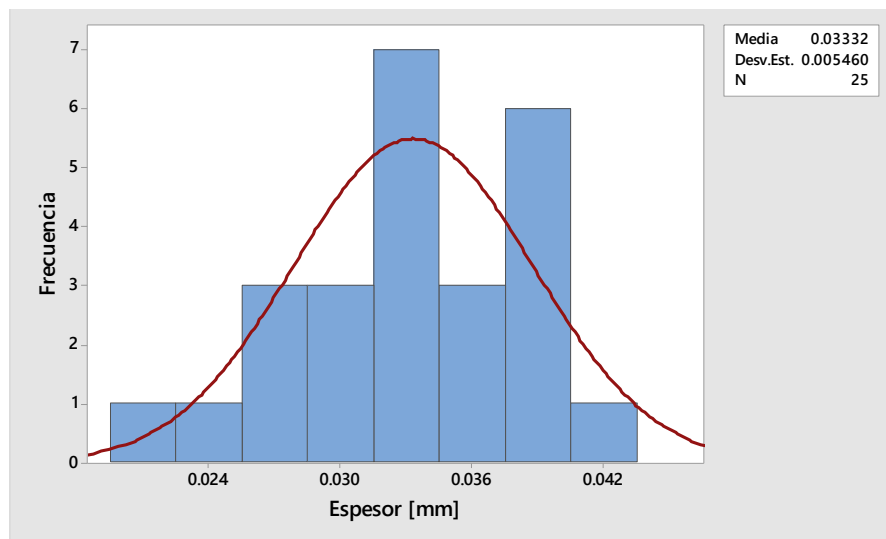


Figura 70 Histograma de espesores de material compuesto

Al analizar los valores de espesores podemos apreciar un promedio de 0.033 [mm] con una desviación estándar de 0.0054 [mm]. Dando así como resultado que el moldeado del material es el adecuado.

4.6. Propuesta de aplicación

Las cualidades que brinda la chonta en la construcción además de dar soporte estructural son el mantener seco el interior debido a la alta humedad del ambiente. Para lo cual la chonta se ha desarrollado para tener una alta concentración de fibras en su exterior, creando así una superficie muy densa que la hace impermeable.

De la misma manera el material compuesto desarrollado es capaz de recrear la misma cualidad. Sino que en este caso para dar resistencia a agentes capaces de degradar la resina de quitosán, como es el caso del peróxido de hidrogeno.

Dada esta premisa se plantea la aplicación de este material en la creación de empaques para tuberías y mangueras con aplicación de peróxido. El cual es aplicado en la industria alimenticia y hospitalaria.

En el caso de la industria alimenticia, el peróxido de hidrogeno es utilizado para crear una protección ambiental y desinfección del envase al ser llenado con el producto.

Para el caso de la industria hospitalaria el peróxido de hidrogeno es aplicado para la desinfección de utensilios quirúrgicos, además de permitir crear atmosferas puras y de bajo contenido de oxígeno.

En las diversas industrias los sellos o empaques aplicados con mayor frecuencia son de EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M) el cual es flexible y resistente al impacto. Sin embargo se degrada con facilidad ante estar expuesto por largos periodos al peróxido de hidrogeno. Por lo que se ha optado por la aplicación de empaques de PTFE (politetrafluoroetileno) más conocido por el nombre de teflón, el cual tiene una alta resistencia a los agentes que degradan a los plásticos. Sin embargo su costo es muy elevado y también es muy rígido. El hecho de ser un elemento muy rígido hace que su manejo deba ser de mayor cuidado.

Para resolver estos inconvenientes es factible desarrollar empaques del material compuesto desarrollado en el presente trabajo. El cual combina el bajo costo de la resina de quitosán con su alta resistencia al impacto y le agrega flexibilidad con las fibras de PAN, además de que las fibras crean una superficie resistente a agentes que podrían degradar al quitosán con es el caso del peróxido de hidrogeno.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se evidencio que el tronco de chonta se compone de fibras alargadas en su parte externa, aglomeradas por resina natural del árbol. Estas fibras están alineadas de forma vertical al tronco dándole gran resistencia. Esto genera una especie de tubo a lo largo del tronco que le da mayor rigidez.
- Se determinó que el método adecuado para la extracción de fibras de chonta es el método mecánico por cizallamiento, pues al utilizar el método químico de hidróxido de sodio (NaOH), se afectan sus características mecánicas. Las fibras que se extrajeron con dicho proceso químico estaban debilitadas.
- El alineamiento de las fibras naturales de forma vertical, genera que el cizallamiento en sentido longitudinal sea el mejor método de extracción de las mismas, ya que obliga a que estas se separen entre sí y de la resina natural. Permitiendo extraerlas sin dañarlas.
- Las fibras de electrospinning obtenidas mediante un colector de placas paralelas permite que éstas estén de forma alineada, es decir paralelas entre sí, perpendiculares a la superficie entre placas y formando una línea recta.
- El voltaje aplicado para la realización del proceso de electrospinning depende de varios factores, entre los cuales están la distancia desde la punta del capilar hasta el colector, el caudal, entre otros. Siendo el más relevante el material utilizado, tal es el caso

