

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICO-MECÁNICA DE MATERIALES  
BIOCOMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE**

**Sergio Andrés Gómez Suárez**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2017**

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICO-MECÁNICA DE MATERIALES  
BIOCOMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE**

**Sergio Andrés Gómez Suárez**

**Tesis de Maestría**

**DIRECTOR**

**Doctor Bladimir Ramón Valencia**

**CO-DIRECTOR**

**Doctor Rolando Enrique Guzmán López**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimiento especial a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga quien proporcionó los equipos para la ejecución de las pruebas y a la Universidad de Pamplona quien me formó en las competencias de investigación.

Al Dr. Bladimir Ramón por todas las enseñanzas recibidas.

A la Universidad del País Vasco, principalmente al Dr. Alberto López Arraiza y el Dr. Fabuer Ramón Valencia, por su colaboración en la fabricación de probetas por el método de infusión en vacío.

Al ingeniero Víctor Hugo Cuellar quien operó el microscopio electrónico de barrido (SEM) permitiendo la obtención de las imágenes que evidenciaba la morfología de los materiales fabricados.

A Dios y a mi familia, junto a todas las personas que estuvieron apoyándome en este proceso de formación.

## RESUMEN

En la siguiente investigación las propiedades mecánicas y dinámicas vibratorias de materiales biocompuestos reforzados con fibras de fique fueron estudiadas. Los materiales fueron fabricados utilizando la técnica de manufactura de infusión en vacío utilizando matrices termoestables y biobases y refuerzos naturales con configuraciones de las fibras en formas tejidas y aleatorias. Las propiedades mecánicas de tensión fueron obtenidas de acuerdo con la norma ASTM D3039/D3039M. Los resultados demostraron mayor rigidez y resistencia a mayor cantidad de fibra natural, así mismo, los biocompuestos de fique tejidos superaron en su comportamiento mecánico a los de configuración aleatoria. El impacto en los parámetros modales (Caracterización dinámica) debido al número de capas de la fibra natural se realizó de forma experimental según la Norma ISO 7626-2. Se identificó un incremento en la frecuencia natural y el amortiguamiento de los materiales con la incorporación de mayor cantidad de fibra. De otro lado, se realizó un estudio comparativo de las frecuencias naturales obtenidas mediante en el método experimental según la medición de la respuesta en frecuencia (FRF), un análisis analítico a partir de la teoría de Euler- Bernoulli y una simulación por elementos finitos obteniéndose porcentajes bajos de diferencia entre los dos últimos métodos mencionados, mientras que para el método experimental se reportaron errores de hasta un 25%. La interface fue evaluada mediante microscopía electrónica de barrido, en donde se evidenció una baja adhesión entre la fibra natural y la resina, y como consecuencia se vieron afectadas las propiedades mecánicas y dinámicas de los biocompuestos. Los resultados obtenidos del ensayo de tensión, análisis modal y microscopia electrónica de barrido de los materiales biocompuestos de fique se compararon contra un compuesto referente de fibra de vidrio el cual presentó mejores propiedades mecánicas, comportamiento dinámico similar y una mejor adhesión que los biocompuestos de fique.

**Palabras Claves:** Análisis Modal, Biocompuesto, Ensayo tensión, Fique, Microscopía electrónica.

## ABSTRACT

In the following investigation, the mechanical and dynamic vibratory properties of bio composite materials reinforced with fique fibers were studied. The materials were fabricated through a vacuum infusion manufacturing technique using a biobases and thermostable matrices and natural fiber reinforcements with random and weave configurations. Mechanical tensile properties were obtained according to ASTM D3039 / D3039M. The results demonstrated greater stiffness and strength to greater natural fiber amount also that the weave fique biocomposites exceed in their mechanical behavior random biocomposites. The impact on the modal parameters (Dynamic characterization) due to the natural fiber number layers was experimentally made according to ISO 7626-2. An increase in the materials natural frequency and damping with the fiber incorporation was identified. On the other hand, the deviation between three modal analysis methods (analytical, finite elements and experimental) applied to biocomposite materials was studied. Obtaining low difference percentages comparing the last two mentioned methods while the experimental method reported errors until 25%. The interface between the materials was studied by scanning electron microscopy, in which a low adhesion between the natural fiber and the resin was evidenced affecting the mechanical and dynamic properties. The fique biocomposite tensile test, Modal analysis and scanning microscopic results obtained were compared against a referent fiberglass composite, which presented better mechanical properties, similar dynamic behavior and a better adhesion than the fique biocomposites.

**Keywords:** Modal analysis, Biocomposite, Fique, scanning electron microscopy, tensile test

## CONTENIDO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1. ESTADO DEL ARTE.....	13
1.1 Materiales compuestos.....	13
1.1.1 Definición.....	13
1.1.2 Clasificación.....	13
1.1.3 Fibras de refuerzo.....	14
1.1.4 Interface matriz-refuerzo.....	16
1.2 Materiales biocompuestos con fibras naturales.....	17
1.2.1 Fibras naturales.....	17
1.2.2 Fibras naturales convencionales.....	18
1.2.3 Fibra natural de fique.....	23
1.2.4 Matrices en materiales biocompuestos.....	24
1.3 Técnicas de manufactura de materiales biocompuestos.....	25
1.4 Antecedentes de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales.....	27
1.4.1 Propiedades estructurales.....	27
1.4.2 Propiedades mecánicas.....	27
1.4.3 Propiedades térmicas.....	28
1.4.4 Propiedades dinámicas.....	29
1.5 Análisis modal en materiales compuestos.....	30
1.5.1 Teoría básica de vibraciones.....	30
1.5.2 Teoría análisis modal.....	33
1.6 Antecedentes de análisis modal en materiales compuestos.....	34
2. OBJETIVOS.....	38
2.1 General.....	38

2.2 Específicos .....	38
3. FABRICACIÓN DE MATERIALES BIOCMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE .....	39
3.1 Materiales y métodos.....	39
3.1.1 Tratamiento fibras de fique en configuración mat.....	39
3.1.2 Tratamiento Fibras de fique en configuración de tejido .....	42
3.1.3 Fibra de vidrio mat.....	43
3.1.4 Resinas empleadas como matrices de los biocompuestos .....	44
3.2 Fabricación de los biocompuestos.....	45
3.2.1 Biocompuestos con matriz termoestable de poliéster insaturado y fibras de fique.....	45
3.2.2 Biocompuestos con matriz biobase .....	47
3.3 Resultados del proceso de fabricación de los biocompuestos .....	48
3.3.1 Biocompuesto de matriz termoestable poliéster y con refuerzo fique en configuración aleatoria. ....	48
3.3.2 Biocompuesto de matriz bio-epoxy y con refuerzo fique en configuración aleatoria.....	49
3.3.3 Biocompuesto de matriz bio-epoxy y fique en configuración de tejido ...	50
3.3.4 Compuesto bio-epoxy y fibras de vidrio.....	51
3.4 Conclusiones y discusión .....	51
4. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN DE LOS BIOCMPUESTOS .....	53
4.1 Materiales y métodos.....	53
4.1.1 Materiales y fabricación de los compuestos .....	53
4.1.2 Ensayo de tensión .....	54
4.2 Resultados propiedades mecánicas a tracción de los biocompuestos .....	54
4.2.1 Biocompuesto con matriz Poliéster variando la cantidad de capas de fique .....	55
4.2.2 Materiales con matrices bioepoxy variando el tipo de fibra y la configuración de la natural .....	57
4.3 Conclusiones y discusión .....	59
5. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA (ANÁLISIS MODAL) .....	63
5.1 Materiales y métodos.....	63
5.1.1 Materiales y fabricación de los compuestos .....	63

5.1.2 Método Experimental, medición de la respuesta en frecuencia .....	64
5.1.3 Método Analítico, Euler Bernoulli .....	65
5.1.4 Simulación por elementos finitos.....	66
5.2 Resultado análisis modal.....	66
5.2.1 Evaluación del impacto en parámetros modales debido al número de capas de la fibra natural .....	66
5.2.2 Evaluación de la desviación entre los métodos de simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico para la caracterización dinámica por análisis modal de materiales compuestos fibro reforzados con fibras.....	69
5.2.3 Comparación de los resultados .....	77
5.3 Conclusiones y discusión .....	78
6. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO) .....	80
6.1 Materiales y métodos.....	80
6.1.1 Materiales y fabricación de los biocompuestos .....	80
6.1.2 Microscopia electrónica de barrido.....	81
6.2 Resultados de la microscopia electrónica de barrido.....	83
6.2.1 Fibras .....	83
6.2.2 Materiales biocompuestos reforzados .....	84
6.3 Conclusiones y discusión .....	90
7. CONCLUSIONES GENERALES .....	91
PRODUCTOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	93
BIBLIOGRAFIA.....	94
ANEXOS .....	103



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de materiales compuestos .....	14
Figura 2. Clasificación de la fibra de fique .....	18
Figura 3. Planta de cáñamo.....	19
Figura 4. Planta de banana.....	19
Figura 5. Planta de kenaf.....	20
Figura 6. Planta de sisal. ....	20
Figura 7. Planta de algodón.....	21
Figura 8. Planta caña de azúcar. ....	21
Figura 9. Planta de piña.....	22
Figura 10. Palma de aceite. ....	23
Figura 11. Planta de fique.....	23
Figura 12. Sistema de un grado de libertad no amortiguado y vibración libre . ....	31
Figura 13. Sistema de un grado de libertad, amortiguado y vibración libre . ....	32
Figura 14. Sistema de un grado de libertad forzado . ....	33
Figura 15. Proceso para la obtención fique aleatorio.....	40
Figura 16. Longitud y diámetro de las fibras de fique en configuración aleatoria ..	41
Figura 17. Proceso para la obtención del tejido de fique .....	42
Figura 18. Fibra de vidrio .....	43
Figura 19. Longitud y diámetro de las fibras de vidrio.....	44
Figura 20. Molde de aluminio.....	46
Figura 21. Proceso de curado.....	46
Figura 22. Biocompuesto matriz biobase.....	47
Figura 23. Probetas arreglo de matriz termoestable poliéster y con refuerzo fique en configuración aleatoria.....	48
Figura 24. Discontinuidades en la fabricación .....	49
Figura 25. Arreglo bio-epoxy/ fique en configuración aleatoria .....	50
Figura 26. Arreglo bio-epoxy/ fique en configuración de tejido .....	50
Figura 27. Arreglo bio-epoxy y fibras de vidrio.....	51
Figura 28. Ensayo de tensión. a) Compuesto de vidrio b) Biocompuesto fique tejido .....	54
Figura 29. Curva esfuerzo-deformación biocompuestos poliéster/ N°capas fique .	55
Figura 30. Módulo Young Biocompuesto Poliéster/fique .....	56
Figura 31. Curva esfuerzo deformación bioepoxy/fique (mat y tejido) Vs bioepoxy/vidrio .....	57
Figura 32. Módulo de elasticidad fibra de vidrio, fique tejido, fique aleatorio .....	58
Figura 33. Montaje método experimental.....	65
Figura 34. Amortiguamiento de los biocompuestos .....	68
Figura 35. Forma modal de los biocompuestos .....	69
Figura 36. Aceleración de los materiales .....	70

Figura 37. Primer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 13.599 Hz ....	72
Figura 38. Primer Modo de vibración biocompuesto fique tejido, 21.567 Hz .....	72
Figura 39. Primer Modo de vibración compuesto de vidrio, 19.522 Hz .....	72
Figura 40. Segundo Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 73.226 Hz	73
Figura 41. Segundo Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 116.4 Hz ..	73
Figura 42. Segundo Modo de vibración compuesto de vidrio, 105.45 Hz .....	74
Figura 43. Tercer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 180.63 Hz ....	74
Figura 44. Tercer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 286.78 Hz ....	75
Figura 45. Tercer Modo de vibración compuesto de vidrio, 260.16 Hz .....	75
Figura 46. Cuarto Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 335.37 Hz ....	76
Figura 47. Cuarto Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 531.53 Hz ....	76
Figura 48. Cuarto Modo de vibración compuesto de vidrio, 483.17 Hz .....	76
Figura 49. Microscopio electrónico de barrido SEM .....	82
Figura 50. Recubrimiento de los biomateriales .....	82
Figura 51. Análisis SEM fibra fique en configuración aleatoria .....	83
Figura 52. Análisis SEM fibra de fique configuración tejido .....	84
Figura 53. Análisis SEM fibra de vidrio .....	84
Figura 54. Porosidad Biocompuesto fique/poliéster a) Una capa b) Dos capas ....	85
Figura 55. Porosidad SEM Biocompuesto fique/poliéster a) Tres capas b) Cuatro capas .....	86
Figura 56. Adhesión SEM biocompuesto fique/poliéster a) Una capa b) Dos capas .....	86
Figura 57. Adhesión SEM Biocompuesto fique/poliéster a) Tres capas b) Cuatro capas .....	87
Figura 58. Análisis SEM biocompuesto fique/bioepoxy configuración aleatoria ....	88
Figura 59. Análisis SEM biocompuesto fique/bioepoxy configuración tejido .....	89
Figura 60. Análisis SEM compuesto fibra de vidrio .....	89

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de los tipos de fibra de vidrio .....	15
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los tipos de fibra de vidrio .....	15
Tabla 3. Propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibra de carbono .....	16
Tabla 4: Componente de la hoja de fique .....	24
Tabla 5: Componente de la fibra fique .....	24
Tabla 6: Empresas comercializadora fibra fique .....	24
Tabla 7. Propiedades mecánicas biocompuestos .....	28
Tabla 8. Propiedades de la resina SuperSap .....	44
Tabla 9. Propiedades de la resina poliéster .....	45
Tabla 10. Arreglo de materiales biocompuesto poliéster/fique. ....	48
Tabla 11. Manufactura compuestos de fique .....	52
Tabla 12. Propiedades mecánicas compuestos de fique .....	61
Tabla 13. Frecuencia natural de los materiales .....	67
Tabla 14. Frecuencia natural por análisis experimental .....	70
Tabla 15. Frecuencia natural análisis analítico .....	71
Tabla 16. Porcentaje de error entre métodos .....	77

## INTRODUCCIÓN

En la última década los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han tomado un papel importante en la industria debido a sus características mecánicas y a la demanda de elementos que sean biodegradables [1], [2]. Estos materiales brindan ventajas como: baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia al impacto, no corrosión y algunas desventajas como: baja adhesión entre la matriz y las fibras, y alta absorción de humedad con respecto a los materiales industriales comunes [3].

Una de las fibras naturales utilizadas para la fabricación de este tipo de biomateriales es la del fique. El fique es una fibra nativa de Colombia la cual es extraída de la planta *Furcraea* spp por un proceso mecánico llamado desfibrado. Esta fibra posee una densidad aproximada de  $0,870 \text{ g/cm}^3$ , una resistencia a la tracción de 237 MPa, un módulo de elasticidad de 8,010 GPa y respecto a sus propiedades térmicas puede soportar  $220^\circ\text{C}$  sin degradarse [4].

Varios compuestos reforzados con fibras de fique han sido manufacturados y caracterizados: física, química, mecánica y dinámicamente [5]–[8] conociendo sus propiedades más representativas lo que ha permitido emplearlos en algunas aplicaciones industriales.

El análisis dinámico más utilizado es el (DMA) el cual permite conocer el módulo de almacenamiento,  $\tan \delta$  y módulo de pérdida de los materiales compuestos de matriz polimérica [9], [10] no obstante no permite establecer si el sistema entrara en resonancia según la frecuencia de excitación.

Para conocer estas últimas características se utiliza el análisis modal, que tiene por objeto encontrar las frecuencias naturales y formas modales de un sistema, las cuales pueden ser determinadas por simulación, experimentación o de forma analítica [11].

El análisis modal, usualmente se ha realizado en aplicaciones mecánicas con materiales metálicos [12]–[14]. Sin embargo, no se encuentra suficiente información sobre su ejecución en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales [15] especialmente la de fique.

Es por esta razón, que en el presente trabajo de investigación se plantea caracterizar dinámicamente y mecánicamente, materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales de fique y resinas termoestable tanto de origen sintético como de productos renovables, por medio de la técnica infusión en vacío, para evaluar la conducta en los parámetros modales.

## **1. ESTADO DEL ARTE**

### **1.1 Materiales compuestos**

En el presente capítulo se realiza un resumen de las características de los materiales compuestos, exponiéndose como se clasifican, dependiendo su tipo de matriz, y que función cumple la fibra (Resaltando las más utilizadas a nivel industrial). Por último, se define la interface y sus características más importantes.

#### **1.1.1 Definición**

Un material compuesto se define como la unión de dos o más materiales donde se busca obtener mejores propiedades que como elemento individual. A diferencia de las aleaciones, cada material retiene sus propiedades (químicas, físicas y mecánicas) separadas [16].

Los materiales compuestos se constituyen por una matriz y un refuerzo siendo su principal ventaja la alta resistencia y rigidez con un bajo peso [16].

#### **1.1.2 Clasificación**

Los materiales compuestos se pueden clasificar dependiendo de la matriz. En la figura 1 se observa esta categorización [17].

