



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**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: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL COMPOSITE UV
FOTOCURABLE RESINA ASTROCARYUM CHAMBIRA
ECUATORIANA**

**AUTORES: SR. AYALA RODRÍGUEZ, FREDDY ENRIQUE
SR. CONTRERAS YÁNEZ, FRANCISCO JAVIER**

DIRECTOR: ING. SÁNCHEZ SÁNCHEZ, XAVIER ROLANDO PHD.

SANGOLQUÍ

2020



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 “*CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL COMPOSITE UV FOTOCURABLE RESINA ASTROCARYUM CHAMBIRA ECUATORIANA*” fue realizado por el señor *Ayala Rodríguez, Freddy Enrique* y el señor *Contreras Yáñez, Francisco Javier* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente

Sangolquí, 7 de enero de 2020

Firma:

.....
Ing. Xavier Rolando Sánchez Sánchez PhD,
C.C: 1712575826



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, *Ayala Rodríguez, Freddy Enrique* y *Contreras Yáñez, Francisco Javier* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Caracterización mecánica del composite UV fotocurable resina Astrocaryum Chambira Ecuatoriana* 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 y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 7 de enero de 2020


.....
Freddy Enrique Ayala Rodríguez
C.C.: 1721510251


.....
Francisco Javier Contreras Yáñez
C.C.: 1716990286



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, Ayala Rodríguez, Freddy Enrique y Contreras Yáñez, Francisco Javier, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar el trabajo de titulación: **Caracterización mecánica del composite UV fotocurable resina Astrocaryum Chambira Ecuatoriana** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangoquí, 7 de enero de 2020

Freddy Enrique Ayala Rodríguez

C.C.: 1721510251

Francisco Javier Contreras Yáñez

C.C.: 1716990286

DEDICATORIA

A mi madre Ana Lupe Rodríguez Cagua.
A mis hermanos, Tíos y padrinos

Freddy Enrique Ayala Rodríguez.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado principalmente a mi amada, querida y adorada madre Teresa que a pesar de todo y sobre todos, nunca dejo de apostar por mí; enseñándome el valor que tiene la fuerza de voluntad y la constancia.

A mi padre Francisco por sus consejos y enseñanzas, las cuales aportaron enormemente para llegar a ser la persona que soy y llegar a cumplir una meta más.

Al amor de mi vida, mi hermana Carina por estar siempre a mi lado apoyándome, aconsejándome y siempre dando un apoyo incondicional.

Francisco Javier Contreras Yáñez

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme sabiduría y permitirme avanzar día a día en este largo y arduo camino.

A mis padres Ana Lupe Rodríguez C. y Freddy Enrique Ayala L. por brindarme su apoyo incondicional y siempre tener confianza en mí.

A mis hermanos Jordi, Arelis, Jean Pierre por darme valor y las ganas de salir siempre adelante para ser ejemplo de superación.

A mis Padrinos Liz García y Fabricio Pereira por ser mis segundos padres y guiarme con sus enseñanzas y consejos desde mi niñez hasta mis logros profesionales.

A mis primos Alex, Jessica, María, Paola, por ser motivos de alegría en toda esta etapa y ayudarme a seguir siempre adelante.

A todos mis amigos del colegio y universidad por todos los momentos de estudio y de fiesta, espero que nos encontremos en la vida profesional.

A todos los profesores a lo largo de mi carrera por sus enseñanzas y consejos.

Freddy Enrique Ayala Rodríguez..

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida y brindarme la oportunidad de aprender de mis errores, mejorando cada día y cumpliendo cada una de mis metas.

A cada uno de mis familiares que siempre estuvieron presentes ayudándome con sus consejos y experiencias de vida para ser una mejor persona y llegar a culminar el presente proyecto.

Agradezco todos y cada uno de mis amigos que aportaron con un grano de arena, estando presentes distinta o indistintamente; brindándome su apoyo confianza y fuerzas en el transcurso de mi vida universitaria.

A cada uno de los ingenieros que esforzaron por impartir sus conocimientos y convencerme que la Carrera de Ingeniería Mecánica es la mejor elección que puede tener como elección para mi vida profesional.

Francisco Javier Contreras Yáñez.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-------------|
| CERTIFICACIÓN | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÒN..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| AGRADECIMIENTO | vii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | viii |
| INDICE DE TABLAS..... | xiv |
| INDICE DE FIGURAS..... | xvii |
| RESUMEN..... | xx |
| ABSTRACT..... | xxi |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Antecedentes..... | 1 |
| 1.2. Definición del problema | 3 |
| 1.3. Objetivos..... | 5 |
| 1.3.1. Objetivo general | 5 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.4. Justificación e importancia | 6 |
| 1.5. Área de influencia..... | 7 |

| | |
|---|----------|
| 1.6. Alcance del proyecto | 8 |
| CAPÍTULO II..... | 9 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 9 |
| 2.1. Fibras | 9 |
| 2.2. Fibras naturales de origen vegetal | 10 |
| 2.2.1. Composición de las fibras naturales..... | 10 |
| 2.2.1.1. Celulosa..... | 13 |
| 2.2.1.2. Lignina..... | 13 |
| 2.2.1.3. Hemicelulosa..... | 14 |
| 2.3. Fibra de chambira | 14 |
| 2.3.1. Producción de chambira en el Ecuador..... | 16 |
| 2.3.2. Aplicaciones..... | 18 |
| 2.4. Resina..... | 18 |
| 2.4.1. Fotopolímeros..... | 18 |
| 2.4.1.1. Aplicaciones..... | 20 |
| 2.5. Materiales compuestos..... | 21 |
| 2.5.1. Compuestos reforzados con fibra vegetal..... | 23 |
| 2.5.1.1. Compuestos de matriz termoplástica y termoestable..... | 24 |
| 2.5.2. Propiedades de los materiales compuestos..... | 26 |
| 2.5.2.1. Adhesión fibra-matriz..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.2.2. Efectos de procesamiento. | 27 |
| 2.5.3. Criterios de falla para materiales compuestos | 28 |
| 2.5.3.1. Tsai-Hill | 28 |
| 2.5.3.2. Criterio de Puck | 29 |
| 2.6. Modelación por medio de elementos finitos | 32 |
| 2.6.1. Software CAE..... | 33 |
| CAPÍTULO III | 35 |
| 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 35 |
| 3.1. Consideraciones previas | 35 |
| 3.2. Estrategia metodológica..... | 36 |
| 3.2.1. Etapas del proceso | 36 |
| 3.2.2. Técnicas y equipos utilizados..... | 38 |
| 3.2.2.1. Caracterización de la fibra Astrocaryum Chambira Ecuatoriana | 38 |
| 3.2.2.1.1. Balanza analítica..... | 39 |
| 3.2.2.1.1. Microscopio digital..... | 39 |
| 3.2.2.1.2. Máquina de ensayos universales..... | 40 |
| 3.2.2.1.3. Higrómetro digital..... | 41 |
| 3.2.2.1.4. Bomba calorimétrica..... | 42 |
| 3.2.2.1.5. Máquina de ensayos universales..... | 42 |
| 3.2.2.1.6. Microscopio..... | 43 |
| 3.2.2.1.7. Reómetro..... | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.2.2.2. Fabricación y caracterización del material compuesto..... | 44 |
| 3.2.2.2.1. Durómetro..... | 45 |
| 3.2.2.2.2. Máquina de corte a láser..... | 45 |
| 3.2.2.2.3. Molde cerrado..... | 46 |
| 3.2.2.2.4. Máquina de curado..... | 47 |
| 3.2.2.2.5. Máquina de ensayos universales..... | 47 |
| 3.3. Procesamiento experimental..... | 48 |
| 3.3.1. Primera etapa: Pruebas en la fibra..... | 48 |
| 3.3.1.1. Porcentajes de lignina y celulosa..... | 48 |
| 3.3.1.2. Tenacidad..... | 51 |
| 3.3.1.3. Densidad lineal..... | 53 |
| 3.3.1.4. Densidad volumétrica..... | 53 |
| 3.3.1.5. Longitud efectiva..... | 54 |
| 3.3.1.6. Elongación..... | 54 |
| 3.3.1.7. Módulo inicial..... | 55 |
| 3.3.1.8. Parámetros considerados para la compactación..... | 55 |
| 3.3.1.9. Variación de entalpía..... | 58 |
| 3.3.2. Segunda etapa: pruebas a la resina y caracterización del material compuesto..... | 58 |
| 3.3.2.1. Tiempo de curado..... | 58 |
| 3.3.2.2. Dureza..... | 60 |
| 3.3.2.3. Materiales..... | 60 |
| 3.3.2.3.1. Resina SF 3D PRINTING LNK..... | 61 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.2.3.2. Astrocaryum Chambira Ecuatoriana..... | 62 |
| 3.3.2.3.3. Propiedades mecánicas de la fibra..... | 62 |
| 3.3.3. Simulación FEM del material compuesto. | 62 |
| 3.3.3.1. ANSYS. | 63 |
| 3.3.3.2. Modelado CAE | 64 |
| CAPITULO IV | 67 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 67 |
| 4.1. Procesabilidad del material compuesto..... | 67 |
| 4.1.1. Lignina y Celulosa..... | 67 |
| 4.1.1.1. Porcentaje de lignina..... | 68 |
| 4.1.1.2. Porcentaje de celulosa..... | 69 |
| 4.1.2. Calorimetría de la fibra..... | 71 |
| 4.1.3. Caracterización mecánica de la fibra Astrocaryum Chambira. | 72 |
| 4.1.3.1. Fuerza vs. Deformación de la fibra..... | 72 |
| 4.1.3.2. Módulo de elasticidad de la fibra..... | 74 |
| 4.1.4. Pruebas preliminares a la resina. | 79 |
| 4.1.5. Selección y elaboración del molde. | 81 |
| 4.1.6. Fuerza vs. Deformación del material compuesto. | 82 |
| 4.2. Factibilidad del uso de fibra Astrocaryum Chambira en materiales compuestos..... | 84 |
| 4.2.1. Aplicaciones en la industria..... | 85 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. Modelo teórico FEM..... | 88 |
| 4.3.1. Análisis de resultados del modelado FEM. | 89 |
| 4.3.1.1. Composite fibra a 90° | 92 |
| 4.3.1.2. Composite fibra a 0° | 94 |
| 4.3.1.3. Composite fibra a 45° | 97 |
| 4.3.1.4. Composite fibra tejida..... | 99 |
| 4.3.1.5. Composite fibra corta..... | 102 |
| CAPITULO V | 104 |
| 5. ANÁLISIS FINANCIERO..... | 104 |
| 5.1. Costos Directos | 104 |
| 5.2. Costos indirectos..... | 106 |
| 5.3. Costos Totales..... | 107 |
| CAPITULO VI | 108 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 108 |
| 6.1. Conclusiones..... | 108 |
| 6.2. Recomendaciones | 110 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 112 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Clasificación de las fibras en general</i> | 9 |
| Tabla 2 <i>Principales fibras vegetales</i> | 11 |
| Tabla 3 <i>Composición química de fibras vegetales</i> | 12 |
| Tabla 4 <i>Aplicaciones de los fotopolímeros</i> | 21 |
| Tabla 5 <i>Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzos</i> | 22 |
| Tabla 6 <i>Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz termoestable reforzados con fibras vegetales</i> | 24 |
| Tabla 7 <i>Propiedades mecánicas de materiales compuestos en matrices termoplásticas reforzados con fibras vegetales, valores máximos</i> | 25 |
| Tabla 8 <i>Ecuación y proceso a aplicar para la obtención de porcentajes lignina, holocelulosa y celulosa</i> | 51 |
| Tabla 9 <i>Tabulación de peso de fibras secas y humedecidas</i> | 52 |
| Tabla 10 <i>Variables de decisión para la compactación de la fibra de chambira</i> | 56 |
| Tabla 11 <i>Combinaciones de las variables de decisión, empleado el método de Taguchi</i> | 57 |
| Tabla 12 <i>Variables de operación Constante</i> | 57 |
| Tabla 13 <i>Variables para el tiempo de curado</i> | 59 |
| Tabla 14 <i>Combinaciones a utilizar para el tiempo de curado</i> | 59 |
| Tabla 15 <i>Combinaciones a emplear</i> | 60 |
| Tabla 16 <i>Propiedades mecánicas de la resina</i> | 61 |
| Tabla 17 <i>Variables en peso para la lignina</i> | 68 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tabla 18 | <i>Parámetros para la obtención de materia orgánica de lignina</i> | 68 |
| Tabla 19 | <i>Parámetros para la determinación de lignina</i> | 68 |
| Tabla 20 | <i>Variables en peso para la holocelulosa</i> | 69 |
| Tabla 21 | <i>Parámetros para la obtención de materia orgánica de holocelulosa</i> | 69 |
| Tabla 22 | <i>Parámetros para la determinación de holocelulosa</i> | 69 |
| Tabla 23 | <i>Variables en peso para la celulosa</i> | 70 |
| Tabla 24 | <i>Parámetros para la obtención de materia orgánica de celulosa</i> | 70 |
| Tabla 25 | <i>Parámetros para la determinación de celulosa</i> | 70 |
| Tabla 26 | <i>Poder calórico de la fibra Astrocaryum Chambira Ecuatoriana</i> | 71 |
| Tabla 27 | <i>Datos de fuerza y desplazamiento de fibras húmedas</i> | 73 |
| Tabla 28 | <i>Datos de fuerza y desplazamiento de fibras secas</i> | 73 |
| Tabla 29 | <i>Datos de fuerza vs desplazamiento de fibras de 50 mm</i> | 74 |
| Tabla 30 | <i>Datos para la obtención de densidad volumétrica</i> | 75 |
| Tabla 31 | <i>Densidad lineal para fibras de 50 mm</i> | 76 |
| Tabla 32 | <i>Datos para la obtención del módulo de elasticidad</i> | 78 |
| Tabla 33 | <i>Datos de composición química y resistencia de fibras comerciales</i> | 85 |
| Tabla 34 | <i>Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 90°</i> | 92 |
| Tabla 35 | <i>Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 90°</i> | 94 |
| Tabla 36 | <i>Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 0°</i> | 95 |
| Tabla 37 | <i>Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 0°</i> | 97 |
| Tabla 38 | <i>Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 45°</i> | 97 |
| Tabla 39 | <i>Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 45°</i> | 99 |
| Tabla 40 | <i>Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta fibra tejida</i> | 100 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 41 <i>Factor de reserva probeta fibra tejida</i> | 101 |
| Tabla 42 <i>Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta fibra corta</i> | 102 |
| Tabla 43 <i>Materiales</i> | 104 |
| Tabla 44 <i>Materia prima</i> | 105 |
| Tabla 45 <i>Procesos realizados</i> | 105 |
| Tabla 46 <i>Sustancias utilizadas</i> | 105 |
| Tabla 47 <i>Total costos directos</i> | 105 |
| Tabla 48 <i>Uso de laboratorios</i> | 106 |
| Tabla 49 <i>Varios</i> | 106 |
| Tabla 50 <i>Costo total del proyecto</i> | 107 |

ÌNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Demanda total de fibras a nivel mundial | 2 |
| Figura 2. Estructura de la celulosa | 13 |
| Figura 3. Estructura parcial de la lignina | 14 |
| Figura 4. Árbol de Astrocaryum Chambira..... | 16 |
| Figura 5. Crecimiento de las palmas Astrocaryum Chambira | 17 |
| Figura 6. Proceso de cosecha de la Astrocaryum Chambira | 17 |
| Figura 7. Evolución de los fotopolímeros | 19 |
| Figura 8. Polimerización del fotopolímero por luz UV. | 20 |
| Figura 9. Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión | 23 |
| Figura 10. Estado de tensión de una lámina..... | 29 |
| Figura 11. Plano de fractura genérico en composite UD y ejes asociados..... | 32 |
| Figura 12. Simulación por modelamiento CAE | 33 |
| Figura 13. Esquema de la metodología aplicada en el proyecto de investigación | 36 |
| Figura 14. Balanza analítica aeADAM. | 39 |
| Figura 15. Microscopio digital con ampliación de 250x..... | 40 |
| Figura 16. Maquina de ensayos universales AMSLER-FM1033 | 41 |
| Figura 17: Higrómetro digital DUSIEL-MD812 | 41 |
| Figura 18. Calorímetro adiabático Gallenkamp OC-5191 | 42 |
| Figura 19. Máquina de ensayos universales MTS-T5002..... | 43 |
| Figura 20. Microscopio MEIJI TECHNO-ML7000 | 43 |
| Figura 21. Reómetro DISCOVERY HR-2HIBRID | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Durómetro Microhardnes Melkon | 45 |
| Figura 23. Máquina de corte laser FDA-KL4060 2017 | 46 |
| Figura 24. Molde para probetas en acrílico transparente | 46 |
| Figura 25. Caja de curado a base de leds UV | 47 |
| Figura 26. Maquinas de ensayos universales SHIMATZU AGS-X | 48 |
| Figura 27. Ilustración del porcentaje de deformación aplicando una fuerza a una fibra. | 55 |
| Figura 28. Resina UV SF 3D LNK | 61 |
| Figura 29. Pantalla de inicio del software ANSYS Workbench | 63 |
| Figura 30. Interfaz para ingreso de datos a ANSYS | 65 |
| Figura 31. Interfaz para el ingreso de datos y modelado | 66 |
| Figura 32. Muestra de las pastillas compactadas utilizadas | 75 |
| Figura 33. Grafico Fuerza vs Deformación para una fibra de 50 mm. | 77 |
| Figura 34. Resultados de profundidad de curado..... | 79 |
| Figura 35. Resultados de dureza variando el voltaje..... | 80 |
| Figura 36. Moldes de acrílico..... | 81 |
| Figura 37. Fuerza y esfuerzos máximos de las probetas de resina uv..... | 82 |
| Figura 38. Esfuerzo vs Deformación de probetas con distintas configuraciones de fibra | 83 |
| Figura 39. Comparación de esfuerzos máximos para las distintas configuraciones de fibra..... | 84 |
| Figura 40. Porcentajes de uso de materiales compuestos en distintas industrias..... | 86 |
| Figura 41. Desglose de materiales automotrices basado en volúmenes..... | 86 |
| Figura 42. Posibles aplicaciones del material compuesto resina UV-Astrocaryum chambira | 87 |
| Figura 43. Datos de esfuerzo máximo y deformación obtenidos mediante simulación..... | 91 |
| Figura 44. Comparación de porcentajes de error en probetas experimental vs teórico. | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 45. Deformación máxima de probeta a 90°, FEM | 93 |
| Figura 46. Tensión máxima de probeta a 90°, FEM..... | 93 |
| Figura 47. Análisis de criterio de Puck. probeta a 90° | 93 |
| Figura 48. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 90°..... | 94 |
| Figura 49. Deformación máxima de probeta a 0°, FEM | 95 |
| Figura 50. Tensión máxima de probeta a 0°, FEM..... | 96 |
| Figura 51. Análisis de criterio de Puck. probeta a 0° | 96 |
| Figura 52. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 0°..... | 96 |
| Figura 53. Deformación máxima de probeta a 45°, FEM | 98 |
| Figura 54. Tensión máxima de probeta a 45°, FEM..... | 98 |
| Figura 55. Análisis de criterio de Puck. probeta a 45° | 98 |
| Figura 56. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 45°..... | 99 |
| Figura 57. Deformación máxima de probeta fibra tejida, FEM..... | 100 |
| Figura 58. Tensión máxima de probeta fibra tejida, FEM | 101 |
| Figura 59. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta fibra tejida | 101 |
| Figura 60. Deformación máxima de probeta fibra corta, FEM | 102 |
| Figura 61. Tensión máxima de probeta fibra corta, FEM | 103 |

RESUMEN

El marco de la presente investigación se orienta en la búsqueda de un material compuesto a base de resina fotocurable UV y fibra de *Astrocaryum chambira* ecuatoriana, para tal propósito se caracterizó física, química y mecánicamente la fibra, los datos de la caracterización química sirven de base para la comparación con otras fibras de la región, obteniendo así propiedades de poder calórico, porcentajes de lignina y celulosa, densidades lineales y volumétricas. Los ensayos mediante tracción a la fibra proporcionan datos esenciales para la caracterización del compost, se utiliza una resina fotocurable con el propósito de buscar otras alternativas a las resinas de uso común. Para la caracterización mecánica del material compuesto se elaboran varias probetas con configuraciones de la fibra a 0°, 45°, 90°, tejida y particulado, los ensayos se los realiza bajo normativas ASTM e ISO. Los valores obtenidos experimentalmente fueron avalados mediante simulación FEM (Finite Element Method), aplicando criterios de falla exclusivos para materiales compuestos como son el de Tsai-hill y Puck, la comparación de datos teóricos con experimentales varían según las probetas ensayadas, logrando así determinar con cual distribución se logran propiedades mecánicas aceptables en comparación con otros compost. Como aporte significativo en la presente investigación, se presenta a la fibra *Astrocaryum Chambira* ecuatoriana como una alternativa de uso industrial, potenciando su uso para aplicaciones de mayor valor agregado.

Palabras clave:

- **ASTROCARYUM CHAMBIRA**
- **RESINA FOTOCURABLE**
- **SIMULACION FEM**
- **CRITERIO DE FALLA**

ABSTRACT

The framework of the present investigation is oriented in the search of a composite material based on UV photocurable resin and Ecuadorian *Astrocaryum chambira* fiber, for this purpose the fiber was physically, chemically and mechanically characterized, the chemical characterization data serve as the basis for comparison with other fibers in the region, thus obtaining properties of caloric power, percentages of lignin and cellulose, linear and volumetric densities. Fiber tensile tests provide essential data for the characterization of the compost, a photocurable resin is used in order to look for other alternatives to commonly used resins. For the mechanical characterization of the composite material, several specimens are made with fiber configurations at 0°, 45°, 90°, woven and particulate, the tests are carried out under ASTM and ISO standards, the values obtained experimentally were endorsed by FEM simulation (Finite Element Method), applying exclusive failure criteria for composite materials such as Tsai-hill and Puck, the comparison of theoretical and experimental data varies according to the test specimens, thus determining with which distribution acceptable mechanical properties are achieved compared to other composites. . As a significant contribution in the present investigation, Ecuadorian *Astrocaryum Chambira* fiber is presented as an alternative for industrial use, promoting its use for higher value-added applications.

Keywords:

- **ASTROCARYUM CHAMBIRA**
- **PHOTOCURABLE RESIN**
- **FEM SIMULATION**
- **FAILURE CRITERIA**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Una de las principales necesidades básicas del ser humano desde la prehistoria ha sido la vestimenta y cobijo para protegerse del medio en el que habitan; en gran medida en todas las culturas humanas su mayor fuente de protección lo han hecho con fibras vegetales de plantas que ha sido encontradas en la región donde han habitado. Tomando en cuenta que las fibras vegetales han ocupado un lugar privilegiado en la cultura de múltiples sociedades en el mundo, ya que han sido la materia prima básica para construir diversos utensilios de uso doméstico, herramientas de caza y pesca, además de materiales para cordelería, trenzado y tejido artesanal (Gladys Vidal, 2016).

En la actualidad existe una demanda creciente a nivel mundial de fibras naturales, siendo la lana, el algodón las más utilizadas, y en menor proporción fibras celulósicas, en la Figura 1 se puede observar una proyección de la demanda de fibras hasta el año 2030, en donde las fibras de poliéster sobresalen como una de las más utilizadas, lo que implicaría una concientización, ya que a diferencia de fibras naturales las fibras sintéticas son derivados del petróleo y en su mayoría no son biodegradables (Messer, 2019). Para Ecuador puede ser una oportunidad potencial ya que cuenta con aproximadamente 25 especies de plantas vasculares nativas que podrían ser aprovechadas (Tamayo, 2012).



Figura 1. Demanda total de fibras a nivel mundial
Fuente: (*Textiles Panamericanos, 2015*)

En el Ecuador actualmente el uso de fibras naturales continúa siendo parte principal de las comunidades autóctonas de los lugares donde crecen las mismas. Pueblos enteros subsisten en lugares remotos alejados de grandes ciudades, donde los productos elaborados con fibras vegetales son utilizados comúnmente por los pobladores locales. Incluso se comercializan en pequeños mercados locales, se utilizan como medio de intercambio por otros productos, destaca el hecho de que se destinan a la venta como suvenires a los turistas (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013).

El uso fibras vegetales se han convertido en una gran opción para aplicaciones industriales, en gran medida por ser renovables y de peso ligero con propiedades similares o superiores a fibras sintéticas, al emplearlas como refuerzos en materiales compuestos (Velásquez, 2016).

Existen ya investigaciones acerca del reemplazo de fibras tradicionales con fibras vegetales ecuatorianas, se pueden citar: material compuesto de matriz de poliéster con fibras de Cabuya (Tamayo, 2012), compuesto de polipropileno con fibras de Abacá (Páez, 2007), Composite de una matriz poliéster con fibras de Paja Toquilla y Cabuya (Molina, Benavides, Moreno, & Iribarra, 2014), Biocompuesto de fibra natural de Palma Cumare y resina bioepoxy, entre otros (Mora & B, 2017).

Gran parte de estos estudios se enfocan en los efectos que tiene la relación porcentual fibra-matriz, ya que influyen de manera gradual y considerable en las propiedades físicas y mecánicas finales del compuesto.

1.2. Definición del problema

La investigación del presente proyecto trata sobre la fabricación de un material compuesto a base de una matriz de resina UV fotocurable reforzado con una fibra nativa del Ecuador conocida como Chambira. Tomando en cuenta que existe información casi nula referente al uso de fibras de *Astrocaryum Chambira* ecuatoriana en matrices termoplástica, los resultados pueden ser inéditos.

Existen pocas investigaciones acerca de la composición y estructura interna que posee la *Astrocaryum Chambira*, no hay criterios o bases de comparación para su uso y desempeño en el Ecuador; en lo que se enfocara el presente trabajo teniendo como objetivo posterior, el reemplazo de fibras sintéticas, y de esta forma reducir el impacto ambiental que estas producen. Actualmente existen varias aplicaciones de resinas fotocurables siendo mayormente utilizada en odontología e impresión 3D (Adela García, 2006), Asia es uno de los mercados con mayor crecimiento sobre el uso de resinas UV, enfocado mayormente como recubrimiento de varios productos (Latin Press,

Inc., 2018), sin embargo su implementación en materiales compuestos con fibras naturales es nula, desaprovechando una potencial aplicación en diferentes industrias. Por otro lado los estudios acerca de la fibra *Astrocaryum Chambira* se los ha realizado en países amazónicos como Perú y Colombia; obteniendo propiedades mecánicas tales como: esfuerzo máximo a tracción de 260 (MPa), módulo de elasticidad de 7 (GPa), deformación máxima de elasticidad de 24% aproximadamente. (Mora & B, 2017). Estos valores son debidos al bajo porcentaje de lignina que poseen las paredes celulares de la fibra, y un porcentaje alto de celulosa que favorece la flexibilidad de la misma (Marín, Millán, & Kahn, 2018).

Las propiedades mecánicas que poseen los polímeros que son reforzadas con fibras vegetales, no solo dependen de las propiedades intrínsecas de sus componentes, sino de factores como la orientación de las fibras en la matriz de polímero. (Molina, Benavides, Moreno, & Iribarra, 2014). Fibras cortas pueden ser colocadas aleatoriamente brindando un comportamiento isotrópico, en arreglos unidireccionales con fibras largas y continuas se obtiene un comportamiento ortotrópico y en arreglos con una disposición más compleja (patrones tridimensionales) se logra un refuerzo tridimensional mucho mayor; factores como: el diámetro, la longitud y la cantidad de fibra que posee el material compuestos son importantes para determinar la resistencia; una característica importante de los materiales compuestos con fibras es que adquieren propiedades que pueden diseñarse para soportar condiciones de cargas distintas (Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2011).

Para el procesamiento de compuestos termoplásticos reforzados con fibras vegetales se tiene métodos como el de inyección, compresión y extrusión, los cuales son limitantes para el uso de fibras largas lo que genera una mayor degradación en las propiedades de la fibra durante el proceso debido a la longitud de la misma. (Herrera & Valadez, 2005).