de PVP que su voltaje varió entre 6 a 8 [KV] mientras que para el PAN su voltaje varió entre 14 y 18 [KV].

- Los parámetros óptimos obtenidos por experimentación para la obtención de fibras de PVP son voltaje 7,9 [KV], caudal de 3 [ml/h], distancia al colector de 15 [cm] y separación de las placas de 2,7 [cm]. Mientras que los parámetros aplicados para la obtención de fibras de PAN son voltaje 17,9 [KV], caudal de 1,32 [ml/h], distancia al colector de 20 [cm] y separación de placas de 3 [cm].

- La resina de quitosán es un elemento con alta resistencia aproximadamente de 30.98 [MPa] y gran facilidad de maniobrabilidad al ser degradada en ácido diluido. Su oxidación se produce a la intemperie permitiendo la obtención de un material seco.

- El esfuerzo de fluencia promedio obtenido de las fibras de PAN es de 15,96 [MPa] a tracción, obtenido bajo la combinación A+ (voltaje de 17.9 [KV]) y B- (deposición de 3 [ml]). El cual fue determinado con un total de 5 muestras para verificar la repetitividad.

- El material compuesto con una relación de mezcla de los elementos de 0.10, tiene un esfuerzo de fluencia promedio de 29,15 [MPa]. Siguiendo la regla de mezcla para materiales compuestos el esfuerzo de fluencia calculado es de 29,48 [MPa]. Lo cual da un error entre los valores del 1.17%.

- La biomimética de la chonta representada por el material micrométrico se realizó mediante la verificación geométrica tanto de la sección transversal como de la longitudinal. Consiguiendo así propiedades mecánicas y químicas conjuntas aportadas por ambos elementos del material compuesto.

5.2. Recomendaciones

- La extracción por medios mecánicos debe ser utilizada para no afectar gravemente las propiedades mecánicas de las fibras.
- Para la utilización de reactivos químicos se recomienda siempre revisar los protocolos de seguridad y manejo de los mismos.
- El manejo del proceso de electrospinning debe hacerse bajo los estándares de los equipos y seguir los protocolos ya establecidos para su elaboración.
- Es importante establecer cuáles son los parámetros óptimos en la generación de fibras mediante el proceso de electrospinning, pues para mantener repetitividad hay que mantener los mismos parámetros en cada proceso de elaboración de fibras.
- Se recomienda ante cualquier proceso experimental controlar la trazabilidad de cada uno de los subproductos obtenidos y del producto final. Para conocer el proceso adecuado de producción
- Los equipos, herramientas e instrumentos utilizados deben ser lavados y secados inmediatamente después de realizar un proceso de electrospinning, con el fin de reducir o eliminar la posibilidad de taponamientos por residuos de material.
- La compatibilidad entre elementos de un material compuesto es un factor que se debe experimentar y analizar para tener una correcta adherencia, así como una conjunción de sus propiedades.
- Los materiales compuestos abren campos de aplicación para los materiales poco comunes, siendo un campo de estudio e investigación con gran amplitud de posibilidades.

- El material compuesto desarrollado en el presente trabajo puede ser aplicado con fines de empaques para juntas de tuberías con elementos de oxidación para plásticos comunes como son el peróxido de hidrogeno y el ácido nítrico. Sin embargo se recomienda realizar más estudios para confirmar su aplicación de manera comercial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Yangüez Bernal, J. A. (1973). *Distribución, importancia económica y domesticación de la palma chonta* .
- A Santos , F., de Queriróz, J. H., & Colodette, J. L. (2012). Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Scielo*, 30-38.
- Agarwall, S., Greiner , A., & Wendorff, J. (2013). Functional materials by electrospinning of polymers. *Progress in Polymer Science*, 963-991.
- Anales Científicos . (2005). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del bambu (bambusa vulgaris), de tres años de edad y proveniente de las plantaciones ubicadas en la ribera de la margen derecha del río Chama, Municipio Francisco Javier Pulgar, Estado de Zulia, Venezuela. Zulia, Venezuela: Agraria.
- Askeland, D. R. (1998). *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Missouri: Thomson Editores.
- Bhardwaj, N., Kundu, & Subhas. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *vol. 28*, 325-347.
- Bonilla, O. (19 de Mayo de 2009). *Repositorio Digital EPN* . Obtenido de EPN. Biblioteca Virtual : www.epn.edu.ec
- Bonilla, O., Guerra, S., Guevara, V. H., & López, C. (2009). Extracción y caracterización de la fibra de hoja de la lengua de suegra (Sansevieria trifasciata). *Revista Politécnica*, 167-178.
- Cabezas , S. (24 de Abril de 2017). *Cinta adhesiva Gecko.Biomimética*. Obtenido de Biomimética: <http://biomimetica4.blogspot.com/2017/04/cinta-adhesiva-geco.html>