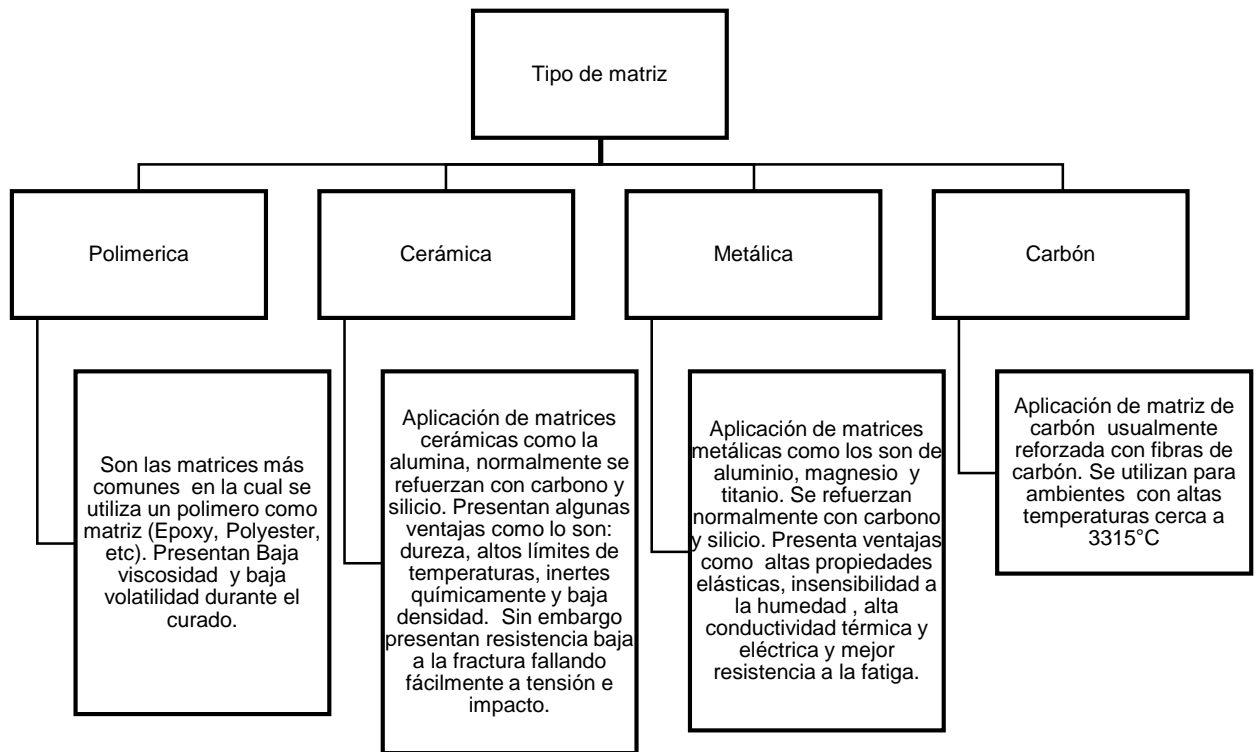


Figura 1. Clasificación de materiales compuestos [17]

### 1.1.3 Fibras de refuerzo

Las fibras tienen como función brindar la resistencia y soportar la carga estructural en el material compuesto. Las mismas presentan longitudes de al menos 100 veces el diámetro. Normalmente los compuestos se fabrican con haces o hilos de 500 a 12 000 fibras [18].

Las fibras se pueden presentar en diferentes tamaños (Largas o cortas) o retorcer en hilos para realizar tejidos [18].

Las configuraciones se presentan unidireccionales, aleatorias o variedad de patrones de tejido [18].

A continuación, se relacionan las fibras convencionales más utilizadas en la fabricación de materiales compuestos

- **Fibra de vidrio:** cerca del 90% de los materiales compuestos se fabrican con la fibra de vidrio. Las fibras se han empleado en la manufactura de los compuestos en diversas formas como lo son longitudinales, aleatorias y tejidas. Se clasifican

como se relacionan en la tabla 1, siendo la más usada la E-glass o eléctrica, donde adicionalmente se denota su composición química [19].

**Tabla 1.** Composición química de los tipos de fibra de vidrio [19]

Tipo	Composición química (% en peso)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
E-glass	55	14	-	0.2	7	22	1	0.5	0.3
C-glass	64.6	4.1	-	-	5	13.4	3.3	9.6	0.5
S-glass	65	25	-	-	-	-	10	-	-
A-glass	67.5	3.5	-	-	1.5	6.5	4.5	13.5	3
R-glass	60	-	-	-	-	9	6	0.5	0.1
EC-glass	58	12.4	12.4	-	-	23	23	-	-
AR-glass	61	1	-	-	-	5	1	14	3

Las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio comerciales se anexan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de los tipos de fibra de vidrio [19]

Tipo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo tensión (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación (%)
E-glass	2.58	3445	72.3	4.8
C-glass	2.52	3310	68.9	4.8
S-glass	2.46	4890	86.9	5.7
A-glass	2.44	3310	68.9	4.8
R-glass	2.54	4135	85.5	4.8
EC-glass	2.72	3445	85.5	4.8
AR-glass	2.7	3241	73.1	4.4

- **Fibra de carbono:** La fibra contiene al menos 92% de su peso de carbono [20]. Este tipo de refuerzo presenta alta resistencia y rigidez con un bajo peso (ofrecen el módulo y la fuerza de tensión más altas de todas las fibras). Adicionalmente son químicamente inertes y conducen la electricidad [19], [20]. Las fibras se utilizan usualmente en forma de tejidos textiles, preimpregnados, mechas continuas y fibras cortadas. Los sistemas de manufacturas más utilizados con este tipo de fibra son el bobinado de filamentos, bobinado de cinta, pultrusión, moldeo por compresión, infusión al vacío, y moldeo por inyección [20].

En la tabla 3 se observan las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibra de carbono [19].

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibra de carbono [19]

Tipo	Esfuerzo de tensión (MPa)	Modulo (GPa)
UHM	2500	600
HM	2500	350-600
IM	3500	280-350
HT	2500	200-280
LM	3500	200

- **Kevlar:** Es una fibra de estructura molecular rígida de Poly-para-phenylene-terephthalamide (PPTA). Inicialmente se desarrolló como refuerzo de acero en llantas de vehículos, pero posteriormente se ha aplicado en armadura balística, cuchillas de helicópteros, refuerzo, artículos deportivos, etc. El kevlar posee buenas propiedades mecánicas y una alta temperatura de transición vítrea (cerca de 360°) [19], [21].

La fibra de kevlar se clasifica en dos tipos: el primero denominado Meta-aramid, se utiliza en la fabricación de telas retardantes de ignición como los uniformes de bomberos y pilotos de competición [19]. Y el segundo llamado Para-aramusually, empleado comúnmente para el refuerzo de materiales compuestos aplicados en ingeniería y aplicaciones donde se requiere alta tensión [19].

#### 1.1.4 Interface matriz-refuerzo

La interface se entiende como la unión de la superficie de la matriz con el refuerzo, también se define como la región donde la concentración del elemento, la estructura, el módulo de elasticidad, densidad, coeficiente de expansión térmica y los parámetros del material, cambian de una superficie a la otra [22], [23].

La interface juega un papel importante, ya que ocupa un área extensa (3000 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>), por tanto, el comportamiento y las propiedades de un compuesto depende de esta unión (junto al refuerzo y el tipo de matriz) [22], [23].

Las características más importantes de la interface son las siguientes:

- **Humectabilidad:** Se entiende como la habilidad que tiene un líquido, en este caso la matriz, para propagarse en una cara sólida (la fibra). Usualmente se utiliza el ángulo de contacto para la caracterización de la misma, el cual se mide de la tangente de las tres interfaces (Sólido/líquido, Líquido/vapor, Sólido/vapor) en una gota de la resina sobre la superficie de la fibra. Pequeños ángulos de contacto indican que hay una buena humectabilidad [22], [23].



- **Tipo de unión:** Existen diversos tipos de unión entre la matriz y la fibra. Los mismos se clasifican en unión mecánica (entrelazamiento entre dos superficies, agarre de la fibra por la matriz), unión física (fuerzas débiles, secundarias o de van der Waals) y unión química (enlace formado entre grupos químicos de la superficie del refuerzo y grupos compatibles de la matriz) [22], [23].

## **1.2 Materiales biocompuestos con fibras naturales**

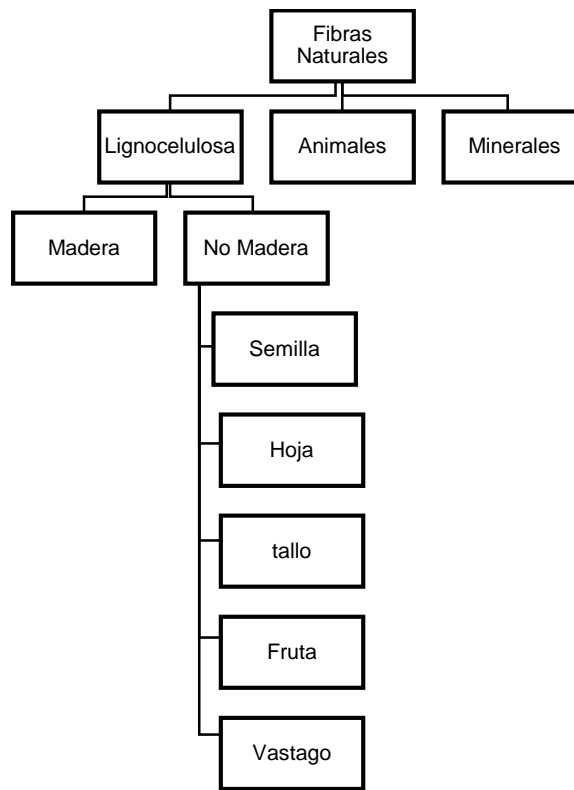
En este apartado se tratan los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales, exponiéndose las características de sus componentes (Matriz y fibra). Así mismo, se mencionan las técnicas de manufactura empleadas en su fabricación. Por último, se hace una descripción de los antecedentes respecto a la caracterización de sus propiedades morfológicas, mecánicas, térmicas y dinámicas.

### **1.2.1 Fibras naturales**

Un material biocompuesto consiste en una mezcla entre materiales con características biodegradables como las fibras naturales y una matriz derivada del petróleo o de un polímero biodegradable [24].

Las fibras naturales se pueden dividir en tres grandes grupos: según su origen se encuentran las lignocelulosas (plantas), animales y minerales. A su vez, las lignocelulosas se clasifican en fibras de madera y de no maderas. Dentro de las no maderas se encuentran las fibras de semilla, hoja, fruta, tallo y vástago [25], [26].

La figura 2 muestra la clasificación mencionada



**Figura 2.** Clasificación de la fibra de fique [25], [26]

El uso de fibras naturales, en refuerzos de materiales compuestos brinda ventajas sobre las sintéticas, en propiedades como: la densidad, costos bajos, disponibilidad, renovación, resistencia a la corrosión y biodegradabilidad [4]. Sin embargo, presentan la dificultad de compatibilidad con la matriz debido a sus características hidrofílicas y a la hidrofobicidad de la matriz, lo que afecta directamente las propiedades mecánicas del compuesto [27]. Así mismo, la temperatura de degradación promedio de las fibras naturales es de aproximadamente 200°C, lo cual no permite usarse con matrices que tienen altas temperaturas de curado o en el caso de polímeros termoplásticos con elevadas temperaturas de fusión [28].

Las fibras naturales se componen principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina con una pequeña cantidad de extractivos [29].

### 1.2.2 Fibras naturales convencionales

A continuación, se relacionan algunas de las fibras naturales convencionales más utilizadas en la fabricación de biocompuestos

- **Fibra de cáñamo:** Hace parte de las fibras de vástago, proveniente de la planta conocida como *cannabis sativa*, la mayor producción se encuentra en Europa, Canadá y China. El uso principal es para recreación y medicinas. La planta crece aproximadamente 4.5 metros y la fibra presenta una longitud de 5 a 55 mm con un diámetro promedio de 10 a 51  $\mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 3 se observa la planta de cáñamo.



**Figura 3.** Planta de cáñamo [31]

- **Fibra de banana:** Hace parte de la clasificación de fibras de vástago, proveniente del árbol llamado *Musa* el cual tiene una altura de 2 a 6 m. La densidad típica de las fibras es de 1350  $\text{kg/m}^3$  con un módulo de elasticidad de 27-32 GPa, un esfuerzo de tensión de 529-914 MPa y una absorción de 10-11% [30], [31]. En la figura 4 se observa la planta de banana.



**Figura 4.** Planta de banana [31]

- **Fibra de kenaf:** La fibra se extrae del árbol conocido como Hibiscus cannabinus el cual es nativo del oeste de África. Esta fibra presenta esfuerzos máximos de tensión, en promedio de 11.9 GPa, un módulo de elasticidad de 60 GPa y una densidad aproximada de  $0.15 \text{ g/m}^3$ , una longitud promedio de 2 a 6 mm y un diámetro de 14 a  $33 \mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 5 se observa la planta de kenaf.



**Figura 5.** Planta de kenaf [31]

- **Fibra de Sisal:** La fibra proviene de la planta Agave Silane la cual tiene una altura de 1.5 a 2 m teniendo su origen en México. La fibra se obtiene de la hoja de la planta presentando longitudes de 1 a 8 mm con diámetros de 8 a  $41 \mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 6 se observa la planta de sisal.



**Figura 6.** Planta de sisal [31]

- **Fibra de algodón:** La fibra hace parte de las fibras de semilla, se obtiene de la planta *Gossypium* la cual es nativa de regiones tropicales alrededor del mundo siendo los mayores productores China, Estados Unidos, Rusia e India. La producción de algodón es muy eficiente debido a que solo el 10% en peso se pierde de la semilla. La fibra presenta longitudes de 15 a 30 mm con diámetros de 12 a 38  $\mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 7 se observa la planta de algodón.



**Figura 7.** Planta de algodón [31]

- **Fibra de caña de azúcar:** La fibra se extrae de la planta *Saccharum Officinarum* produciéndose en regiones tropicales (Brasil es el mayor productor). Normalmente la fibra se obtiene del bagazo derivado de la obtención del jugo. La fibra de bagazo de caña presenta longitudes de 0.8 a 2.8 mm con diámetros de 10 a 34  $\mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 8 se observa la planta de caña de azúcar.



**Figura 8.** Planta caña de azúcar [31]

- **Fibras de piña:** La fibra proviene de la planta *Ananas comosus* la cual tiene su origen del Brasil con una altura promedio de 1 a 1.5 m. La fibra se obtiene normalmente de forma mecánica presentando una longitud cerca de 61.7 mm con diámetros cercanos a los 20  $\mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 9 se observa la planta de piña.



**Figura 9.** Planta de piña [31]

- **Fibra de la fruta de la palma de aceite:** La fibra es recolectada de la fruta del árbol *Elaeis Guineensis* originario del oeste de África y de América, la planta puede crecer entre 3 y 5 m. La fruta se da en racimo los cuales oscilan en peso de 10 kg a 40 kg. La longitud de las fibras es en promedio de 4 mm con diámetros cercanos a los 30  $\mu\text{m}$  [30], [31]. En la figura 10 se observa la planta palma de aceite.





**Figura 10.** Palma de aceite [31]

### **1.2.3 Fibra natural de fique**

La fibra de fique hace parte de las fibras de origen de hoja. La planta de fique con nombre científico *Furcraea* spp (Ver figura 11) tiene una altura promedio de entre 2 y 7 m, rodeada de hojas largas de 1 a 3 m y hojas cortas de 10 a 20 cm, las mismas tienen una distribución radial siendo carnosas y puntiagudas [32].



**Figura 11.** Planta de fique [32]

Su promedio de vida varia de 10 a 20 años; iniciando su producción de los 3 a los 6 años en adelante. Cuenta con una flor de color blanco verdoso, la cual solo se presenta una vez durante toda su existencia [32].

En la tabla 4, se relaciona los componentes de la hoja de fique y su porcentaje de utilidad, observándose que solo el 4% de la hoja puede usarse como fibra.

**Tabla 4:** Componente de la hoja de fique [32]

<b>Componente</b>	<b>% De la hoja</b>	<b>% Útil</b>
Fibra	5	4
Jugo	70	40
Estopa	8	3
Bagazo	17	10

A su vez, la fibra de fique está compuesta por otros tres componentes los cuales son: celulosa, hemicelulosa y lignina (En la tabla 5 se relaciona el porcentaje de cada componente en la fibra) siendo la celulosa el principal que le ofrece la estabilidad y la resistencia a las paredes de las células de la fibra.

**Tabla 5:** Componente de la fibra fique [33]

<b>Componente de la fibra</b>	<b>%</b>
Hemicelulosa	17.5
Celulosa	63
Lignina	14.5

Las empresas comercializadoras de la fibra de fique más representativas en Colombia se mencionan en la tabla 6.

**Tabla 6:** Empresas comercializadora fibra fique [32]

<b>Nombre empresa</b>	<b>Región</b>
Compañía de Empaques S. A	Antioquia
Coohilados del Fonce Ltda	Santander
Empaques del Cauca S. A	Popayán
Ecofibras Ltda	Santander

#### **1.2.4 Matrices en materiales biocompuestos**

Existen diversos materiales que son utilizados como matrices en la manufactura de materiales compuestos, siendo los más representativos los metales, cerámicos y los polímeros. Estos últimos son los más mencionados en la literatura para la



fabricación de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales; es por esta razón que en esta sección solo se hablará de ellos [34]–[36].

Las matrices poliméricas se pueden dividir en tres grupos los cuales son: termoplásticas, termoestables y bio-bases.

A continuación, se menciona las características de cada una de ellas.