Por tal motivo el presente proyecto trata de aportar con el estudio físico y mecánico de un composite de resina uv con fibra de *Astrocaryum Chambira* ecuatoriana, el cual pueda servir como opción para reemplazar materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas o naturales actualmente en el mercado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Desarrollar un composite en matriz de resina uv fotocurable, reforzada con fibra de *Astrocaryum Chambira* ecuatoriana.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer una combinación del composite a base de resina uv fotocurable y la *Chambira*.
- Caracterizar el composite mediante normas ASTM, para las propiedades mecánicas.
- Determinar la factibilidad de uso de fibra de *Astrocaryum Chambira* en la fabricación de materiales compuestos al compararlo con otros composites.
- Definir una potencial utilización del material compuesto con fibras de *Astrocaryum Chambira* producidas en Ecuador.
- Modelar el material compuesto con técnicas de FEM (Finite Element Method)

1.4. Justificación e importancia

En el Ecuador el desarrollo de nuevos materiales compuestos está en una etapa inicial, por lo cual, el uso de nuevas fibras naturales en el ámbito industrial es mínimo. En líneas generales, la industrialización de fibras vegetales no ha tenido un gran desarrollo en el país, lo que se puede cambiar teniendo en cuenta el gran potencial que se posee el Ecuador para la producción de fibras naturales, teniendo una ventaja en lo que se refiere a su reciclaje, disminuyendo el impacto ambiental. (Majewski & Błędzki, 2013). Existe la necesidad de desarrollar nuevas aplicaciones que agreguen valor a la Chambira. Si bien la obtención de algunas fibras está extendida en la amazonia ecuatoriana, las mismas han sido utilizadas en productos de bajo valor agregado.

Las condiciones de vida de los habitantes de la región quieren ser mejorada por muchas organizaciones con proyectos nacionales e internacionales, por medio de la explotación, el procesamiento y comercialización de los productos realizados con fibras vegetales nativas. (Montoya & Zumaeta, 2016).

En la actualidad la industria de los plásticos aporta una gran cantidad de productos a la vida cotidiana del ser humano, gracias a su versatilidad. Sin embargo, al ser derivados del petróleo generan una contaminación considerable para el medio ambiente, y su uso amenaza con contaminar cada rincón del planeta, al poseer muy baja biodegradabilidad son perjudiciales para la salud humana, animal y vegetal del planeta (Roman, 2007). Por lo mencionado anteriormente, se ve la necesidad de disminuir el uso y combinar los polímeros con fibras naturales. Con la presente investigación se pretende incorporar la fibra vegetal *Astrocaryum Chambira* como refuerzo de un material compuesto de una matriz polimérica (Resina UV Fotocurable), y verificar si es factible obtener resultados similares a las propiedades que poseen las fibras sintéticas más comunes

actualmente en la industria como son las de carbono, aramida, vidrio, entre otras. Siendo el paso previo para una posible aplicación en productos de mayor valor agregado.

El crear un material compuesto con fibras de *Astrocaryum* Chambira ecuatoriana va a permitir conocer la composición, propiedades, comportamiento y desempeño mecánico que podría tener, además de saber si puede ser el sustituto de fibras sintéticas como: carbón, aramida, vidrio, entre otro recalcando el uso de resina fotocurable como matriz. Desde el punto de vista económico se debe desarrollar un compuesto que utilice fibras de producción nacional, con lo cual se pueden generar desarrollo, potenciando la producción local de la *Astrocaryum* Chambira ecuatoriana, siendo este un producto que puede ser explotado y aprovechado por las comunidades de la región de la amazonia ecuatoriana.

1.5. Área de influencia

El presente proyecto de investigación tendrá un área de influencia sobre la fabricación de materiales compuestos con fibras naturales y el uso de nuevas tecnologías para su obtención, los materiales compuestos poseen un gran impacto actualmente a nivel mundial en diferentes industrias como la automotriz (autopartes), industria de la construcción, industria petrolera, industria química, medicina y biomedicina, productos de consumo, artículos de oficina, implementos deportivos, entre otros (Guerrero, y otros, 2011).

Conociendo la tendencia y el uso que actualmente tienen los materiales derivados de la naturaleza, se observa que, en el Ecuador a pesar de contar con muchas de las fibras que son explotados en otros países como: algodón, cabuya, abacá, paja toquilla, etc.; no se ha impulsado,

mucho menos se les ha sacado el mejor provecho. Lo que permite que sea el inicio para futuras investigaciones dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE, y del País.

1.6. Alcance del proyecto

En esta investigación se plantea determinar características físico-químicas de la fibra Chambira, para un análisis de sus propiedades.

Se desea evaluar la factibilidad de obtención de un material compuesto de resina uv fotocurable reforzado con fibras de Chambira con una calidad óptima, del cual se obtengan propiedades mecánicas aceptables y de bajo impacto al medio ambiente.

Para el desarrollo de la investigación, a las fibras se les realizarán pruebas mecánicas de fuerza las cuales son: tracción, cálculo de la densidad lineal, además pruebas químicas para determinar la lignina y la celulosa, posteriormente realizar una prueba de calorimetría y análisis con FEM. Para posteriormente comparar resultados con investigaciones ya desarrolladas que empleen las resinas fotocurables y fibras naturales, elaborar un análisis sobre si los resultados de la presente investigación aportan de gran manera en la industria o si se requiere aplicar otra metodología. Todos los ensayos se realizarán usando normativas y estándares.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Fibras

“Fibra es cada uno de los filamentos que, dispuestos en haces, entran en la composición de los hilos y tejidos, ya sean animales, vegetales, artificiales o minerales” (John & Thomas, 2008). Por lo general las fibras presentan gran finura y buena flexibilidad, en la Tabla No. 1 se presenta una clasificación en general de las fibras.

Tabla 1

Clasificación de las fibras en general

| | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------------|--|
| FIBRAS NATURALES | Vegetales | De fruto y semilla | Algodón, Coco |
| | | De tallo | Lino, Cañaño, Bambú, Yute |
| | | De hoja | Sisal, Miraguano |
| | Animales | Glándulas sedosas | Seda, Seda salvaje |
| | | Folículos Pilosos | Lana, Angora, Cachemire |
| | | Minerales | Amianto, Metales (Oro, Plata) |
| FIBRAS QUÍMICAS | Artificiales | Celulósicas | Caucho, Látex |
| | | Proteínicas | Vegetales(Ardil), Algas (Alginato) Animales (Fibrolana) |
| | | Metálicas | Oro, Plata, Cobre |
| | Sintéticas | Policondensación | Poliamida, Poliéster |
| | | Polimerización | Polivinilo, Poliuretano, Polipropileno |

Fuente: Tomada de (John & Thomas, 2008)

2.2. Fibras naturales de origen vegetal

Se entiende como fibras naturales de origen vegetal a los fragmentos o hebras que pueden extraerse de las plantas. Las fibras vegetales están constituidas básicamente de celulosa, lignina y otros componentes en menor cantidad. La celulosa es la más utilizada en la industria textil, sobretodo en la fabricación de papel (FAO, 2009).

Las fibras vegetales pueden ser extraídas de diferentes partes de la planta: frutos o semillas, del tronco y de la hoja (Vidal & Hormazábal, 2016). Existiendo así: fibras blandas y fibras duras. Las fibras blandas son las que se encuentran en el tallo de las dicotiledóneas (plantas con dos cotiledones en la semilla); entre las cuales están el cáñamo, el yute y el lino. Las fibras duras se extraen de las hojas de las monocotiledóneas (plantas con un solo cotiledón en la semilla), donde se sobreponen unas con otras, lo que las hace más resistentes debido a su mayor grado de lignificación¹ (Adquieren mayor consistencia por la acumulación de celulosa), fibras de este tipo son las de sisal, esparto, yuca, entre otras. Se puede establecer una tercera categoría, denominada fibras de superficie que serían aquellas fibras que corresponden a los pelos de la epidermis de la semilla, como es el caso del algodón (Macía, 2006). En la Tabla No. 2 se presenta las principales fibras vegetales.

2.2.1. Composición de las fibras naturales.

Las condiciones climáticas, procesamiento y edad afectan a la composición química de la fibra. Todas las fibras vegetales están constituidas por diferentes proporciones de celulosa,

¹ Lignificación: “La lignificación de la pared celular es el proceso de sellado de las paredes vegetales a través de la deposición de lignina, que proporciona fuerza mecánica a los tallos.” (Novo Uzal, 2008)

hemicelulosa y lignina (John & Thomas, 2008), En la Tabla 3 se muestran composiciones químicas de varias fibras vegetales, la celulosa brinda propiedades de resistencia a la tracción y a la flexión, además de proporcionar rigidez (Deaquiz & Moreno, 2016), mientras que la lignina ayuda a permeabilizar a la fibra (Moscoso, 2007).

Tabla 2
Principales fibras vegetales

| Nombre Comercial | Nombre Botánico | Zona en la que se encuentra |
|--|------------------------------|------------------------------------|
| Fibras de los frutos y semillas | | |
| Miraguano | <i>Ceiba pentrandia</i> | Trópicos |
| Nuez de coco | <i>Cocos nucifera</i> | Trópicos |
| Algodón | <i>Gossypium sp.</i> | Estados Unidos, Asia, África |
| Fibras de los troncos | | |
| Cáñamo | <i>Cannabis sativa</i> | Zonas templadas |
| Lino | <i>Linium sp.</i> | Zonas templadas |
| Ramio | <i>Bohemeria nivea</i> | China, Estados Unidos |
| Yute | <i>Corchorus capsularis</i> | India |
| Kenaf | <i>Hibiscus cannabiss</i> | India, América del Sur |
| Sunn | <i>Crotalia juncea</i> | India |
| Roselle | <i>Hibiscus sabdarifa</i> | Brasil, Indonesia |
| Fibras de las hojas | | |
| Cantala | <i>Agave cantala</i> | Filipinas, Indonesia |
| Henequén | <i>Neoglazioia variegata</i> | Cuba, México |
| Mauritos | <i>Furcraea gigantea</i> | Brasil, Venezuela |
| Sisal | <i>Agave sisalana</i> | Haití, México |
| Sansevieria | <i>Sansevieria sp.</i> | África, América del Sur |
| Ixtle | <i>Agave fourcroydes</i> | México |
| Abacá | <i>Musa textilis</i> | Filipinas, Ecuador |

Fuente: Tomada de (Moscoso, 2007).

Tabla 3
Composición química de fibras vegetales

| Fibra | Celulosa [% peso] | Lignina [% peso] | Hemicelulosa [% peso] | Pectina [% peso] |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Kenaf | 37-49 | 15-21 | 18-24 | - |
| Yute | 41-48 | 21-24 | 18-22 | - |
| Cáñamo | 57-77 | 3.7-13 | 14-22.4 | 0.9 |
| Ramio | 68.6-91 | 0.6-0.7 | 5-16.7 | 1.9 |
| Abacá | 56-63 | 7-9 | 15-17 | 6 |
| Sisal | 47-78 | 7-11 | 70-24 | 10 |
| Lino | 71 | 2.2 | 16.6-20.6 | 2.3 |
| Algodón | 94 | - | - | 1.2 |
| Nuez de coco | 36-46 | 31-45 | 10 | 3-4 |
| Henequén | 77.6 | 13.1 | 4-8 | - |
| Bambú | 35-60,38 | 27-32.2 | 15 | - |
| Ortiga | 86 | - | - | - |
| Banana | 36-64 | - | - | - |
| Miraguano | 64 | 13 | 23 | 23 |

Fuente: Tomada de (Franco & González, 2005).

La celulosa es el principal componente estructural en la mayoría de fibras de origen vegetal, presentándose en forma de microfibrillas alineadas a lo largo de la fibra (Satyanarayana, 2009). Ayuda a evitar la oxidación, pero se puede degradar fácilmente si se expone a ácidos fuertes. La hemicelulosa recubre a las microfibrillas, esta puede ser hidrolizada² fácilmente por ácidos y bases diluidas.

² Hidrolisis: "Reacción química determinada, en la que moléculas de agua se dividen en sus átomos componentes (H₂O: hidrógeno y oxígeno) y forman uniones distintas con alguna otra sustancia involucrada, alterándola en el proceso." (Raffino, 2019)

La lignina es un polímero que otorga rigidez a la pared celular, la hace resistente a la flexión y al impacto, es hidrofóbica, y de fácil oxidación. La lignificación además hace que las fibras sean más resistentes a los microorganismos (John & Thomas, 2008). La pectina es un complejo polisacárido aniónico, que brinda flexibilidad a las fibras gracias a una alta estructura ramificada.

2.2.1.1. Celulosa.

La celulosa se forma por la unión de varias moléculas de β -glucopiranososa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico, lo que la hace insoluble en agua. Es una larga cadena polimérica como se observa en la Figura 2 con un peso molecular variable cuya fórmula empírica es $(C_6H_{10}O_5)_n$, con un n mínimo de 200 (Omar, 2013).

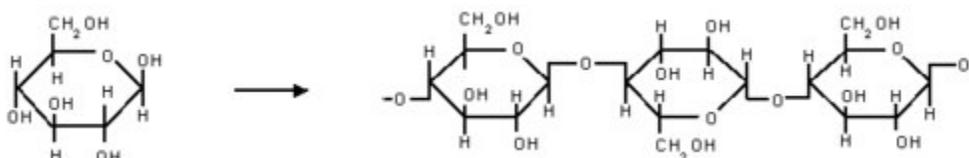


Figura 2. Estructura de la celulosa

Fuente: (Omar, 2013)

2.2.1.2. Lignina.

Molécula de elevado peso molecular, se obtiene de la unión de alcoholes fenilpropílicos y varios ácidos. Su estructura tridimensional característica es debido al acoplamiento aleatorio de los alcoholes y ácidos. La lignina no posee una estructura definida, sin embargo, se han propuesto varios modelos que representan una aproximación a esta estructura, uno de los cuales se puede observar en la Figura 3 (Omar, 2013).

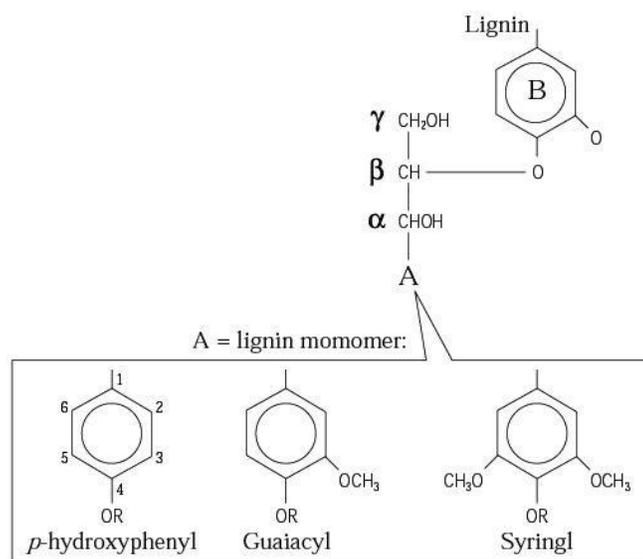


Figura 3. Estructura parcial de la lignina
Fuente: (Omar, 2013)

2.2.1.3. Hemicelulosa.

La hemicelulosa es un polímero compuesto por diferentes polisacáridos formando una cadena lineal ramificada (Torgal & Jalali, 2011), que se caracteriza por no ser ni pectina ni celulosa. Además, es un tipo de hetero-polisacárido con contenido de glucosa en estructuras complejas. La hemicelulosa se diferencia de la celulosa en varios aspectos, unos de los cuales es que contiene unidades diferentes de azúcares, mientras que la celulosa solo contiene unidades de 1,4- β -D-glucopiranososa el cual es un componente estructural intrínseco de las paredes celulares, con el que forma una red con otros polímeros de carbohidratos (Brett, 2000).

2.3. Fibra de chambira

Fibra vegetal que se la encuentra comúnmente en palmeras nativas a lo largo de la región amazónicas, esta fibra pertenece al género *Astrocaryum* uno de los más importantes y representativos. En el Perú se puede encontrar hasta 16 especies de *Astrocaryum*, cuatro de estas

se encuentran en el Ecuador. Este es el caso de la *Astrocaryum Aculeatum* y la *Astrocaryum Vulgare* que crece en el este amazónico del Perú y son utilizadas principalmente para la confección de bolsas nativas, hamacas y redes de pesca. Mientras que, en Brasil, la *Astrocaryum Arenarium* crece en regiones semiáridas y son utilizadas generalmente para la confección de cuerdas.

En países como Ecuador, Colombia, Costa Rica y Panamá los cuales poseen bosques con humedad relativamente alta, es muy común la *Astrocaryum Standleyanum*, los cuales son aprovechadas para confección de sombreros, hamacas y cestos. (Marín, Millán, & Kahn, 2018)

Pero existe una menor importancia en la producción y la extracción de fibras de especies como la *Astrocaryum Jaguari* y *Astrocaryum Urostachys*. Pero no sucede lo mismo con la *Astrocaryum Chambira* ya que es considerada una de las especies más importantes para la producción de fibras vegetales en la región occidental amazónica ecuatoriana; etnias indígenas como los Bora, Chacobo, Cofán, Huaorani, Secoya, entre otras; son las principales etnias que poseen como principal fuente de empleo la domesticación de fibras. (Jensen, Balslev, & Henrik, 2008).

La *Astrocaryum Chambira* considerada como primer recurso no forestal domesticado para su conservación, tiene una influencia importante en los sistemas agroforestales de la Amazonía (Coomes, 2004). En países como Ecuador, Colombia y Perú la comercialización de la *Chambira* se la realiza en mercados de la región y redes nacionales e internacionales (Jensen, Balslev, & Henrik, 2008).

2.3.1. Producción de chambira en el Ecuador.

Es una planta arborescente grande, con tallo solitario de hasta 30 m, un diámetro entre 25 y 45 cm, cubierto con espinas planas amarillentas, en la Figura 4 se puede observar un árbol; su corona se encuentra formada por 9-16 hojas pinnadas erguidas y con una longitud de hasta 5 m de largo. La infrutescencia tiene hasta 500 frutos ovoides (6-7 cm eje mayor y 4-5 cm eje menor), de color verde claro o amarillo cuando ya están maduros (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013).



Figura 4. Árbol de *Astrocaryum Chambira*
Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013)

La *Astrocaryum Chambira*, se la encuentra en el Parque Nacional Yasuní, Amazonía ecuatoriana; con más abundancia en los bosques de tierra firme hasta los 350 msnm y de manera esporádica a mayor altitud, aproximadamente hasta los 500 - 600 msnm (Patrimonio, 2015), aunque en ocasiones se la puede encontrar en pantanos, en la Figura 5 se observa un diagrama de barras que representa las zonas donde crecen las palmas de *Astrocaryum Chambira*. (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013).

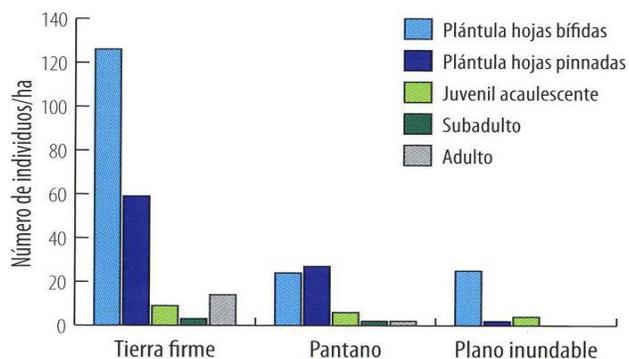


Figura 5. Crecimiento de las palmas *Astrocaryum Chambira*
Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013)

Como se puede observar en la Figura 6 se detalla el proceso de cosecha de la fibra en donde: (A) Con la ayuda de un machete amarrado a un palo de bambú se cortan las hojas ubicadas en la parte superior del tallo, (B y C) se cortan y se acopian para el transporte, (D) la extracción de la fibra empieza con el desprendimiento de la epidermis de los folíolos, (E) para cocinarlas durante 30 minutos, lavarlas con jabón y secarlas al sol. Posteriormente con la fibra seca se procede a realizar el tensado que consiste en colocar la fibra sobre el muslo y torcerla con la palma de la mano hasta formar una piola continua compuesta por varias fibras, la cual será utilizada para las distintas aplicaciones artesanales (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013).



Figura 6. Proceso de cosecha de la *Astrocaryum Chambira*
Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Henrik, 2013)

2.3.2. Aplicaciones.

De la *Astrocaryum Chambira* se elabora toda clase de productos para diferentes usos, por ejemplo, para la caza y pesca la fibra es utilizada para confeccionar redes, en la alimentación se usan el endospermo líquido, el palmito crudo y la semilla, como combustible se aprovecha los residuos de los foliolos; se elaboran además shigras o bolsos, hamacas, piolas, hilo para cordeles, cepillos, pulseras y pequeñas canastas; ceremonialmente las fibras son utilizadas para la elaboración de bandas que sirven de adorno (Garcia, y otros, 2013).

2.4. Resina

La resina sustancia con elevada densidad y solubilidad, e intenso olor; la cual es obtenida de forma natural a través de la secreción orgánica de plantas específicas una de estas es el pino resinero (Definición ABC , 2019),siendo en un principio líquida que al sufrir un proceso de polimerización se vuelve sólida (QuimiNET, 2019). Es muy valorada por sus usos y las propiedades químicas que poseen, se utilizan para la elaboración de: perfumes, bálsamos, pegamentos, aditivos alimenticios, entre otros productos. Existen también las resinas fabricadas por el ser humano, con propiedades relativamente similares a las resinas naturales entre las cuales podemos encontrar: el acrílico, poliuretano, resina epoxi, poliéster, etc. (Pérez Porto & Gardey, 2011).

2.4.1. Fotopolímeros

Los fotopolímeros o resinas son polímeros sensibles a la luz, al exponerla a la luz UV cambian sus propiedades mecánicas, pueden cambiar de estado líquido a sólido como es el caso

del plástico. Tomando en cuenta que solo el área expuesta a la luz ultravioleta se endurece, mientras que las partes no expuestas permanecen en estado líquido.

Por lo general, los fotopolímeros para uso general se los mantiene en estado líquido, también se los puede encontrar en forma de láminas. Existen otra variedad de polímeros que pueden cambiar sus propiedades bajo condiciones de radiación, como microondas o calor. (lámpara, luz solar, UV, etc.). (Pandey, 2014). En la figura 7 se detalla la evolución que han tenido los fotopolímeros a partir de sus primeros estudios y aclarar que en a partir del 2010 su estudio se encuentra enfocado en los distintos tipos de curado que pueden tener la resina. (Rodríguez & Pereira, 2007).

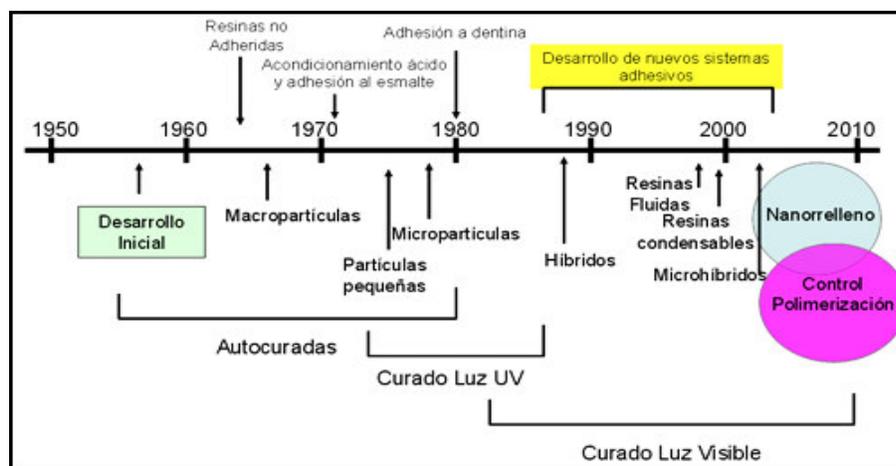


Figura 7. Evolución de los fotopolímeros

Fuente: (Rodríguez & Pereira, 2007)

La luz UV inicia reacciones químicas que van a cambiar la estructura y propiedades químicas y mecánicas. En general, los fotopolímeros están constituidos de varios componentes, como aglutinantes, fotoiniciadores, agentes químicos, aditivos, colorantes y plastificantes. Sin embargo, los componentes principales son monómeros, aglutinantes y fotoiniciadores. En la Figura 8 se

muestra un esquema de una mezcla de los componentes principales que se convierten en un material endurecido al exponerlo a un proceso de curado UV.

Las ondas UV tiene la capacidad de romper los enlaces que unen a los átomos que constituyen a la resina, al ser desprendidos tienden a formar nuevos enlaces con otros átomos en una reacción en cadena, reorganizando la estructura atómica que posee la resina que se encuentra en forma de pasta o líquido; cambiando propiedades como el color y la dureza (Borton, 2008).

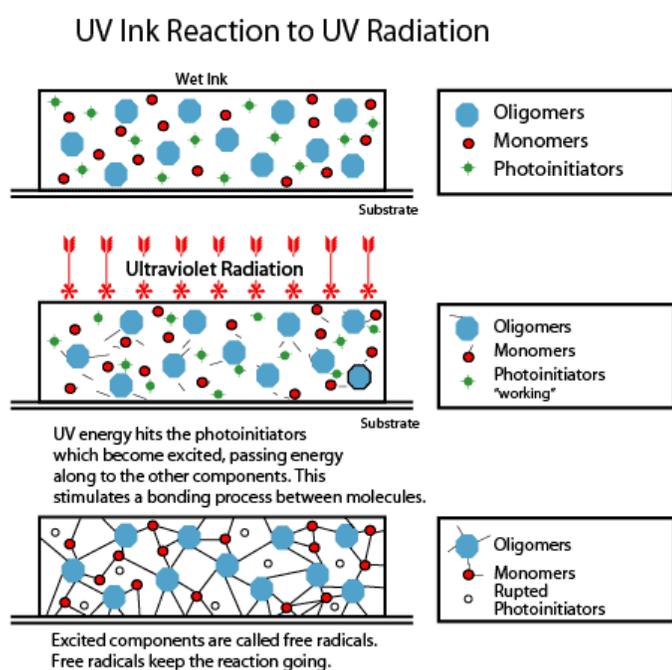


Figura 8. Polimerización del fotopolímero por luz UV.

Fuente: (Borton, 2008)

2.4.1.1. Aplicaciones.

Los fotopolímeros son ampliamente utilizados, en aplicaciones como imágenes o usos biomédicos. A continuación, en la Tabla 4 se detalla una descripción de algunas de las aplicaciones.

Tabla 4
Aplicaciones de los fotopolímeros

| Aplicación | |
|----------------------------|--|
| Odontología | Adhesivos, Compuestos sellantes, Recubrimientos protectores |
| Usos médicos | Catéteres, Audífonos, Mascarillas quirúrgicas. |
| Impresión 3D | Imagen digital, La estereolitografía |
| Fotoprotectores | Fotorresistencias |
| Impresión fina | Diseños en metal, planchas de impresión, Tarjetas de visita. |
| Reparación de fugas | Sellante para fugas y grietas |
| Acabado de suelos | Repintado de pisos. |

Fuente: Tomada de (Ferracane, 2002), (Reichmanis & Crivello, 2014)

2.5. Materiales compuestos

Los materiales compuestos son el resultado cuando dos o más materiales se juntan para dar una combinación de propiedades nuevas que no se pueden dar de otra manera. Un material compuesto se puede seleccionar para obtener propiedades no usuales de peso, rigidez, resistencia a la corrosión, dureza, entre otras. (Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2011)

La matriz en un material compuesto tiene la función de unir las fibras, dando la forma de la estructura del nuevo material, aislando cada una de las fibras, protegiéndolas del daño por desgaste, transfiriendo las cargas y más que nada dotarle de propiedades mecánicas como resistencia al impacto, tenacidad, etc. Dependiendo del comportamiento mecánico de la matriz polimérica frente a temperaturas elevadas, esta se puede dividir en dos grupos: matrices poliméricas termoplásticas las cuales se suavizan ante el calor en ocasiones hasta se funden, pero al enfriarse se endurecen y

las matrices poliméricas termoestables que poseen un comportamiento totalmente opuesto a las termoplásticas, ya que se endurecen al calentarse sin volverse a ablandar. (Jayaraman, 2003).