- Cajero Vásquez, P., Meléndez Lira, M., Camacho López, M. Á., Castillo Rubí, M. A., & Gonzalez Díaz, F. R. (2010). *Armazones celulares por la técnica de electrohilado. Vol 1, 3-5.*
- Calderón, J., & Martínez, H. (2012). *Obtención de fibras poliméricas a partir de la técnica de "Electrospinning" para aplicaciones biomédicas.* Cali: Universidad autónoma de occidente.
- Calzón, A. (2016). *Desarrollo de un equipo de electrospinning para obtención de nanofibras alineadas de recombinámeros tipo elastina.* Universidad de Valladolid.
- Choi, J. S., Lee, S. W., Jeong, L., Bae, S. H., Min, B. C., Youk, J. H., & Park, W. H. (2004). *Effect of organosoluble salts on the nanofibrous structure of electrospun poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate).* International Journal of Biological Macromolecules,.
- Cisneros, L. R. (12 de Abril de 2014). *Sistema constructivo estructural a partir de la palma de chonta irritea deltoidea.* Loja, Loja, Ecuador .
- Coppedge, D. (27 de Marzo de 2010). *Biomimética.Creacionismo.* Obtenido de Creacionismo: <http://www.creacionismo.net/genesis/Art%C3%ADculo/la-biomim%C3%A9tica-una-ciencia-para-hoy>
- Del Cañizo, J. A. (2011). *Palmeras Todos los Géneros y 565 especies.* México: Mundi-Prensa.
- Doblaré Castellanos, M. (12 de Septiembre de 2014). *Ingeniería Biomimética e Ingeniería Tisular.* Sevilla, España.
- Doshi, H., & Reneker, D. H. (1995). *Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers.* Journal of electrostatics, 151-160.

- Doshi, J., & Reneker, D. H. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of Electrostatics*, 35, 151–160.
- Dotti, F., Varesano, A., Montarsolo, A., Aluigi, A., Tonin, C., & Mazzuchetti, G. (2007). Electrospun porous mats for high efficiency filtration. *Journal of Industrial Textiles*, 37, 151-162.
- Duque, L. M., Rodríguez, L., & López, M. (2014). Electrospinnig, la era de las nanofibras. *Revista iberoamericana de los polímeros*, 1-2.
- Elsevier. (2015). "Elsevier". Scopus.
- Estrada, M. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Bogota: Universidad de los Andes.
- Favret, E. A. (2008). *Biomimética, tecnología inspirada en la naturaleza*. Instituto de Suelos, cir n. int a. CONICET.
- Fernández, A. (2015). Diseños biomiméticos de luz natural para edificios en Ecuador. *CONGRESO INTERNACIONAL I+D+i EN SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA INER 2015*, 123.
- FibraPlus. (3 de Mayo de 2018). *Materiales Compuestos*. Obtenido de FibraPlus: <http://www.fibraplus.com/tag/materiales-compuestos-tecnologia-de-los-plasticos/>
- GLASSER, W. (1997). *Preparation of N-acylglucosamine polymers from chitosan for chitin fibers and filaments*. Canada: Canada Pat CA.
- Glorieta González Palencia. (2007). *LEONARDO DA VINCI*. Cuenca: BIBLIOTECA PÚBLICA DE CUENCA.