- **Termoestables:** La principal característica que tiene es tipo de matriz, es que no pueden volver a su estado original después de ser calentada, las más representativas de este grupo son las epoxy, la fenólicas, y las poliéster insaturado [34]–[36].
- **Termoplásticas:** Es un polímero que se puede ablandar en el procesamiento con calor, pero vuelve al estado sólido, una vez ha completado su ciclo de temperatura. Entre las más representativas de este grupo son el polipropileno (PP), polietileno (PE) poliestireno (PS), y cloruro de polivinilo (PVC) [34]–[36].
- **Bio-bases:** Son polímeros de base biológica, es decir, son biodegradables pudiendo ser termoestables o termoplásticos. Las matrices más representativas de este grupo son: el almidón (un polímero de origen natural), ácido poliláctico (PLA), ácido láctico, el monómero (obtenido de la fermentación de azúcar), polihidroxi alcanato (PHA, producido de aceites vegetales), policaprolactona (PCL), polibutileno (PBS) y polímeros del aceite de soya [34], [35], [37].

### 1.3 Técnicas de manufactura de materiales biocompuestos

A continuación, se relacionan las diferentes técnicas de manufactura que se encuentra en la literatura para la fabricación de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales:

- **Pultrusión:** Proceso donde el producto se obtiene tirando el material a través de una matriz. Las fibras naturales continuas se pasan a través de un baño de resina de un polímero termoestable como el epoxy o el poliéster y una vez impregnadas son jaladas e introducidas a una matriz, en la cual se le da la forma (comúnmente circular o rectangular) donde se realiza el curado. Posteriormente se corta a la longitud requerida [38], [39].
- **Filament Winding:** Proceso donde se manufacturan productos con forma circular, las fibras naturales se pasan a través de un baño de resina termoestable, una vez impregnadas son enrolladas alrededor de un mandril giratorio el cual se desplaza, adicionalmente en dirección axial [38], [39].

- **Hand Lay-Up:** Es un proceso de moldeo abierto el cual requiere de un operador de alta habilidad para la fabricación del material. Inicialmente se aplica un desmoldante que facilita el desprendimiento del material compuesto del molde una vez terminado el curado. Seguido se aplica una capa rica de resina termoestable la cual evitará que las fibras se desplacen por el molde. Posteriormente se coloca una capa del refuerzo (Fibra natural) y se le adiciona resina presionándose comúnmente con un rodillo, este proceso se repite con el número de capas requerido para obtener el espesor deseado. Los materiales compuestos se curan a temperatura ambiente o en horno según las especificaciones de la resina [38], [39].
- **Moldeo por transferencia de resina (RTM):** En este proceso inicialmente se cortan las fibras a una medida establecida, las mismas se colocan dentro de un molde cerrado, posteriormente se les transfiere una resina termoestable ya sea por presión o vacío. Las resinas que se utilizan normalmente en este proceso son poliéster, epoxy, éster de vinilo, y fenólica [38], [39].
- **Infusión en vacío:** Es un proceso de moldeo similar al Hand lay-up, a diferencia este proceso se realiza con presión en una bolsa de vacío la cual tiene como objetivo proporcionar compactación y consolidación de las capas dentro del laminado mejorando la adhesión entre los componentes. Inicialmente se aplica un desmoldante al molde y posteriormente se apilan las fibras naturales, las mismas se cubren con diversas capas que sirven con herramientas en el proceso, como la capa de liberación, la capa de purga de aire, capa de película de bloqueo y la capa de respiro. Por último, se envuelven las láminas con una bolsa de vacío y por medio de una bomba de presión negativa se realiza la transferencia de la resina termoestable y la compactación. Finalmente se termina con el proceso de curado ya sea a temperatura ambiente, horno o autoclave [38], [39].
- **Moldeo por compresión:** Este proceso normalmente se utiliza cuando se requieren altos volúmenes de producción y puede ser clasificado para trabajar en frío o en caliente. Inicialmente, se debe contar con el material compuesto en pellets obtenido de un proceso previo mediante una extrusora donde se homogeniza la matriz termoplástica con la fibra natural. En el moldeo por compresión en frío se aplica solo presión y el curado se realiza a temperatura ambiente mientras en caliente se aplica presión y temperatura, esta última permite realizar adicionalmente el proceso de curado [38], [39].
- **Moldeo por inyección:** En este proceso se requiere el uso de fibras cortas en la forma de partículas o en polvo y una matriz termoplástica. El polímero y las fibras son alimentados respectivamente, a través de un embudo en un cilindro de compresión precalentado con un tornillo, el calor del cilindro funde los pellets y los mezcla con las fibras obteniéndose un líquido viscoso. Finalmente, ese

líquido se inyecta sobre el molde el cual tiene la forma del producto final [38], [39].

#### **1.4 Antecedentes de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales**

Para conocer las propiedades de los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales, las cuales se ven principalmente afectadas por el tipo de matriz, el contenido de la fibra, y la interacción de matriz/fibra, se han ejecutado diversos tipos de caracterizaciones. A continuación, se mencionan las más representativas:

##### **1.4.1 Propiedades estructurales**

Se utiliza la microscopía electrónica de barrido con el objetivo de conocer las propiedades estructurales de los materiales biocompuestos. Esta técnica permite ver la adherencia entre la matriz y la fibra después de su proceso de fabricación o de haber sufrido alguna falla [40].

Rana et al [41] utilizaron este análisis para investigar la morfología de la superficie de la fibra y la interface de un biocompuesto jute/polipropileno. Así mismo, Khoshnava et al [42] lo aplicaron a un compuesto híbrido de kenaf y fruta de la palma de aceite con polihidroxibutirato, encontrando una adherencia aceptable entre el refuerzo y la matriz.

Variados estudios aplican la microscopía electrónica de barrido para observar la mejora que se obtiene en la adhesión al aplicar tratamientos químicos [43]–[46].

##### **1.4.2 Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los biocompuestos reforzados con fibras naturales se obtienen normalmente por pruebas de tracción, flexión e impacto.

- **Tensión:** Para obtener el esfuerzo a tensión y el módulo de Young se aplica una tensión axial en una máquina universal de ensayos mecánicos. Para los biocompuestos el esfuerzo crece cuando se aumenta el contenido de fibra esto debido a que hay una rigidez del material [47].
- **Flexión:** Con este ensayo se obtiene el esfuerzo y el módulo de flexión, normalmente estas propiedades aumenta cuando se aumenta la cantidad de fibra dentro del mismo [48].

- **Impacto:** El esfuerzo al impacto es la energía requerida para propagar una grieta o la capacidad de un biomaterial para resistir la fractura. Usualmente el esfuerzo aumenta con mayor cantidad de fibras dentro del material [49].

En la tabla 7 se citan algunos trabajos de investigación junto a las propiedades mecánicas obtenidas.

**Tabla 7.** Propiedades mecánicas biocompuestos

Fibra	Matriz	Esfuerzo tensión (MPa)	Módulo elasticidad (GPa)	Esfuerzo de flexión (MPa)	Módulo de tensión (GPa)	Esfuerzo impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Referencia
Hemp	PLA	83	11	143	7	9	[50]
Kenaf	PLA	82	8	126	7	14	[51]
Hemp	PLA	77	10	101	7	19	[52]
Kenaf	PHB	70	6	101	7	10	[51]
Jute	UP	50	8	103	7	11	[53]
Hemp	PLA	62	7	124	9	25	[54]
Jute	PP	74	11	112	12	195	[55]
Kraft	PP	52	3	90	4	235	[55]
Hemp	PP	52	4	86	4	210	[55]
Kenaf	PP	46	5	58	4	39	[56]
Flax	PP	52	5	60	5	18	[57]
Bagasse	PP	17–22	1.2–1.4	21–34	0.8–1.6	3.3–6.2	[58]

### 1.4.3 Propiedades térmicas

El análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) son las dos técnicas principales para obtener las propiedades térmicas de los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales [40].

Fernandes et al [59] aplicaron estos dos ensayos a biocompuesto de fibra de corcho y almidón con diferentes matrices (poly L-lactic acid PLLA, polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate PHBV, poly-ε-caprolactone PCL y starch-poly-ε-caprolactone SPCL). Las propiedades térmicas obtenidas del TGA mostraron que el corcho presenta mayor estabilidad térmica que el almidón. Los análisis de DSC revelaron un efecto opuesto con respecto al grado de cristalinidad de ambos rellenos, el almidón contribuyó a un aumento de la fase amorfa que conduce a una mayor biodegradación.

Por otra parte Saba et al [60] estudiaron el efecto en la estabilidad térmica producidas por las nanofibras de celulosa (CNF) en una matriz epoxy, mediante

TGA y DCS. Se concluye que la incorporación del refuerzo (Hasta un 0,75% en peso) mejoró la estabilidad térmica.

Así mismo, Dorez et al [61] investigaron el comportamiento térmico, al introducirle polifosfato de amonio (APP), como agente ignífugo, a compuestos de celulosa, cáñamo, lino, caña de azúcar y bambú con matriz succinato de polibutileno (PBS), mediante la técnica de análisis termo-gravimétrico de TGA. Del estudio se concluyó que la estabilidad térmica de la fibra celulosa pura fue mejor que la de las fibras lignocelulósicas

Los estudios en general revelan que el uso de fibras naturales como material de refuerzo en compuestos, aumenta la estabilidad térmica de los mismos, debido a la creación de una barrera más alta para la formación de gases de escape de los polímeros [62]–[64].

#### **1.4.4 Propiedades dinámicas**

El ensayo análisis dinámico mecánico (DMA) es el usado frecuentemente para evaluar las propiedades dinámicas de los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales [40].

Rosnita et al [65] aplicaron análisis dinámico mecánico DMA a biocompuestos de kenaf/ ácido poliláctico (PLA) comparándose el módulo de almacenamiento ( $E'$ ), el módulo de pérdida ( $E''$ ) y la tan delta contra el material de la matriz PLA. Como resultado de la investigación se obtuvo que el módulo de almacenamiento del biocompuesto es dos veces más alto que el del PLA comercial dentro de un rango de temperatura elevado (por encima de  $80^\circ\text{C}$ ). Así mismo, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) generada a partir de las curvas del módulo de pérdida, muestran que el pico se desplazó a una temperatura más alta en la medida que se incrementa el porcentaje de carga de celulosa.

Lopez-Machado et al [66] aplicaron el análisis DMA, a compuestos reforzados con fibras orgánicas cortas. Los mismos, resaltan que las fibras dieron lugar a un aumento sensible de la rigidez del biocompuesto (módulo de almacenamiento), mientras que, disminuyó ligeramente el factor de amortiguamiento y la temperatura de transición vítrea

John et al [67] reforzaron caucho natural con fibras de sisal y fibras de la palma de aceite y aplicaron un análisis dinámico mecánico. Se obtuvo que el módulo de almacenamiento ( $E'$ ) y el módulo de pérdida ( $E''$ ) aumentó, al adicionar una mayor fracción en peso de la fibra. Esto se debió a la mayor rigidez impartida por las fibras naturales, mientras que se observó que el tan delta disminuía.

Las investigaciones indican que el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida incrementan, en la medida que se aumenta la cantidad de fibra natural,

mientras que el factor de pérdida puede aumentar o disminuir según el tipo de fibra y el tipo de manufactura del biocompuesto [68].

## 1.5 Análisis modal en materiales compuestos

En este apartado se realiza una introducción a la teoría básica de las vibraciones en sistemas de un grado de libertad. Complementariamente se realiza una exposición de las características del ensayo de análisis modal. Finalmente se informan los antecedentes de esta técnica aplicada a materiales compuestos.

### 1.5.1 Teoría básica de vibraciones

La vibración es un movimiento que se repite, definiéndose técnicamente como la transferencia entre la energía potencial y cinética de un sistema, siendo la primera producida normalmente por una masa mientras la segunda por un resorte [69]–[71].

La vibración armónica de un sistema es el tipo de vibración fundamental; la cual consiste en una vibración puramente sinusoidal a través de un número infinito de periodos [69]–[71]. El desplazamiento de esta vibración se describe como se relaciona en la ecuación 1.

$$x(t) = A \sin wt \quad (1)$$

Donde A es la constante de la amplitud de la vibración, w la velocidad angular y t el tiempo. Derivando la ecuación se puede obtener en términos de la velocidad y la aceleración como se relacionan en las ecuaciones 2 y 3 [69]–[71].

$$\dot{x}(t) = A w \cos wt \quad (2)$$

$$\ddot{x}(t) = -A w^2 \sin wt \quad (3)$$

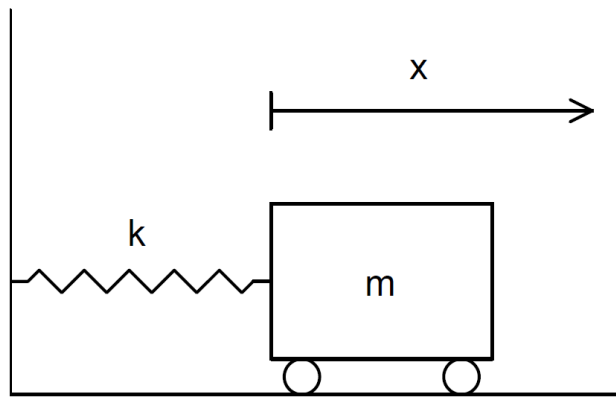
Como se puede observar en las ecuaciones existe un desfase de 90° entre desplazamiento-velocidad y velocidad-aceleración.

Para el estudio de los sistemas vibratorios se requiere conocer la cantidad de grados de libertad del mismo. Entendiéndose los grados de libertad como el número de coordenadas independientes que se requiere para describir el movimiento de todas las partes del sistema [69]–[71].

Adicionalmente los sistemas pueden estar amortiguados o no amortiguados y presentar la aplicación de una fuerza externa [69]–[71].

- **Sistema de un grado de libertad no amortiguado y vibración libre**

En este tipo de sistema de un grado de libertad tanto el coeficiente de amortiguación como la fuerza externa es cero [69]–[71], en la figura 12 se observa un ejemplo del mismo.



**Figura 12.** Sistema de un grado de libertad no amortiguado y vibración libre [71].

Este sistema se describe matemáticamente según la segunda ley de Newton [69]–[71] como se presenta en las ecuaciones 4 y 5.

$$\sum F_x = m\ddot{x} \quad (4)$$

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad (5)$$

Donde  $m$  es la masa,  $k$  la constante elástica del resorte,  $\ddot{x}(t)$  la aceleración y  $x(t)$  el desplazamiento.

La raíz cuadrada entre la relación de rigidez y de la masa se define como la frecuencia natural del sistema [69]–[71], como se expresa en la ecuación 6.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

La frecuencia natural de un cuerpo ( $\omega_0$ ) es la frecuencia a la cual un cuerpo le gusta vibrar. La frecuencia depende de la relación de estos parámetros por lo que

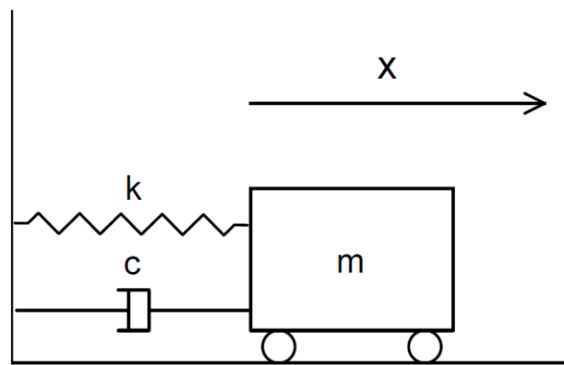
podemos tener cuerpos con distintas masas y rigidez, pero con la misma frecuencia natural [69]–[71].

Como el sistema de la figura 12 no tiene entrada o disipación de energía la cantidad de energía en un instante será igual a una constante [69]–[71]. Realizando el balance de energías se obtiene la ecuación 7.

$$\frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \frac{1}{2} kx^2 = const \quad (7)$$

- **Sistema de un grado de libertad amortiguado con vibración libre**

En este sistema de un grado de libertad fuerza externa es cero pero se cuenta con amortiguamiento [69]–[71]. En la figura 13 se muestra un ejemplo.



**Figura 13.** Sistema de un grado de libertad, amortiguado y vibración libre [71].

El sistema se describe matemáticamente como se observa en la ecuación 8.

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) - c\dot{x}(t) \quad (8)$$

Donde  $c$  es el coeficiente de amortiguamiento.

Otro parámetro importante en este tipo de sistema es la relación de amortiguamiento [69][70][71] el cual se describe como se define en la ecuación 9.

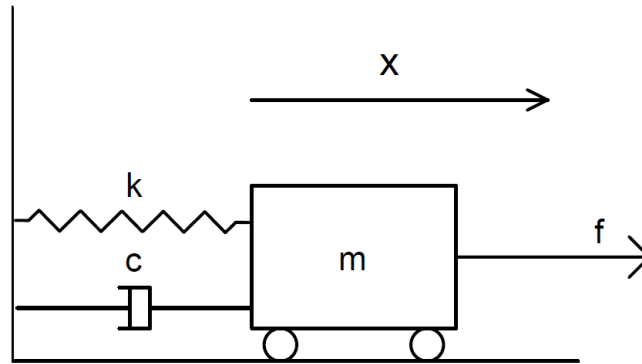
$$\xi = \frac{c}{2m\omega_0} \quad (9)$$



Este último permite clasificar si el sistema es sobre amortiguado  $\xi > 1$ , críticamente amortiguado  $\xi = 1$  y subamortiguado  $\xi < 1$  [69]–[71].

- **Sistema de un grado de libertad amortiguado y forzado**

En la figura 14, se observa un sistema de un grado de libertad amortiguado y forzado.



**Figura 14.** Sistema de un grado de libertad forzado [71].

La ecuación de movimiento de un sistema armónico forzado con amortiguamiento se describe en la ecuación 10 [69]–[71].

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \sin wt \quad (10)$$

Obteniéndola en términos de la frecuencia natural y la relación de amortiguamiento se expresaría como se menciona en la ecuación 11 [69]–[71].