Tabla 5

Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzos

| Fibra orientada unidireccional | |
|---------------------------------------|--|
| Fibra larga y continua | Fibra orientada bidimensional (tejido, material cosido) |
| | Fibra orientada tridimensional (tejido 3-D, cosido 3-D) |
| | Orientación aleatoria (material de hilo continuo) |
| Fibras Discontinua | Orientación aleatoria (material de hilo troceado) |
| | Orientación predominante |
| Partículas | Orientación aleatoria |
| | Orientación predominante |

Fuente: Tomada de (Mayugo, 2013).

Los materiales de refuerzo cumplen la función de mejorar y/o modificar las propiedades del compuesto dependiendo de la distribución del refuerzo que se utilice, en la Tabla 5 se puede observar la clasificación de un material compuesto de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo, mismo que pueden ser partículas tales como: arena, sílice, grafito, vidrio, etc.

Los refuerzos también pueden ser fibras que tienen similitud con una cinta, cordón e hilo, estos proporcionan una mayor rigidez; mejorando la resistencia a la fatiga, soportando la mayor parte de la fuerza que se le aplica al material compuesto, permitiendo así mejorar la resistencia por parte del material que se encuentre en dirección al eje de la fibra. Este tipo de compuestos pueden tener fibras continuas o fibras discontinuas, dependiendo de disposición de estas fibras se puede obtener materiales compuestos con propiedades muy singulares que se acoplarían dependiendo de los requerimientos de diseño que se deseen obtener. En la Figura 9 se observa cómo cambia la resistencia a la tensión en un material compuesto según la orientación de las fibras.

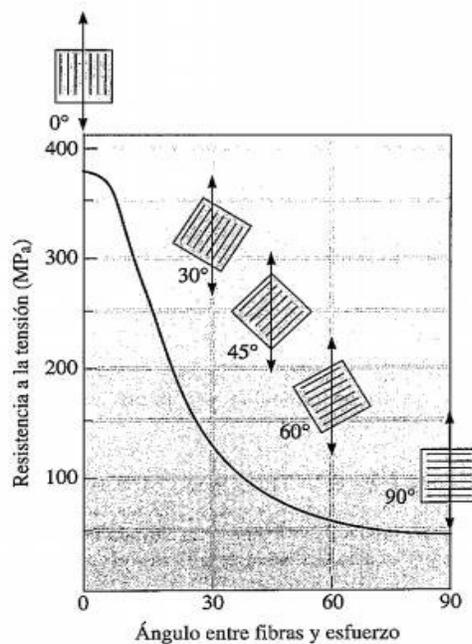


Figura 9. Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E

Fuente: (Askeland, 2011).

2.5.1. Compuestos reforzados con fibra vegetal.

Tecnológicamente, los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales son de gran importancia. A menudo se diseñan y elaboran materiales compuestos reforzados con fibras, con la finalidad de obtener elevada rigidez y resistencia, a baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso (Guerrero, y otros, 2011). Esta relación se la puede conseguir empleando materiales ligeros tanto en la fibra como en la matriz, teniendo en cuenta que estas cumplan con las propiedades mecánicas que se le quieren otorgar al material compuesto. En la mayoría de investigaciones se utilizan fibras vegetales en matrices termoestables o termoplásticas, sin embargo, en los últimos años se orienta al uso de biopolímeros (Satyanarayana, 2009).

2.5.1.1. *Compuestos de matriz termoplástica y termoestable.*

La rigidez y fragilidad de estas matrices es debido a las cadenas de polímeros que forman mallas de estructura reticulada en cualquier dirección. Los termoestables más utilizados para realizar matrices son: el poliéster, el epoxi y las poliamidas los cuales se utilizan comúnmente en la elaboración de materiales compuestos con fibras largas. (Moscoso, 2007). En la Tabla No. 6 se puede observar algunas propiedades mecánicas de distintos materiales compuestos obtenidas en varias investigaciones.

Tabla 6

Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz termoestable reforzados con fibras vegetales

| Material Compuesto | Modulo de Elasticidad [GPa] | Esfuerzo de Ruptura [MPa] | Resistencia al Impacto [KJ/m ²] |
|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---|
| Poliéster | 1.75 | 41.60 | 9.3 |
| Sisal (25%) /Poliéster | 1.90 | 34.35 | 30.0 |
| Coco (25%) /Poliéster | 1.40 | 14.10 | 11.1 |
| Banano (25%) /Poliéster | 2.34 | 43.25 | 10.0 |
| Vidrio (25%) /Poliéster | 2.71 | 55.65 | 45.0 |
| Sisal (58%) /Epoxy | 8.85 | 350 | - |

Fuente: Tomada de (Rong, Zhang, Liu, Yang, & Zeng, 2001).

Los materiales compuestos termoplásticos presentan una estructura molecular lineal o muy poco ramificada, estos al ser expuestos a la acción del calor se funden y se solidifican rápidamente

al entrar en contacto con el aire, una de las ventajas de los termoplástico es que se los puede fundir más de una vez, pero si se los funde en excesivas ocasiones se degradan. Un material termoplástico genera menor impacto ambiental, posee buenas propiedades y tiene un bajo costo de procesamiento que un material termoestable; dichas características hacen que sean materiales óptimos para la industria automotriz, proporcionando una excelente apariencia externa y brindando una resistencia al envejecimiento bastante buena. Entre termoplásticos utilizados como matriz se tienen: polipropileno (PP), polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), poliuretano (PU), entre otros (Moscoso, 2007).

Las investigaciones realizadas a distintos materiales compuestos se enfocan en determinar los efectos que se obtiene al modificar la interfaz fibra-matriz sobre las propiedades finales del compuesto. En la Tabla 7 se presentan los resultados referentes a las propiedades mecánicas realizadas a materiales compuestos con fibras vegetales y matrices termoplásticas.

Tabla 7

Propiedades mecánicas de materiales compuestos en matrices termoplásticas reforzados con fibras vegetales, valores máximos

| Material Compuesto | Modulo de Elasticidad [MPa] | Esfuerzo ultimo de tensión [MPa] | Elongación [%] |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Cabuya (20%)/ PE | 167.2 | 11.48 | 33.3 |
| Abaca (20%)/ PE | 251.8 | 13.17 | 34 |
| Abaca (30%)/ PP | 1185.6 | 33.2 | 11.8 |
| Cañamo (30%)/ PP | 6800 | 52 | - |

| | | | |
|----------------------------|--------|------|------|
| Yute (30%)/ PP | 3100 | 28 | - |
| Sisal (20%)/ PP | 1630.8 | 36.5 | 8.33 |
| Sisal (40%)/ PP | 716.4 | 38.7 | 8.56 |
| Kenaf (50%)/ PP | 7200 | 62.0 | - |
| Kenaf (30%)/ PP | 6900 | 29 | - |

Fuente: Tomada de (Morejón & Narváez, 2004), (Herrera & Valadez, 2005).

2.5.2. Propiedades de los materiales compuestos.

Las distintas propiedades de los materiales compuestos por fibras, no solo obedecen a las propiedades intrínsecas de cada uno de los componentes que lo conforman, sino también de factores como: relación de longitud-diámetro, adhesión fibra-matriz, disposición geométrica, proceso de conformado, cantidad de fibras y peso de las mismas, entre otras. (Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2011)

2.5.2.1. Adhesión fibra-matriz.

En un material compuesto existen un factor importante que interviene en la adhesión conocido comúnmente como interfaz, este actúa principalmente como una atadura la cual transfiere y distribuye la carga entre la fibra y la matriz, permitiendo obtener un área total de interfaz mucho mayor, las propiedades mecánicas que posee un material compuesto con fibra están directamente relacionadas con la longitud, orientación y peso que posee. Teniendo en cuenta que la cantidad de fibras que tiene un material compuesto se encuentra expresado como cantidad de volumen o a su vez cantidad de peso (Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2011).

La adhesión mecánica se logra gracias a las formas irregulares con las que cuentan la fibra y la matriz polimérica, si una fibra posee un elevado grado de humedad y fluidez se puede lograr una excelente unión entre las mismas. (Jayaraman, 2003), . La orientación de las fibras es un factor importante ya que aumenta la resistencia al encontrarse en dirección axial (Joseph, Joseph, & Thomas, 1999).

2.5.2.2. Efectos de procesamiento.

La estructura que se induce mientras se realiza el proceso de transformación influye negativamente en las propiedades finales de un material compuesto. Por ejemplo, al realizar un moldeo por compresión la velocidad de deformación del material fundido es baja, además considerando el progreso de presión y temperatura, así como el flujo de la matriz y el movimiento natural de la fibra cuando se encuentra dentro del molde, permiten un reordenamiento de la fibra, enfriamiento paulatino, y la cristalización de la matriz. (Wakeman, 1998)

Un factor fundamental que se debe tomar en cuenta es la degradación que la fibra tiene por efecto de la temperatura que es aplicada en el proceso de conformado del material compuesto, lo que provoca la coloración de la fibra, así como la pérdida de materias volátiles y un deterioro gradual de sus propiedades mecánicas. Provocando que el material tenga porosidades, con una densidad menor y propiedades inferiores

Pasa exactamente lo mismo cuando no se toma en cuenta el porcentaje de humedad de la fibra, si este sería elevado afectaría las dimensiones del compuesto influyendo directamente en las propiedades mecánicas. (Moscoso, 2007)

2.5.3. Criterios de falla para materiales compuestos

Si se conocen los esfuerzos que actúan en un laminado, es posible obtener las tensiones en cada lamina de un material compuesto, existen varias formas de definir el concepto de fallo, las más simple sería cuando existe una separación completa o fractura, una definición más acertada sería “Cuando el componente ya no puede cumplir la función para el cual fue diseñado” (Esmeralda Castillo, 2016).

Un diseño correcto requiere de un análisis eficiente, para lo cual es necesario aplicar teorías de falla acordes a los estados de tensión que actúan en el material, a continuación, se exponen dos de estos criterios seleccionados esencialmente por la simplicidad de implementación en programas de elementos finitos MEF.

2.5.3.1. *Tsai-Hill*

Basado en criterios de fallas polinomiales, siendo uno de los más utilizados, obteniendo resultados más ajustados, criterio similar al de Von Mises que se lo propuso para materiales ortotrópicos.

Para materiales anisótropos, Hill se basó en el criterio de Von Mises, el cual se comprobó para algunos materiales metálicos. En este criterio interviene una serie de parámetros de plastificación, cuya expresión general es la siguiente:

$$(G + H)\sigma_x^2 + (F + H)\sigma_y^2 + (F + G)\sigma_z^2 - 2H\sigma_x\sigma_y - 2G\sigma_x\sigma_z - 2F\sigma_y\sigma_z + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

Tsai relacionó los parámetros de plastificación F, G, H, L, M y N con la resistencia mecánica en dirección de las fibras X, transversalmente a ellas Y, de la resistencia de la lámina en dirección perpendicular a la misma Z, resistencia al a cortadura plana S, e interlaminar S_{xz} y S_{yz} . Tsai tomo como parámetro que sobre la lámina actúan estados de carga simples. (Borrachero, 2006).

La teoría de Tsai se ajusta de mejor forma a ciertos rangos de esfuerzos, una de las ventajas es que toma en cuenta todos los esfuerzos en el cálculo, para cualquier estado de esfuerzo. Por otro lado, una de las principales desventajas es que se involucran todos los modos de falla pudiendo aparecer alguno de ellos que no esté aportando a la falla de la lámina, ya que por lo general no aparecen todos los modos de falla simultáneamente.

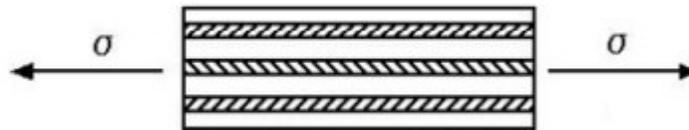


Figura 10. Estado de tensión de una lámina

En el caso de tensiones a tracción, se aplica el primer polinomio de la fórmula:

$$(G + H)\sigma_x^2 = 1 \quad (2)$$

2.5.3.2. Criterio de Puck

El criterio de Puck se basa en los fallos de materiales compuestos, haciendo una distinción entre dos modos de fallo, fallo de la fibra (FF) y fallo de la interfibra (IFF) denominado como fallo de la matriz.

Nomenclatura:

- E_f Módulo de Young de la fibra.

- S Resistencia del composite a cortante en el plano anisótropo en dirección fibras.
- X_{fT} Resistencia a tracción de la fibra.
- X_{fC} Resistencia a compresión de la fibra.
- Y_T Resistencia a tracción del composite en dirección transversal.
- σ_{f1} Tensión de la fibra.
- ε_{1C} Deformación longitudinal de fallo a compresión.
- ε_{1T} Deformación longitudinal de fallo a tracción.
- ν_{f12} Coeficiente de Poisson de la fibra en su plano.
- $m_{\sigma f}$ Factor de magnificación de Puck.
- γ_{12} Coeficiente de modo.

Fallo de la fibra: Este fallo se producirá cuando en la fibra se alcance una tensión normal longitudinal que sea igual a la que provocaría el fallo en un estado de tensión uniaxial, se tiene en cuenta que las componentes hacen referencia a las fibras, tal como se indica:

$$\sigma_{f1} = X_{fT} \quad ; \quad \sigma_{f1} = -X_{fC} \quad (3)$$

al establecerse un comportamiento elástico lineal, las resistencias se evaluarán de la siguiente manera:

$$X_{fT} = \frac{X_T}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1T} E_{f1} \quad ; \quad X_{fC} = \frac{X_C}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1C} E_{f1} \quad (4)$$

Donde tenemos el módulo elástico del compuesto en dirección de la fibra y el módulo elástico de la fibra, las deformaciones hacen referencia a las deformadas del compuesto en dirección de la fibra ya sea a tracción o compresión.

Si se tiene en cuenta el análisis de un estado tensional completo, donde se presentan las tres componentes, la deformación longitudinal de la fibra se expresa como:

$$\sigma_{f1} = \varepsilon_1 E_{f1} + \vartheta_{f12} m_{\sigma f} \sigma_2 \quad (5)$$

Finalmente, descomponiendo los criterios iniciales, tenemos:

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left(\varepsilon_1 + \frac{\vartheta_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) = 1 \quad \text{para tracciones} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1C}} \left(\varepsilon_1 + \frac{\vartheta_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) + (10\gamma_{12})^2 = 1 \quad \text{para compresiones} \quad (7)$$

Fallo de la matriz (fallo de la interfibra): Puck se centra en un criterio de rotura para materiales frágiles, existen tres modos distintos de fallo en la matriz; el modo A se asocia a un esfuerzo de tracción en la matriz ($\sigma_2 > 0$). Los otros dos modos B y C se asocian a un esfuerzo de compresión. En el modo B, la tensión transversal es pequeña relativamente a la tensión tangencial, mientras que en el modo C la tensión tangencial es mayor que la tensión transversal. Como el ensayo realizado es a tracción con fibras orientadas a un cierto ángulo solo será necesario estudiar el modo A.

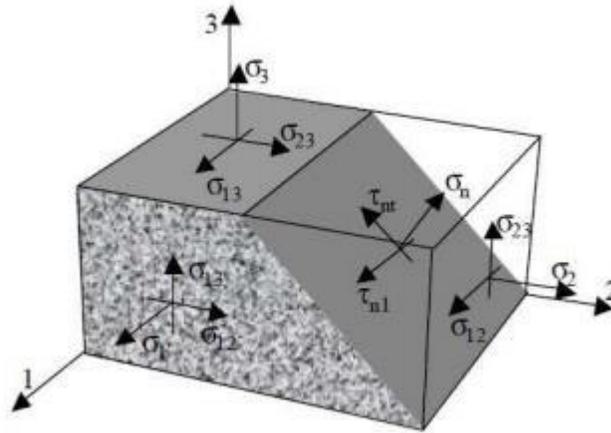


Figura 11. Plano de fractura genérico en composite UD y ejes asociados.
Fuente: (Esmeralda Castillo, 2016)

La ecuación siguiente se aplica para un problema típico de tensión plana, según el modo A:

$$\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 + \left(1 - 0,7 \frac{Y_T}{S}\right) \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + 0,7 \frac{\sigma_{22}}{S} + \left[2 - 0,7 \frac{\sigma_{22}}{S} - \left(\frac{\sigma_{11}}{1,1X_T}\right)^6\right] \left(\frac{\sigma_{11}}{1,1X_T}\right)^6 = 1 \quad (8)$$

2.6. Modelación por medio de elementos finitos

Es de gran importancia realizar un estudio de los materiales compuestos, así como de las estructuras o sistemas en los que se aplican estos materiales. En muchas ocasiones, antes de obtener un material o prototipo, se desea contar con información que proporcione datos sobre cómo podría actuar el diseño propuesto en la vida real y así poder tomar decisiones, es por este motivo que ha incrementado el uso de modelación y simulación (Ismeli, Vladimir, & Ignacio, 2015).

El Método de los Elementos Finitos (MEF) hoy en día se ha convertido en unos de los procesos habituales para modelar y simular en varias áreas de la ingeniería tales como: mecánica de sólidos, mecánica estructural entre otros; además se utiliza para problemas de

electromagnetismo, mecánica de fluidos y transferencia de calor. (Zienkiewicz & Taylor, 1994). En el MEF se dividen las estructuras en elementos o zonas conectadas entre nodos, al realizar un análisis arroja datos relativamente exactos de aplicaciones reales, este método se ha utilizado en el diseño asistido por computador con el fin de reducir costos y tiempos de producción. En el área de Ciencia de Materiales el uso del MEF ha sido en gran manera, principalmente para materiales avanzados, como son los materiales compuestos, nanomateriales, materiales porosos entre otros. (Ganesh & Chawla, 2005).

2.6.1. Software CAE.

Ingeniería asistida por computadora (CAE, Computer Aided Engineering) se denomina así al conjunto de programas que permite simular y analizar diseños elaborados con el ordenador, o creados en otro modo e introducidos al ordenador, la finalidad de estos softwares es la de optimizar tiempos y costos de fabricación, con la reducción de las pruebas a realizarse para obtener un producto deseado. (Borrachero, 2006).

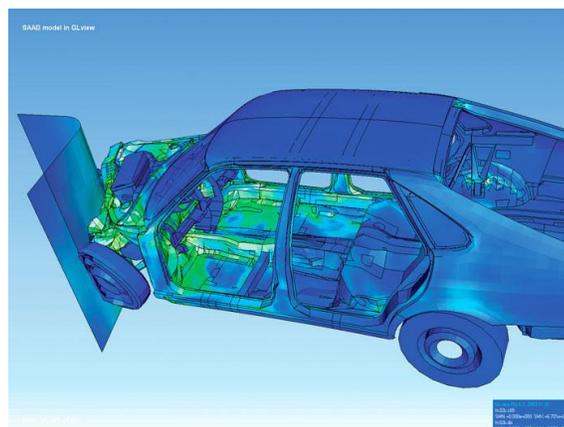


Figura 12. Simulación por modelamiento CAE
Fuente: (Borrachero)

El MEF permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas mediante un ordenador. La variedad de problemas a los que se puede aplicar el MEF ha crecido notablemente, con un requisito indispensable de conocer las ecuaciones constitutivas y de evolución temporal del problema a resolver, en la Figura 12 se puede observar la simulación de un choque en un software MEF.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describe el proceso experimental utilizado en el proyecto, se detalla la estrategia metodológica, las diferentes pruebas y ensayos realizados, por otro lado, se especifican las características de los equipos utilizados, se listan los materiales utilizados, y las técnicas empleadas a lo largo del estudio experimental.

3.1. Consideraciones previas

Si bien existen varias investigaciones con la finalidad de reemplazar las fibras sintéticas por fibras naturales como material de refuerzo en composites, gran parte de estas utilizan fibras ya ampliamente conocidas como son el kenaf, sisal, abacá entre otras, cambiando únicamente la matriz. Adicionalmente, actualmente existe poca información referente al uso de fibra de Chambira en materiales compuestos, una fibra de común uso en la Amazonía Ecuatoriana, utilizada ampliamente en artesanías (Jensen, Balslev, & Henrik, 2008).

Las propiedades mecánicas de composites reforzados con fibras vegetales, dependen en gran manera de factores como la disposición geométrica, orientación, relación peso entre fibra-matriz, fracción de volumen, e incluso del proceso de manufactura aplicado al material compuesto (Marco, 2012).

Los métodos más utilizados al momento de elaborar compuestos reforzados con fibras naturales son el de extrusión e inyección, el cual es un limitante para usar fibras largas, y la fibra se tiende a degradar en el proceso. Por el cual la presente tesis trata de aportar con el estudio de

una técnica simple que minimice tiempo y la degradación térmica y mecánica de la fibra (Moscoso, 2007).

3.2. Estrategia metodológica

3.2.1. Etapas del proceso

El proyecto se llevó a cabo en tres procesos principales como se describe en la Figura 13:

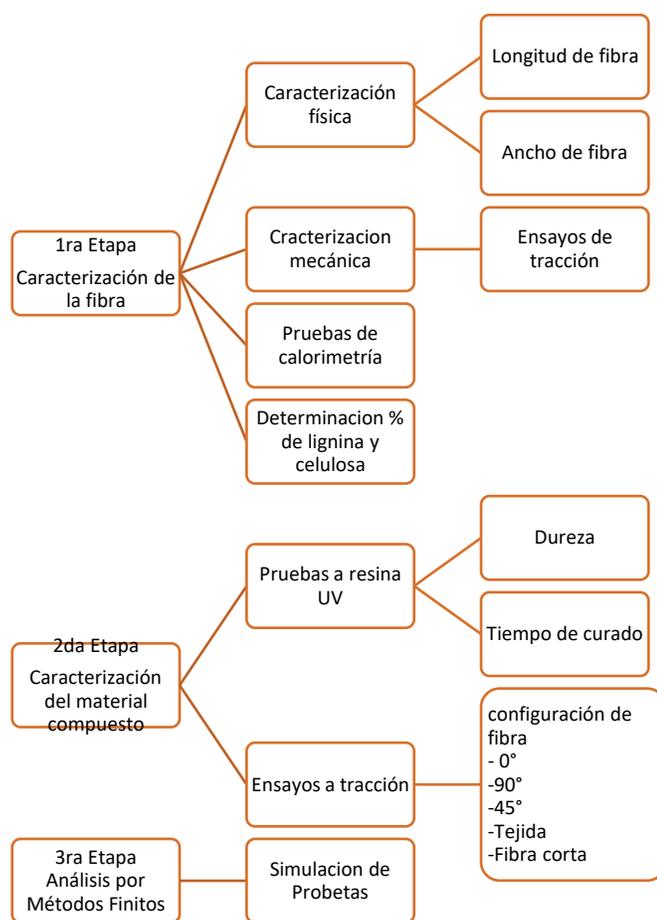


Figura 13. Esquema de la metodología aplicada en el proyecto de investigación

En una primera etapa se caracterizó la fibra *Astrocaryum Chambira*, se realiza una caracterización física, tomando medidas de ancho y largo (ANEXO A4.1 & A4.2), posteriormente

se determinó la densidad lineal, para obtener estos datos se seleccionaron fibras de diferentes longitudes y se pesaron cada una de ellas y así obtener un promedio, como segundo paso se hizo la caracterización mecánica de la fibra, utilizando las fibras de diferentes longitudes anteriormente mencionadas, se las sometieron a un ensayo de tracción en un reómetro adaptado adecuadamente para realizar el ensayo, así se obtuvieron los datos de esfuerzo máximos, Módulos de Elasticidad, Coeficientes de Poisson que son necesarios para la segunda etapa; adicionalmente a la fibra se le realizaron ensayos de calorimetría para obtener su poder calórico, este ensayo se lo hizo con una bomba calorimétrica, para las muestras se elaboró una matriz, a la fibra se la hizo polvo para lo cual se la sumergió en nitrógeno líquido y posteriormente se la pulverizó y tamizó; para obtener el número de muestras se empleó el método de experimentos ortogonal de Taguchi³ dándonos así un total de 27 muestras, a estas se las pesó y midió su volumen para obtener la densidad volumétrica.

La segunda etapa se trató sobre la caracterización del material compuesto, para lo cual como primer punto se caracterizó la resina fotopolimérica, se sometió a la resina a una cámara de curado UV, con lo cual se sacaron datos de espesores y tiempos de curado, para la elaboración de la matriz se basó en la norma ISO 527-4 de donde se obtuvieron las medidas adecuadas y se las elaboro en acrílico transparente que es un material resistente a los rayos UV, estas matrices fueron adecuadas para poder colocar las fibras con diferentes orientaciones (Longitudinales, transversales, a 45°, particulado y en malla) y fracciones de volumen, a la resina se le hicieron ensayos de dureza en un micro durómetro, una vez ya obtenido el material compuesto se lo sometió a ensayos de tracción obteniendo las características mecánicas, datos que serán de gran utilidad para determinar la posible aplicación del material compuesto.

³ Método ortogonal Taguchi: "Experimento diseñado que permite elegir un producto o proceso que funciona con mayor consistencia en el entorno operativo" (Minitab, 2019).

En la tercera etapa se realiza un análisis por métodos finitos en el software ANSYS, se simuló una probeta y se la sometió igualmente a fuerzas de tracción para así poder comparar datos teóricos con los experimentales, se utilizaron varios criterios de falla como son el de Tasi-Hill y Puck, criterios empleados específicamente para materiales compuesto al aplicar estos criterios se puede determinar la posible falla de la probeta en cual capa y con cual orientación de la fibra, pudiendo así optimizar la elaboración del material compuesto.

Finalizadas todas las etapas, las probetas con las mejores propiedades mecánicas, y con las cuales se obtuvo unas mejores condiciones de procesamiento, se las caracterizo de forma más detallada.

3.2.2. Técnicas y equipos utilizados.

Las técnicas y Equipos utilizados en las distintas etapas realizadas se detallan a continuación: caracterización de la fibra, caracterización del material compuesto, Modelado FEM del material compuesto.

3.2.2.1. Caracterización de la fibra *Astrocaryum Chambira Ecuatoriana*

Dentro de la caracterización se detalla todas las técnicas que fueron utilizadas para poder determinar propiedades mecánicas y físicas de la fibra, resina foto curable y el material compuesto; por lo cual a continuación se detallan las máquinas que fueron utilizadas con sus respectivas técnicas:

3.2.2.1.1. Balanza analítica

Balanza marca aeADAM, modelo PW254, representada en la Figura 14, apreciación de 0.0001 g. Y carga máxima de 250 g., empleada para determinar el peso tanto de fibras, moldes y probetas ensayadas, datos con los cuales se determina la fracción volumétrica del material compuesto.



Figura 14. Balanza analítica aeADAM.

3.2.2.1.1. Microscopio digital.

Microscopio digital de marca Plugable, versión 2.0 USB, como se observa en la Figura 15, con una ampliación de imagen de 250x; utilizado para tomar fotos a las fibras y poder medir el ancho de las mismas.



Figura 15. Microscopio digital con ampliación de 250x

3.2.2.1.2. Máquina de ensayos universales.

Máquina de Ensayos Universales marca AMSLER modelo FM-1033, la cual se observa en la Figura 16; permite obtener las distintas pastillas por medio de la compactación de la fibra pulverizada (Arroyo, & Guerrero, & Eduardo, 2019), tomando en cuenta el grado de compactación que se deseaba obtener.

Posee una capacidad de carga a compresión de 200 ton, dispone de un control por medio de perillas con la cual se controla la fuerza de compresión del polvo de la fibra de Chambira, los datos obtenidos son tabulados de forma automática en tablas de Excel.