- Gómez Tobar, L. C. (2015). *Obtención experimental de nuevas fibras vegetales*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- González, A. M., & Arbo, M. M. (2013). *Botánica Morfológica. Morfología de plantas Vasculares*. Obtenido de Botánica Morfológica: www.biologia.edu.ar/botanica
- González, C., Valbuena, A., Celis, B., Perentena, L., & Colina, M. (2015). DEGRADACIÓN OXIDATIVA DE QUITOSANO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 43-68.
- Google. (19 de 11 de 2018). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/EI+Pangui/@-3.6857078,-79.4608034,104653m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x91cc7edc2b7278fb:0xdd6d1d40b03941f4!8m2!3d-3.6273774!4d-78.5859566>
- Google.inc. (s.f.). *Pinterest*. Obtenido de Pinterest: <https://www.pinterest.es/>
- Gupta, A., Paliwal, D., & Bajaj, P. (1998). *Melting behavior of acrylonitrile polymers*. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Haider, A., Haider, S., & Kang, I.-k. (2015). *A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potencial applications og nanofibers in biomedical and biotechnology*. Riyadh, Saudi Arabia: King Saud University.
- Hernández, L. J., Martínez Correa, N., Gómez, I. N., Espejo Serena, A., López Ferrari, R., & Ceja Romero, J. (s.f.). *Universidad Autónoma Metropolitana*. Obtenido de <http://feriacienciasuami.com/semana/documentos/fibrasvegetales.pdf>
- Herrera, I. (2008). *La Vivienda Shuar al oriente ecuatoriano*. Cuenca: UTPL.

- Hidalgo, I., Ramirez, J., Sabino, M., & Müller, A. (2009). Obtención de estructuras tipo andamio de poli(ácido) láctico para bioingeniería mediante electrospinning. *vol. 1*, 1-2.
- Higuera, J. (2015). *Poliacrilonitrilo (PAN)*. Valencia: Instituto Universitario de Tecnología de Valencia.
- Hossain, M., Gong, R., & Rigout, M. (2016). *Effect of polymer concentration on electrospinning of hydroxypropyl- β -cyclodextrins/PEO nanofibres*. Manchester: White Rose University Consortium.
- Huang, Z.-M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning. *Composites Science and Technology*, 63, 2223–2253.
- J., C., Angamma, H., S., & Jayaram. (s.f.).
- Jalili, R., Morshed, M., & Ravandi, S. A. (2006). Fundamental Parameters Affecting Electrospinning of PAN Nanofibers as Uniaxially Aligned Fibers. *Wiley InterScience* (www.interscience.wiley.com), 4350-4357.
- Jaramillo, N. (2016). *Efecto del proceso de mercerización en el comportamiento de la fibra de hoja de piña (FHP) como refuerzo en una matriz de polipropileno*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Kim, J. S., & Reneker, D. H. (1999). Mechanical Properties of Composites Using Electrospun Nanofibers . *POLYMER COMPOSITES*, 50-65.
- Laranjeira, M., & Favere, V. (2009). *Quim. NOVA*, 672.
- Ledezma, A., Romero, J., Hernández, M., Moggio, I., Arias, E., Padrón, G., . . . Torres, S. (2014). *Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso*

de nopal (Opuntia sp.) y su electrohilado polimérico. Chihuahua, México: Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales.

Lucena, M. P., Suarez, A., & Zamudio, I. (2009). Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronauticas. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1107-1114.

Medina, P., Cruz, E., & Restrepo, J. (Agosto de 2007). APLICACIÓN DEL MODELO DE EXPERIMENTACION SHAININ EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA. *Scientia et Technica Año XIII*, 305-310.

Melo Altamirano, J. G. (2018). *Obtención de fibras submicrométricas de fibroína de seda con sangre de drago (Croton Lechleri Müll) para aplicaciones biomédicas a través de la técnica de electrohilado*. Matriz Sangolquí.: Carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. .

Merriam-Webster. (19 de Abril de 2018). *Dictionary Merriam- Webster*. Obtenido de Merriam-Webster, incorporated: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetics>

Morales, P. (2012). *Tamaño necesario de la muestra: ¿Cuántos sujetos necesitamos?* Madrid: Facultad de Humanidades - Universidad Pontificia Comillas.

Moreta, M. (12 de Marzo de 2016). Chonta, caña guadúa y las hojas de toquilla en casas kichwas. *El Comercio*, pág. 20.

Muñoz Jimenez, L. A. (2006). Planta de procesamiento de chonta Mocoa-Putumayo. San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.