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \frac{F_0}{m} \sin wt \quad (11)$$

### 1.5.2 Teoría análisis modal

El análisis modal es el proceso de determinar las características dinámicas de un sistema en término de la frecuencia natural, el amortiguamiento y las formas modales [69].

El mismo se basa en que la vibración total de un cuerpo puede ser expresado como la combinación de vibraciones armónicas las cuales son llamados modos de

vibración. Los modos de vibración son determinados por las propiedades de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema [69].

Este análisis puede ser desarrollado de manera matemática, (Modernamente se utiliza método de elementos finitos) o experimental (Ya sea con martillo impulsional o shaker).

El objetivo es describir el sistema dinámico como la relación de salida versus entrada conocida como la medición de la respuesta en frecuencia (FRF) [69]. Normalmente se obtiene de la relación entre la aceleración, velocidad o desplazamiento (Salida) sobre la fuerza de excitación (Entrada) quedando descrito como se relaciona en la ecuación 12 en término de la aceleración.

$$FRF \text{ Acelerancia} = \frac{\ddot{x}}{F_0} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (12)$$

Donde  $j$  es la unidad imaginaria

Normalmente en aplicaciones de maquinaria el ruido y vibración están relacionados con fenómenos de resonancia la cual se entiende cuando un cuerpo está vibrando en la frecuencia natural, donde las fuerzas operativas excitan uno o más de los modos de vibración es por esta razón que este análisis es tan importante [69].

## 1.6 Antecedentes de análisis modal en materiales compuestos

Existe poca evidencia de análisis modal aplicado a materiales compuestos, en especial en materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales con matrices poliméricas, los cuales generalmente presentan mayor amortiguación que las estructuras metálicas convencionales debido al comportamiento viscoelástico de la resina y la interacción matriz-fibra [72], [73].

Sobre los materiales compuestos en general Chandra et al [74] informa que el amortiguamiento en los materiales compuestos depende de las siguientes características:

- Naturaleza viscoelástica de los materiales de la matriz y de la fibra, sin embargo, reporta que la gran contribución es por la matriz.
- Amortiguamiento debido a la interface.
- Amortiguamiento debido a los daños: fricción de las capas y grietas que se tengan en la matriz.

- Amortiguación viscoplástica: en grandes amplitudes de vibración, se evidencia que no hay una linealidad en el amortiguamiento debido a altos esfuerzos y concentradores que existen en la región entre las fibras.
- Amortiguamiento termoplástico: el cual varía el amortiguamiento dependiendo de la temperatura del material, este puede aumentar dependiendo del número de ciclos al cual se someta el compuesto.

Algunos de los trabajos y sus autores, donde se aplica análisis modal a compuestos reforzados con fibras industriales se mencionan a continuación:

Cakir et al [75] aplicaron un análisis modal experimental y por elementos finitos a arcos de ladrillo reforzados con compuestos poliméricos preimpregnados. Los resultados exponen que los compuestos preimpregnados mejoraron las frecuencias naturales y los coeficientes de amortiguamiento de los arcos de ladrillo.

Thinh et al [76] ejecutaron análisis modal experimental y por elementos finitos a materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz polimérica y un refuerzo en U o en T. como resultado reportan una mayor frecuencia natural en el compuesto con refuerzo en U que en T y que las formas modales obtenidas con los distintos tipos de refuerzos son diferentes.

Ioan et al [77] aplicaron análisis modal experimental a cuatro diferentes compuestos de fibra de vidrio diferenciándolos por número de capas, grosor y presión utilizados en su manufactura. Los resultados condujeron a varias conclusiones, que incluyen que mediante el aumento del espesor disminuye la frecuencia natural, así mismo, los coeficientes de amortiguamiento de los distintos materiales reportaron valores similares independientemente del número de capas. Por último, mencionan que el proceso de fabricación afecta el comportamiento dinámico del material.

Un análisis modal experimental a un compuesto fibras de carbón/epoxy utilizando vibrómetro láser fue llevado a cabo por Mota et al [78]. Los resultados de las frecuencias naturales obtenidas fueron comparados con un desarrollo de método numérico reportando errores hasta de un 9%.

Zhang et al [79] utilizaron método de elementos finitos para predecir el amortiguamiento de compuestos laminados con capas visco-elásticas utilizando el software ANSYS 7.0. Los mismos, obtuvieron que el amortiguamiento depende de la manera como se ubica las capas en la fabricación del compuesto y del modo de vibración (Flexión o torsión). Por otra parte, concluyeron que a mayor cantidad de capas se obtiene mayor amortiguamiento en los modos de flexión.

Lin et al [80] desarrollaron un programa para aplicar análisis modal por elementos finitos a compuestos de fibra de vidrio y de carbono comparando sus resultados

contra un análisis modal experimental. El estudio reporta que la precisión de los métodos dependía de la uniformidad del material.

Crawley et al [81] obtuvieron las frecuencias naturales y las formas modales de un compuesto de grafito con una matriz epoxy de manera experimental y las comparó con un modelo de elementos finitos. Se presentaron errores hasta de un 17% justificándose en la diferencia entre los módulos de flexión dinámica y módulos estáticos en el plano.

Oliveira et al [82] realizaron un estudio modal experimental en un material compuesto de fibras de carbón y epoxy comprobando la diferencia que se obtenía en utilizar un sensor piezoeléctrico contra un vibrómetro láser como elemento de medición. Resultado de la investigación se obtiene que los resultados son similares con los dos equipos.

En la literatura se encontraron los siguientes trabajos donde se aplicaron análisis modales experimentales y por elementos finitos a materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales.

Rajesh et al [83] aplicaron un análisis modal experimental a compuestos de banana con una y dos capas. Se concluye que el compuesto de doble capa tiene mayores frecuencias naturales ya que la rigidez de la fibra mejora las propiedades inherentes del biocompuesto material.

Un análisis modal experimental en compuesto de fibra corta de sisal/ poliéster y fibra de banano/poliéster fue llevado a cabo por Kumar et al [15]. Los autores encontraron que un aumento en el contenido de fibra aumenta la frecuencia natural y el amortiguamiento.

Akadash et al [84] realizaron estudio de análisis modal experimental sobre un biocompuesto híbrido entre jute y sisal con poliéster comparándolo contra uno solo de sisal / poliéster. Se buscó comparar la frecuencia natural, el factor de amortiguación y las formas modales. Se obtuvo un mejor comportamiento dinámico en el biocompuesto híbrido ya que presentó mayor rigidez.

Por otra parte Sushmita et al [85] compararon la respuesta vibratoria de manera experimental de dos compuestos sándwich híbridos, uno arreglo vidrio-jute-vidrio (GJG) y otro jute-vidrio-jute (JGJ). Los autores obtuvieron que el compuesto JGJ tenía una frecuencia natural ligeramente mayor para los primeros 3 modos, mientras que GJG poseía un amortiguamiento mayor.

Savin et al [86] realizaron análisis modal experimental a biocompuestos con diferentes tipos de fibras lignocelulosas utilizadas en arquitecturas ambientales como madera maciza y tablero de fibra, encontrando que se tuvo un alto

amortiguamiento recomendando su uso en la industria del automóvil, paneles insonorizantes, arquitectura de salas de conciertos y aislamientos acústicos. Una conclusión similar de la aplicación de este tipo de materiales la obtuvo Genc et al [87] en biocompuesto de luffa.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 General

Caracterizar dinámica y mecánicamente materiales biocompuestos reforzados con fibras de fique manufacturados por la técnica infusión en vacío evaluando el impacto en los parámetros modales debido al número de capas de la fibra natural utilizados en la fabricación.

### 2.2 Específicos

- Fabricar materiales biocompuestos reforzados con fibra de fique con la técnica de manufactura infusión en vacío con diferentes arreglos de números de capas de la fibra natural de fique y el tipo de matriz aplicada.
- Obtener los parámetros de las propiedades mecánicas a tracción de los biocompuestos, los cuales permitirán alimentar el modelo numérico por medio de elementos finitos para la caracterización dinámica.
- Caracterizar dinámicamente, por medio de análisis modal, los materiales biocompuestos reforzados con fibras de fique usando análisis numérico con software de elementos finitos y verificando el modelo con análisis modal experimental
- Evaluar la adhesión del biocompuesto entre la matriz de resina termoestable y la fibra natural de fique por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM).

### **3. FABRICACIÓN DE MATERIALES BIOCMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE**

En este capítulo se presenta la fabricación de materiales biocompuestos reforzados con fibras de fique mediante la técnica de manufactura infusión en vacío utilizando matrices termoestables convencionales de fuentes petroquímicas y biobases de origen de fuentes renovables. Las fibras naturales se utilizaron en dos configuraciones: en forma tejida y en forma aleatoria o comúnmente llamada Mat.

Se elaboraron tres tipos de materiales biocompuestos reforzados con la fibra natural de fique. El primero consiste en un arreglo de matriz termoestable poliéster insaturado y refuerzo de fique en configuración aleatoria. En el segundo, se mezcló resina bioepoxy y refuerzo de fique en configuración aleatoria. Y el tercero, se empleó matriz bioepoxy y refuerzo de fique en configuración de tejido. Adicionalmente, se manufacturó un compuesto reforzado con fibras de vidrio mat y resina bioepoxy, como un material referente para compararlo con el biocompuesto con fique.

#### **3.1 Materiales y métodos**

A continuación, se exponen los materiales y la técnica de manufactura utilizada para la elaboración de las fibras fique y la fabricación de los biocompuestos de fique.

##### **3.1.1 Tratamiento fibras de fique en configuración mat**

Las fibras en configuración aleatoria o mat fueron suministradas por la Fundación San Lorenzo de Barichara, Santander, Colombia. Para la obtención de su aleatoriedad se siguió el proceso que se relaciona en la figura 15:



Impregnación



Tratamiento térmico



Lavado



Macerado



Colado



Formación de la hoja



Prensado inicial



Prensado final



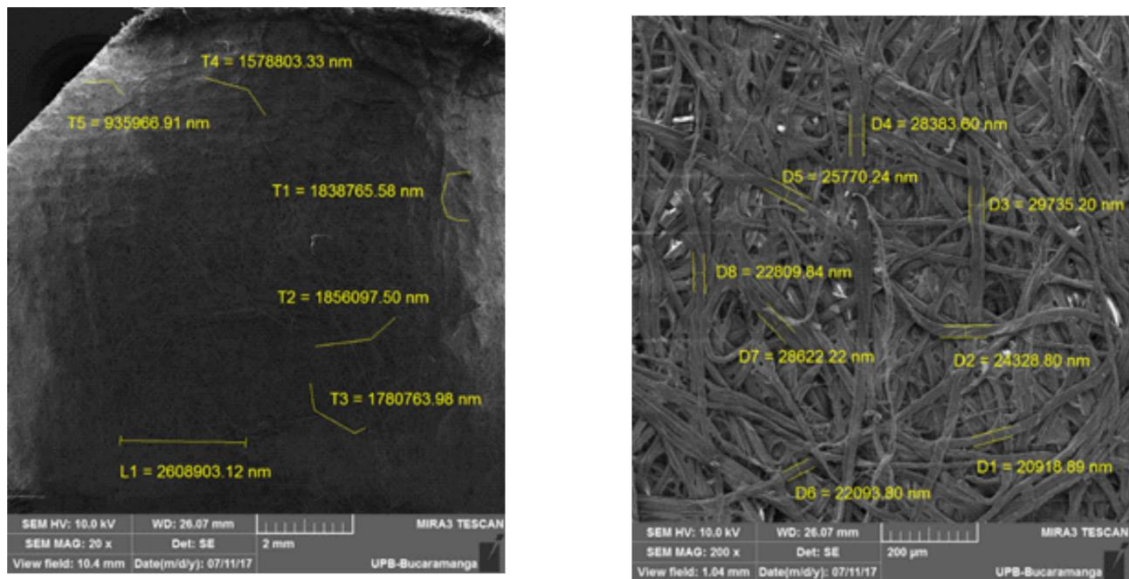
Hoja final

**Figura 15.** Proceso para la obtención figue aleatorio.



Inicialmente la fibra de fique se impregnó con cal (CaO) por aproximadamente 24 horas para suavizarla, posteriormente se calentó por otras 24 horas en recipientes de cobre a una temperatura aproximada de 70°C. Una vez finalizado el proceso térmico, la fibra se dejó enfriar y se lavó con agua para eliminar los residuos de cal, seguidamente se macero golpeándose por aproximadamente 10 minutos con rodillo de madera para obtener fibras cortas. Las fibras obtenidas se remojaron y se colaron para que presentaran longitudes similares. La hoja aleatoria de fique se manufacturó utilizando un tamiz artesanal de madera. Para retirar el agua almacenada aun en las fibras la hoja se prensó en maquinaria manual realizándosele un secado adicional al sol. Por ultimo las fibras se prensaron en maquinaria Industrial por ocho días. Como resultado del proceso se obtuvo hojas de fique en configuración aleatoria de un tamaño de 23.2 x 38.8 cm con un espesor aproximado de 0.3 mm.

Las fibras de fique que componen la hoja en configuración aleatoria poseen una longitud promedio de  $1.76 \pm 0.53$  mm y un diámetro de  $0.0253 \pm 0.0033$  mm como se observa en la figura 16 de microscopía electrónica SEM.



**Figura 16.** Longitud y diámetro de las fibras de fique en configuración aleatoria

### 3.1.2 Tratamiento Fibras de fique en configuración de tejido

Las fibras de fique en configuración de tejido fueron suministradas por la empresa Coohilados del Fonce LTDA. En la figura 17, se observa el proceso de obtención del arreglo de la fibra natural.



**Figura 17.** Proceso para la obtención del tejido de fique

El proceso inicia sumergiéndose la fibra de fique en agua para retirarle la contaminación que presenta como residuo del proceso de obtención (Desfibrado). Posteriormente se aplica el escarmenado donde la fibra se desenreda y se alisa en un peine artesanal. Una vez terminado el escarmenado se realiza la hilatura donde se unen diferentes fibras de fique para obtener un hilo. Por último, se realiza la tejeduría donde la fibra se trenza utilizando un telar manual. Como resultado del proceso se obtuvo fique (Fibras largas) trenzado bidireccional 0/90 no equilibrado 2:1, con un gramaje de 530 g/m<sup>2</sup>.

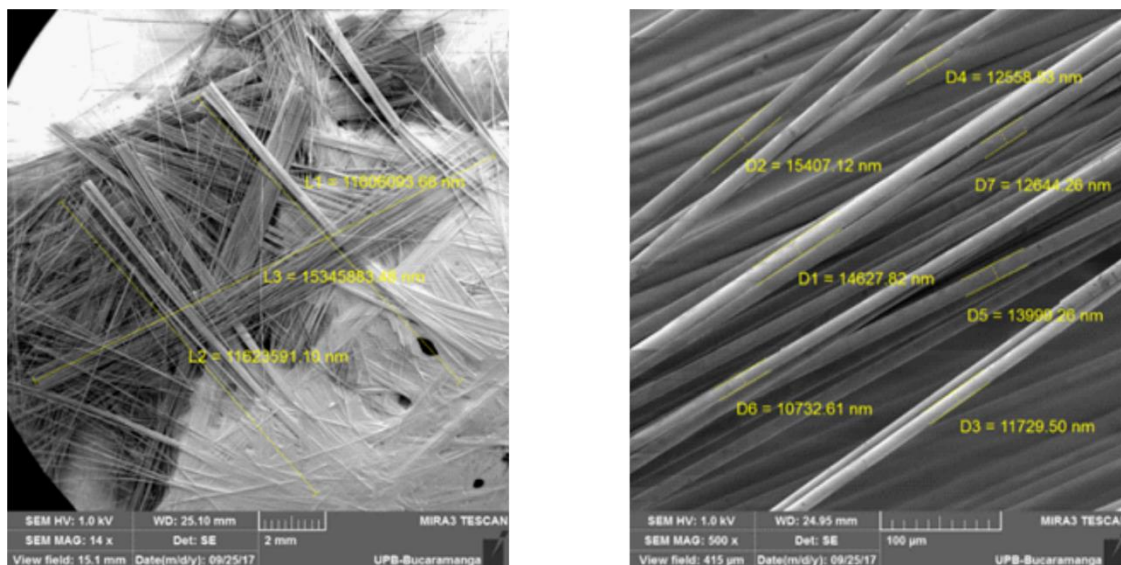
### 3.1.3 Fibra de vidrio mat

Se utilizó fibra de vidrio industrial E-glass en configuración aleatoria, ver figura 18, la misma fue suministrada por la empresa Ingequimica LTDA de Santander Colombia.



**Figura 18.** Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio reportaron una longitud de  $12.85 \pm 2.15$  mm y un diámetro  $0.013 \pm 0.0017$  mm como se observa en la figura 19 de microscopía electrónica SEM.



**Figura 19.** Longitud y diámetro de las fibras de vidrio

### 3.1.4 Resinas empleadas como matrices de los biocompuestos

Se utilizaron dos tipos de matrices para la fabricación de los materiales biocompuestos, una termoestable y una biobase.

- Biobase: la resina biobase utilizada como matriz fue la SuperSap®, resina epoxídica procedente de materiales renovables y suministrada por Entropy Resins. El porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. En la tabla 8 se observan un resumen de las propiedades de la biobase.