Figura 16. Maquina de ensayos universales AMSLER-FM1033

3.2.2.1.3. Higrómetro digital.

Es un higrómetro digital marca DUSIEL, modelo MD812, cuenta con una pantalla LCD, rango de medición 5% a 40%, resolución de 1%, cuenta con dos pines de contacto y una potencia de 9V alcalina, como se muestra en la Figura 17, el cual permite realizar la medición de la humedad que tenía la fibra pulverizada clasificada en distintos grupos dependiendo de la humedad que poseían.



Figura 17: Higrómetro digital DUSIEL-MD812

3.2.2.1.4. Bomba calorimétrica.

El poder calorífico de las muertas se determinó mediante el Calorímetro Adiabático Gallenkamp OC-5191, Figura 18, la cual posee tres cámaras de agua que permiten tener un sistema adiabático completo, posee dos termómetros de mercurio que miden la temperatura de combustión bajo condiciones certificadas cada 0.01°C ; los cuales permiten realizar el cálculo de poder calorífico mediante las diferencias de temperatura que existe entre ellos.



Figura 18. Calorímetro adiabático Gallenkamp OC-5191

3.2.2.1.5. Máquina de ensayos universales

Es la máquina de ensayos universales marca MTS, modelo T 5002 que se observa en la Figura 19; permite obtener las propiedades mecánicas de la fibra utilizando una longitud de 100 milímetros (100mm) según la Norma ASTM D3822 – D3822M, detallada en el ANEXO D, tomando en cuenta la disposición y distancias recomendadas.



Figura 19. Máquina de ensayos universales MTS-T5002

Posee una capacidad de carga máxima de 5000 (N) y una velocidad de motor de 20 (plg/min), dispone de un control analógico, los datos obtenidos se reflejan en el computador en tablas de Excel; para posteriormente realizar una tabulación de los datos de forma automática.

3.2.2.1.6. Microscopio.

Se utilizó un microscopio marca MEIJI TECHNO, modelo ML 7000 ilustrado en la Figura 20, Para poder observar el comportamiento que tiene la resina al ser curada con rayos UV lo que permitió tener una un criterio más claro de cuáles eran los mejores parámetros de curado.



Figura 20. Microscopio MEIJI TECHNO-ML7000

3.2.2.1.7. Reómetro.

El reómetro de marca DISCOVERY HR-2 HIBRID RHEOMETER, ilustrado en la Figura 21 emplea una fuerza normal máxima de 50 N y una fuerza normal de sensibilidad de 0.005 N, en el cual se realizó ensayos a tracción para poder obtener propiedades mecánicas de la fibra como fuerza máxima, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación. Esta máquina permite ingresar datos como peso, distancia entre mordazas y tiempo de aplicación de la fuerza para el ensayo a tracción.



Figura 21. Reómetro DISCOVERY HR-2HIBRID

3.2.2.2. Fabricación y caracterización del material compuesto.

Se describe con brevedad los equipos y técnicas que se utilizaron para la obtención del material compuesto.

3.2.2.2.1. Durómetro.

Se usa el medidor de dureza DORULINE-M Microhardness, Marca Melkon, que cuenta con una prensa de precisión de 12V 50W, ilustrado en la Figura 22, Este durómetro permite obtener datos de la dureza superficial que posee la resina, lo que proporciona los parámetros iniciales para poder iniciar el estudio investigativo.

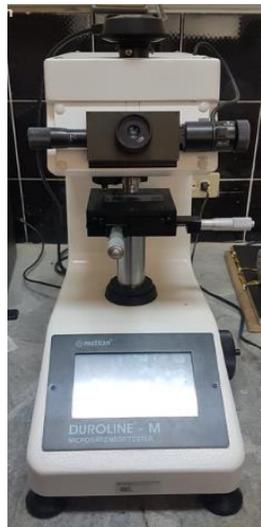


Figura 22. Durómetro Microhardnes Melkon

3.2.2.2.2. Máquina de corte a láser.

Máquina de corte a rayo láser marca FDA modelo KL4060 2017, manejado por el software “Corel LASER”; la misma que permitió realizar los cortes de los moldes para las distintas distribuciones de las fibras en el material compuesto. Como se ilustra en la Figura 23.



Figura 23. Máquina de corte laser FDA-KL4060 2017

3.2.2.2.3. Molde cerrado.

Se utilizó un molde tipo Macho-hembra y los planos se encuentran detallados en el ANEXO C, el material en el cual se realizó el molde es en acrílico de tres milímetros (3mm) de espesor; las dimensiones de la cavidad son: 75mm x 10mm x 3mm, como se especifica en Figura 24.



Figura 24. Molde para probetas en acrílico transparente

3.2.2.2.4. Máquina de curado

Caja en material MDF ensamblada, que posee una distribución rectangular de 68 leds UV, con una potencia de 61.2 Watts y una longitud de onda de 400 [nm]; los cuales permiten la curación de la resina, misma que fue utilizada para curar el material compuesto, su accionamiento es a través de un switch, Ilustrado en la Figura 25.



Figura 25. Caja de curado a base de leds UV

3.2.2.2.5. Máquina de ensayos universales.

Es la máquina de ensayos universales marca SHIMATZU, modelo AGS-X como se observa de la Figura 26; permite determinar diferentes propiedades mecánicas del material compuesto utilizando probetas de acuerdo según la Norma ISO 527-4 (ANEXO D), tomando en cuenta la disposición y distancias de las mordazas de la misma.

Su capacidad de carga es de 50kN, dispone de un control a través de un computador, posee un Software de manejo denominado TRAPEZIUM X, el cual admite ingresar parámetros predeterminados como: tipo de ensayo, distancia entre mordazas, fuerza de aplicación, tiempo de aplicación de la fuerza, entre otros. Para posteriormente realizar una tabulación de los datos de forma automática.



Figura 26. Maquinas de ensayos universales SHIMATZU AGS-X

3.3. Procesamiento experimental

3.3.1. Primera etapa: Pruebas en la fibra

En esta parte se detalla las pruebas que se realizaron y el procesamiento utilizado para poder obtener las características y propiedades de la fibra, para lo cual se tomó en cuenta parámetros y consideraciones de la norma ASTM D3822/D3822M “Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers” y la norma ASTM D1577 “Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers”.

3.3.1.1. Porcentajes de lignina y celulosa.

Para la caracterización química de la fibra se tomaron en cuenta seis muestras de las cuales dos fueron para la lignina, dos para la hemicelulosa, y dos para la celulosa.

3.3.1.1.1. Humedad.

La humedad se determina por la diferencia en el porcentaje de agua entre el material húmedo y seco. Para su cálculo se pesa una cantidad de fibra fresca (PMH), se seca la fibra en un horno a 105 °C, y se procede a pesar la muestra (PMS), la humedad será la pérdida de peso como se indica en la ecuación 9.

$$\%Humedad\ de\ la\ muestra = \frac{PMH - PMS}{PMH} * 100 \quad (9)$$

Se calcula la humedad operativa empleando la ecuación 10.

$$\%Humedad\ operativa = \frac{100}{100 - \%humedad\ de\ la\ muestra} \quad (10)$$

3.3.1.1.2. Residuo a calcinación (cenizas).

Se determinó como cenizas el residuo obtenido de la calcinación de la muestra a 430°C (PC) secada anteriormente para el cálculo del porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas se expresa respecto al peso de muestra seca como se indica en la ecuación 11.

$$\%Cenizas = \frac{PMS - PC}{PMS} * 100 \quad (11)$$

3.3.1.1.3. Materia Orgánica (MO).

Se determina como la pérdida de peso debido a la calcinación a 430°C, Se expresa empleando la ecuación 12.

$$100 = \% \text{ Cenizas} + \% \text{ MO} \quad (12)$$

3.3.1.1.4. Lignina, Holocelulosa y Celulosa

Los Anexos concernientes para determinar cada uno de los componentes constitutivos principales de la fibra *Astrocaryum Chambira*, se mencionan en la Tabla 8; los parámetros utilizados en cada ecuación se especifican en su respectivo procedimiento indicado en el Anexo correspondiente.

- Lignina

$$\% \text{ Lignina} = \frac{(P3 - P2) \times (\% \text{ MOlig}) \times 100}{P1 \times (100 - \% H)} \quad (13)$$

- Holocelulosa

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{(P3 - P2) \times (100 - \% \text{ Hholo}) \times (\% \text{ MOlig})}{P1 \times (100 - \% H)} \quad (14)$$

- Celulosa

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{(P3 - P2) \times (\% \text{ MOcel}) \times (\% \text{ Holocelulosa}) \times 100}{P1 \times (\% \text{ MOholo}) \times (100 - \% \text{ Hholo})} \quad (15)$$

Tabla 8

Ecuación y proceso a aplicar para la obtención de porcentajes lignina, holocelulosa y celulosa

| Componente | Ecuación | Anexo para el procedimiento |
|---------------------|-----------------|------------------------------------|
| Lignina | 13 | B1 |
| Holocelulosa | 14 | B2 |
| Celulosa | 15 | B3 |

3.3.1.2. Tenacidad.

Según la norma ASTM D3822/D3822M, la longitud de la fibra debe ser mayor a 10mm de longitud para obtener resultados más satisfactorios, por lo que la longitud de cada fibra será de 250 mm tomando en consideración la separación de las mordazas.

las 20 fibras deben previamente estar humedecidas en agua destilada al 0.1% a temperatura ambiente durante tres minutos, se debe tomar en cuenta que al sacar la fibra de la solución acuosa; no debe pasar de dos minutos para realizar la prueba a tracción como se observa en la Tabla 9.

Ya clasificadas y pesadas las fibras después de realizar el ensayo a tracción, se procede a calcular la tenacidad empleando la ecuación 16.

$$\gamma = \frac{F}{D_L} \quad (16)$$

Donde:

Y = Fuerza de tenacidad [N/tex]

F = Fuerza de rompimiento [N]

D_L = Densidad Lineal [tex]

Tabla 9*Tabulación de peso de fibras secas y humedecidas*

| PESO DE LAS FIBRAS | | | | | |
|---------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| FIBRAS SECAS | | FIBRAS SECAS (ANTES HUMEDECER) | | FIBRAS HÚMEDAS | |
| CÓDIGO | PESO (g) | CÓDIGO | PESO (g) | CÓDIGO | PESO (g) |
| S1 | 0,1558 | H1 | 0,1625 | H1 | 0,314 |
| S2 | 0,1521 | H2 | 0,1519 | H2 | 0,3006 |
| S3 | 0,1517 | H3 | 0,1511 | H3 | 0,2656 |
| S4 | 0,1427 | H4 | 0,149 | H4 | 0,2594 |
| S5 | 0,1423 | H5 | 0,1484 | H5 | 0,2568 |
| S6 | 0,1381 | H6 | 0,1371 | H6 | 0,2493 |
| S7 | 0,1345 | H7 | 0,1366 | H7 | 0,2454 |
| S8 | 0,1309 | H8 | 0,1312 | H8 | 0,2435 |
| S9 | 0,1153 | H9 | 0,1238 | H9 | 0,2263 |
| S10 | 0,1139 | H10 | 0,1137 | H10 | 0,2171 |
| S11 | 0,1115 | H11 | 0,1125 | H11 | 0,2121 |
| S12 | 0,1095 | H12 | 0,1091 | H12 | 0,2093 |
| S13 | 0,1082 | H13 | 0,1079 | H13 | 0,2075 |
| S14 | 0,1078 | H14 | 0,1056 | H14 | 0,206 |
| S15 | 0,0958 | H15 | 0,0955 | H15 | 0,2049 |
| S16 | 0,0932 | H16 | 0,0947 | H16 | 0,1966 |
| S17 | 0,0909 | H17 | 0,0904 | H17 | 0,1845 |
| S18 | 0,0875 | H18 | 0,0882 | H18 | 0,1816 |
| S19 | 0,0852 | H19 | 0,0843 | H19 | 0,1397 |
| S20 | 0,0835 | H20 | 0,0834 | H20 | 0,1385 |
| S21 | 0,0772 | H21 | 0,0764 | H21 | 0,1379 |
| S22 | 0,0712 | H22 | 0,074 | H22 | 0,1303 |
| S23 | 0,0681 | H23 | 0,0696 | H23 | 0,1291 |
| S24 | 0,0675 | H24 | 0,064 | H24 | 0,1116 |
| S25 | 0,0532 | H25 | 0,0538 | H25 | 0,0922 |

3.3.1.3. *Densidad lineal*

Para determinar la densidad lineal como lo enuncia la norma ASTM D1577, se utiliza la ecuación 17.

$$T_d = \frac{W}{L \times N} \quad (17)$$

Donde:

T_d = Densidad lineal promedio de la fibra [tex].

W = Masa de la muestra [g].

L = Longitud de la muestra [tex].

N = Número de fibras en la muestra del paquete.

3.3.1.4. *Densidad volumétrica.*

Para la densidad volumétrica se toman en cuenta pastillas compactadas de forma cilíndrica, las cuales se las pesa y con las dimensiones se saca el volumen. Con estos datos se aplica la siguiente ecuación para obtener la densidad respectiva.

$$\rho = \frac{M}{\frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 \cdot L} \quad (18)$$

Donde:

M = Peso de la pastilla [Kg].

L = Longitud de la pastilla [m].

φ = diámetro de la pastilla [m].

3.3.1.5. *Longitud efectiva.*

Para el cálculo de la longitud efectiva se debe tomar en cuenta la norma ASTM D3822/D3822M utilizando la ecuación 19.

$$L_e = L_i + \Delta L_c \quad (19)$$

Donde:

L_e = Longitud efectiva [mm].

L_i = Longitud inicial entre abrazaderas [mm].

ΔL_c = longitud adicional correspondiente al error de la abrazadera [mm].

3.3.1.6. *Elongación.*

Para el cálculo de la elongación se debe considerar las especificaciones de la norma ASTM D3822/D3822M, utilizando la ecuación 20, y se ilustra en el ejemplo de la Figura 27.

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta L}{L_e} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

ε_s = Porcentaje de elongación [%].

L_e = Longitud efectiva [mm].

ΔL = Distancia a lo largo del eje cero, desde el punto correspondiente al punto cero de la curva Tensión- Deformación [mm].

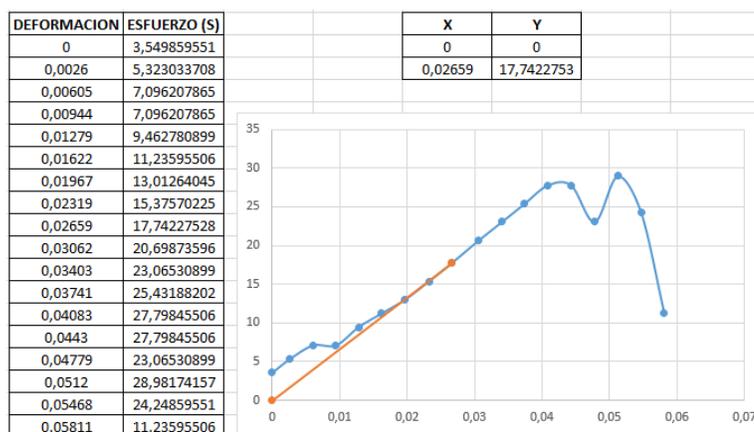


Figura 27. Ilustración del porcentaje de deformación aplicando una fuerza a una fibra.

3.3.1.7. Módulo inicial.

Encontrada la pendiente máxima se dibuja una línea tangente a la curva Esfuerzo – Deformación, entre el punto que es tangente a dicha línea y el límite elástico proporcional a la misma, midiendo el alargamiento y la deformación con 3 cifras significativas, como lo dispone la norma ASTM D3822/D3822M, para lo cual se utiliza la ecuación 21.

$$J_i = \frac{S}{\varepsilon_s} \quad (21)$$

Donde:

J_i = Módulo inicial [N/tex].

S = Tensión determinada trazada en línea tangencial [N].

ε_p = tensión correspondiente con respecto a la línea tangencial trazada y la tensión determinada[tex].

3.3.1.8. Parámetros considerados para la compactación.

Para poder medir el poder calorífico superior de la fibra se requiere un cierto grado de compactación, porcentaje de humedad y distintos tamaños de grano; para obtener las pastillas se

pulverizó la fibra con ayuda de nitrógeno líquido que cuenta con una temperatura igual o menor a -195.8°C .

Luego de obtener el polvo de la fibra, se realizó un tamizado para poder clasificar y obtener los distintos tamaños de grano, adicionalmente se midió el porcentaje de humedad que tenía cada grupo de fibras pulverizadas, con lo cual se establece el número de variables (Tamaño de grano, grado de compactación y % de humedad) para aplicar el método estadístico más idóneo para el desarrollo experimental

Para la caracterización de la fibra se aplicó un diseño estadístico experimental 3N, en la Tabla 10 se observan las variables de decisión para el desarrollo de la investigación, las mismas que permitirán obtener la combinación más adecuada para obtener el poder calorífico superior⁴.

Tabla 10

Variables de decisión para la compactación de la fibra de chambira

| PARÁMETROS | | | | |
|-----------------------|----------------------|---------|-------|------|
| FACTORES | VARIABLES | NIVELES | | |
| | | ALTO | MEDIO | BAJO |
| TAMAÑO DE GRANO | TG [μm] | 850 | 600 | 425 |
| GRADO DE COMPACTACIÓN | GC [Ton] | 1,25 | 1 | 0,75 |
| % DE HUMEDAD | Hu [%] | 31% | 24% | 17% |

Las combinaciones que fueron obtenidas gracias el método estadístico de Taguchi en la cual se recomendaba realizar 27 muestras con distintas combinaciones las mismas que se detalla en la Tabla 11.

⁴ Poder Calórico Superior: "cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado, También es llamado poder calorífico neto" (Petromercado, 2019).

Tabla 11

Combinaciones de las variables de decisión, empleado el método de Taguchi

| <i>HUMEDAD [%]</i> | <i>TAMAÑO GRANO [um]</i> | <i>GRADO COMP. [Ton]</i> | <i># PROBETAS</i> |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 31 | 850 | 1,25 | 3 |
| 31 | 600 | 1 | 3 |
| 31 | 425 | 0,75 | 3 |
| 24 | 850 | 1 | 3 |
| 24 | 600 | 0,75 | 3 |
| 24 | 425 | 1,25 | 3 |
| 17 | 850 | 0,75 | 3 |
| 17 | 600 | 1,25 | 3 |
| 17 | 425 | 1 | 3 |
| TOTAL | | | 27 |

La bomba calorimétrica tiene que ser calibrada con ácido benzoico estándar de 26454 KJ/Kg., medidas que fueron realizadas acorde a la norma ASTM D4868, que nos brinda una precisión del 0.01%; las muestras fueron quemadas en ácido benzoico dentro de la bomba calorimétrica adiabática y así poder obtener la capacidad calorífica de la bomba.

Al quemar las 27 muestras se tomó en cuenta la temperatura final y el tiempo en el cual la muestra llego a su combustión completa, teniendo en cuenta una temperatura inicial de 21°C; con estos datos se puede calcular el poder calorífico superior; para la obtención de los mismos se consideraron variables de operación constantes las cuales están detalladas en la Tabla 12.

Tabla 12

Variables de operación Constante

| | |
|---|----------------|
| <i>MASA DE LA MUESTRA</i> | 0,8 g |
| <i>PRESIÓN DE OXÍGENO</i> | 15 bar |
| <i>TEMPERATURA INICIAL</i> | 21°C |
| <i>CAP. CALORÍFICA TOTAL DE LA B.C.</i> | 11022,5 [J/°C] |

3.3.1.9. *Variación de entalpía.*

La variación de entalpía es una propiedad termodinámica utilizada para medir la entalpía de neutralización, utilizando generalmente agua como fue el caso de la experimentación y tomado en cuenta la variación de temperatura existente, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (22)$$

Donde

Q = Variación de entalpía [KJ/Kg].

\dot{m} = Masa de la muestra [Kg].

C_p = Capacidad calorífica específica de la bomba [J/°C].

ΔT = Variación de temperatura [°C].

3.3.2. **Segunda etapa: pruebas a la resina y caracterización del material compuesto.**

Al no contar con la hoja técnica completa de todos los datos acerca de la resina SF 3D Printing LNK, se realizó pruebas preliminares a la misma y así poder continuar con la caracterización del material compuesto ya que no se conocía el tiempo de curado y tampoco la dureza de la misma.

3.3.2.1. *Tiempo de curado.*

Para obtener los parámetros detallados en la Tabla 13 se usa el procedimiento: “Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly(propylene fumarate) scaffolds”, (Mott, Busso, Luo, Dolder, & Wang, 2015).

Tabla 13*Variables para el tiempo de curado*

| <i>VARIABLES</i> | |
|------------------|----------------|
| <i>TIEMPO</i> | <i>VOLTAJE</i> |
| <i>[S]</i> | <i>[V]</i> |
| <i>2</i> | <i>12</i> |
| <i>5</i> | <i>8,2</i> |
| <i>10</i> | <i>7,4</i> |
| <i>20</i> | <i>-</i> |

Al contar con 7 variables de decisión para el desarrollo de esta prueba se aplica el método estadístico de Taguchi obteniendo 12 combinaciones detalladas en la Tabla 14, realizando con cada combinación tres pruebas (ensayos). Para obtener la muestra se aplicó 3 gotas de la resina sobre un portaobjetos que posteriormente sería sometido a radiación UV tomando en cuenta las distintas combinaciones.

Tabla 14*Combinaciones a utilizar para el tiempo de curado*

| <i>TIEMPO [S]</i> | <i>VOLTAJE [V]</i> | | |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | <i>12 [V]</i> | <i>8,2 [V]</i> | <i>7,4 [V]</i> |
| <i>2 [S]</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> |
| <i>5 [S]</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> |
| <i>10 [S]</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> |
| <i>20 [S]</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> | <i>3 E.</i> |

E: Ensayos o Repeticiones

3.3.2.2. *Dureza.*

Al contar con 6 variables de decisión para el desarrollo de la presente prueba se aplicó el mismo diseño estadístico 3N, utilizado anteriormente para las pruebas de calorimetría, por lo que al aplicar el método de Taguchi se obtienen 9 combinaciones, realizando tres ensayos con cada combinación, como se puede observar en la Tabla 15, prueba que se realizó con el mismo procedimiento de curado.

Tabla 15
Combinaciones a emplear

| TIEMPO [S] | VOLTAJE [V] | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | 12 [V] | 8,25 [V] | 7,34 [V] |
| 5 [S] | 3 E. | 3 E. | 3 E. |
| 10 [S] | 3 E. | 3 E. | 3 E. |
| 20 [S] | 3 E. | 3 E. | 3 E. |

E: Ensayos o Repeticiones

3.3.2.3. *Materiales.*

A continuación, se detalla las características primordiales de los materiales que fueron utilizados en el presente proyecto de titulación; también se especificará características técnicas entregadas por los proveedores y otras que fueron determinadas durante el desarrollo del proyecto.

3.3.2.3.1. Resina SF 3D PRINTING LNK

Resina SF 3D Printing LNK de la casa fabricante Maker Juice, ilustrada en la Figura 28, utilizada en el presente proyecto, es de curado UV de uso general, compuesto por Ester de acrilato y fotoiniciador, posee una viscosidad de 550 Cp.



Figura 28. Resina UV SF 3D LNK

Pruebas de tiempo de curado y dureza se le practicaron a la resina ya que no contábamos con estos datos técnicos, lo que permitió realizar un curado adecuado al material. A continuación, en la Tabla 16 detallaremos las distintas propiedades que proporciona el fabricante acerca de la resina.

Tabla 16

Propiedades mecánicas de la resina

| | |
|-------------------|-------------|
| Elongación | 15 % |
| Módulo | 655 MPa |
| Tracción | 47 MPa |
| Viscosidad | 220 cP |

Fuente: Tomada de (MakerJuice Labs, 2019).

3.3.2.3.2. *Astrocaryum Chambira Ecuatoriana.*

Esta fibra se la encuentra en la amazonia, su tratamiento para ser comercializada y utilizada es a base de secado y cocinado de la fibra, como se referencia y se detalla en la sección 2.3 del presente proyecto. Estudios realizados con *Astrocaryum Chambira* en regiones como Perú y Colombia proporcionan datos que se pueden utilizar para la comparación con el estudio que actualmente se está desarrollando como proyecto de titulación.

3.3.2.3.3. *Propiedades mecánicas de la fibra.*

Se realizan pruebas de tracción a la fibra con la Máquina de Ensayos Universales, con una medida inicial de 100mm de longitud para obtener resultados del esfuerzo que soporta la fibra; basándose en la norma ASTM D3822/D3822M-14 se obtiene la tenacidad, longitud efectiva, elongación y módulo inicial de la fibra *Astrocaryum Chambira* ecuatoriana.

Para lo cual se pesó 40 fibras de 100mm, de las cuales 20 fueron humedecidas en agua destilada durante 3 minutos esto fue para determinar si la resistencia aumentaba o disminuía con respecto a las fibras secas; tomando en cuenta que la comparación de las pruebas a tracción se hizo con fibras de similar peso cuando estas se encontraban secas.

3.3.3. Simulación FEM del material compuesto.

Para una comparación tanto teórica como experimental se realizó la simulación de las probetas en el software ANSYS, Utilizando teorías de falla exclusivamente de materiales compuestos enfocándonos en las teorías de Tsai-Hill y de Puck.

3.3.3.1. ANSYS.

ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.), ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a distintas áreas de la ingeniería por medio de su software de simulación, para poder predecir cómo se comportará o funcionará determinado producto ante una situación real. ANSYS se está innovando continuamente desarrollando tecnología enfocada en la simulación, ha desarrollado otros softwares que se complementan entre sí para prestar soporte a la industria.



Figura 29. Pantalla de inicio del software ANSYS Workbench

El Programa utilizado ha sido ANSYS Workbench, dentro de esta interfaz se han realizado los primeros cálculos, determinados mediante el pre-postprocesador de materiales compuestos ACP, este módulo es exclusivamente para el cálculo de materiales compuestos, siendo una de las principales ventajas la posibilidad de crear tejidos, permite añadir o quitar capas y cambiar la orientación de las fibras según las necesidades que se requieran.

3.3.3.2. *Modelado CAE*

Se van a simular los ensayos de tracción realizados con las distintas orientaciones de fibras mediante el software ANSYS Workbench con el fin de obtener un modelo y resultados lo más cercanos a la realidad comparando entre criterios de falla como son el de Puck y Tsai-Hill.

El modelado empezó con el diseño CAD, se realizó una probeta con las dimensiones de las ensayadas para lo cual se utilizó el software CAD Solidworks, el diseño de la probeta se la hizo como lamina para aplicar el espesor y la distribución de las fibras en los siguientes pasos.

Como siguiente paso es añadir las principales propiedades del material compuesto en la base de datos, desde el “Engineering Data” como se muestra en la Figura30, los cuales han sido determinados por los ensayos de tracción y son:

- Deformación unitaria
- Tensión máxima
- Coeficiente de Poisson
- Módulo de Young
- Módulo de cortadura a partir de:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (23)$$

- Tensión cortante en cada dirección obtenida a partir de:

$$\tau = 2G\varepsilon_{ij} \quad (24)$$

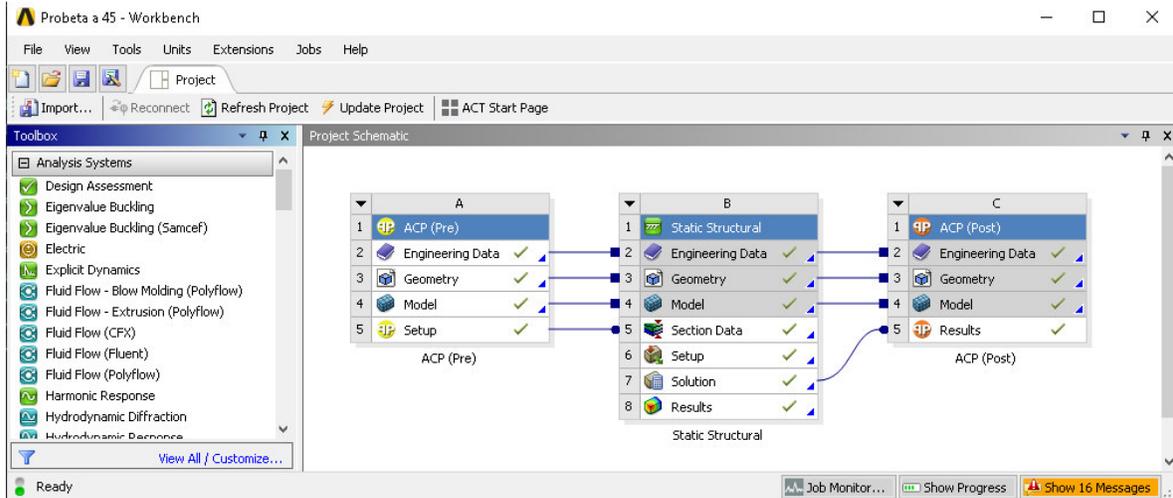


Figura 31. Interfaz para el ingreso de datos y modelado

Una vez simulado el ensayo de tracción con el material y espesor de ejemplo, se seleccionará los parámetros a tener en cuenta en el cálculo (tensión máxima y espesor). Se procederá a introducir las características del material compuesto, mediante el pre-procesador del módulo ACP (Ansys composite prepost) de ANSYS que se utiliza únicamente para materiales compuestos.