Musialik, F. E. (14 de Abril de 2010). *El blog de los cuchillos artesanales* . Obtenido de Cuchillos Artesanales : <http://cuchillosamano.blogspot.com/>

- Narvaez Cadena, D. A. (2017). *Influencia de solventes orgánicos en la morfología y propiedades mecánicas de fibras de polivilpirrolidona (PVP) fabricadas mediante Electrospinning*. Matriz Sangolquí.: Carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. .
- Nature Inspire Us. (30 de Junio de 2017). *Nature inspire us* . Obtenido de Nature Inspire Us: <https://natureinspireus.wordpress.com/category/materiales/>
- Navarro, J. A., Galeano, G., & Bernal, R. (24 de Junio de 2014). *Manejo de la palma barrigona o chonta (Iriartea deltoidea Ruiz & Pav.) en el pendinete amazonico colombiano y perspectivas para su cosecha disponible* . Colombia .
- Palacios, W. A. (2011). *Familias y géneros arbóreos del Ecuador* . Quito: Ministerio del Medio ambiente.
- Parras, D., & Domínguez, M. (2016). *Recursos formales de la naturaleza como fuente de inspiración en diseño de producto*. Cartagena: Anuario de Jóvenes Investigadores, vol. 9.
- Pataquiva Mateus, A. Y. (2014). *Técnicas empleadas en síntesis de nanocompuestos en ingeniería de tejido óseo*. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Perez, L. (2004). *Ecuaciones de Maxwell*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería- UBA.
- Pickering, K. L., Efendy, M. G., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf*, 98–112.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., Lim, T.-C., & Ma, Z. (2005). *An introduction to electrospinning and nanofibres*. Singapore: World Scientific.

- Renekar, D. H., Yarin, A. L., Fong, H., & Koomhongse, S. (2000). *Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning*. J. Appl.Phys.
- Rocha Rangel , E., Rodríguez García , J. A., Martínez , P. E., & López Henández, J. (Agosto de 2012). *Biomimética: Innovación sustentable ispirada por la naturaleza* . Aguas Calientes , Colombia.
- Salazar, C. (2015). *Desarrollo de un material compuesto de fibras naturales de bambú para la utilización en viviendas de bajo costo*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Sapir, L., Stanley, C., & Harries, D. (2016). *Properties of Polyvinylpyrrolidone in a Deep Eutectic Solvent*. Jerusalén: J. Phys. Chem.
- Sato, H., Mizutani, S., Tsuge, S., Ohtani, H., Aoi, K., Takasu, A., . . . Shoda, S. (1998). *Determination of the degree of acetylation of chitin/chitosan by pyrolysis-Gas chromatography in the presence of oxalic acid*. Nagoya, Japón: Universidad de Nagoya.
- Soro, L. (2007). *Estudio de la obtención de quitosano a partir de caparazón de camarón (penaeus Vannamei) y su aplicacion de la estabilidad de una emulsion aceite en agua*. Guayaquil: Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- SUGIMOTO, K. (1999). *Preparation and characterization of chitin and chitosan derivates*. Carbohydrate Polymers .
- Tema Fantástico, S.A. (13 de Abril de 2013). *POLIMEROS*. Obtenido de <http://polimeros-12.blogspot.com/2013/04/poliacrilonitrilo.html>
- Termonia, Y. (2000). *Modeling of the stress-strain behavior of spider dragline*. Elsevier Science.

- Tino Ramos, R. (2010). *Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio*. Zamora: Cimbra: tecnicas constructivas.
- Trung Dung , N. (2015). *Biomimethic Technologies principles and aplications* . Amsterdam: ELSEVIER.
- Universidad Técnica de Manabí. (21 de Junio de 2017). *Jardín Universitario*. Universidad Técnica de Manabí. Obtenido de Universidad Técnica de Manabí. Web site: <http://sms.utm.edu.ec/jardin/>
- Usero, R., & Suárez, N. (2010). Electrospinning de poliesteramidas biodegradables. Vol 1, 9-59.
- Valencia , R., Montúfar , R., Navarrete, H., & Balslev, H. (2013). *Palmas Ecuatorianas: biología y uso sostenible*. Quito: Herbario QCA.
- Vargas Polo, M. A. (20 de Agosto de 2011). *Agro 2.0*. Obtenido de Agro 2.0: <http://www.agro20.com/photo/la-chonta-nombre-cient-fico-bactris-gasipaes-familia-arec-ceas?context=popular>
- Vargas, L. (2007). *Uso de fibras de papel periódico, cal hidratada y alumbre, en la elaboración de un material compuesto*. Colima: Universidad de Colima. Obtenido de http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/VARGAS_ROBLES_LUIS_ARTURO.pdf
- Vega, V. (27 de Abril de 2014). *Arch Daily*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.archdaily.co/co/02-355842/edificio-panal-archium>
- Wohlfarth, C. (2010). *Thermodynamic Properties of Polymer Solutions*. Springer Verlag. : Landolt-Börnstein, New Series, Group VIII, Volume 6D.

Yih, T., & Al-Fandi, M. (2006). *Engineered Nanoparticles as Precise Drug Delivery Systems*. J. Cell. Biochem.