**Tabla 8.** Propiedades de la resina SuperSap

Propiedades	Unidades
Módulo de tensión.	4,067 GPa
Esfuerzo de tensión	73,08 MPa
Módulo de flexión	3,623 GPa
Esfuerzo de flexión	124,450 MPa
Elongación	2,5 %
Densidad especifica (77°F)	1.105
Tiempo recomendado de curado	7 días

- Termoestable: la resina termoestable utilizada fue de poliéster suministrada por la empresa INGEQUIMICA LTDA. El porcentaje de resina: catalizador

fue de 100: 2 en peso. En la tabla 9 se adjuntan algunas de las propiedades de la resina de poliéster

**Tabla 9.** Propiedades de la resina poliéster

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>
Módulo de tensión.	3800 MPa
Esfuerzo de tensión	80 MPa
Módulo de flexión	3800 MPa
Esfuerzo de flexión	140 MPa
Dureza barcol	60

Las hojas técnicas de los dos productos se adjuntan en el anexo A.

### **3.2 Fabricación de los biocompuestos**

Los materiales biocompuestos fueron fabricados por medio de la técnica infusión en vacío, la manufactura se ejecutó en dos locaciones y en cada una se tuvieron particularidades propias del proceso.

#### **3.2.1 Biocompuestos con matriz termoestable de poliéster insaturado y fibras de fique**

Los biocompuestos con matriz termoestable con poliéster fueron fabricados en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colombia reforzándose con fibra de fique en configuración aleatoria.

Para la manufactura de los biocompuestos se elaboró un molde en aluminio (Ver figura 20) con tres áreas para la manufactura de las probetas con la geometría establecida en la norma ASTM D3039/D3039M (25 cm de largo por 2.5 cm de ancho por 2.5 mm de grosor).



**Figura 20.** Molde de aluminio

El proceso se inició con la limpieza y preparación del molde, posteriormente se aplicó una capa de cera desmoldante la cual evitaría la adhesión de la probeta final. Adicionalmente se ubicó a los alrededores del molde, cinta de vacío la cual aseguró que no habría fugas, seguidamente se introdujeron las tiras de fibra de fique en configuración aleatoria del tamaño de la probeta, apilándolas una sobre otras realizándose biocompuestos de una hasta cuatro capas. En la figura 21 se observa una imagen del montaje.



**Figura 21.** Proceso de curado

El vacío se realizó mediante la utilización de una bomba de presión negativa conectada a una trampa de succión la cual fue acoplada a un orificio en la parte



inferior del molde, mientras que el extremo superior del molde se conectó al tanque donde se almacenaba la resina para permitir la movilidad.

Se aplicó una presión de 1 bar, lo cual garantizó la eliminación de defectos internos en el material. El curado se realizó a temperatura ambiente durante 24 horas.

### 3.2.2 Biocompuestos con matriz biobase

Los biocompuestos con matriz bioepoxy fueron manufacturados en el Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales de la Universidad del País Vasco, España. Elaborándose materiales con refuerzo de fibra de vidrio en configuración mat, fibra de fique en configuración de tejido y fibra de fique en configuración mat. La infusión en vacío fue la técnica empleada para la fabricación de los laminados con una geometría de 350 mm x 350 mm x 2.5 mm (como se observa en la figura 22) las cuales fueron cortadas posteriormente por medio de chorro de agua para obtener las probetas con las dimensiones expuestas en la norma ASTM D3039/D3039M.



**Figura 22.** Biocompuesto matriz biobase

### 3.3 Resultados del proceso de fabricación de los biocompuestos

A continuación, se relacionan los diferentes materiales biocompuestos reforzados resultados del proceso de fabricación por infusión en vacío:

#### 3.3.1 Biocompuesto de matriz termoestable poliéster y con refuerzo fique en configuración aleatoria.

Del material con matriz termoestable poliéster con refuerzo de fique en configuración aleatoria se obtuvieron cinco probetas para cada uno de los arreglos que se observan en la tabla 10.

**Tabla 10.** Arreglo de materiales biocompuesto poliéster/fique.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
Biocompuesto 1	1 capa de fique (correspondiente a 5.26%) y poliéster	1217.28 ± 1.7
Biocompuesto 2	2 capas de fique (correspondiente al 10.45%) y poliéster	1224.96 ±0.8
Biocompuesto 3	3 capas de fique (correspondiente al 15.36%) y poliéster	1249.92 ±1.9
Biocompuesto 4	4 capas de fique (correspondiente al 20.09%) y poliéster	1274.24 ±2.1

Las probetas obtenidas contaron con la siguiente geometría: 25 ±0.4 cm de largo por 2.5±0.1 cm de ancho por 2.5±0.2 mm de grosor.

En la figura 23 se observa una muestra de las probetas fabricadas.



**Figura 23.** Probetas arreglo de matriz termoestable poliéster y con refuerzo fique en configuración aleatoria



Durante la fabricación de los materiales, se detectaron discontinuidades (Porosidades) en la matriz por la presencia de burbujas como se observa en la figura 24. Como principales causas se explica, el aire atrapado cuando se realizó la mezcla de resina-catalizador y por otro lado, en el momento de la succión de la resina cuando ingresaba al sistema. Para mitigar la situación, el molde se ubicó de manera vertical y la mezcla se introdujo por un orificio inferior en contra de la gravedad, buscando que, por la presión de la bomba, las burbujas fueran desprendidas y absorbidas en la trampa. Así mismo, se utilizó un mayor tiempo para que la matriz impregnara la fibra, esto se reflejó en mayor cantidad de resina almacenada en la trampa al final del proceso.



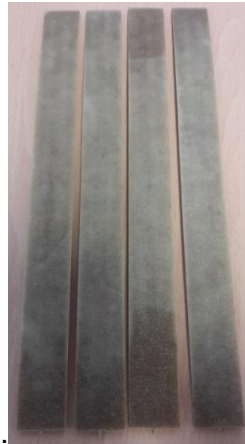
**Figura 24.** Discontinuidades en la fabricación

### **3.3.2 Biocompuesto de matriz bio-epoxy y con refuerzo fique en configuración aleatoria**

Para el material compuesto de matriz bio-epoxy con refuerzo fique en configuración aleatoria se aplicaron cuatro capas de la fibra natural correspondiente al 24.30% en peso del compuesto manufacturándose cinco probetas de acuerdo como lo exige la norma ASTM D3039/D3039M

Las probetas obtenidas se cortaron con la siguiente geometría:  $25 \pm 0.5$  cm de largo por  $2.54 \pm 0.08$  cm de ancho por  $2.6 \pm 0.2$  mm de grosor con una densidad de  $1053.32 \pm 4.2$  kg/m<sup>3</sup>.

En la figura 25 se observa una muestra de las probetas fabricadas.



**Figura 25.** Arreglo bio-epoxy/ fique en configuración aleatoria

### **3.3.3 Biocompuesto de matriz bio-epoxy y fique en configuración de tejido**

Del material compuesto de matriz bio-epoxy con refuerzo fique en configuración de tejido se aplicaron dos capas de la fibra natural correspondiente al 27.57% en peso del compuesto manufacturándose cinco probetas.

Las probetas obtenidas se cortaron con la siguiente geometría:  $25 \pm 0.9$  cm de largo por  $2.55 \pm 0.1$  cm de ancho por  $2.5 \pm 0.1$  mm de grosor con una densidad de  $928.3 \pm 3.8$  kg/m<sup>3</sup>, de acuerdo con la norma ASTM D3039/D3039M.

En la figura 26, se observa una muestra de las probetas fabricadas.



**Figura 26.** Arreglo bio-epoxy/ fique en configuración de tejido

### 3.3.4 Compuesto bio-epoxy y fibras de vidrio

El compuesto de matriz bio-epoxy con refuerzo vidrio contó con cuatro capas de la fibra en configuración aleatoria correspondiente al 24.1% en peso, del mismo se manufacturaron cinco probetas.

Las probetas obtenidas se cortaron con la siguiente geometría:  $25 \pm 0.5$  cm de largo por  $2.52 \pm 0.03$  cm de ancho por  $2.46 \pm 0.2$  mm de grosor con una densidad de  $1387.36 \pm 5.7$  kg/m<sup>3</sup>, conforme a la ASTM D3039/D3039M.

En la figura 27 se observa una muestra de las probetas fabricadas.



**Figura 27.** Arreglo bio-epoxy y fibras de vidrio

### 3.4 Conclusiones y discusión

Se fabricaron, por medio de la técnica de manufactura infusión en vacío, tres tipos de materiales biocompuestos reforzados con fibra natural. Uno con matriz de poliéster insaturado y refuerzo fique en configuración aleatoria, variando la cantidad de capas. Para los otros dos, se empleó una resina bio-epoxy, modificando la configuración de la fibra de fique en forma aleatoria mat y en forma de tejido. Así mismo se fabricó un compuesto reforzado con una fibra industrial (Vidrio) con matriz bio-epoxy.

Durante la producción de los materiales se detectaron porosidades debido a que burbujas de aire quedaban atrapadas cuando se realizaba la mezcla resina catalizador y en el momento de la succión cuando ingresaba al sistema de vacío. Este fenómeno se aminoró aumentando el tiempo de pre-impregnado lo que se

reflejó en mayor cantidad de resina utilizada. Esta anomalía es característica del sistema de manufactura infusión en vacío y se reporta en trabajos similares de materiales compuestos [88]–[91]. Por tal razón, y con miras a disminuir estas imperfecciones, se recomienda para futuros trabajos implementar técnicas de mitigación en el momento de la fabricación como lo indica Lee Hamill et al [92].

Adicionalmente para mejorar la adhesión entre las matrices termoestables y la fibra natural se sugiere utilizar autoclave para realizar el curado.

Otro aspecto que resaltar es la baja información con respecto a la fabricación de materiales biocompuestos con fibras naturales y matrices termoestables mediante la técnica de infusión en vacío.

En la tabla 11, se relaciona las técnicas de manufactura de compuestos de fique más utilizadas en los trabajos de investigación.

**Tabla 11.** Manufactura compuestos de fique

<b>Fibra</b>	<b>Técnica de manufactura</b>	<b>Referencia</b>
Fique	Moldeo compresión	[8]–[10], [27], [93]–[102]
	Moldeo Manual	[5], [7]
	Pultrusión manual	[6]
	Infusión en vacío	[103]

Como se observa en la tabla 11 la mayoría de artículos reportan como técnica de manufactura el moldeo por compresión utilizando matrices termoplásticas, lo que permite que este trabajo sea referencia para futuras investigaciones que se realicen de materiales biocompuestos con fique por medio de infusión en vacío.

## **4. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN DE LOS BIOCMPUESTOS**

En este capítulo se presenta el estudio del comportamiento mecánico de materiales biocompuestos reforzados con fibra de fique y un material reforzado con una fibra industrial sintética.

Inicialmente se evaluó las propiedades mecánicas de tensión en un material con matriz de poliéster variando la cantidad de refuerzo de fique en configuración aleatoria mat. Entre los resultados se obtuvo un incremento de los valores de las propiedades mecánicas con la adición de capas de fibras de fique.

Posteriormente se comparó el esfuerzo de tensión y el módulo de elasticidad de los biocompuestos: resina bioepoxy/fique aleatorio, bioepoxy/fique tejido, con el compuesto bioepoxy/fibra de vidrio mat (aleatoria). Se observó que el material biocompuesto con fique en tejido superó en sus propiedades mecánicas al de configuración aleatoria, así mismo, el compuesto con fibra vidrio reportó valores mayores que los otros dos biocompuestos. El ensayo se aplicó en maquina universal siguiendo la normativa ASTM D3039/D3039M.

### **4.1 Materiales y métodos**

#### **4.1.1 Materiales y fabricación de los compuestos**

Para evaluar el comportamiento mecánico de biocompuestos con fibras naturales de fique se manufacturaron las siguientes cuatro configuraciones:

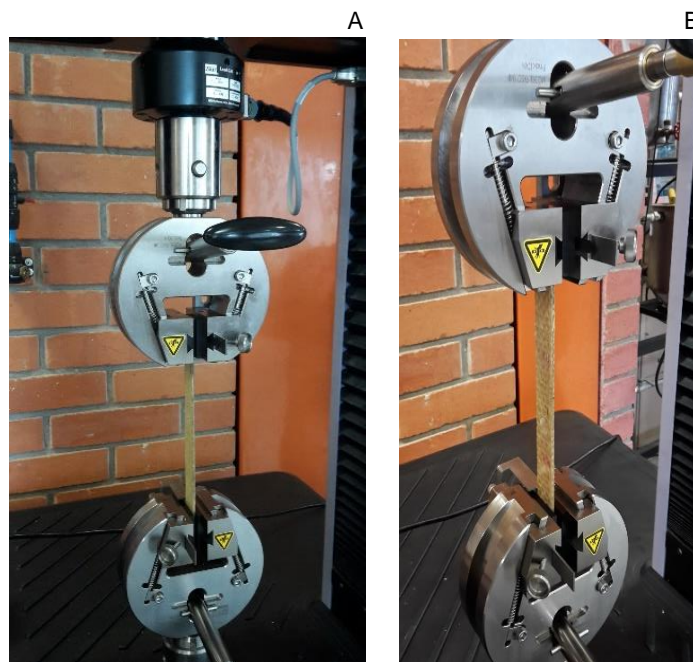
- Material biocompuesto variando las capas de fibras de fique en configuración aleatoria (una, dos, tres y cuatro) y matriz de poliéster en porcentaje de resina: catalizador de 100: 2 en peso. (Ver apartado 3.3.1).
- Material biocompuesto con cuatro capas de fibras de fique en configuración aleatoria y matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.2).
- Material biocompuesto con dos capas de fibras de fique en configuración de tejido trenzado bidireccional 0/90 no equilibrado 2:1, con un gramaje de 530 g/m<sup>2</sup> y matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.3).

- Material compuesto con cuatro capas de fibra de vidrio en configuración aleatoria matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.4).

Los materiales fueron fabricados por la técnica de manufactura infusión en vacío.

#### 4.1.2 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se realizó siguiendo la normativa ASTM D3039/D3039M en una máquina universal marca MTS modelo C43.104 de 10 KN a una velocidad de 2 mm/min con una temperatura de  $24.2^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Para cada uno de los materiales se ensayaron cinco probetas, teniendo en cuenta el promedio de cada una de las propiedades. En la figura 28, se muestra el sistema de mordazas empleado en el ensayo.



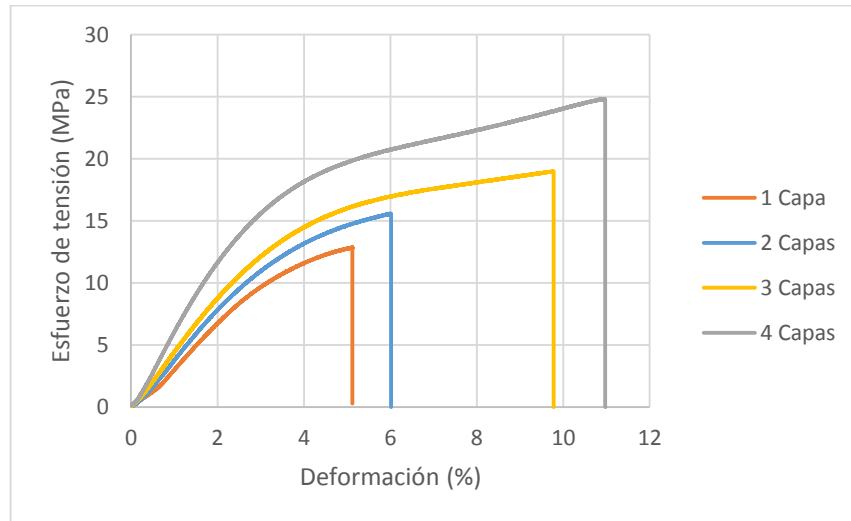
**Figura 28.** Ensayo de tensión. A) Compuesto de vidrio B) Biocompuesto fique tejido

#### 4.2 Resultados propiedades mecánicas a tracción de los biocompuestos

A continuación, se relacionan los resultados de las propiedades mecánicas del ensayo de tensión para los diferentes materiales fabricados.

#### 4.2.1 Biocompuesto con matriz Poliéster variando la cantidad de capas de fique

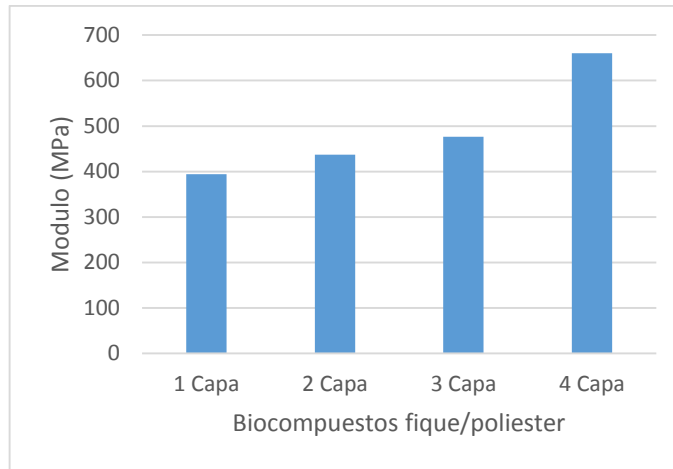
En la figura 29 se observa el diagrama esfuerzo- deformación de los materiales biocompuestos con matriz de poliéster variando la cantidad de fique (Capas).