Finalmente se importa el ensayo al post-procesador ANSYS ACP (módulo de composite), para obtener los resultados finales previamente se definen los criterios de falla, de los que se puede elegir, Tensión máxima, Deformación máxima, Hoffman, Hashin, Puck Tsai-Hill, Tsai-Wu y LaRC.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se discuten y se presentan los resultados que se obtuvieron en el desarrollo del presente proyecto tomando en consideración las tres etapas detalladas en el capítulo anterior. La discusión se centraliza principalmente en el comportamiento mecánico que posee la fibra, la resina y el material compuesto; comparando distintos parámetros de procesamiento.

4.1. Procesabilidad del material compuesto

Se detalla los resultados de las pruebas a la fibra, resina que se realizaron durante el desarrollo del presente estudio. Posteriormente se continúa con los parámetros que se tomaron en cuenta para el desarrollo del material compuesto, respuesta mecánica a tracción y para finalizar se presenta resultados visuales que se obtuvieron al variar la disposición de orientación en las distintas fibras en el material compuesto.

4.1.1. Lignina y Celulosa.

Utilizando la metodología explicada en el capítulo tres para determinar los porcentajes de lignina y celulosa y empleando las ecuaciones (9) porcentaje de humedad, (10) porcentaje de humedad operativa, (11) porcentaje de cenizas, (12) porcentaje de materia orgánica se obtuvieron los respectivos resultados.

4.1.1.1. Porcentaje de lignina.

Para su determinación se utiliza la ecuación (13), tomando en cuenta que el parámetro P3 se refiere al peso del crisol, a continuación, en la Tabla 17 se colocaron las variables en peso de cada muestra, así mismo en la Tabla 18. En la Tabla 19 se presentan los parámetros y resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 17

Variables en peso para la lignina

| <i>MUESTRA</i> | <i>CRISOL</i> [gr.] | <i>HÚMEDO</i> [gr.] | <i>SECO</i> [gr.] |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 41,478 | 42,461 | 41,671 |
| 2 | 40,6 | 41,909 | 40,794 |

Tabla 18

Parámetros para la obtención de materia orgánica de lignina

| <i>MATERIA ORGÁNICA LIGNINA</i> | | |
|---------------------------------|----------------------|-------------------------|
| <i>MUESTRA</i> | <i>SECO</i> [gr.] | <i>CENIZAS</i> [gr.] |
| 1 | 41,671 | 41,503 |
| 2 | 40,794 | 40,627 |

Tabla 19

Parámetros para la determinación de lignina

| <i>Muestra</i> | <i>%Hlig</i> | <i>%H</i> | <i>%Cenizas</i> | <i>%MOlig</i> | <i>%Lignina</i> |
|-----------------|--------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1 | 80,366 | 5,093 | 87,047 | 12,953 | 2,634 |
| 2 | 85,180 | 6,747 | 86,082 | 13,918 | 2,895 |
| Lignina | | | | | 2,765 |
| promedio | | | | | |

4.1.1.2. Porcentaje de celulosa.

Para el cálculo del porcentaje de celulosa es necesario determinar previamente el porcentaje de holocelulosa empleando la ecuación (14); en la Tabla 20 se colocaron las variables en peso de cada muestra, así mismo en la Tabla 21. En la Tabla 22 se presentan los parámetros y resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 20

Variables en peso para la holocelulosa

| <i>MUESTRA</i> | <i>CRISOL</i> | <i>HÚMEDO [gr.]</i> | <i>SECO [gr.]</i> |
|----------------|---------------|---------------------|-------------------|
| | <i>[gr.]</i> | | |
| 1 | 43,403 | 45,673 | 45,574 |
| 2 | 42,045 | 44,563 | 44,354 |

Tabla 21

Parámetros para la obtención de materia orgánica de holocelulosa

| <i>MATERIA ORGÁNICA HOLOCELULOSA</i> | | |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|
| <i>MUESTRA</i> | <i>SECO</i> | <i>CENIZAS [gr.]</i> |
| | <i>[gr.]</i> | |
| 1 | 45,574 | 45,357 |
| 2 | 43,354 | 43,206 |

Tabla 22

Parámetros para la determinación de holocelulosa

| <i>Muestra</i> | <i>%Hholo</i> | <i>%H</i> | <i>%Cenizas</i> | <i>%MOholo</i> | <i>%Holocelulosa</i> |
|----------------|---------------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 4,361 | 1,046 | 9,995 | 90,005 | 94,426 |
| 2 | 8,300 | 1,091 | 11,306 | 88,694 | 94,933 |
| | | | | <i>Holocelulosa</i> | 94,680 |
| | | | | <i>promedio</i> | |

Una vez determinado el porcentaje de holocelulosa se procede a determinar el porcentaje de celulosa, para lo cual se emplea la ecuación (15), en la Tabla 23 se colocaron las variables en peso de cada muestra, así mismo en la Tabla 24. En la Tabla 25 se presentan los parámetros y resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 23

Variables en peso para la celulosa

| <i>MUESTRA</i> | <i>CRISOL</i> | <i>HÚMEDO</i> | <i>SECO</i> |
|----------------|---------------|---------------|--------------|
| | <i>[gr.]</i> | <i>[gr.]</i> | <i>[gr.]</i> |
| 1 | 24,575 | 29,08 | 28,897 |
| 2 | 25,835 | 29,804 | 28,68 |

Tabla 24

Parámetros para la obtención de materia orgánica de celulosa

| <i>MATERIA ORGÁNICA</i> | | |
|-------------------------|--------------|----------------|
| <i>CELULOSA</i> | | |
| <i>MUESTRA</i> | <i>SECO</i> | <i>CENIZAS</i> |
| | <i>[gr.]</i> | <i>[gr.]</i> |
| 1 | 28,897 | 25,405 |
| 2 | 28,68 | 26,621 |

Tabla 25

Parámetros para la determinación de celulosa

| <i>Muestra</i> | <i>%Hcel</i> | <i>%H</i> | <i>%Cenizas</i> | <i>%Mocel</i> | <i>%Celulosa</i> |
|----------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1 | 4,06215316 | 1,04234151 | 80,7959278 | 19,2040722 | 91,0485042 |
| 2 | 28,3194759 | 1,39507909 | 72,3725835 | 27,6274165 | 91,7441844 |
| | | | | <i>Celulosa</i> | 91,396 |
| | | | | <i>promedio</i> | |

El análisis químico realizado para la fibra *Astrocaryum Chambira* indica un porcentaje bajo de lignina (2,76%), y un alto porcentaje de celulosa (91,39%) lo que indica una mayor resistencia mecánica a la tracción.

4.1.2. Calorimetría de la fibra.

Como resultado del procesamiento de datos, se puede observar que la fibra pulverizada alcanza un poder calorimétrico superior de 16120.406 [KJ/Kg], el cual se consigue utilizando una de fuerza de compactación de 1,00 [Ton], tamaño de grano de 850 [μm] y una humedad de 17 [%]. Como se puede observar en la Tabla 25.

Tabla 26

*Poder calórico de la fibra *Astrocaryum Chambira* Ecuatoriana*

| <i>PARÁMETROS</i> | <i>TEMPERATURA [°C]</i> | <i>ΔT</i> | <i>ENERGÍA TOTAL LIBERADA [J]</i> | <i>PODER CALORÍFICO DE LA MUESTRA [KJ/Kg]</i> |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|---|---|
| 425 μm | 21,91 | 0,91 | 10030,475 | 12538,094 |
| 31 % | 21,92 | 0,92 | 10140,7 | 12675,875 |
| 0,75 Tonn | 21,93 | 0,93 | 10250,925 | 12813,656 |
| 425 μm | 21,96 | 0,96 | 10581,6 | 13227,000 |
| 24 % | 21,95 | 0,95 | 10471,375 | 13089,219 |
| 1,25 Tonn | 21,96 | 0,96 | 10581,6 | 13227,000 |
| 425 μm | 22,13 | 1,13 | 12455,425 | 15569,281 |
| 17 % | 22,14 | 1,14 | 12565,65 | 15707,063 |
| 1,00 Tonn | 22,13 | 1,13 | 12455,425 | 15569,281 |
| 600 μm | 21,89 | 0,89 | 9810,025 | 12262,531 |
| 31 % | 21,9 | 0,90 | 9920,25 | 12400,313 |
| 1,00 Tonn | 21,89 | 0,89 | 9810,025 | 12262,531 |
| 600 μm | 22,01 | 1,01 | 11132,725 | 13915,906 |
| 24 % | 22,02 | 1,02 | 11242,95 | 14053,688 |
| 0,75 Tonn | 22,01 | 1,01 | 11132,725 | 13915,906 |
| | 22,12 | 1,12 | 12345,2 | 15431,500 |

CONTINÚA

| | | | | |
|-------------------|-------|------|-----------|-----------|
| 600 μm | 22,13 | 1,13 | 12455,425 | 15569,281 |
| 17 % | 22,14 | 1,14 | 12565,65 | 15707,063 |
| 1,25 Tonn | | | | |
| 850 μm | 21,97 | 0,97 | 10691,825 | 13364,781 |
| 31 % | 21,99 | 0,99 | 10912,275 | 13640,344 |
| 1,25 Tonn | 21,89 | 0,89 | 9810,025 | 12262,531 |
| 850 μm | 22,02 | 1,02 | 11242,95 | 14053,688 |
| 24 % | 22,02 | 1,02 | 11242,95 | 14053,688 |
| 1,00 Tonn | 22,04 | 1,04 | 11463,4 | 14329,250 |
| 850 μm | 22,17 | 1,17 | 12896,325 | 16120,406 |
| 17 % | 22,15 | 1,15 | 12675,875 | 15844,844 |
| 1,00 Tonn | 22,16 | 1,16 | 12786,1 | 15982,625 |

4.1.3. Caracterización mecánica de la fibra *Astrocaryum* Chambira.

Para la caracterización mecánica se hizo varios ensayos a la fibra, las primeras pruebas fueron realizadas en la máquina de Ensayos Universales MTS a fibras humedecidas y secas, obteniendo datos de fuerza y deformación y poder hacer una comparación, el segundo ensayo se realizó en el reómetro “Hybrid Dynamics” tomando fibras secas con longitudes de 40mm, 50mm y 60 mm obteniendo resultados de fuerza y deformación, estos datos se los empleo para el cálculo de módulos de elasticidad , mismos que fueron ingresados para la simulación FEM.

4.1.3.1. Fuerza vs. Deformación de la fibra.

Los resultados que se observan en la Tabla 27, y en la Tabla 28, permiten determinar la fuerza máxima que soporta una fibra de 10 mm de largo en un ensayo a tracción con fibra seca es de 131.81 [N] mientras el ensayo con fibra húmeda es de 74.883[N], se puede observar que la fibra en seco posee una mayor resistencia que cuando se encuentra humedecida, lo que nos permite concluir que fibras húmedas pierden resistencia, y al desear emplearlas como refuerzo de un

material compuesto se lo debe realizar con un método o proceso de rápido secado, para que la fibra no tenga mucha absorción.

Tabla 27*Datos de fuerza y desplazamiento de fibras húmedas*

| <i>FIBRA</i> | <i>PESO</i> | <i>DESPLAZAMIENTO [mm]</i> | <i>FUERZA [N]</i> |
|--------------|-------------|--------------------------------|-----------------------|
| H1 | 0,3140 | 0,1968 | 74,883 |
| H2 | 0,3006 | 0,1146 | 73,304 |
| H3 | 0,2656 | 0,3260 | 73,205 |
| H4 | 0,2594 | 0,2168 | 68,023 |
| H5 | 0,2568 | 0,2183 | 67,638 |
| H6 | 0,2493 | 0,1863 | 66,852 |
| H7 | 0,2454 | 0,1402 | 62,245 |
| H8 | 0,2435 | 0,1554 | 56,974 |
| H10 | 0,2171 | 0,2585 | 53,772 |
| H11 | 0,2121 | 0,1903 | 51,084 |
| H12 | 0,2093 | 0,1464 | 49,918 |
| H13 | 0,2075 | 0,1088 | 49,850 |
| H14 | 0,2060 | 0,1350 | 49,067 |
| H15 | 0,2049 | 0,1790 | 45,635 |
| H16 | 0,1966 | 0,1296 | 43,217 |
| H18 | 0,1816 | 0,0925 | 43,096 |
| H19 | 0,1397 | 0,1388 | 39,112 |
| H20 | 0,1385 | 0,1752 | 38,354 |

Tabla 28*Datos de fuerza y desplazamiento de fibras secas*

| <i>FIBRA</i> | <i>PESO</i> | <i>DESPLAZAMIENTO [mm]</i> | <i>FUERZA [N]</i> |
|--------------|-------------|--------------------------------|-----------------------|
| S1 | 0,1558 | 0,1542 | 131,810 |
| S2 | 0,1521 | 0,1341 | 126,139 |
| S3 | 0,1517 | 0,1222 | 112,822 |
| S4 | 0,1427 | 0,0869 | 86,788 |
| S5 | 0,1423 | 0,1527 | 75,534 |
| S6 | 0,1381 | 0,0948 | 70,770 |
| S7 | 0,1345 | 0,1225 | 65,947 |
| S8 | 0,1309 | 0,0593 | 60,790 |
| S10 | 0,1139 | 0,1997 | 56,226 |
| S11 | 0,1115 | 0,1155 | 50,666 |
| S12 | 0,1095 | 0,0777 | 48,919 |
| S13 | 0,1082 | 0,0598 | 47,447 |
| S14 | 0,1078 | 0,1087 | 44,278 |
| S15 | 0,0958 | 0,0972 | 35,614 |
| S16 | 0,0932 | 0,1741 | 34,977 |
| S18 | 0,0875 | 0,0558 | 34,752 |
| S19 | 0,0852 | 0,0981 | 33,785 |
| S20 | 0,0835 | 0,0693 | 31,642 |

Posteriormente se realizaron pruebas a fibras con longitud de 40mm, 50mm y 60mm en el reómetro, obteniendo la mayor homogeneidad con fibras que poseen una longitud de 50mm los cuales se detallan en la Tabla 29, Los datos obtenidos a fibras de 40 y 60 mm se detallan en el ANEXO A5.1 & 5.2, aclarando que las pruebas realizadas solo se hicieron únicamente con fibras secas.

Al realizar esta prueba a un solo hilo de la fibra se determinó que en promedio soporta una fuerza de 36.4873 [N] siendo la más regular en comparación con los datos obtenidos con las fibras de 40 y 60 mm, estos resultados vas a servir para la comparación con otras fibras.

Tabla 29*Datos de fuerza vs desplazamiento de fibras de 50 mm*

| <i>FIBRA</i> | <i>PESO</i> | <i>DESPLAZAMIENTO</i> <i>[mm]</i> | <i>FUERZA</i> <i>[N]</i> |
|--------------|-------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| F1 | 0,0064 | 914,5 | 36,4873 |
| F2 | 0,0059 | 1130,9 | 34,1525 |
| F3 | 0,0047 | 838,2 | 23,4335 |
| F4 | 0,0043 | 866,2 | 22,5328 |
| F5 | 0,0042 | 994,7 | 22,4424 |
| F6 | 0,0040 | 688,4 | 19,4187 |
| F7 | 0,0037 | 807,3 | 19,3625 |
| F8 | 0,0036 | 729,7 | 17,1111 |
| F9 | 0,0036 | 801,9 | 16,3617 |
| F10 | 0,0036 | 642,1 | 15,8333 |
| F11 | 0,0034 | 629,7 | 15,2914 |
| F12 | 0,0032 | 755 | 14,43 |
| F13 | 0,0032 | 697,1 | 13,8956 |
| F14 | 0,0030 | 906,9 | 13,8783 |
| F15 | 0,0030 | 717,9 | 13,7125 |
| F16 | 0,0030 | 686,4 | 13,6909 |
| F17 | 0,0029 | 411,5 | 13,0408 |
| F18 | 0,0028 | 520,1 | 11,9214 |
| F19 | 0,0028 | 663,5 | 11,913 |
| F20 | 0,0028 | 717 | 11,2667 |
| F21 | 0,0028 | 922,8 | 10,9524 |
| F22 | 0,0028 | 565,1 | 9,43581 |
| F23 | 0,0027 | 1534,1 | 6,5222 |
| F24 | 0,0027 | 846,4 | 5,73087 |
| F25 | 0,0025 | 264,9 | 5,38379 |

4.1.3.2. Módulo de elasticidad de la fibra.

Previamente a de determinarse la densidad lineal y volumétrica de la fibra

4.1.3.2.1. Densidad volumétrica.

Aplicando la ecuación (10) y tomando las medidas de la pastilla la cual tiene forma cilíndrica como se muestra en la Figura 32, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 30.

Tabla 30*Datos para la obtención de densidad volumétrica*

| | $L[mm]$ | φ [mm] | $Vol [m^3]$ | $m [g]$ | $Densidad$ [kg/m ³] |
|---|---------|-------------------|-------------|---------|------------------------------------|
| 1 | 6,95 | 13 | 0,000922 | 0,81 | 0,8781 |
| 2 | 5,3 | 13 | 0,000703 | 0,71 | 1,0093 |
| 3 | 3,25 | 13 | 0,000431 | 0,43 | 0,9968 |
| 4 | 7,02 | 13 | 0,000932 | 0,85 | 0,9122 |
| 5 | 5,5 | 13 | 0,000730 | 0,74 | 1,0137 |
| | | | Prom | | 0,9620 |

**Figura 32.** Muestra de las pastillas compactadas utilizadas

4.1.3.2.2. Densidad lineal

La densidad lineal se obtuvo para fibras de 40,50 y 60 mm, a continuación, se muestran en la Tabla 30 los datos y resultados para las fibras de 50 mm ya que como se explicó anteriormente es la que mejor resultados nos brinda.

Tabla 31

Densidad lineal para fibras de 50 mm

| DENOMINACIÓN | PESO [g] | Densidad Lineal [Kg/m] |
|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,0064 | 0,000128 |
| 2 | 0,0059 | 0,000118 |
| 3 | 0,0047 | 0,000094 |
| 4 | 0,0043 | 0,000086 |
| 5 | 0,0042 | 0,000084 |
| 6 | 0,0040 | 0,00008 |
| 7 | 0,0037 | 0,000074 |
| 8 | 0,0036 | 0,000072 |
| 9 | 0,0036 | 0,000072 |
| 10 | 0,0036 | 0,000072 |
| 11 | 0,0034 | 0,000068 |
| 12 | 0,0032 | 0,000064 |
| 13 | 0,0032 | 0,000064 |
| 14 | 0,0030 | 0,00006 |
| 15 | 0,0030 | 0,00006 |
| 16 | 0,0030 | 0,00006 |
| 17 | 0,0029 | 0,000058 |
| 18 | 0,0028 | 0,000056 |
| 19 | 0,0028 | 0,000056 |
| 20 | 0,0028 | 0,000056 |
| 21 | 0,0028 | 0,000056 |
| 22 | 0,0028 | 0,000056 |
| 23 | 0,0027 | 0,000054 |
| 24 | 0,0027 | 0,000054 |
| 25 | 0,0025 | 0,00005 |

4.1.3.2.3. Módulo de Elasticidad.

Los siguientes datos mostrados en la Tabla 32, son para una longitud de fibra de 50 mm, en donde para la obtención del módulo de elasticidad se utilizó un artificio matemático como se muestra en la ecuación 25, en la Figura 33 se muestra un gráfico esfuerzo vs deformación, con su respectiva pendiente, los datos y gráficas para fibras de 40 y 60 mm se detallan en el Anexo A5.1 y A5.2.

$$E = m \frac{\rho}{D_l} \quad (25)$$

Donde:

E= Modulo de elasticidad, [Pa]

m=Pendiente del grafico fuerza vs deformación.

ρ =Densidad volumétrica [Kg/m³].

D_l =Densidad lineal [Kg/m].

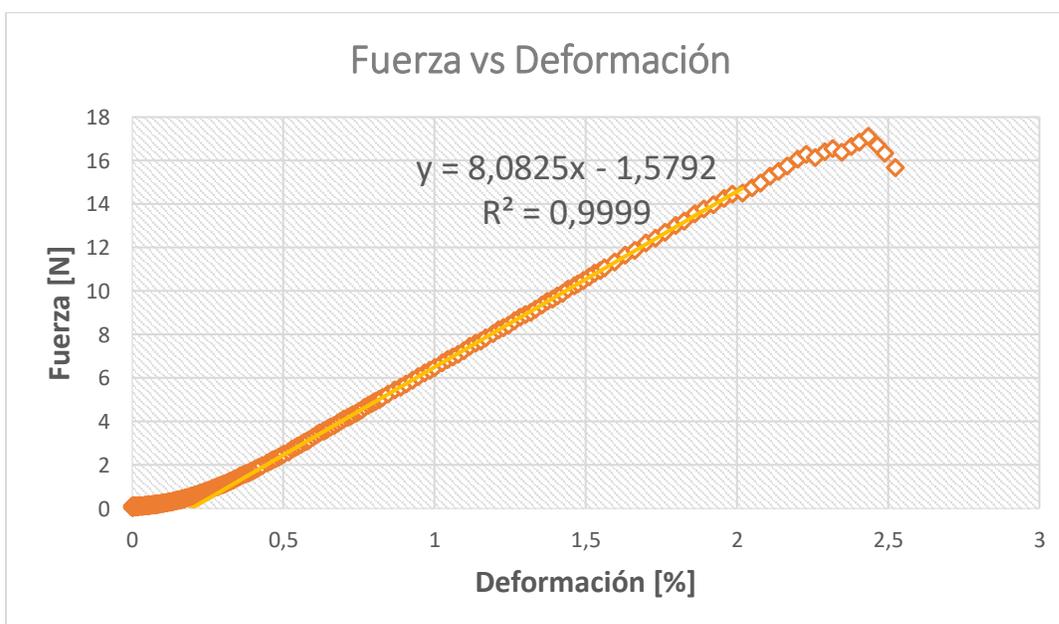


Figura 33. Grafico Fuerza vs Deformación para una fibra de 50 mm.

Tabla 32*Datos para la obtención del módulo de elasticidad.*

| <i>Fibras de 50 mm</i> | | | | |
|------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <i>Denominación</i> | <i>Densidad Lineal</i> | <i>Pendiente</i> | <i>Densidad Volumétrica</i> | <i>Módulo de Elasticidad</i> |
| | <i>[Kg/m]</i> | <i>[N]</i> | <i>[Kg/m³]</i> | <i>[Pa]</i> |
| 1 | 0,000128 | 13,849 | 0,96200374 | 104084,295 |
| 2 | 0,000118 | 13,484 | 0,96200374 | 109929,309 |
| 3 | 0,000094 | 7,304 | 0,96200374 | 74749,7374 |
| 4 | 0,000086 | 7,425 | 0,96200374 | 83056,7182 |
| 5 | 0,000084 | 6,0645 | 0,96200374 | 69453,2343 |
| 6 | 0,00008 | 10,48 | 0,96200374 | 126022,49 |
| 7 | 0,000074 | 7,3373 | 0,96200374 | 95385,2708 |
| 8 | 0,000072 | 8,0825 | 0,96200374 | 107991,6 |
| 9 | 0,000072 | 8,3518 | 0,96200374 | 111589,762 |
| 10 | 0,000072 | 9,5995 | 0,96200374 | 128260,485 |
| 11 | 0,000068 | 7,8665 | 0,96200374 | 111288,271 |
| 12 | 0,000064 | 6,2056 | 0,96200374 | 93278,2876 |
| 13 | 0,000064 | 7,1837 | 0,96200374 | 107980,41 |
| 14 | 0,00006 | 7,2759 | 0,96200374 | 116657,383 |
| 15 | 0,00006 | 7,5581 | 0,96200374 | 121182,008 |
| 16 | 0,00006 | 7,7357 | 0,96200374 | 124029,539 |
| 17 | 0,000058 | 7,5194 | 0,96200374 | 124718,809 |
| 18 | 0,000056 | 7,5505 | 0,96200374 | 129707,308 |
| 19 | 0,000056 | 9,953 | 0,96200374 | 170978,986 |
| 20 | 0,000056 | 5,7017 | 0,96200374 | 97947,4414 |
| 21 | 0,000056 | 5,5376 | 0,96200374 | 95128,4269 |
| 22 | 0,000056 | 5,6381 | 0,96200374 | 96854,88 |
| 23 | 0,000054 | 6,3419 | 0,96200374 | 112980,213 |
| 24 | 0,000054 | 5,3941 | 0,96200374 | 96095,2661 |
| 25 | 0,00005 | 7,3781 | 0,96200374 | 141955,196 |
| | | | Media[KPa] | 110,052213 |

4.1.4. Pruebas preliminares a la resina.

Con el método de Taguchi se procedió a realizar las 36 probetas curadas a distinto voltaje y tiempo de exposición a la luz ultravioleta, se pudo determinar que la profundidad de curado más adecuada es cuando la resina está expuesta al menos 20 segundos a 12 voltios como se observa en la Figura 34, este método nos permitió saber el tiempo mínimo de curación de la resina y así poder realizar las pruebas de dureza.

Realizando un análisis ANOVA para los datos de profundidad de curado, como se observa en el ANEXO G1.1 los resultados obtenidos en los distintos ensayos, indican que no existe una diferencia estadística significativa cuando se realiza un curado a 7.4[V] y 8.2[V] y un tiempo constante de 5[S]. Mientras que el curado de la resina a 10 [S] y 20 [S] siguen prácticamente el mismo patrón para voltajes de 12[V] y 8.2[V].