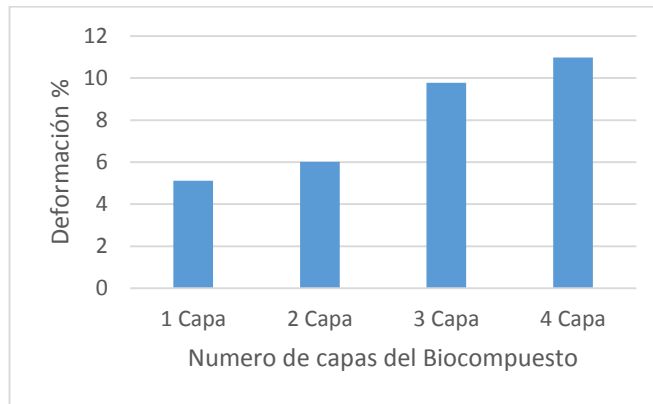
**Figura 29.** Curva esfuerzo-deformación biocompuestos poliéster/ N°capas fique

Según la gráfica esfuerzo-deformación, el número de capas de fique afecta el comportamiento mecánico del compuesto, incrementado la resistencia a la tensión conforme se adicionan las películas de fique. De otro lado, se observa que, al ampliar la cantidad de estratos de fique, se modifica la ductilidad, aumentando el porcentaje de deformación, por lo cual, se pensaría que la estructura de la fibras fique, le confiere al biocompuesto un cambio de conducta de, elástico-lineal a elástico-plástico.

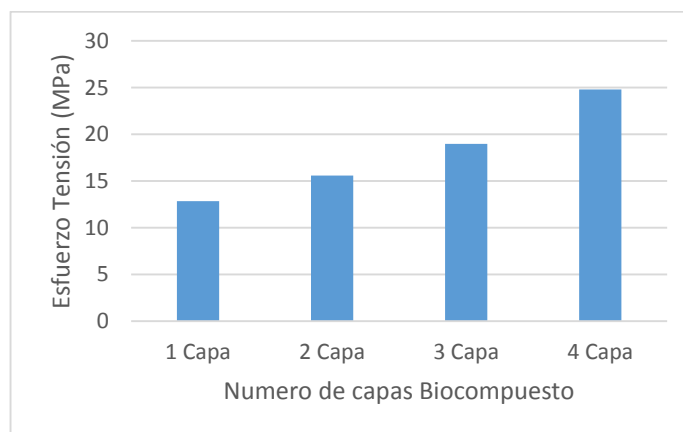
En las figuras 30, 31 y 32 se observan la variación del módulo de elasticidad, el esfuerzo de tensión y la deformación en relación al número de capas de fique.



**Figura 30.** Módulo Young biocompuesto Poliéster vs capa de fique



**Figura 31.** % Deformación biocompuesto Poliéster vs capa de fique



**Figura 32.** Esfuerzo tensión biocompuesto Poliéster vs capa de fique

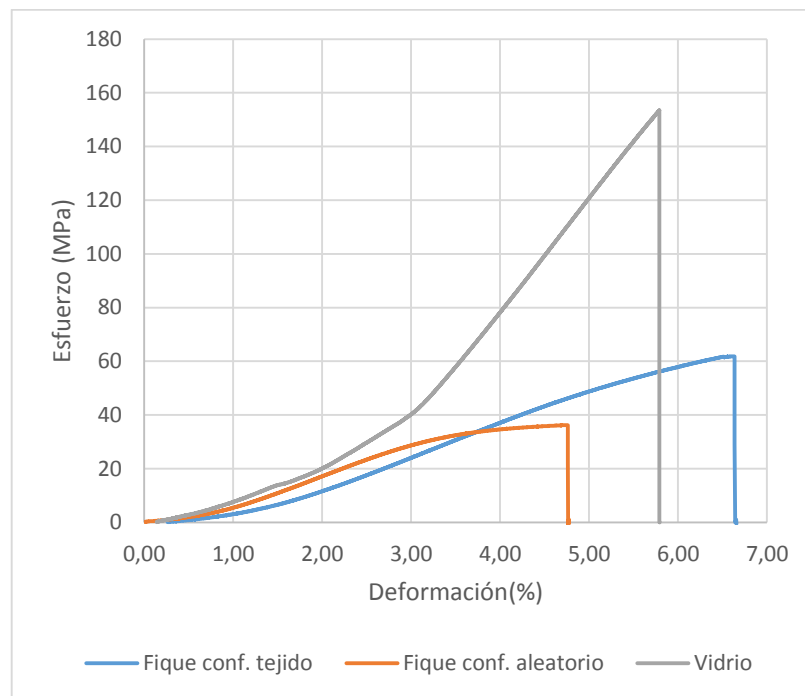


En el compuesto con 4 capas de fique en configuración aleatoria, se obtuvo una resistencia a la tensión de  $24.81 \pm 3.2$  MPa, un módulo de  $660.286$  MPa  $\pm 15.2$  MPa y una deformación de  $10.97 \pm 2.2\%$ , representando una mejora en la resistencia, de un  $93.22\%$ , en el módulo de  $67.42\%$  y en la deformación de  $53.3\%$ , respecto a una sola capa en el cual se obtuvo valores de  $12.84 \pm 4.4$  MPa,  $394.37 \pm 12.5$  MPa y  $5.12 \pm 1.8\%$  respectivamente.

Se puede evidenciar que a medida que se incrementa el contenido de fique las propiedades mecánicas incrementan, esto indica que el material sufre un fenómeno de rigidez. Este comportamiento se explica debido a que el material compuesto toma las propiedades del fique que presenta un valor de resistencia y módulo de elasticidad superior al de la matriz.

#### 4.2.2 Materiales con matrices bioepoxy variando el tipo de fibra y la configuración de la natural

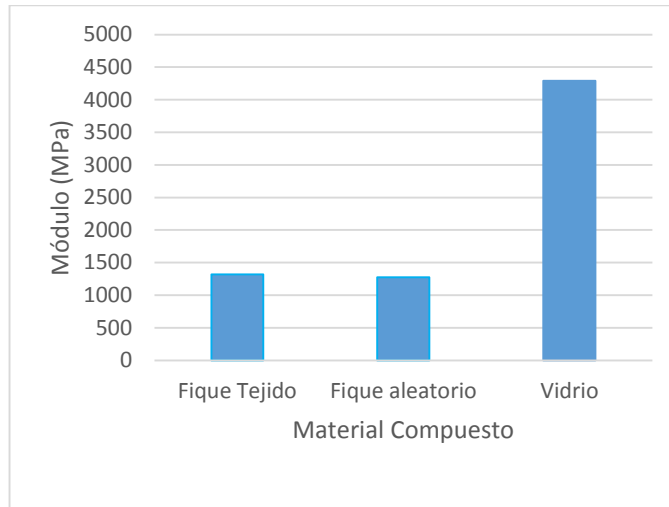
En las figuras 33 se observa el diagrama esfuerzo de los tres materiales.



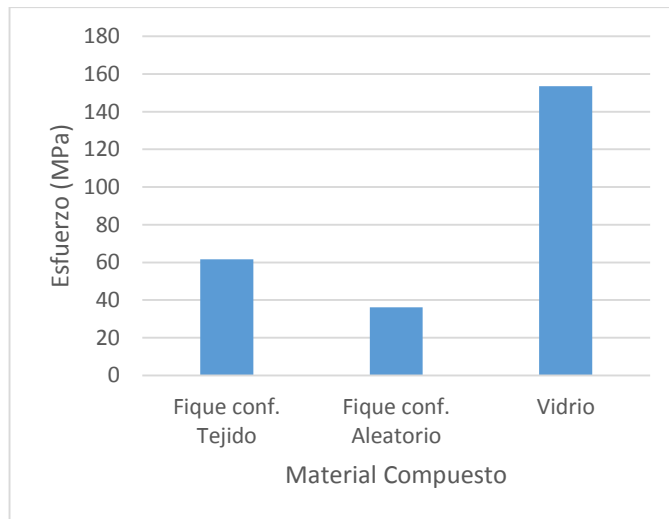
**Figura 33.** Curva esfuerzo deformación bioepoxy/fique (mat y tejido) Vs bioepoxy/vidrio

De acuerdo con el diagrama esfuerzo-deformación, se evidencia un comportamiento elástico-lineal para los tres materiales como consecuencia de la naturaleza frágil de la matriz.

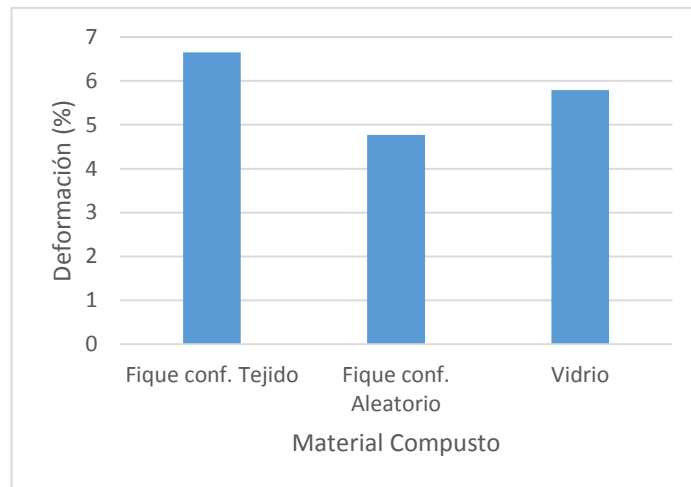
En las figuras 34, 35 y 36 se observan el módulo de elasticidad, el esfuerzo de tensión y la deformación versus el material compuesto.



**Figura 34.** Módulo de elasticidad fibra de vidrio, fique tejido, fique aleatorio



**Figura 35.** Esfuerzo de tensión fibra de vidrio, fique tejido, fique aleatorio



**Figura 36.** Deformación fibra de vidrio, fique tejido, fique aleatorio

En el caso del biocompuesto reforzado con fibra de fique en configuración de tejido, se alcanza un valor máximo de resistencia a la tensión de  $61.8 \pm 4.8$  MPa, un módulo de elasticidad  $1320 \pm 32.8$  MPa y una deformación de  $6.6 \pm 0.8\%$ , mientras que el biocompuesto reforzado con fibra de fique en configuración aleatoria es de  $36.2 \pm 8.5$  MPa, un módulo de  $1272.98 \pm 41.2$  MPa y una deformación de  $4.78 \pm 0.9\%$ .

Por otra parte, se observa que el compuesto de vidrio tiene un esfuerzo de tensión  $153.5 \pm 17.5$  MPa y un módulo de Young  $4290 \pm 131.2$  MPa superando ampliamente las propiedades mecánicas de los biocompuestos.

Las propiedades mecánicas de los tres materiales se ven afectadas por la cantidad de fibras que están localizadas en dirección a la aplicación de la carga y que soportan la tensión generada.

### 4.3 Conclusiones y discusión

Las propiedades mecánicas del esfuerzo a tensión y el módulo de Young aumentaron a medida que se incorporó mayor cantidad de capas de fique en el biocompuesto en una matriz de poliéster insaturado, con lo cual, el material sufrió un fenómeno de rigidez. Este comportamiento también se obtuvo por Hidalgo et al [27], [93] en estudio del comportamiento a la tensión de material compuesto con una matriz de polietileno/aluminio variándole la cantidad de fique que se utilizó como refuerzo.

Por otra parte, el material biocompuesto con fique en tejido superó en sus propiedades mecánicas al de configuración aleatoria, como consecuencia del mayor número de fibras continuas que soportan las cargas a lo largo del material, y a que la transmisión de esfuerzos no es interrumpida debido a la longitud de las fibras

comportandose de forma anisotropica como lo menciona Sumaila et al [104] en el estudio de un compuesto de banana con fibras largas y cortas .

Adicionalmente las propiedades mecánicas obtenidas del compuesto reforzado con fibras de vidrio superan las de los biocompuesto reforzados con fibras de fique, debido a las propiedades inherentes de la fibra natural (hidrofílicas) las cuales no permiten formar uniones fuertes con la matriz. Por otra parte para la fibra de vidrio se reportan valores de esfuerzos de tensión de 2000 a 3000 MPa [105], mientras que para el fique están en el orden de entre 50 a 500 MPa [4]. Rodríguez et al [5] obtuvo resultados similares a los del presente estudio cuando comparó un compuesto de fibra de vidrio con uno de fibras de fique y otro de fibra de banano.

Para los distintos biocompuestos ensayados, según Navia et al [106], la presencia de poros obtenidos en la manufactura de los materiales afecta negativamente los valores de la propiedades mecánicas (Ver capítulo 3). Por tanto, la fabricación de los materiales es un factor importante en la caracterización, permitiendo analizar compuestos que reflejen la conducta real del mismo.

En la tabla 12 se comparan la resistencia última a la tracción y el módulo de Young de algunos materiales compuestos con fibras de fique contra los resultados obtenidos en el presente estudio.

**Tabla 12.** Propiedades mecánicas compuestos de fique

Material	Descripción	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Referencia
Material 1	PEBD/AL y 50% en peso fique unidireccional	67.26	7130	[27]
Material 2	PEBD/AL y 30% en peso fique unidireccional	52	4400	[27]
Material 3	PEBD/AL y 10% en peso fique unidireccional fibra corta	32	2800	[27]
Material 4	PEBD/AL y 50% en peso fique aleatorio fibra corta	24.86	3650	[93]
Material 5	PEBD/AL y 30% en peso fique aleatorio fibra corta	15	2200	[93]
Material 6	PEBD/AL y 10% en peso fique aleatorio fibra corta	12	1150	[93]
Material 7	LDPE-AL 10% peso fique configuración aleatoria	13	890	[95]
Material 8	LDPE-AL 20% peso fique configuración aleatoria	16	1520	[95]
Material 9	LDPE-AL 30% peso fique configuración aleatoria	21.22	1560	[95]
Material 10	Poliéster y fibra de fique con tratamiento de alcalinización	102.6	6190	[96]
Material 11	Polietileno de alta densidad y fique corto aleatorio, tratamiento térmico 25% volumen fique	14	500	[98]
Material 12	Poliéster ,fibra de fique tejido 15%	18.3	950	[5]
Material 13	Bioresina, fique en configuración aleatoria	36.2	1272.98	El presente estudio
Material 14	Bioresina, fique en configuración tejido	61.8	1320	El presente estudio
Material 15	Poliéster 5.26% en peso fique aleatorio	12.84	394.37	El presente estudio
Material 16	Poliéster 10.45% en peso fique aleatorio	15.58	437.146	El presente estudio
Material 17	Poliéster 15.36% en peso fique aleatorio	18.99	476.264	El presente estudio
Material 18	Poliéster 20.09% en peso fique aleatorio	24.81	660.286	El presente estudio

Como se observa en la tabla 12 comparando con el material 1 (PEBD/AL y 50% en peso de fique con fibras unidireccionales), con los materiales fabricados en el presente estudio, se obtuvieron propiedades mecánicas más bajas, debido a que el compuesto PEBD/AL tiene un componente de aluminio en la matriz, lo que permite un incremento de la rigidez y la resistencia, adicionalmente todas las fibras de fique se ubicaron en sentido de la carga soportando la tensión generada. Respecto a los

materiales 2 y 3 (30% y 10% PEBD/AL/Fibras unidireccionales) el material 14 (Bioresina/fique en configuración de tejido) fabricado en la investigación reportó mayor esfuerzo de tensión, a causa del aumento en el porcentaje de la fibra de fique, y la cantidad de fibras largas orientadas en la misma dirección de la tensión. El módulo de Young fue más bajo debido a que la bioresina utilizada era más frágil.

Los materiales 13 y 14 de bioresina fabricados en la investigación mostraron módulos de Young menores a los de los materiales 4, 5 y 6, producto del comportamiento frágil del compuesto PEBD/AL.

Así mismo, los materiales 7,8 y 9 mostraron comportamientos mecánicos similares a los materiales 15, 16 ,17 y 18, desarrollados en la presente investigación, puesto que se utilizó el mismo tipo de fibra de fique para el refuerzo sin ningún tipo de tratamiento. Por otra parte a pesar de que la matriz LDPE-AL contiene aluminio, esta se obtuvo de un proceso de reciclaje de envases de Tetra Pak de larga duración, lo cual afectó sus características inherentes y adicionalmente no se presentó buena adhesión en los componentes matriz – fibra, según lo indica el autor Hidalgo [95].

El material 10 mostró un desempeño mayor a los materiales fabricados en la investigación, debido al tratamiento químico de alcalinización al cual fue expuesto. Según Gañan et al [96], este proceso mejora la adhesión entre la matriz y la fibra, presentando una mejor unión entre los componentes. Por tal razón, para futuros trabajos se recomienda aplicar tratamientos químicos a la fibra de fique para obtener materiales con mejores prestaciones, siguiendo el procedimiento descrito por la autora [96].

El material de 17 de 15.36% fique/ poliéster, fabricado en la investigación, mostró un esfuerzo de tensión similar al reportado al del material 12, esto se debió a que se contó con una cantidad similar de fibra en los dos compuestos y el mismo tipo de resina poliéster.

## **5. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA (ANÁLISIS MODAL)**

En este capítulo, inicialmente, se evalúa el impacto en los parámetros modales de un material biocompuesto poliéster/fique debido al número de capas de la fibra natural utilizados en la fabricación. La caracterización dinámica se realizó por medio experimental obteniendo la medición de la respuesta en frecuencia (FRF) bajo la Norma ISO 7626-2. Se identificó un incremento en la frecuencia natural y el amortiguamiento de los materiales con la incorporación de fique haciéndose más significativo en la medida que se le incorpora más capas de fibra natural.

Posteriormente, se aplicó un análisis modal sobre dos materiales biocompuestos (bioepoxy/fibra de fique en configuración de tejido y aleatorio) y a un compuesto de fibra de vidrio utilizando simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico conociendo la desviación entre cada uno de los métodos de solución para la estimación de la frecuencia natural. El análisis modal experimental se realizó por medio de la medición de la respuesta en frecuencia (FRF) bajo la Norma ISO 7626-2. Para el modelamiento analítico se utilizó la ecuación de Euler-Bernoulli, mientras que para la simulación se utilizó el software ANSYS de elementos finitos. Se concluye que se obtienen porcentajes muy bajos de diferencia comparando la solución analítica y de elementos finitos, indicando que los dos métodos tienen una aplicación similar sobre la solución en compuestos. Sin embargo, para el método experimental se reportó errores hasta de un 25% de diferencia (Con respecto al método analítico y de elementos finitos) siendo mayores en el compuesto de fibra de vidrio debido a la interacción entre la matriz y la fibra y los efectos de la rotación de la sección transversal de la probeta.

### **5.1 Materiales y métodos**

#### **5.1.1 Materiales y fabricación de los compuestos**

Para evaluar el impacto en los parámetros modales de forma experimental de los biocompuestos de resina de poliéster y refuerzo de fibras de fique en forma aleatoria se fabricaron las siguientes formulaciones de materiales compuestos:

- Material biocompuesto variando las capas de fibras de fique en configuración aleatoria (una, dos, tres y cuatro) y matriz de poliéster en porcentaje de resina: catalizador de 100: 2 en peso. (Ver apartado 3.3.1).

Por otra parte, para conocer la desviación entre los métodos de simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico para la

caracterización dinámica por análisis modal de materiales biocompuestos fibro reforzados con fibras naturales, se fabricaron los siguientes materiales por la técnica infusión en vacío:

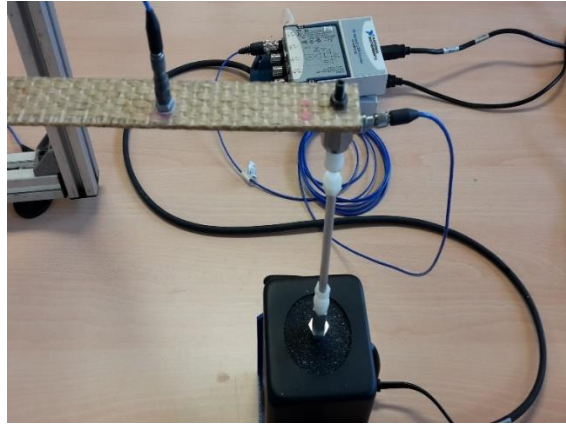
- Material biocompuesto con cuatro capas de fibras de fique en configuración aleatoria y matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.2).
- Material biocompuesto con dos capas de fibras de fique en configuración de tejido trenzado bidireccional 0/90 no equilibrado 2:1, con un gramaje de 530 g/m<sup>2</sup> y matriz SuperSap®, resina epoxídica. El porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.3).
- Material compuesto con cuatro capas de fibra de vidrio en configuración aleatoria matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver apartado 3.3.4).

### **5.1.2 Método Experimental, medición de la respuesta en frecuencia**

El análisis experimental para la caracterización dinámica se realizó según la metodología conforme la Norma ISO 7626-2 “Mechanical vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility - Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter”.

Se utilizó un shaker electrodinámico marca The Modal Shop generándose un barrido sinusoidal hasta una frecuencia de 400 Hz. La magnitud de la excitación se midió por medio de un sensor de fuerza PCB referencia 208C02 acoplado al extremo superior del shaker mientras que la respuesta fue medida por un acelerómetro PCB referencia 352C68, el cual se trasladó por 5 puntos de medición distribuidos uniformemente por la superficie total de las probetas. El material compuesto fue acoplado al sensor de fuerza en uno de sus extremos mientras que el otro permaneció de forma libre (sin restricciones) usando elementos elásticos. En la figura 37 se observa el montaje del ensayo.





**Figura 37.** Montaje método experimental

Para cada una de las mediciones (Punto) se realizaron un total de 5 pruebas siendo los resultados reportados en el presente trabajo un promedio de los mismos. El rango de excitación cubrió de 5 a 400 Hz con un barrido sinusoidal.

La extracción del amortiguamiento se realizó utilizándose el método Peak-Picking siguiendo la ecuación 13.

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n} \quad (13)$$

Donde  $\xi$ : Amortiguamiento,  $\Delta\omega$ : Ancho de banda y  $\omega_n$  Frecuencia natural.

### 5.1.3 Método Analítico, Euler Bernoulli

Para la obtención de las frecuencias naturales por medio del método analítico se utilizó el modelo de Euler- Bernoulli el cual se describe en la ecuación 14:

$$EI \frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, I el momento de inercia,  $\rho$  la densidad y A el área transversal de la barra, con las siguientes condiciones de frontera descritas en la ecuación 15 y 16.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial^3 v}{\partial t^3} = 0 \quad (16)$$

Resolviendo la ecuación 14 se obtiene que la frecuencia natural es igual a la descripción matemática de la ecuación 17:

$$W_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4} * a^2} \quad (17)$$

Donde L es la longitud y a es  $1/(2\pi)$  veces el número de ciclos en la longitud de la barra, el cual se obtiene de la ecuación característica de cada uno de los modos de la probeta para una viga Corredizo-libre.

#### **5.1.4 Simulación por elementos finitos.**

Para el análisis de elementos finitos se utilizó el software comercial Ansys 17.1 en el mismo se emplearon elementos sólidos de 4 nodos en 2D asumiendo deformación plana y las condiciones de libertad en un extremo y corredizo en el otro.

### **5.2 Resultado análisis modal**

#### **5.2.1 Evaluación del impacto en parámetros modales debido al número de capas de la fibra natural**

A continuación, se observa la evaluación de los diferentes parámetros modales obtenidos de la caracterización dinámica experimental del material biocompuesto con matriz de poliéster variando la cantidad de capas de fibra de fique.

- **Frecuencia natural**

Las frecuencias naturales de cada uno de los biomateriales se muestran en la tabla 13, en la cual, es posible observar que a medida que se incrementan las capas de fique, tienden a aumentar, esto se debe a que hubo una rigidización del compuesto que se opone a la transmisión de la vibración (Ver capítulo 4).

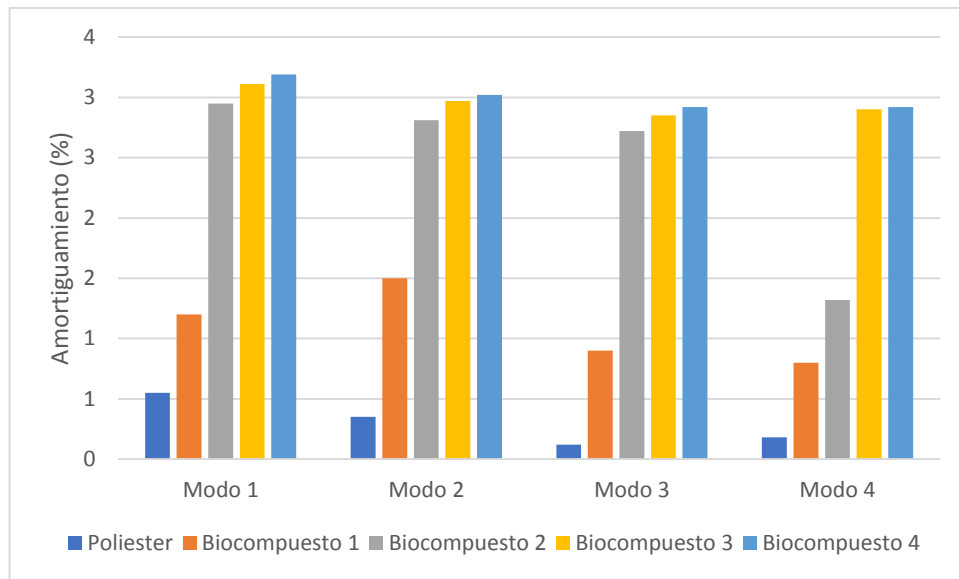
**Tabla 13.** Frecuencia natural de los materiales

Modo de vibración	Frecuencia natural (Hz)				
	Poliéster	Biocompuesto 1 capa	Biocompuesto 2 capas	Biocompuesto 3 capas	Biocompuesto 4 capas
1	43.75	44.5	48.75	50	57.5
2	112.5	113.75	118.5	119.25	123.5
3	196.25	197.5	202.5	204.75	209.75
4	217.75	219.25	222.5	225.75	232.5

Por otra parte, el aporte de la masa, y las dimensiones de los especímenes probados, los cuales tienden a disminuir las frecuencias naturales, no son tan significativas, ya que las probetas presentaron valores de estas propiedades muy similares (Ver capítulo 3).

- **Amortiguamiento**

La capacidad para disipar energía de los materiales estudiados (resistencia ofrecida por un cuerpo al movimiento de un sistema vibratorio), se muestran en la Figura 38, en donde se observa un pequeño aumento con el número de capas de fibra incorporado en los biocompuestos. Esto ocurre debido a la alta porosidad de las fibras, a los defectos de fabricación y a la falta de adherencia entre los materiales lo que permite que la energía se disipe más fácilmente.

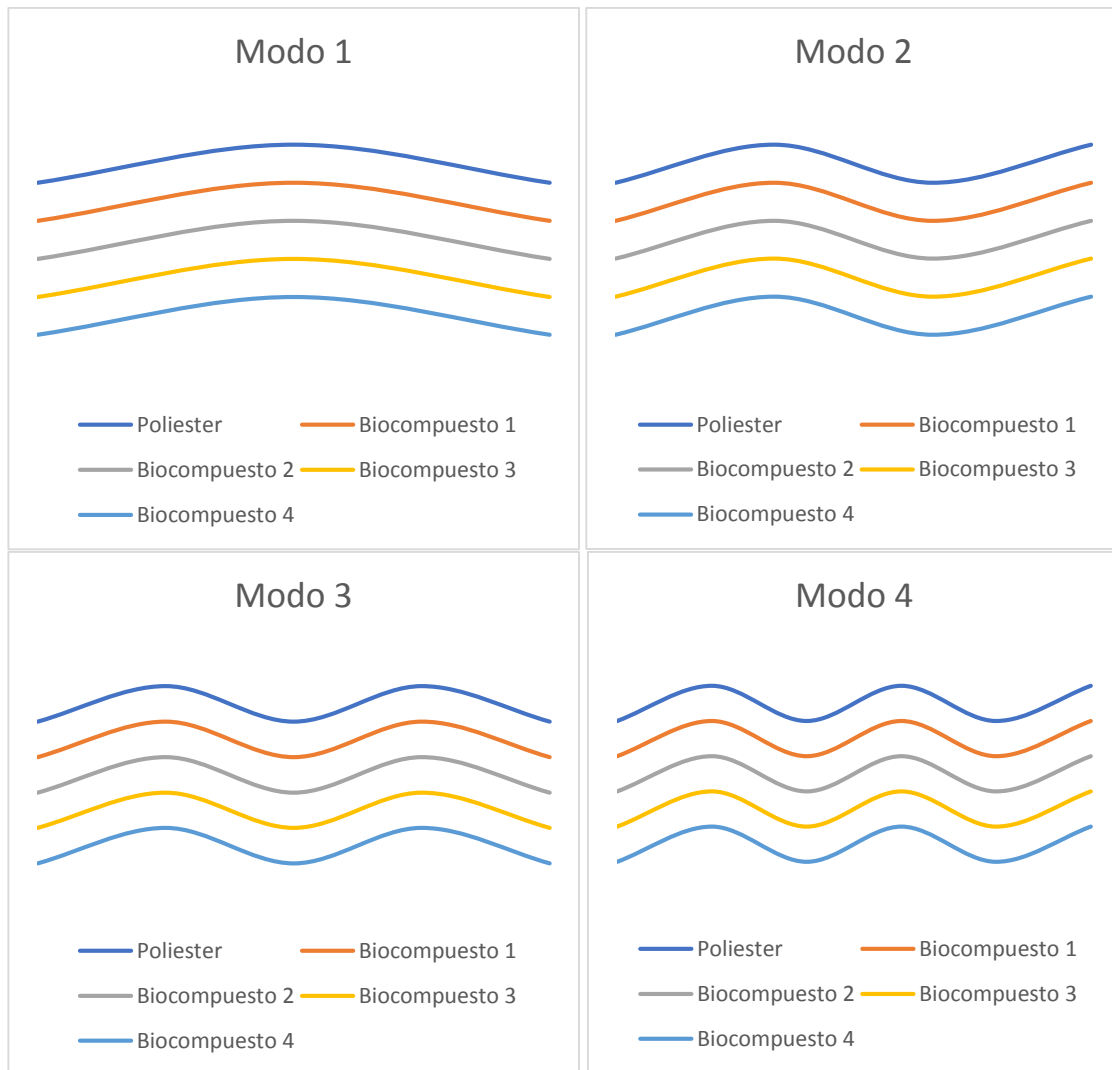


**Figura 38.** Amortiguamiento de los biocompuestos

Sin embargo, aparte del contenido de fibra, La fricción entre la resina y las fibras, la rigidez, y el espesor de la interfaz afectan directamente el amortiguamiento jugando un papel fundamental el proceso de manufactura. [74]

- **Forma Modal**

Como se observa en la Figura 39, los modos de vibración de los compuestos son flectores, esto es debido a que la probeta es mucho más larga que ancha. Así mismo, la forma modal por modo de cada uno de los materiales es igual, a causa de la misma geometría en las probetas.



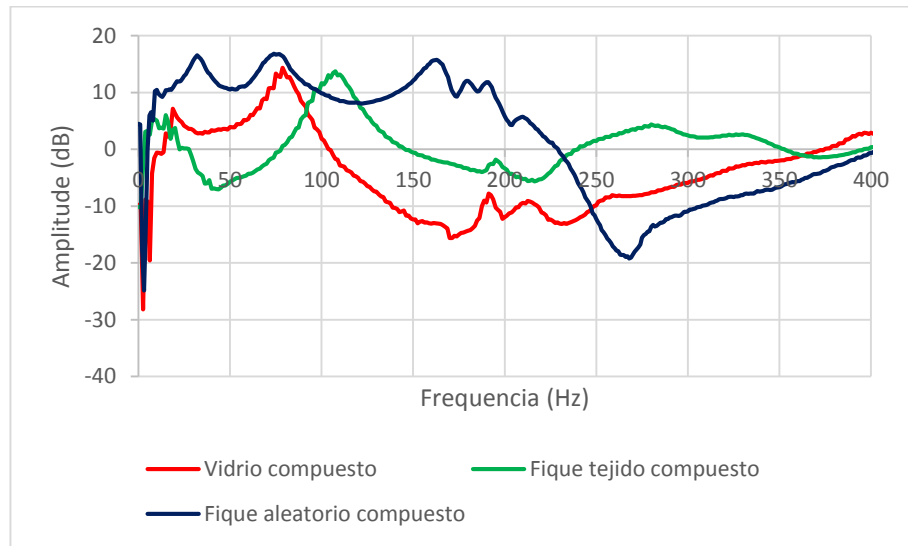
**Figura 39.** Forma modal de los biocompuestos

**5.2.2 Evaluación de la desviación entre los métodos de simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico para la caracterización dinámica por análisis modal de materiales compuestos fibro reforzados con fibras.**

A continuación, se observa las diferentes frecuencias naturales obtenidas por los métodos de simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico para los dos biomateriales de fibra de fique y el compuesto de vidrio.

- **Método experimental**

En la figura 40 se observa la amplitud de la medición de la respuesta en frecuencia FRF, en el punto dos (Medio) de los tres materiales evaluados hasta la frecuencia de 400 Hz.



**Figura 40.** Aceleración de los materiales

Cada uno de los picos de la figura 40 representa las frecuencias naturales del material ensayado, esto debido a que se obtiene una mayor respuesta (Aceleración) a una misma entrada (Fuerza) indicando que el material a esta frecuencia está en resonancia. Los valores obtenidos de los modos flectores de cada material se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14.** Frecuencia natural por análisis experimental

Modos	Frecuencia Natural (Hz) Experimental		
	Biocompuesto fique aleatorio	Biocompuesto fique tejido	Compuesto fibra de vidrio
Modo 1	16	17.5	19
Modo 2	66.25	107	79
Modo 3	182	292.5	196.2
Modo 4	309	468	395

En el anexo B se adjuntan la FRF obtenida en los diferentes puntos analizados de cada material

- **Método analítico, teoría de Euler- Bernoulli**

Los resultados matemáticos que se obtuvieron al aplicar la ecuación de Euler – Bernoulli para los primeros tres modos de vibración se presentan en la tabla 15.

**Tabla 15.** Frecuencia natural análisis analítico

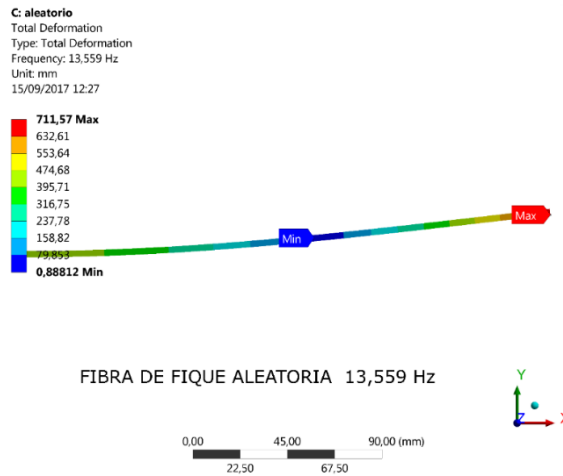
Modos	Frecuencia Natural (Hz) analítico		
	Biocompuesto fique aleatorio	Biocompuesto fique tejido	Compuesto fibra de vidrio
Modo 1	13.55	21.57	19.52
Modo 2	73.26	116.59	105.50
Modo 3	180.87	287.85	260.48
Modo 4	336.36	535.31	484.41

La densidad de las probeta para los cálculos fue de 1387.36 kg/m<sup>3</sup> para el biocompuesto de fique aleatorio, 928.3 kg/m<sup>3</sup> para el biocompuesto de fique tejido y 1053.32 kg/m<sup>3</sup> para el compuestos de fibra de vidrio, El módulo de elasticidad se tomó del ensayo de tensión (4190 MPa para el compuesto de fibra de vidrio, 1320 MPa para el biocompuesto de fique tejido y 1272.98 MPa biocompuesto de fique aleatorio, ver capítulo 4) mientras que la longitud y el área fueron definidas según la geometría de la probeta ( Aproximadamente 25 cm de longitud, 2.5 cm de ancho y 2.5 mm de espesor ver capítulo 3) .