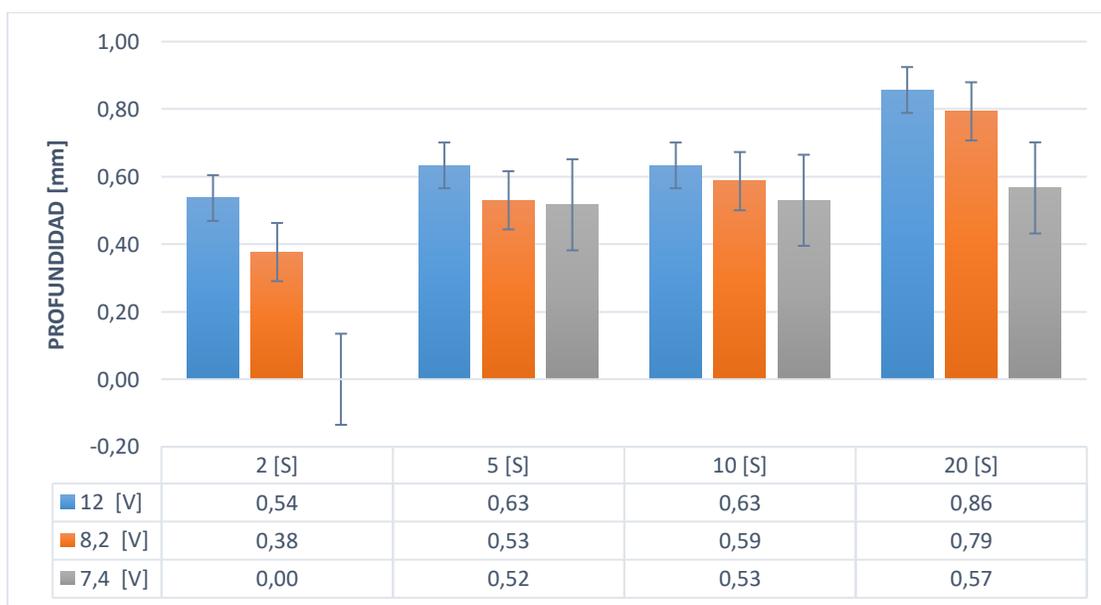


Figura 34. Resultados de profundidad de curado

Bajo el mismo criterio se realizaron 27 probetas para medir la dureza que posee la resina obteniendo que la dureza más efectiva es de 8.00[Hv], misma que está dada por la combinación de una probeta curada a 12V voltios en un tiempo 10 segundos; misma que se puede observar en la Figura 35.

En la Figura 35 se observa que, manteniendo un tiempo de 10 segundos constantes y con una tensión 8,25 y 12 Voltios, no existe diferencia estadística considerable, lo que nos indica que prácticamente las propiedades serán las mismas, así mismo con un tiempo de 20 seg. Entre 7,34 y 12 voltios la dureza no variara considerablemente. Deduciendo que; si se tiene un mayor voltaje en el curado de resinas fotocurables, la dureza aumenta, teniendo menor relevancia el tiempo de curado.

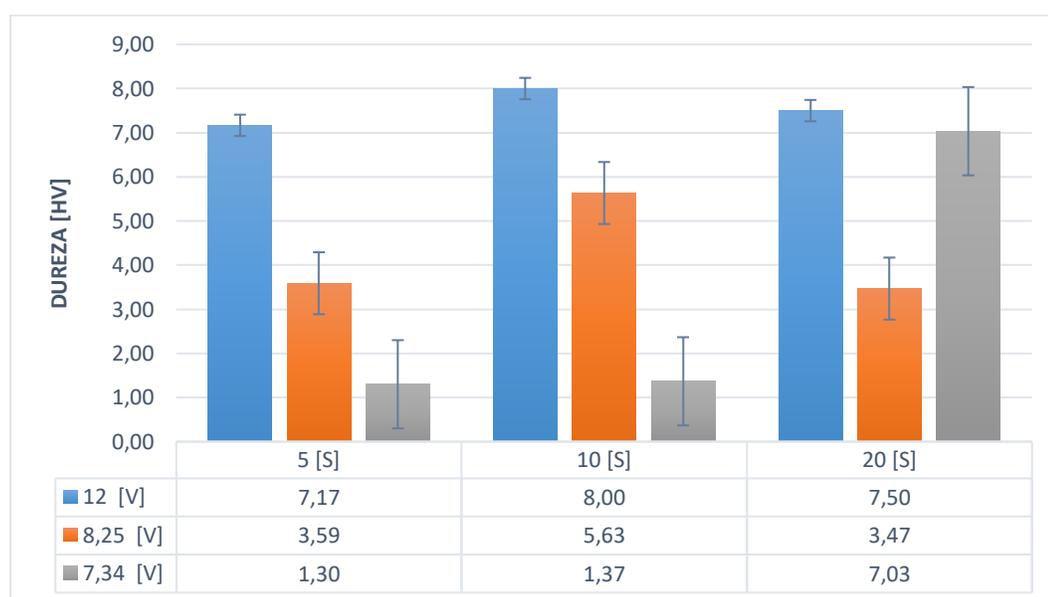


Figura 35. Resultados de dureza variando el voltaje.

4.1.5. Selección y elaboración del molde.

Al utilizar los moldes que se detallan en el capítulo 3 se tuvo inconvenientes de desmolde, ya que se debe abrir completamente la matriz para poder sacar la resina curada, adicionalmente no permite una aplicación directa de presión al momento de inyectar la resina para realizar el material compuesto.

Los moldes de acrílico con dos orificios a través de los cuales se llenan por inyección manual, este tipo de moldes nos permitió obtener la forma deseada de las probetas para posteriormente realizar el mecanizado de las mismas como podemos observar en la Figura 36.



Figura 36. Moldes de acrílico

No existe un desperdicio de resina gracias al diseño de las matrices, pero al instante de ser curadas la resina se producen unas burbujas en los extremos, la solución que se encontró fue realizar las probetas más largas; adicional no produce ninguna reacción adicional al contacto con la resina utilizada.

4.1.6. Fuerza vs. Deformación del material compuesto.

Tomando en cuenta parámetros como: modo de ensayo, velocidad a la que se van a desplazar las mordazas y el tipo de ensayo, se pudo obtener la deformación y la fuerza que soportó el material compuesto antes de romperse, los datos obtenidos de la máquina de ensayos se representan en los ANEXOS A3.1 al A3.6, por otro lado a continuación se detallan las gráficas de la comparación de esfuerzos vs deformación con las distintas configuraciones de fibra, gráficas de cada configuración se encuentran en el ANEXO A5.6.

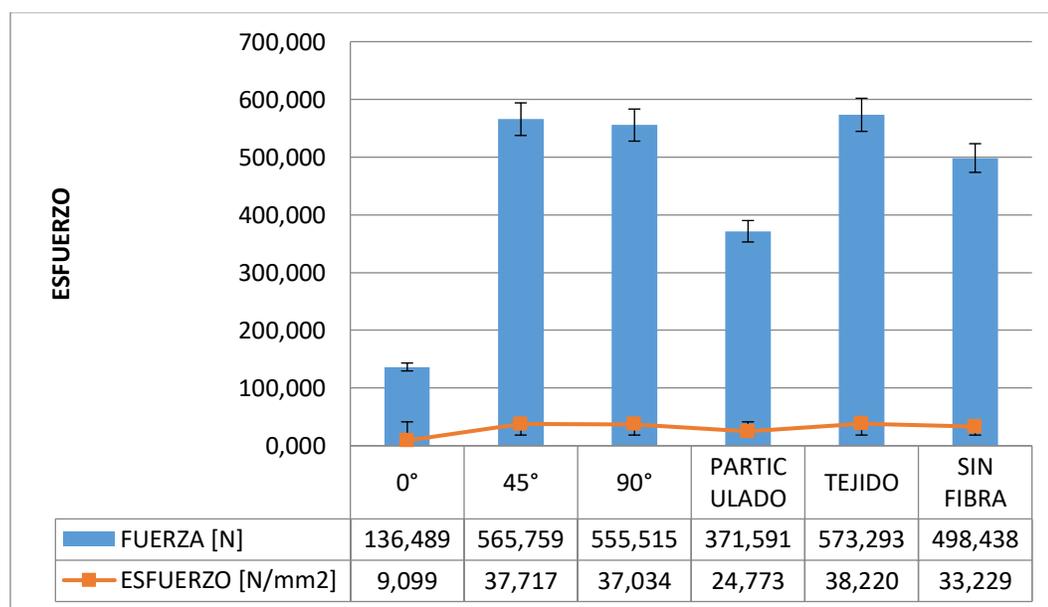


Figura 37. Fuerza y esfuerzos máximos de las probetas de resina uv

Se puede observar en las Figuras 37 y 38, donde se compara los esfuerzos máximos de cada probeta con las distintas distribuciones de fibras, que las probetas con una configuración de fibras tejida y a 45° son las que soportan un mayor esfuerzo en relación de las otras distribuciones, con un valor máximo de 38.22 [N/mm²] y 37,717[N/mm²] respectivamente, mejorando la resistencia que tiene la resina sin ninguna fibra que es de 33.229[N/mm²], por tal motivo la fibra tejida aporta

con mayor resistencia a la tracción al material compuesto. Con una configuración de 45° se obtiene mayor deformación, siendo un punto a consideración si la elasticidad del material es objetivo de estudio.

Al efectuar un análisis ANOVA de los resultados obtenidos dentro de todas las pruebas realizadas, se observa que no existe significancia estadística entre las probetas con fibras a 45°, 90° y tejidas, las propiedades mecánicas que aporta la fibra a la resina fotocurable son relativamente las mismas como muestra la Figura 39. Adicionalmente el aporte que da la fibra a la resina es baja; aproximadamente de 1[N/mm²], según (Pucha, 2018) una de las razones para la obtención de dichos resultados es la falta de adherencia, que poseen las fibras naturales con las resinas fotocurables.

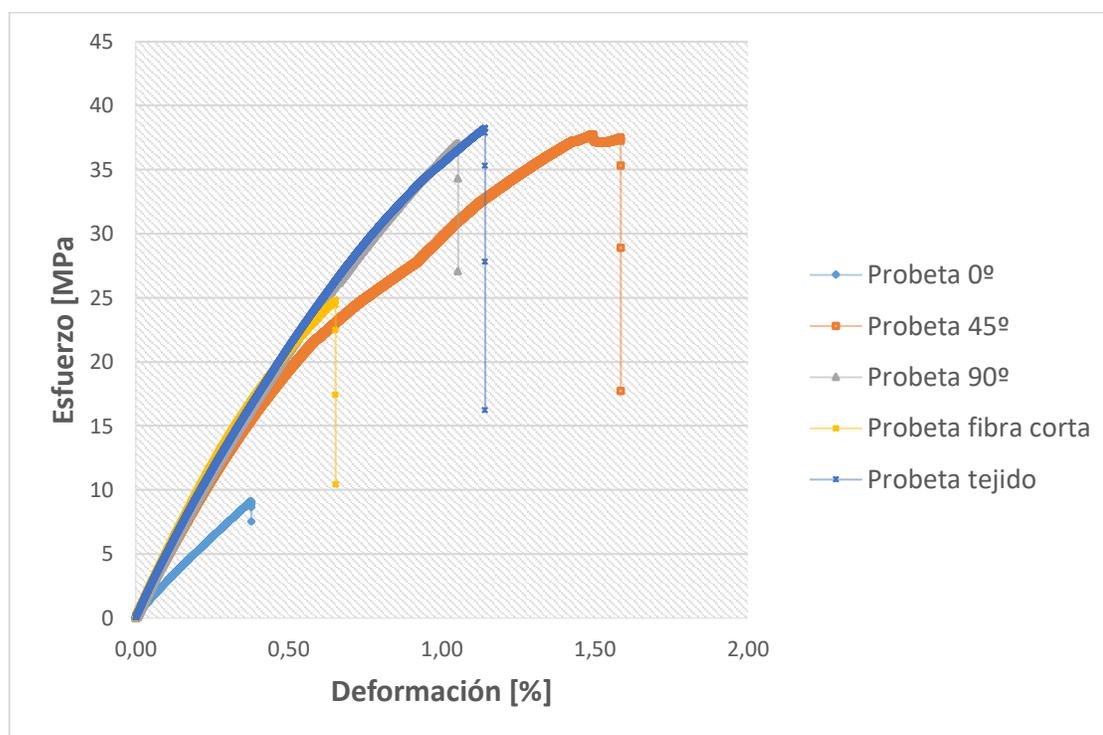


Figura 38. Esfuerzo vs Deformación de probetas con distintas configuraciones de fibra

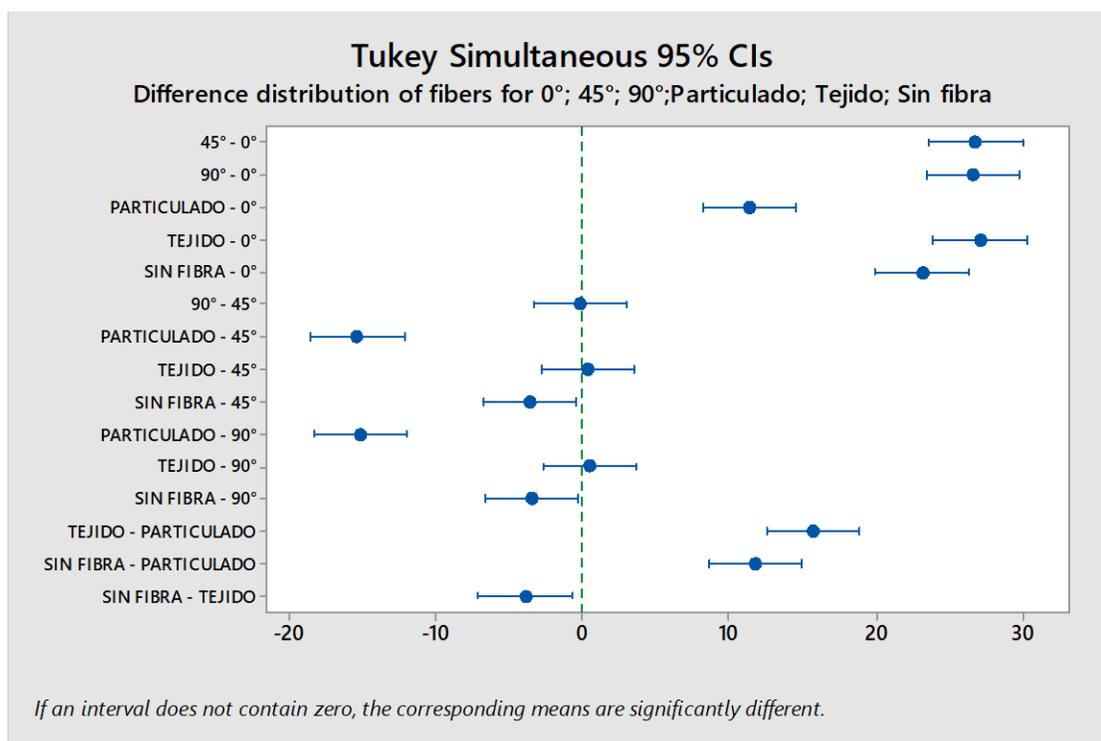


Figura 39. Comparación de esfuerzos máximos para las distintas configuraciones de fibra.

4.2. Factibilidad del uso de fibra *Astrocaryum Chambira* en materiales compuestos.

Los análisis realizados en este trabajo fueron con el fin de ver cuán factible es el uso de la fibra *Astrocaryum Chambira* en materiales compuestos y posibles aplicaciones para la industria primordialmente ecuatoriana.

Las fibras están constituidas mayormente por celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa. (Thakur, 2013) Siendo la celulosa el componente más importante esta ayuda a aumentar la resistencia a tracción y el módulo de Young. La lignina va a brindar rigidez, lo que hace que a fibra tenga mayor resistencia al impacto y a la flexión (John & Thomas, 2008).

En la Tabla 33, se presentan algunos datos de composición química y resistencia mecánica de algunas fibras añadiendo los resultados obtenidos en la investigación actual.

Tabla 33*Datos de composición química y resistencia de fibras comerciales.*

| Fibra | Celulosa [%] | Hemicelulosa [%] | Lignina [%] | Densidad [g/cm ³] | Resistencia a tracción [MPa] |
|-----------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|---|--|
| Algodón | 85-90 | 5,7 | - | 1,5-1,6 | - |
| Cáñamo | 69-70 | 20-22 | 5,5-5,7 | - | 550 |
| Yute | 72 | 13 | 13 | 1,3 | 400 |
| Lino | 81 | 16,7-20,6 | 3 | 1,5 | - |
| Chambira | 91,34 | 3,283 | 2,77 | 0,96 | 110 |

Fuente: Tomada de (John & Thomas, 2008)

Los datos de resistencia tracción del cáñamo y yute fueron hechos a un haz de fibras mientras que los ensayos de la chambira se los hizo a fibras individuales, por lo cual tiene un valor más bajo con respecto a las anteriores, se puede observar porcentajes altos de celulosa lo que quiere decir una alta resistencia mecánica.

4.2.1. Aplicaciones en la industria.

Existen un sin número de posibles aplicaciones del material compuesto experimentado en varias industrias como se observa en la Figura 40. Uno de los principales campos es el automotriz (Miravete, 2003), en los últimos años se busca remplazar fibras sintéticas, ahí es donde se podría dar un potencial uso a la fibra de chambira al remplazar componentes de interiores, ya que el material compuesto no se astilla en caso de impacto directo, también se pueden realizar componentes con funcionalidad estructural utilizando en los paneles de las puertas, partes de los asientos, apoyacabezas, entre otros.

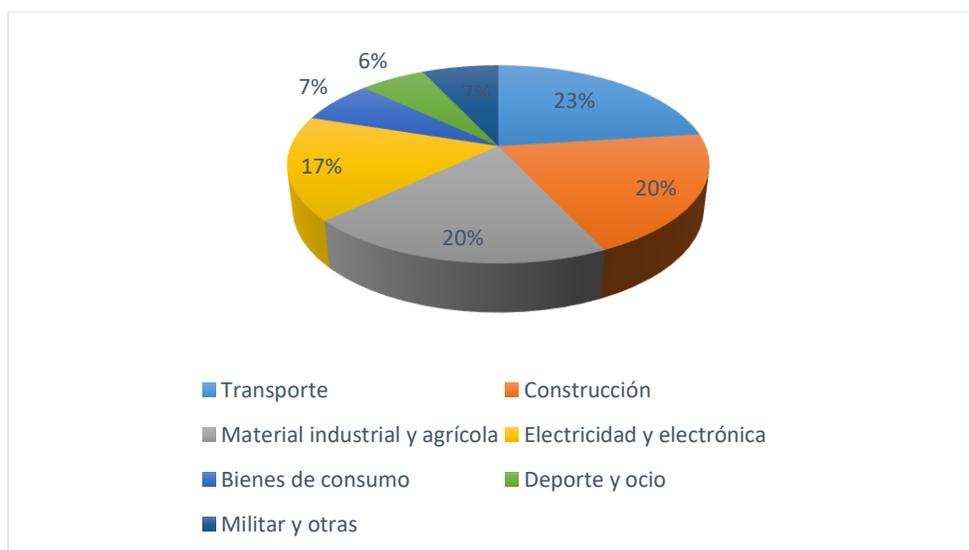


Figura 40. Porcentajes de uso de materiales compuestos en distintas industrias
Fuente: (Miravete, 2003)

Con el uso de materiales compuesto se disminuiría en gran cantidad el peso de un automóvil ya que posee una densidad relativamente baja ($0,96 \text{ g/cm}^3$) y una alta estabilidad dimensional, en la Figura 41 se muestra la cantidad de otros materiales usados en un automóvil pudiendo ser remplazados por un material más ligero.

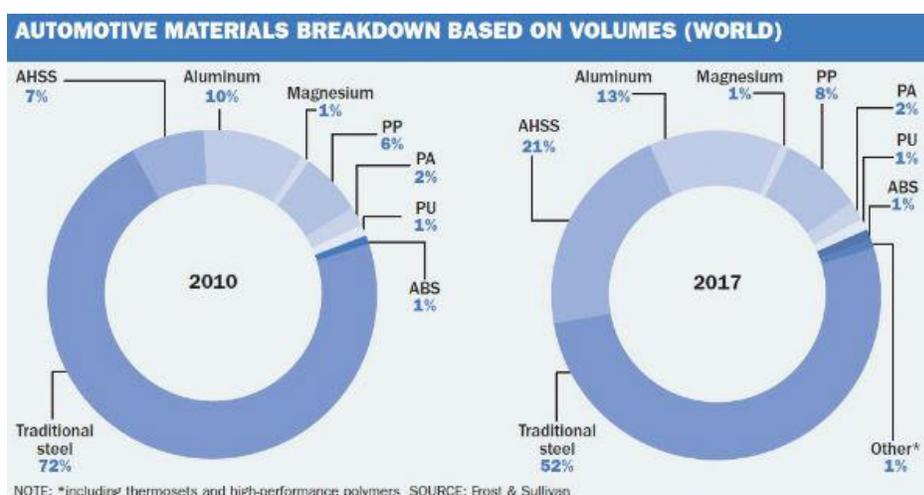


Figura 41. Desglose de materiales automotrices basado en volúmenes.
Fuente: (Frost & Sulivan)

Otro campo de aplicación es el de la construcción, continuamente se busca reducir el ruido y mejorar el confort. Mayoritariamente se usan aislantes costosos a base de fibras sintéticas, el uso del compuesto a base de resina UV y fibra de chambira constituye disponer de un material Biodegradable, barato y reciclable.

Otras posibles aplicaciones del material compuesto estudiado se pueden apreciar en la Figura 42, al ser un material con bajas prestaciones mecánicas sus aplicaciones se limitan a productos de bajas prestaciones estructurales, se debe tener en consideración que para cada aplicación propuesta se debe hacer su respectivo estudio de factibilidad.



Figura 42. Posibles aplicaciones del material compuesto resina UV-Astrocaryum chambira

4.3. Modelo teórico FEM

En la mayoría de casos los materiales compuestos son anisótropos y quebradizos, Esto ayuda a determinar el modo de falla del material, algunos relacionados con la falla de la interfase y otros con la de los constituyentes, de donde se diferencia los derivados de una carga de tracción o compresión.

Por lo general las fibras no presentan plasticidad, generalmente el límite de rotura coincide con el límite de elasticidad, relacionándose la falla con el fenómeno de redistribución de esfuerzos a las fibras vecinas, por lo que se puede generar una nueva ruptura de la fibra. En el caso de cargas a compresión, se genera un micro pandeo de las fibras hasta que se rompen el cual es progresivo.

La microfisuración es el principal modo de falla para la matriz. Aparecen grietas paralelas a la dirección de la fibra en la matriz generalmente sobre el espesor total de la lámina, en especial en las láminas en las que el refuerzo no se encuentra en la misma dirección de la carga aplicada (Molinier).

Otro modo de falla es el de Interfase fibra-matriz denominado debonding. Este se produce debido a la pérdida de adhesión entre fibra y la matriz ocasionando un deslizamiento, debido a los diferentes esfuerzos cortantes de deformación en la interfase de la fibra-matriz. Si no existe una buena adhesión entre fibra-matriz, la transmisión de cargas de la matriz a la fibra no se efectúa adecuadamente ocasionando una pérdida considerable de las características del composite.

Por último, otro modo de falla es el de la delaminación, este se genera por la pérdida de adhesión entre láminas, lo que ocasiona una pérdida de la distribución de cargas entre láminas.

Actualmente existen distintos criterios de falla aplicables exclusivamente a materiales compuestos. Para clasificar cada uno de ellos por la veracidad de los resultados es necesario hacer una comparación teórica experimental. La mayoría de criterios de falla asumen homogeneidad y un comportamiento lineal de esfuerzo-deformación hasta la falla.

4.3.1. Análisis de resultados del modelado FEM.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar un estudio de cada probeta con cada configuración de la fibra, comparando los resultados experimentales con los teóricos.

En todos los casos se ha ensayado una probeta de matriz resina UV y fibra Astrocaryum Chambira, cambiando la configuración de la fibra, la forma de la probeta ha sido tomada en base a las especificaciones de la norma ISO- 527-4 “Determination of tensile properties of plastics” (ANEXO D).

Para obtener los resultados acertados ha sido necesario realizar la simulación varias veces, variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta, y verificando los valores de los criterios de deformación adecuados hasta que se produzca la rotura, una vez realizadas las aproximaciones en el software ANSYS Workbench, se puede realizar las comparaciones con los valores obtenidos experimentalmente, especificados para cada configuración de fibra en las tablas de “Datos experimentales y teóricos”. A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas para el cálculo de las propiedades mecánicas del compuesto, datos esenciales para proceder con la simulación.

- Módulo de elasticidad en dirección de las fibras

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (26)$$

- Módulo de elasticidad en dirección transversal de las fibras

$$E_1 = E_m \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_f} V_f} \quad (27)$$

- Módulo de rigidez

$$G_{12} = G_m \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} V_f} \quad (28)$$

- Coeficiente de Poisson

$$\nu_{21} = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad (29)$$

- Módulo de elasticidad en una dirección cualquiera

$$E_x = \frac{1}{\frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left(\frac{1}{2G_{12}} - \frac{\nu_{21}}{E_1} \right)} \quad (30)$$

A continuación, se presenta un ejemplo realizado para la probeta con una configuración a 90° el cual se repite para las demás configuraciones.

Módulo de elasticidad en la dirección de las fibras

$$E_1 := E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m = 35.08$$

Módulo de elasticidad en dirección transversal a las fibras

$$E_2 := E_m \cdot \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_f} \cdot V_f} = 23.483$$

Módulo de rigidez

$$G_{12} := G_m \cdot \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} \cdot V_f} = 13.827$$

Coefficiente de Poisson

$$\nu_{21} := \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m = 0.28$$

Un informe con los criterios y suposiciones realizado para cada configuración de fibra en la simulación se detallan en el ANEXO F, con lo cual se han obtenido los resultados mostrados en los siguientes puntos.

Se observa en la Figura 43, los resultados obtenidos en la simulación utilizando ANSYS, la distribución de las fibras a 90° poseen el comportamiento más adecuado tanto en deformación como en esfuerzo máximo. Mediante un análisis ANOVA se concluye que existe gran significancia entre cada probeta con distintas configuraciones de fibra, obteniendo el mejor con una configuración de fibras a 90°.

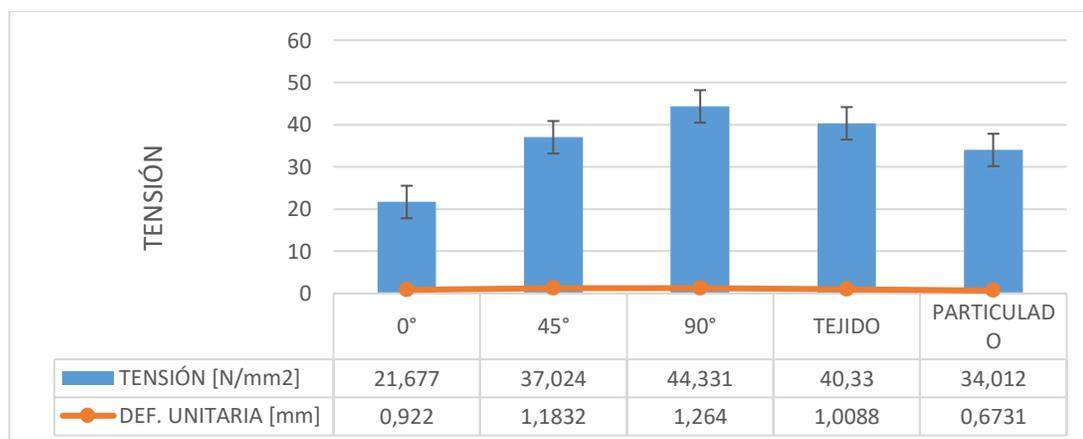


Figura 43. Datos de esfuerzo máximo y deformación obtenidos mediante simulación.

Al comparar datos teóricos y experimentales realizados a cada probeta se observa que, únicamente para las probetas con fibra particulado el error es mínimo, teniendo en cuenta que en el programa ANSYS se considera condiciones perfectas al momento de realizar la simulación, lo que se debe tomar en consideración para futuros ensayos, en la Figura 44 se observa las comparaciones.

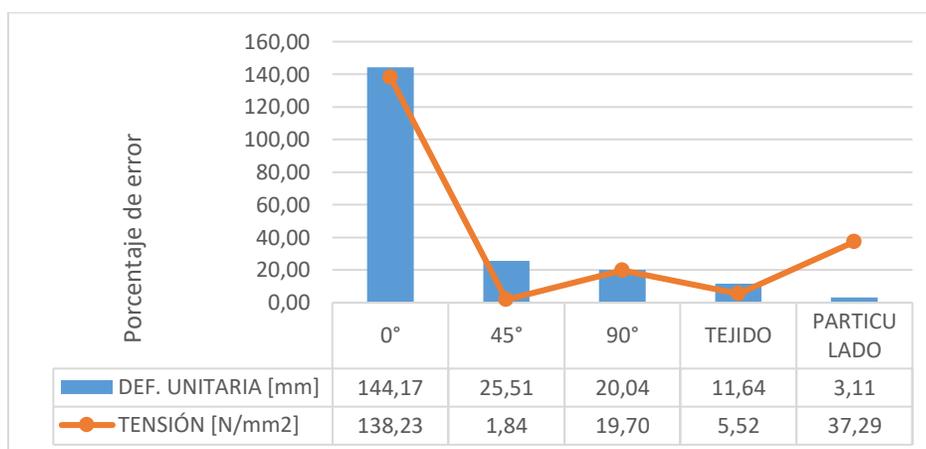


Figura 44. Comparación de porcentajes de error en probetas experimental vs teórico.

4.3.1.1. Composite fibra a 90°

Para comparar los resultados es necesario conocer previamente los datos o valores a obtener.

Tabla 34

Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 90°

| <i>Compuesto Resina</i> | <i>Deformación</i> | <i>Tensión</i> |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| <i>UV-Chambira 90°</i> | <i>Unitaria</i> | <i>Mpa</i> |
| <i>Ensayo experimental</i> | 1,053 | 37,034 |
| <i>Ensayo ANSYS</i> | 1,264 | 44,331 |
| <i>%Error</i> | 20,0379867 | 19,70351569 |

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas del software ANSYS, tomando en cuenta que los criterios de falla utilizados son los de Tsai-hill, y el de Puck.

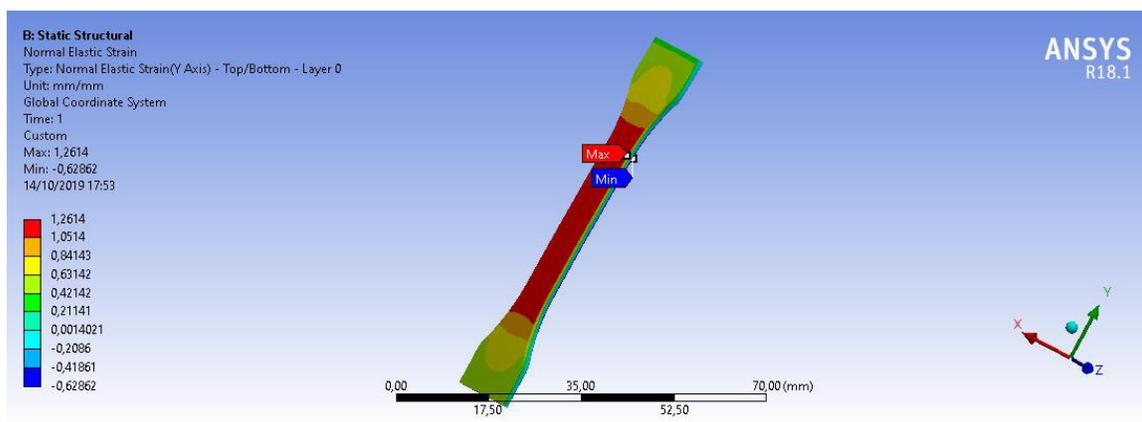


Figura 45. Deformación máxima de probeta a 90°, FEM

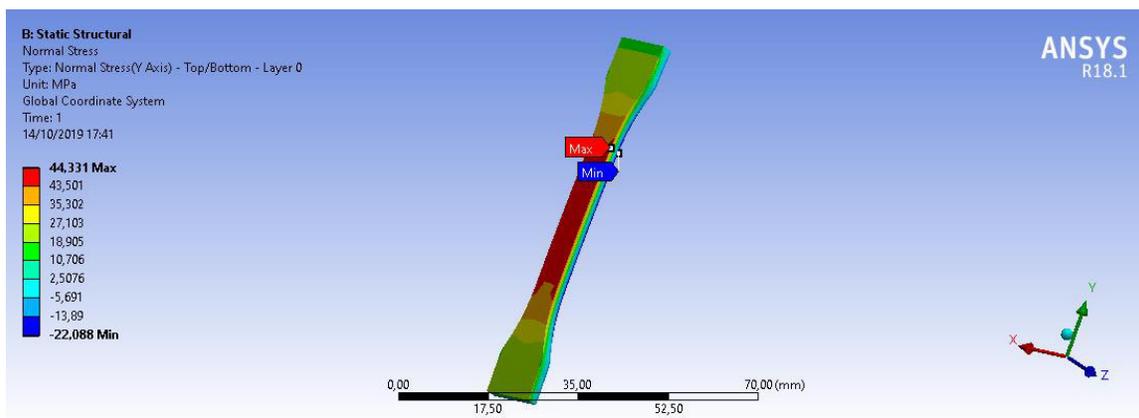


Figura 46. Tensión máxima de probeta a 90°, FEM

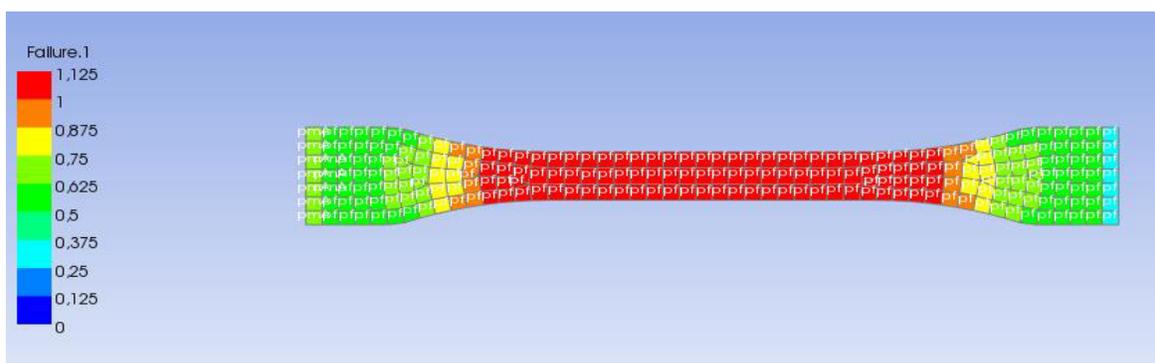


Figura 47. Análisis de criterio de Puck. probeta a 90°

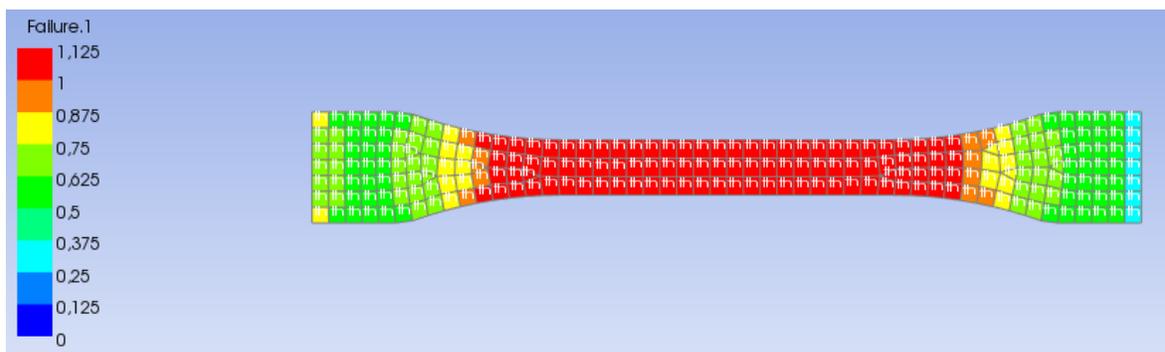


Figura 48. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 90°

Tabla 35

Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 90°

| <i>Criterio</i> | <i>Máximo</i> | <i>Mínimo</i> |
|------------------|---------------|---------------|
| <i>Puck</i> | 1,2038 | 0,29412 |
| <i>Tsai-Hill</i> | 1,2007 | 0,30961 |

El criterio de Puck y el de Tsai-Hill arrojan un factor de reserva⁵ similar.

4.3.1.2. Composite fibra a 0°

En este caso la configuración de las fibras es a cero grados con relación a la fuerza aplicada a la probeta.

Una vez realizadas las aproximaciones en el software ANSYS Workbench, se puede realizar las comparaciones con los valores obtenidos experimentalmente, especificados en la Tabla 36.

⁵ Factor de reserva: El factor de reserva indica margen al fracaso. La carga aplicada multiplicada por el factor de reserva da la carga de falla, Los valores del factor de reserva superiores a uno indican un margen positivo para el fallo y los valores inferiores a uno indican un margen negativo. Los valores de los factores de reserva son siempre mayores que cero. (ANSYS, 2019)

Tabla 36

Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 0°

| <i>Compuesto Resina</i> | <i>Deformación</i> | <i>Tensión</i> |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| <i>UV-Chambira 0°</i> | <i>Unitaria</i> | <i>Mpa</i> |
| <i>Ensayo experimental</i> | 0,3776 | 9,099 |
| <i>Ensayo ANSYS</i> | 0,922 | 21,677 |
| <i>%Error</i> | 144,1737288 | 138,234971 |

El porcentaje de error obtenido es demasiado alto en comparación a los otros ensayos con configuraciones de fibra diferentes, una de las posibles causas es falta de adhesión fibra-matriz, curado no uniforme, entre otras, a determinar con un mayor estudio.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas del software ANSYS, tomando en cuenta que los criterios de falla utilizados son los de Tsai-hill, y el de Puck.

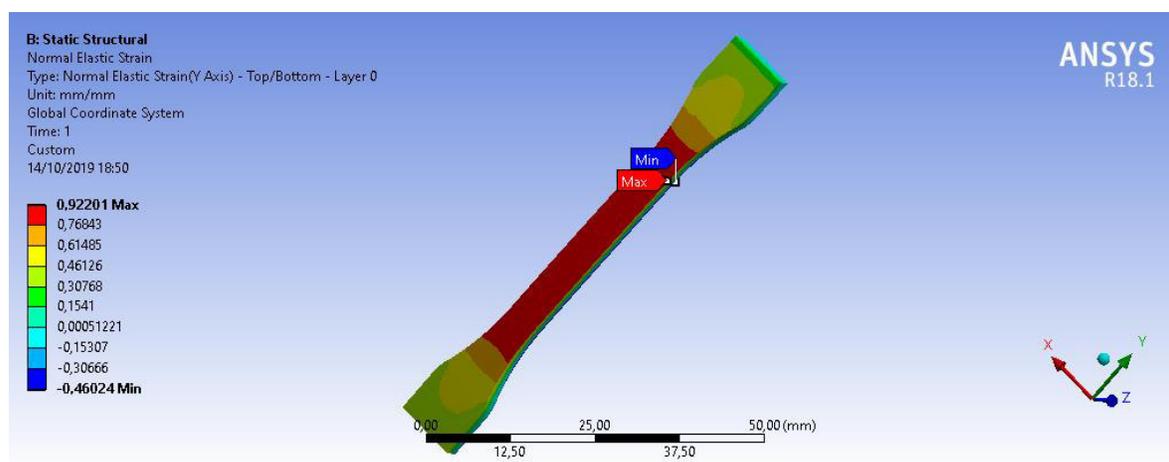


Figura 49. Deformación máxima de probeta a 0°, FEM

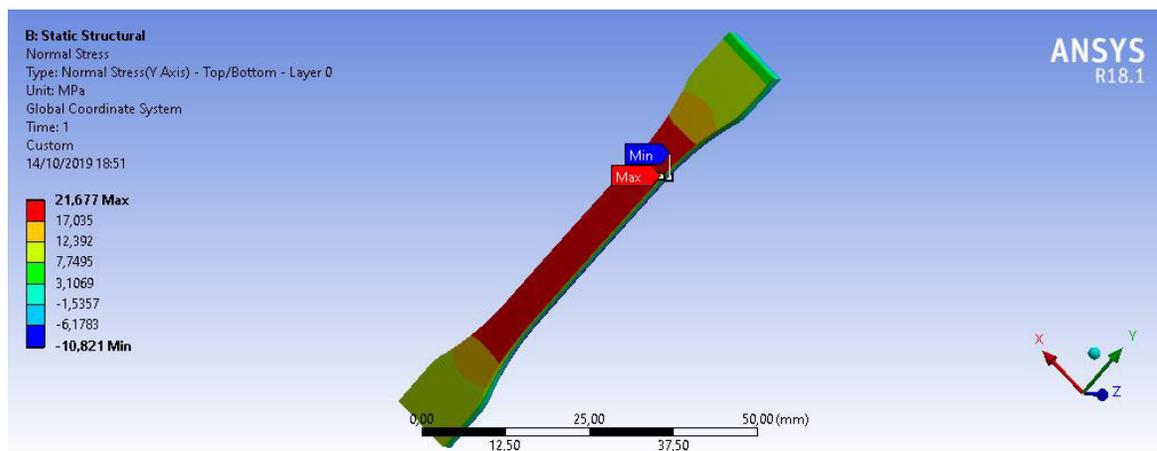


Figura 50. Tensión máxima de probeta a 0° , FEM

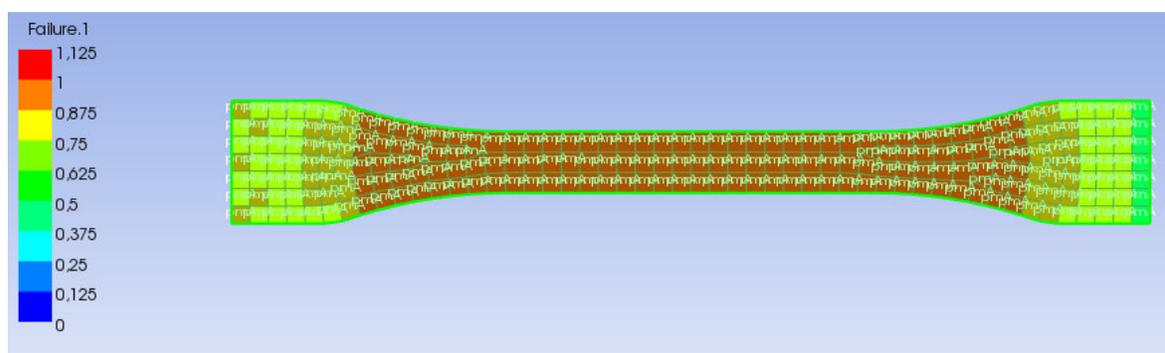


Figura 51. Análisis de criterio de Puck. probeta a 0°

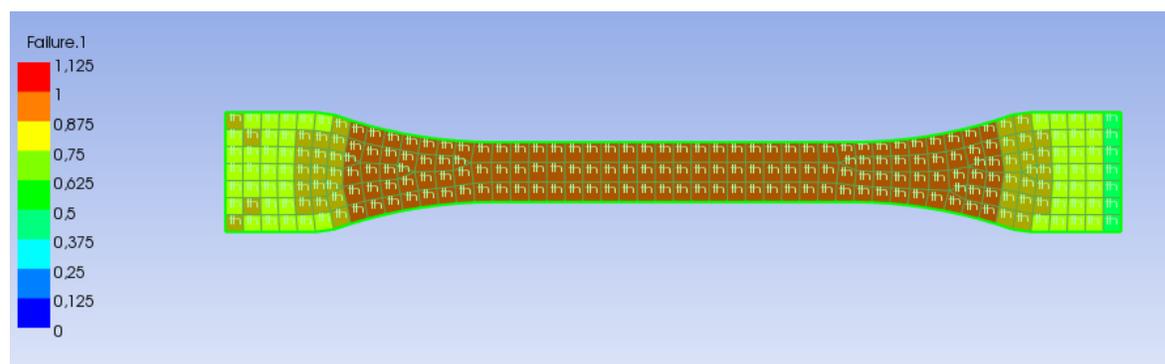


Figura 52. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 0°

Tabla 37

Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 0°

| <i>Criterio</i> | <i>Máximo</i> | <i>Mínimo</i> |
|------------------|---------------|---------------|
| <i>Puck</i> | 2,3908 | 0,5887 |
| <i>Tsai-Hill</i> | 2,397 | 0,5891 |

El criterio de Puck y el de Tsai-Hill arrojan un factor de reserva similar siendo más alto que el de la probeta de 90 grados lo que quiere decir una mayor falla.

4.3.1.3. Composite fibra a 45°

La comparación de valores experimentales y teóricos se especifican en la Tabla 38, obteniendo porcentajes de error bajos referentes a la tensión, con un mayor porcentaje en lo referente a la deformación máxima.

Tabla 38

Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta a 45°

| <i>Compuesto Resina</i> | <i>Deformación</i> | <i>Tensión</i> |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| <i>UV-Chambira 45°</i> | <i>Unitaria</i> | <i>Mpa</i> |
| <i>Ensayo experimental</i> | 1,5884 | 37,717 |
| <i>Ensayo ANSYS</i> | 1,1832 | 37,024 |
| <i>%Error</i> | 25,50994712 | 1,83736777 |

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas del software ANSYS, así mismo los criterios de falla empleados son el de Tsai-hill, y el de Puck.

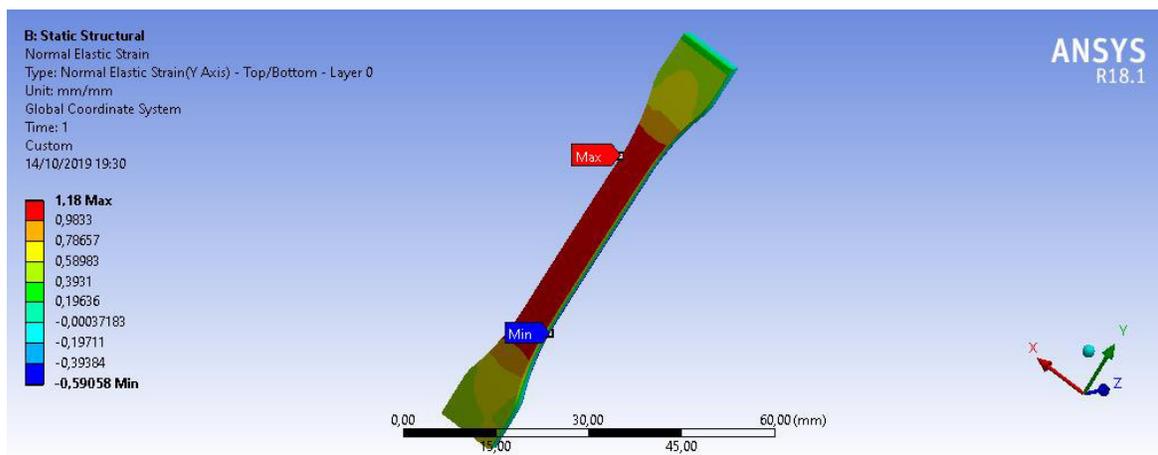


Figura 53. Deformación máxima de probeta a 45°, FEM

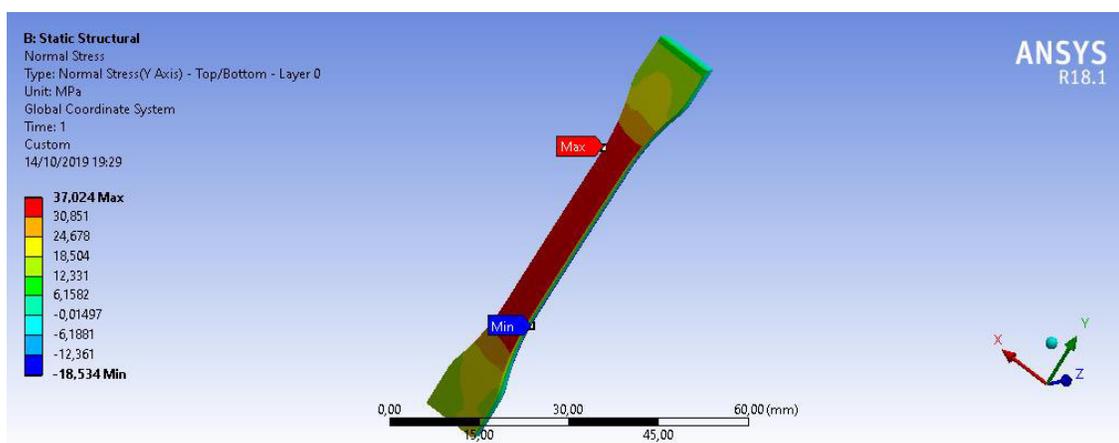


Figura 54. Tensión máxima de probeta a 45°, FEM

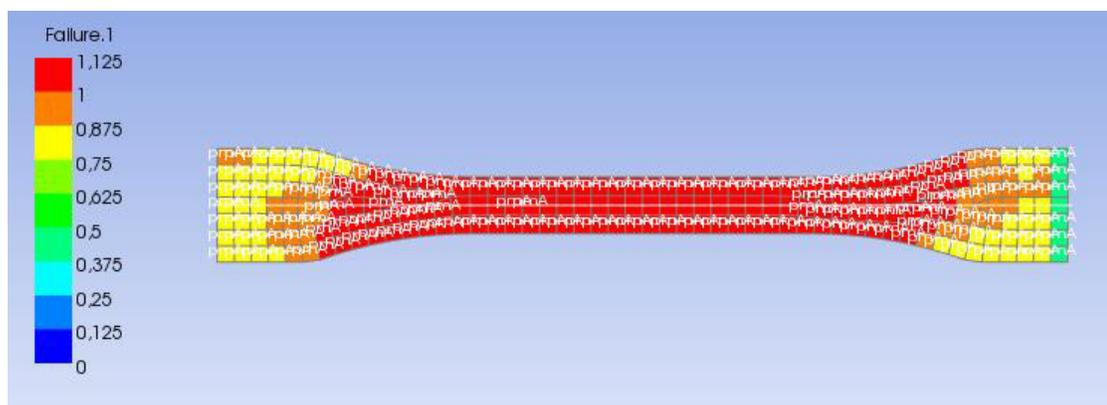


Figura 55. Análisis de criterio de Puck. probeta a 45°

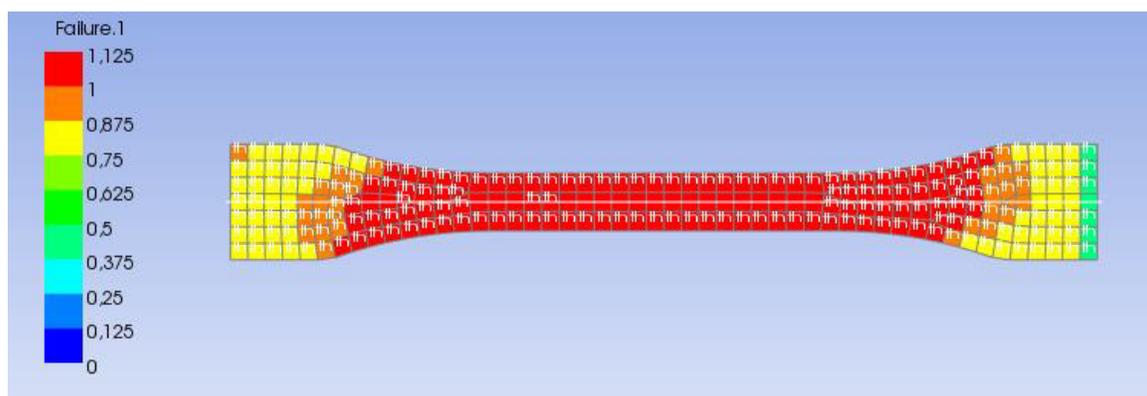


Figura 56. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta a 45°

Tabla 39

Comparación de factores de reserva de criterios de falla, probeta 45°

| <i>Criterio</i> | <i>Máximo</i> | <i>Mínimo</i> |
|------------------|---------------|---------------|
| <i>Puck</i> | 2,538 | 0,5938 |
| <i>Tsai-Hill</i> | 2,4696 | 0,5743 |

El criterio de Puck y el de Tsai-Hill arrojan un factor de reserva similar siendo más alto que el de la probeta de 90 grados lo que quiere decir una mayor falla.

4.3.1.4. Composite fibra tejida

Los valores obtenidos por la aproximación en ANSYS mostrados en la Tabla 40, indican un porcentaje de error más homogéneo en comparación a los ensayos de las probetas a 0°, 90°, y 45°.

Tabla 40

Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta fibra tejida

| <i>Compuesto Resina</i> | <i>Deformación</i> | <i>Tensión</i> |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| <i>UV-Chambira tejido</i> | <i>Unitaria</i> | <i>Mpa</i> |
| <i>Ensayo experimental</i> | 1,1417 | 38,22 |
| <i>Ensayo ANSYS</i> | 1,0088 | 40,33 |
| <i>%Error</i> | 11,64053604 | 5,52066981 |

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas del software ANSYS, tomando en cuenta que el criterio de falla utilizado es el de Tsai-hill ya que el de Puck no puede ser utilizado para materiales con configuración tejida. (Abellán López, 2012).

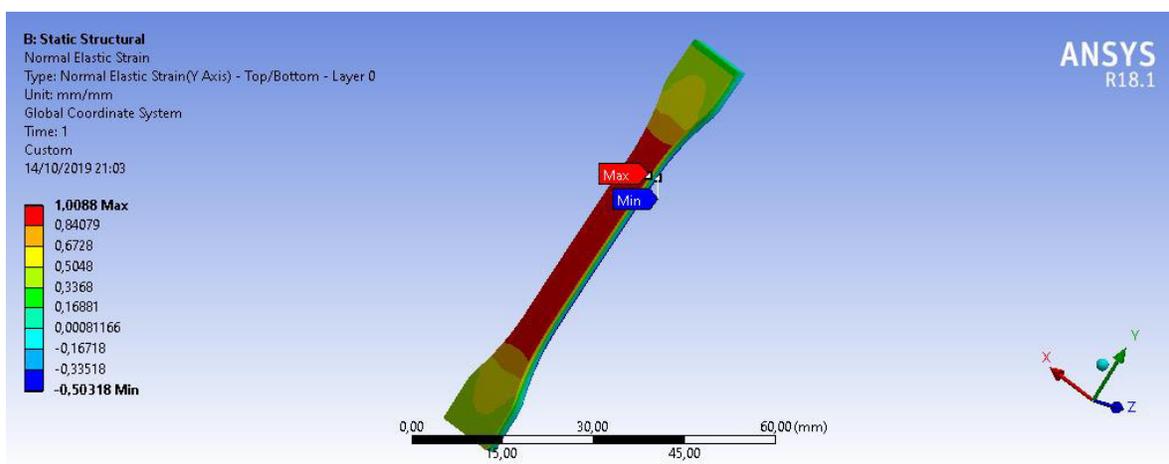


Figura 57. Deformación máxima de probeta fibra tejida, FEM

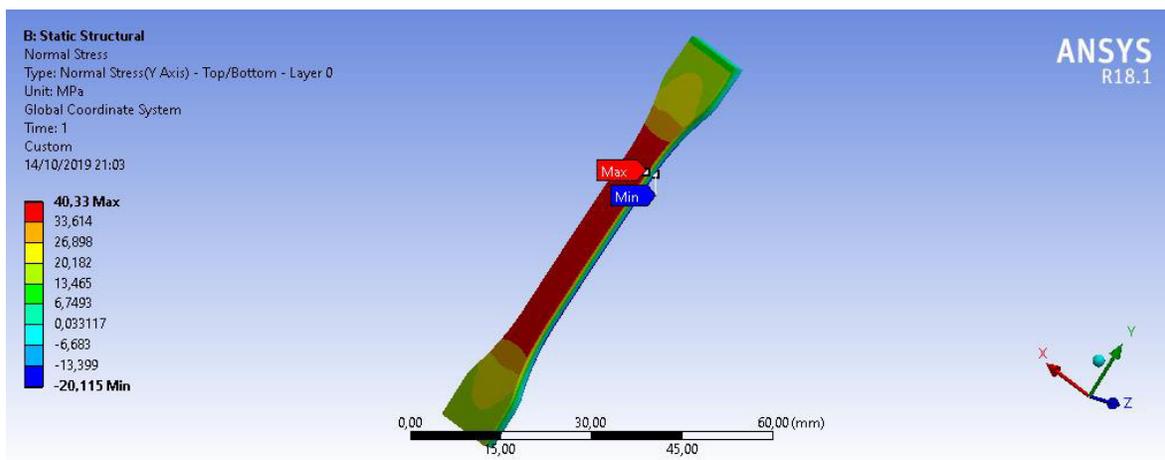


Figura 58. Tensión máxima de probeta fibra tejida, FEM



Figura 59. Análisis de criterio de Tsai-Hill. probeta fibra tejida

Tabla 41

Factor de reserva probeta fibra tejida

| <i>Criterio</i> | <i>Máximo</i> | <i>Mínimo</i> |
|------------------|---------------|---------------|
| <i>Puck</i> | - | - |
| <i>Tsai-Hill</i> | 1,0549 | 0,26471 |

Analizando el criterio de Tsai-Hill arroja un factor de reserva más bajo que el de las anteriores probetas, lo que resulta con una mayor resistencia.

4.3.1.5. Composite fibra corta

Las aproximaciones realizadas en la simulación dan los valores especificados en la Tabla 42, obteniendo un porcentaje de error alto al comparar datos teóricos con los experimentales, una de las posibles causas podría ser la falta de adhesión de fibras con la matriz.

Tabla 42

Datos experimentales y teóricos de deformación y tensión, probeta fibra corta

| <i>Compuesto Resina</i> | <i>Deformación</i> | <i>Tensión</i> |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| <i>UV-Chambira</i> | <i>Unitaria</i> | <i>Mpa</i> |
| <i>Fibra corta</i> | | |
| <i>Ensayo experimental</i> | 0,6528 | 24,773 |
| <i>Ensayo ANSYS</i> | 0,6731 | 34,012 |
| <i>%Error</i> | 3,109681373 | 37,2946353 |

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos al hacer el ensayo de tracción, se presentan únicamente las deformaciones y el esfuerzo, no se estudió ningún criterio de falla ya que, al comportarse como un material isótropo, no se pueden aplicar los criterios de falla de materiales compuestos.

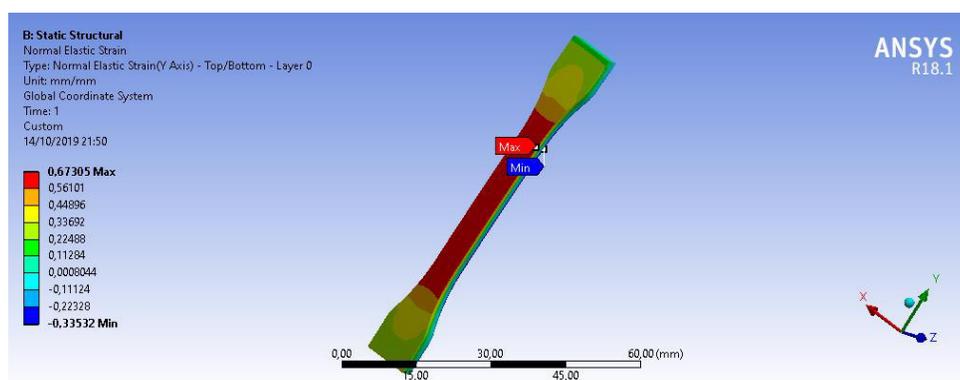


Figura 60. Deformación máxima de probeta fibra corta, FEM

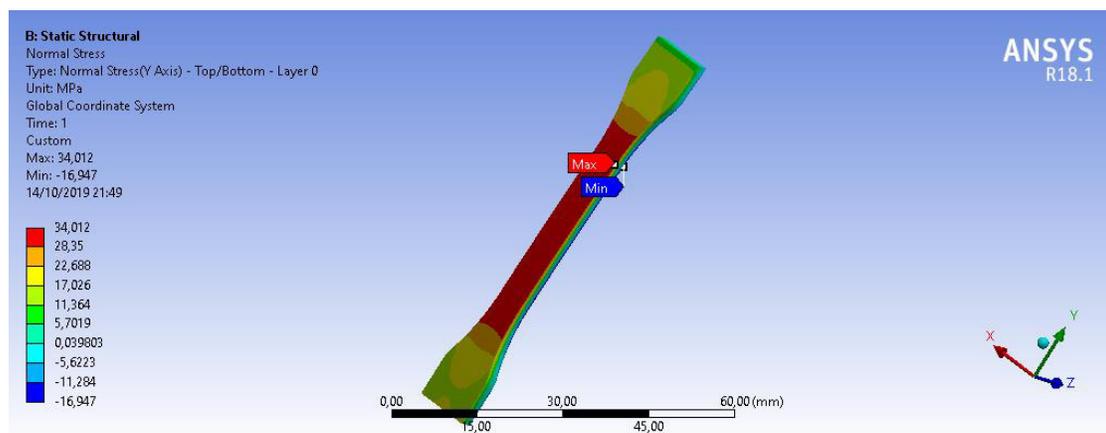


Figura 61. Tensión máxima de probeta fibra corta, FEM

En la tabla 43 se observa un resumen de los valores máximos y mínimos del factor de reserva de cada una de las probetas simuladas que proporciona ANSYS, aunque no es mucha la variación entre cada probeta, para una configuración de fibra a 45° es más conservador obteniendo una mayor resistencia.

Tabla 43

Resumen de factores de reserva para cada probeta simulada.

| PROBETA | PUCK | | TSAIL-HILL | |
|--------------------|--------|---------|------------|---------|
| | MÁXIMO | MÍNIMO | MÁXIMO | MÍNIMO |
| 0° | 2,3908 | 0,5887 | 2,397 | 0,5891 |
| 45° | 2,538 | 0,5938 | 2,4696 | 0,5743 |
| 90° | 1,2038 | 0,29412 | 1,2007 | 0,30961 |
| TEJIDO | - | - | 1,0549 | 0,26471 |
| PARTICULADO | - | - | - | - |

CAPITULO V

5. ANÁLISIS FINANCIERO

En el siguiente capítulo se detalla el total de costos de la presente tesis; no ha sido necesario realizar un análisis económico-financiero, ya que los resultados serán de uso de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Los costos directos e indirectos se detallan en las posteriores tablas.

5.1. Costos Directos

Para los costos directos se considera materiales utilizados, materia prima, procesos y sustancias que se utilizaron para la obtención del material compuesto como se observa en Las siguientes tablas.

Tabla 44
Materiales

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>UNIDADES</i> | <i>PRECIO UNITARIO</i> | <i>TOTAL</i> |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| <i>MEDIDOR DE TEMPERATURA</i> | <i>1</i> | <i>15</i> | <i>15</i> |
| <i>GAFAS UV</i> | <i>3</i> | <i>5</i> | <i>17</i> |
| <i>CAJA DE PIPETAS</i> | <i>22,25</i> | <i>1</i> | <i>22,25</i> |
| <i>PAR DE GUANTES</i> | <i>10</i> | <i>0,25</i> | <i>2,5</i> |
| <i>MASCARILLA</i> | <i>10</i> | <i>0,15</i> | <i>1,5</i> |
| <i>CAJA DE PORTA OBJETOS</i> | <i>1</i> | <i>5</i> | <i>5</i> |
| <i>ENVASES DE VIDRIO 30ML</i> | <i>1</i> | <i>0,44</i> | <i>0,44</i> |
| <i>ENVASES DE VIDRIO 250ML</i> | <i>1</i> | <i>0,72</i> | <i>0,72</i> |
| <i>ENVASES DE VIDRIO REDONDO</i> | <i>3</i> | <i>0,72</i> | <i>2,16</i> |
| <i>MEDIDORES DE PH</i> | <i>1</i> | <i>13,01</i> | <i>13,01</i> |
| <i>PAPEL FILTRO</i> | <i>4</i> | <i>1,04</i> | <i>4,16</i> |
| <i>RECIPIENTES PARA PROBETAS</i> | <i>10</i> | <i>0,1</i> | <i>1</i> |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>84,74</i> |

Tabla 45
Materia prima

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>UNIDADES</i> | <i>PRECIO UNITARIO</i> | <i>TOTAL</i> |
|--------------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| <i>CHAMBIRA</i> | <i>14</i> | <i>5</i> | <i>70</i> |
| <i>RECINAS</i> | <i>2</i> | <i>110</i> | <i>220</i> |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>290</i> |

Tabla 46
Procesos realizados

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>UNIDADES</i> | <i>PRECIO UNITARIO</i> | <i>TOTAL</i> |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| <i>FRESADO</i> | <i>1</i> | <i>5</i> | <i>5</i> |
| <i>CONSTRUCCIÓN CAMARA CURADO</i> | <i>1</i> | <i>20</i> | <i>20</i> |
| <i>CORTE Y MATERIAL MATRICES</i> | <i>1</i> | <i>50</i> | <i>50</i> |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>75</i> |

Tabla 47
Sustancias utilizadas

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>UNIDADES</i> | <i>PRECIO UNITARIO</i> | <i>TOTAL</i> |
|---|-----------------|----------------------------|--------------|
| <i>NITROGENO LÍQUIDO (RECARGA 30LT)</i> | <i>2</i> | <i>30</i> | <i>60</i> |
| <i>HIDROXIDO DE SODIO 10% (1 LITRO)</i> | <i>2</i> | <i>4,48</i> | <i>8,96</i> |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>68,96</i> |

Tabla 48
Total costos directos

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>TOTAL (\$)</i> |
|------------------------------|-----------------------|
| <i>MATERIALES</i> | <i>84,74</i> |
| <i>MATERIA PRIMA</i> | <i>290</i> |
| <i>PROCESOS REALIZADOS</i> | <i>75</i> |
| <i>SUSTANCIAS UTILIZADAS</i> | <i>68,96</i> |
| <i>TOTAL</i> | <i>518,7</i> |

5.2. Costos indirectos

En esta sección se detallan costos por utilización de laboratorios dentro de la universidad, impresiones, tiempo que se invirtió en el desarrollo del proyecto e incluso servicios básicos (luz), como se detalla en las siguientes tablas.

Tabla 49

Uso de laboratorios

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>COSTO POR DÍA(\$)</i> | <i>NÚMERO DE DÍAS</i> | <i>TOTAL (\$)</i> |
|--|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| <i>LAB. DE CIENCIA DE MATERIALES</i> | 5 | 35 | 175 |
| <i>LAB. DE RESISTENCIA DE MATERIALES (CIVIL)</i> | 5 | 5 | 17 |
| <i>LAB. DE QUÍMICA</i> | 5 | 3 | 15 |
| <i>LAB. DE MECÁNICA DE FLUIDOS</i> | 5 | 25 | 125 |
| <i>LAB. DE MECÁNICA DE MATERIALES</i> | 5 | 10 | 50 |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>382</i> |

Tabla 50

Varios

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>COSTO (\$)</i> | <i>MESES</i> | <i>INTEGRANTES</i> | <i>TOTAL (\$)</i> |
|---------------------|-------------------|--------------|--------------------|-------------------|
| <i>TRANSPORTE</i> | 20 | 12 | 2 | 480 |
| <i>MADO DE OBRA</i> | 400 | 12 | 2 | 9600 |
| <i>IMPRESIONES</i> | 50 | 1 | 1 | 50 |
| <i>LUZ</i> | 50 | 12 | 1 | 600 |
| <i>TOTAL</i> | | | | <i>10730</i> |

5.3. Costos Totales

Tabla 51*Costo total del proyecto*

| <i>DESCRIPCIÓN</i> | <i>TOTAL</i> <i>(\$)</i> |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| <i>COSTOS DIRECTOS</i> | <i>518,7</i> |
| <i>COSTOS INDIRECTOS DE LABS.</i> | <i>382</i> |
| <i>COSTOS INDIRECTOS VARIOS</i> | <i>10730</i> |
| <i>TOTAL</i> | <i>11630,7</i> |

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La caracterización química de la fibra para determinar el contenido de lignina y celulosa arrojó los siguientes datos: porcentaje de lignina 2,77%, porcentaje de celulosa 91,34%, lo que representa una mayor resistencia mecánica a la tracción y una baja resistencia a la flexión.

Al realizar el curado de la resina para determinar tanto la profundidad como la dureza, se dedujo que; se obtiene prácticamente los mismos resultados al curar en 10 s o 20 s, también así con los voltajes prácticamente el curar la resina con 8,3 y 12 voltios se mantiene la dureza, entendiéndose que curar en 10 seg. Con 8,3 V, sería lo más idóneo por el ahorro que representaría si el proceso se lo realiza de manera industrial.

El moldeo por inyección manual permitió la obtención del material compuesto, a través de una matriz de resina UV y un material de refuerzo como la fibra de *Astrocaryum Chambira*, para las 4 primeras disposiciones de fibras continuas fueron orientadas a 0°, 45°, 90° y tejidas; mientras que para las fibras discontinuas el particulado fue al azar. Comparando las probetas de resina sin fibra y el material compuesto; se obtuvo disminuciones y un aumento en las propiedades mecánicas de forma significativa

Cuando se utilizó la disposición de fibras a 45°, 90° , tejidas; hubo un aumento de 13.51%, 11.45% y 15.02% en cuanto al esfuerzo máximo que soportaba la probeta solo de resina, mientras que al utilizar las disposiciones de fibras a 0° y particulado existió una disminución 72.62% y

25.45% respectivamente en cuanto a la resistencia de la resina sin fibra, un factor importante es la no adherencia total entre matriz y fibra; esto genera concentradores de esfuerzo que disminuyen la capacidad de resistencia del material compuesto.

Mediante la utilización de la norma ISO 527-4 se construyó la probeta y se pudo escalar las dimensiones tanto en largo como de ancho, teniendo en cuenta que el espesor no necesariamente debía ser escalado; lo que permitió la construcción de las matrices de manera más sencilla para facilitar el armado y desmolde de la misma.

Tomando en consideración las características mecánicas que posee el material compuesto de resina de foto curado UV y fibra Astrocaryum Chambira, no es factible reemplazarlo con materiales compuestos por resina fenólicas o polipropileno; ya que estas poseen una resistencia a la tracción superior a la resina utilizada.

Se observó que el mayor problema fue la cámara de curado con la cual se realizó el material compuesto puesto no era la más idónea para este proceso, ya que al ser una resina de impresión se necesitaba una maquina especializada que pueda curar capa por capa a medida que se iba imprimiendo cada una de ellas, adicionalmente, no contamos con especificación en la hoja técnica para realizar pos calentamiento y el pre calentamiento que es característicos de este tipo de resinas; esto ocasionó que la resina reduzca su capacidad a tracción en un 41.44% puesto que en la hoja técnica posee una capacidad a tracción de 47 [N/mm²] y con el procedimiento utilizado obtuvimos una resistencia de 33.229 [N/mm²].

Al contar con un fenómeno común en los líquidos llamado capilaridad, se tuvo inconvenientes al momento de realizar las matrices de las distintas probetas, para lo cual se debió

realizar pruebas previas al resultado final de las probetas, optando por realizar cajas selladas con dos orificios en la parte superior para entrada de resina y salida de aire.

Al realizar la simulación por elementos finitos los resultados experimentales difieren a los teóricos, en donde las probetas con una configuración de fibra a cero grados; experimentalmente tuvo una tensión máxima de 9,09 Mpa y en la simulación se obtuvo 21,667 MPa, obteniendo un error del 138% que es inadmisibles, mientras que para las probetas con configuración de fibra tejida experimentalmente se obtuvo 38,22 MPa, y teóricamente 40,33 Mpa, dándonos un error del 5,5 % siendo muy aceptado.

En cuanto al poder calorífico que posee la fibra es de 16120,406 [KJ/Kg], tomando en consideración que tiene una que su poder calorífico es mayor cuando la fibra posee un tamaño de grano más pequeño y un porcentaje de humedad mínimo.

6.2. Recomendaciones

Almacenar las fibras en un ambiente seco, con baja humedad para no alterar sus propiedades y no obtener datos muy variantes debido a problemas en la estructura de la fibra.

Elaborar una matriz completamente sellada, de preferencia en acrílico transparente con un orificio para el desfogue de la resina, y así evitar problemas de capilaridad y de curado del material compuesto.

Elaborar una cámara de curado UV con control de tiempo y temperatura si es posible giratoria, para un mejor resultado del curado del material compuesto.

Para el proceso de obtención del poder calórico, realizar el tamiz, y compactado de las muestras el mismo día de la elaboración del ensayo experimental, ya que se varia la humedad y al no almacenarlas adecuadamente este valor podría cambiar, dándonos resultados erróneos.

Realizar un post curado de las probetas de material compuesto una vez desmoldada ya que la superficie o el centro de la probeta tiende a quedar residuos de resina líquida.

Realizar todos los ensayos químicos respectivos en un ambiente controlado, empleando las normas de seguridad respectiva, ya que se trabaja con reactivos ácidos perjudiciales para la salud.

Para mejorar la adherencia fibra-matriz realizar un remojado de la fibra con algún químico, el más idóneo sería tema de investigación para futuros proyectos, así mismo determinar la composición de las resinas fotocurables empleadas, ya que estos alteran de forma representativa las propiedades finales del compuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Latin Press, Inc. (2018). *Inpralatina*. Obtenido de Inpralatina Web site: inpralatina.com/201405203028/noticias/empresas/analisis-del-mercado-de-resinas-curables-con-uv.html
- Abellán López, D. (Octubre de 2012). Implementación y verificación de un modelo de degradación de propiedades para la predicción del fallo en materiales compuestos. Sevilla, España.
- Adela García, M. L. (2006). Resinas compuestas. Revisión de los materiales e indicaciones clínicas. *Medicina oral*, 215-220.
- ANSYS, I. (2019). *ANSYS Web site*. Obtenido de <https://ansyshelp.ansys.com>
- Arroyo, M., & Guerrero, M., & Eduardo, & G. (2019). Análisis comparativo de la densidad y velocidad de ignición óptimas para la combustión completa del olote perteneciente al Zea Mays L. *Científica*, 43-50.
- Askeland, R. R. (2011). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson Editores.
- Askeland, R. R. (2011). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson Editores.
- Borrachero, B. A. (2006). *Caracterización de materiales compuestos de fibras de carbono y naturales aplicados para la fabricación de componentes de automoción*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Borton, J. (2008). *SingIndustry.com*. Recuperado el 2008, de SingIndustry.com: http://www.signindustry.com/flatbed_UV/articles/2008-11-17-SGIA_Primer_on_UV-

Curable_Inkjet_Inks.php3?fbclid=IwAR0t14FMUTEAwhf_88vgXdcd_EGUjftug8NPoRj
TU8M9V4YBUFaRj5UJdzI

Brett, C. T. (2000). Cellulose microfibrils in plants: Biosynthesis, deposition, and integration into the cell wall. *Int. Rev. Cytol*, 161-199.

Coomes, O. T. (2004). Rainforest ‘conservation through-use’? Chambira palm fibre extraction and handicraft production in a land-constrained community, Peruvian Amazon. . *Biodiversity and Conservation*, 351-366.

Deaquiz, Y., & Moreno, B. (2016). Producción y Biosíntesis de Fibras Vegetales. Una Revisión. *Conexión Agropecuaria*, 29-42.

Definición ABC . (2019). Obtenido de Definición ABC tu diccionario hecho fácil:
<https://www.definicionabc.com/general/resina-epoxi.php>

EcuRed. (30 de 10 de 2015). *EcuRed*. Obtenido de Enciclopedia en la red:
<https://www.ecured.cu/Resina>

Esmeralda Castillo, S. (Septiembre de 2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

FAO. (2009). *Fibras Naturales 2009*. Obtenido de <http://www.naturalfibres2009.org>

Ferracane, J. L. (2002). A new approach for curing light activated oral biomaterials. *British Dental Journal*, 186-384.

Franco, H., & González, V. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: engineering Vol. 68*, 597 - 608.

Ganesh, V., & Chawla, N. (2005). “Effect of particle orientation anisotropy on the tensile behavior of metal matrix composites: experiments and microstructure-based simulation. *Materials Science and Engineering A*, 342-353.

- Garcia, Galeano, Berbal, Nacimiento, Noriega, & Angel. (Julio de 2013). Cartilla para el manejo y aprovechamiento de la palma de chambira (*Astrocaryum chambira*). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Garcia, N., Galeano, G., Berba, R., Nacimiento, Noriega, A., H., & V, A. (Julio de 2013). Cartilla para el manejo y aprovechamiento de la palma de chambira (*Astrocaryum chambira*). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gladys Vidal, S. H. (2016). Las fibras vegetales y sus aplicaciones . En S. H. Gladys Vidal, *Las fibras vegetales y sus aplicaciones* (págs. 11-12). Concepción, Chile: Sello Editorial Universidad de Concepción .
- Guerrero, V. H., Dávila, J., Galeas, S., Ponton, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Herrera, P., & Valadez, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B Engineering*, 597-608.
- Ismeli, A., Vladimir, R., & Ignacio, F. (2015). Potencialidades computacionales del Método de los Elementos Finitos para la modelación y simulación de materiales compuestos: revisión. *REVISTAMATERIA*, 293-303.
- Jayaraman, K. (2003). Manufacturing sisal–polypropylene composites with minimum fibre degradation. *Composites Science and Technology*, 367-374.
- Jensen, O. H., Balslev, & Henrik. (2008). Ethnobotany of the fiber palm *Astrocaryum chambira* (Arecaceae) in Amazonian Ecuador. *Economic Botany*.
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 343-364.
- John, M., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 342-364.

- Joseph, P., Joseph, K., & Thomas, S. (1999). Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 1625-1640.
- Macía, M. J. (2006). Las plantas de fibra. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 380.
- Majewski, T., & Błędzki, A. (2013). Plásticos Reforzados con Fibras Naturales en el Sector Automotriz. *Ideas en Ciencia*, 25.
- MakerJuice Labs. (2019). *MakerJuice Labs*. Obtenido de <https://makerjuice.com/collections/form-1-compatible/products/sf-for-form-1>
- Marco, N. &. (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de biocomposites con fibras naturales. *IBEROMAT, XII Congreso Nacional de Materiales*. Valencia.
- Marín, M., Millán, B., & Kahn, F. (2018). Anatomy and physicochemical properties of the chambira fiber. *Revista Peruana de Biología*, 19(1), 6-7.
- Mayugo, J. (01 de 07 de 2013). Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos acargas cíclicas. Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Messer, A. E. (16 de Febrero de 2019). *The Pennsylvania State University* . Obtenido de <https://news.psu.edu/story/559351/2019/02/16/research/tiny-fibers-create-unseen-plastic-pollution>
- Minitab. (2019). Obtenido de Minitab Web site: <https://www.minitab.com>
- Miravete, A. (2003). *Materiales compuestos 03, Volumen 1*. Zaragoza: Reimpresa.
- Mohanty, A., Misra, M., & Drzal, L. (2005). Natural fiber, biopolimers and biocomposites. Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
- Molina, J., Benavides, S., Moreno, G., & Iribarra, E. (2014). Composite Material Based on a Matrix of Resin Polyester Reinforced. *Journal of Materials Science Research*, 53-55.

- Molinier, M. (s.f.). *Anàlisis de los Criterios de Falla Aplicados a los Laminados Compuestos*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- Montoya, J., & Zumaeta, C. (01 de 08 de 2016). *Uso de la Tierra, Comunidades y Áreas Protegidas en la Amazonía Baja Peruana: Aplicación de un Enfoque Multinivel*. Huanuco, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Mora, W., & B, R. (2017). Biocompuesto de fibra natural de palma cumare (*Astrocaryum chambira*) y resina bioepoxy, aplicaciones industriales. *AEMAC*, 1-7.
- Morejón, S., & Narváez, L. (2004). *Materiales Compuestos de Matrices Polietilénicas Reforzados con Fibras Naturales de Abacá y Cabuya*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional .
- Moscoso, J. P. (Junio de 2007). *Obtención de Compuestos de Polipropileno Reforzado con Fibras de Abacá Mediante Moldeo por Compresión*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Mott, E. J., Busso, M., Luo, X., Dolder, C., & Wang, M. O. (2015). Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly(propylene fumarate) scaffolds. *ELSEVIER*, 6-10.
- Novo Uzal, E. (2008). *Lignificación en cultivos celulares de gimnospermas basales. Lignificación en cultivos celulares de gimnospermas basales*. Coruña, Coruña, España: Universidade Da Coruña .
- Olvera, M., Jimenez, O., & Mendoza, O. (2013). *Caracterización de un proceso de manufactura para la obtención de compuestos de fibra de agave unidireccional resina epóxica y poliéster. Autonoma Universidad de México*, 3-6.
- Omar, T. (Noviembre de 2013). *Evaluación de un Material Lignocelulósico Para la Producción de celulasa, Xilanasa y Lacas por Basidiomicetos del Noreste de México*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Páez, J. (2 de Junio de 2007). Tesis. *Obtención de compuesto de polipropileno con fibras de abacá mediante moldeo por compresión*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Pandey, R. (2014). *Photopolymers in 3D printing applications*. Finlandia: ARCADA.
- Patrimonio, M. d. (Marzo de 2015). *Cultura y Patrimonio*. Obtenido de <http://patrimonioalimentario.culturaypatrimonio.gob.ec/wiki/index.php/Chambira>
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2011). *Definicion.de*. Obtenido de <https://definicion.de/resina/>
- Petromercado. (2019). Obtenido de Petromercado.com: <http://petromercado.com/blog/37-articulos/105-poder-calorifico-inferior-y-superior.html>
- Pucha, M. V. (21 de Agosto de 2018). Caracterización de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- QuimiNET. (2019). *Resinas, tipos de resinas y aplicaciones | QuimiNet.com*. Obtenido de Quiminet.com: <https://www.quiminet.com/articulos/resinas-tipos-de-resinas-y-aplicaciones-18443.htm>
- Raffino, M. E. (29 de Agosto de 2019). *Concepto.de*. Recuperado el 29 de Agosto de 2019, de *Concepto.de*: <https://concepto.de/hidrolisis/#ixzz644BF5LYP>
- Reichmanis, E., & Crivello, J. (2014). Materiales y Procesos de Fotopolímero para Tecnologías Avanzadas. *Chem. Mater*, 533-548.
- Rodriguez, D., & Pereira, N. (2007). Current Trends And Evolution On Dental Composites. *Acta Odontológica Venezolana*, 2.
- Roman, J. S. (2007). Biomateriales: retos y alternativas. *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*, 63-72.

- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., & Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 1437-1447.
- Satyanarayana, K. A. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-an overview. *Progress in Polymer Science*, 982-1021 .
- Sherman, L. M. (1999). Natural fibers: the new fashion in automotive plastics. *Plastics Technology* , 62-68.
- Sydenstricker, T., Mochnaz, S., & Amico, S. (2003). Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. *Polymer Testing*, 375-380.
- Tamayo, N. (10 de Junio de 2012). Tesis. *Obtención y caracterización de un material compuesto de matriz de polister reforzados con fibras de cabuya mediante estratificación*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Technical-Floor. (12 de 12 de 2012). *Technical-Floor*. Obtenido de Tecnología en Paviments: <http://technicalfloor.com/resina-epoxi-pavimentos/>
- Textiles Panamericanos. (05 de Febrero de 2015). *Fibras Manufacturadas Continúan su Crecimiento*. Obtenido de <https://textilespanamericanos.com/textiles-panamericanos/articulos/2015/02/fibras-manufacturadas-continuan-su-crecimiento/>
- Thakur, V. (2013). *Green composites from natural resources*. CRC Press.
- Torgal, P., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials. *Construction and Building Materials* 25, 575-581.
- Valencia, R., Montúfar, R., Navarrete, H., & Henrik, B. (2013). *Palmas ecuatorianas: Biología y uso sostenible*. Quito: Herbario QCA de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Velásquez, S. &. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *Informador Técnico*, 77-86.
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2016). *Las Fibras Vegetales y sus Aplicaciones*. Concepción, Chile: Sello editorial Universidad de Concepción.
- Wakeman, M. (1998). Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro- mechanical properties—1 commingled glass and polypropylene. *Composite Science and Technology*, 1879-1898.
- Zienkiewicz, O., & Taylor, R. (1994). *El Método de los Elementos Finitos. Volumen 1. Formulación básica y problemas lineales*. McGraw-Hill.