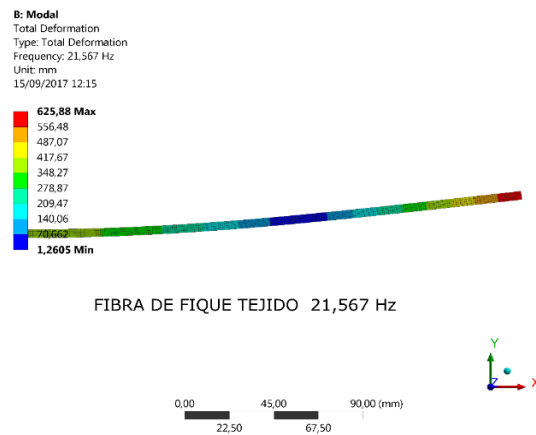
Se obtiene un valor mayor de frecuencias naturales para el biocompuesto de fique de tejido debido a que a pesar de que el compuesto de fibra de vidrio tiene un módulo de elasticidad superior su masa es mayor como lo denota la densidad afectando directamente la ecuación.

- **Método de simulación por elementos finitos**

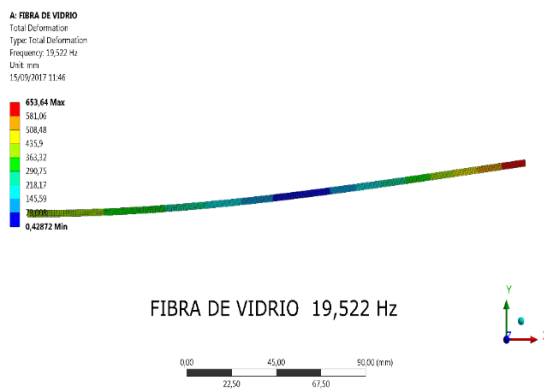
En las figuras 41,42 y 43 se observa el primer modo de vibración y frecuencia natural resultado del análisis de elementos finitos ejecutado en Ansys de los tres materiales.



**Figura 41.** Primer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 13.599 Hz



**Figura 42.** Primer Modo de vibración biocompuesto fique tejido, 21.567 Hz

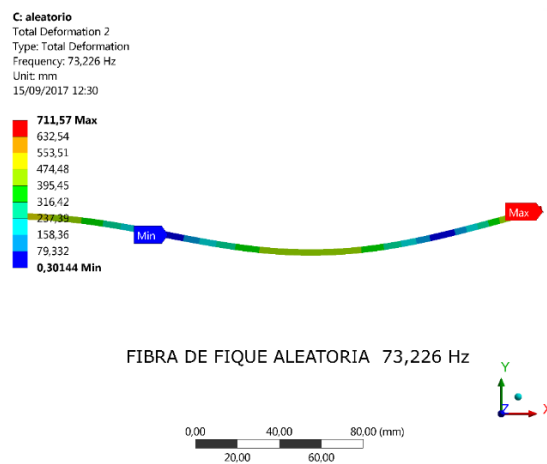


**Figura 43.** Primer Modo de vibración compuesto de vidrio, 19.522 Hz

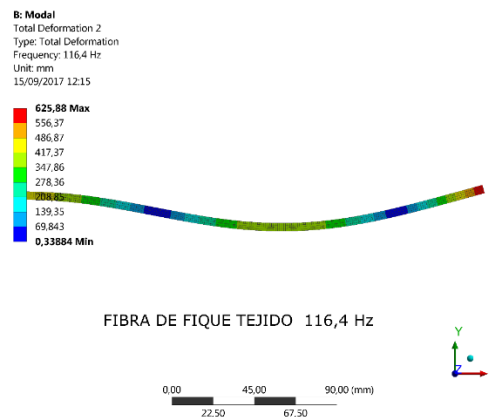


El primer modo de vibración de los tres materiales es de flexión teniendo un solo nodo (Punto Azul), punto donde el material no vibra. La deformación es mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción. Se obtuvo una frecuencia natural de 13.599, 21.567, 19.522 Hz para el biocompuesto de fibra de fique aleatoria, biocompuesto de fique tejido y para el compuesto de vidrio respectivamente.

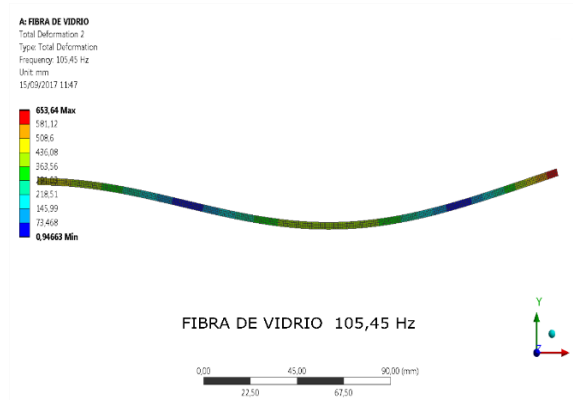
En las figuras 44,45 y 46 se observa el segundo modo de vibración y frecuencia natural resultado del análisis de elementos finitos ejecutado en Ansys de los tres materiales.



**Figura 44.** Segundo Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 73.226 Hz



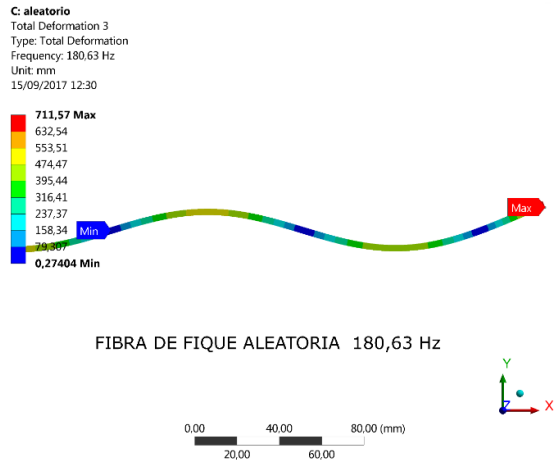
**Figura 45.** Segundo Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 116.4 Hz



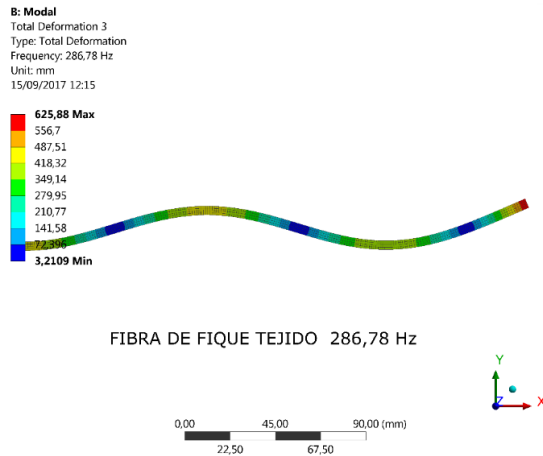
**Figura 46.** Segundo Modo de vibración compuesto de vidrio, 105.45 Hz

El segundo modo de vibración de los materiales también es de flexión teniendo dos nodos (Puntos azules). La deformación sigue siendo mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción. Se obtuvo una frecuencia natural de 73.266, 116.4, 105.45 Hz para el biocompuesto de fibra de fique aleatoria, biocompuesto de fique tejido y para el compuesto de vidrio respectivamente.

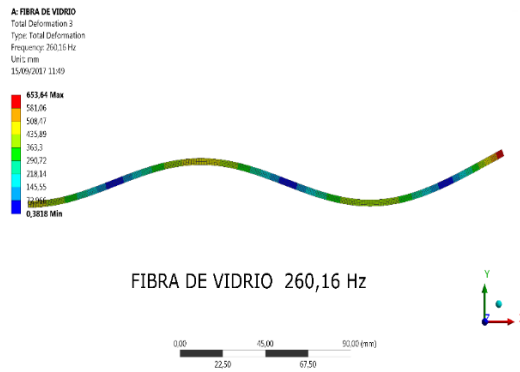
En las figuras 47,48 y 49 se observa el tercer modo de vibración y frecuencia natural resultado del análisis de elementos finitos ejecutado en Ansys de los tres materiales.



**Figura 47.** Tercer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 180.63 Hz



**Figura 48.** Tercer Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 286.78 Hz



**Figura 49.** Tercer Modo de vibración compuesto de vidrio, 260.16 Hz

El tercer modo de vibración de los tres materiales también es de flexión teniendo tres nodos (Puntos azules). La deformación sigue siendo mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción. Se obtuvo una frecuencia natural de 180.63, 286.78, 260.16 Hz para el biocompuesto de fibra de fique aleatoria, biocompuesto de fique tejido y para el compuesto de vidrio respectivamente.

En las figuras 50,51 y 52 se observa el tercer modo de vibración y frecuencia naturales obtenidos por el análisis de elementos finitos obtenidos de los tres materiales.

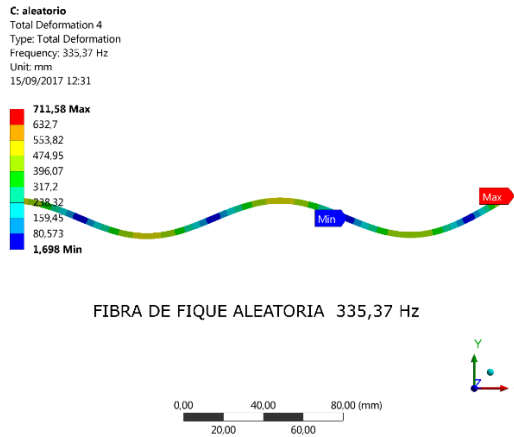


Figura 50. Cuarto Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 335.37 Hz

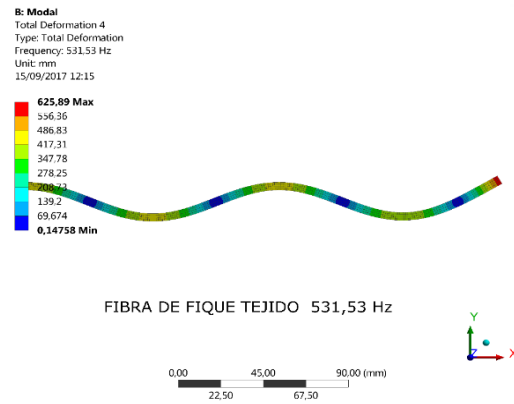


Figura 51. Cuarto Modo de vibración biocompuesto fique aleatorio, 531.53 Hz

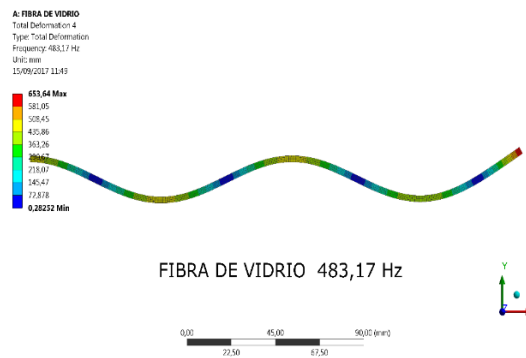


Figura 52. Cuarto Modo de vibración compuesto de vidrio, 483.17 Hz

El cuarto modo de vibración de los tres materiales también es de flexión teniendo cuatro nodos (Puntos azules). La deformación sigue siendo mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción. Se obtuvo una frecuencia natural de 335.37, 531.53, 483.17 Hz para el biocompuesto de fibra de fique aleatoria, biocompuesto de fique tejido y para el compuesto de vidrio respectivamente.

En el anexo C se adjuntan los informes obtenidos de Ansys.

### 5.2.3 Comparación de los resultados

Como se observa en la tabla 16 se obtienen porcentajes muy bajos de diferencia comparando la solución analítica y de elementos finitos indicando que los dos métodos tienen una aplicación similar sobre la solución en compuestos.

Modos	% Error Frecuencia Natural								
	Analítico- Elemento finitos			Analítico- Experimental			Elementos finitos experimental		
	Compu esto fique aleatorio	Compu esto fique tejido	Compu esto fibra de vidrio	Compu esto fique aleatorio	Compu esto fique tejido	Compu esto fibra de vidrio	Compu esto fique aleatorio	Compu esto fique tejido	Compu esto fibra de vidrio
Modo 1	0.360	0.014	0.010	15.3	18.9	2.7	15.0	18.9	2.7
Modo 2	0.008	0.163	0.047	9.6	8.2	25.1	9.6	8.1	25.1
Modo 3	0.133	0.372	0.123	0.6	1.6	24.7	0.8	2.0	24.6
Modo 4	0.294	0.706	0.256	8.1	12.6	18.5	7.9	12.0	18.2

**Tabla 16.** Porcentaje de error entre métodos

Sin embargo, el método experimental reportó errores hasta de un 25% de diferencia con respecto al método analítico y de elementos finitos siendo mayores en el compuesto de fibra de vidrio.

Las desviaciones obtenidas en el presente estudio son del mismo orden de lo que reporta Han et al [107] donde presenta errores para la primera frecuencia natural del 14% al 26% y para la segunda del 78% al 133%.

Así mismo, en el desarrollo experimental se pudo tener las fuentes de incertidumbre referentes a los elementos de sujeción de la pieza, la sensibilidad del sensor de fuerza y del acelerómetro que aumentaron las desviaciones, como también lo reporta Mendoza et al [108] en estudio realizado a material compuestos reforzados con fibra de carbono para aplicación aeronáutica.

### 5.3 Conclusiones y discusión

En la evaluación del impacto en los parámetros modales debido al número de capas de la fibra natural aplicado al material compuesto de matriz de poliéster se evidenció un incremento de las mismas con la inserción de mayor cantidad de fique.

Respecto a las frecuencias naturales, estas se incrementaron debido a que los materiales con más cantidad de fibra son más rígidos, lo que no permite que el material se deforme (Flexión) evitando la transmisión de la vibración. Resultados similares se han obtenido en aplicación de análisis modal de biocompuestos [15], [83], [84] . Por ejemplo Pitchaimani et al [109] los reporto en un compuesto de poliéster tejido de banano / jute, el cual tuvo un mejor comportamiento dinámico cuando se orientó la fibra a lo largo de la dirección de carga. A pesar de este incremento las primeras frecuencias naturales de los materiales biocompuestos de poliéster/fique ensayados, se encuentran entre las frecuencias comunes de operación de las máquinas rotativas (30 y 60 Hz), por lo que no es recomendable utilizarlo en este tipo de aplicaciones, debido a que entraría en resonancia, y por tanto generarían daños.

Analizando el amortiguamiento también presento un pequeño aumento con la inserción de fique, ya que el material es más poroso y permite mayor absorción de la vibración. Los valores de amortiguamiento obtenidos en los materiales, son similares a los reportados por Ioan et al [77]. Entre los resultados expuestos por los autores, para el análisis modal de un material compuesto de fibra de vidrio, se concluye que los valores de amortiguamiento estuvieron cerca, independientemente del número de capas. El amortiguamiento obtenido en los compuestos de la investigación pueden disipar alta energía por vibraciones o impactos, lo que hace posible emplearlos en aplicaciones donde se requieran aisladores de vibración o sonido como lo sugieren Akash et al [84] y Genc et al [87] en investigaciones dinámicas realizadas a biocompuestos con fibras naturales.

Para futuros trabajos de investigación se recomienda aplicar metodologías para la extracción de parámetros modales mucho más robustas que el peak-picking como lo son el Circle-Fitting method expuesto por Mendes [110] en trabajo de doctorado de extracción de propiedades modales válidas para vibraciones estructurales.

En lo referente a las metodologías de solución por simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico se obtuvieron porcentajes muy bajos de diferencia comparando la solución analítica y de elementos finitos indicando que los dos métodos tienen aplicación similar en la solución para materiales compuestos sin embargo el método experimental reportó errores hasta de un 25% de diferencia con respecto al método analítico y de elementos finitos siendo mayores en el compuesto de fibra de vidrio. Esto se debe en parte, a que el modelo de Euler-Bernoulli, no tiene en cuenta el efecto de la rotación de la sección transversal, el

desplazamiento lateral de la barra y que el material es lineal elástico, lo que acrecienta la desviación del valor real de la frecuencia natural [107]. Por otra parte en el modelo de elementos finitos se asumieron los compuestos como barras de un solo material ingresando las características obtenidas en el ensayo mecánico ignorando la interacción que se tiene entre la fibra y la matriz (Adhesión, fricción y falta de homogeneidad)

Por esta razón para futuros trabajos de investigación se recomienda aplicar otras metodologías analíticas como lo son las de Shear, Rayleigh o Timoshenko para conocer su desviación en aplicaciones con materiales compuestos. De igual manera se sugiere simular el material en el complemento de ANSYS para materiales compuestos (ANSYS Composite PrepPost) donde se pueden ingresar las características propias de la matriz y de la fibra así como la distribución que tuvo esta misma en el momento en que se realizó la fabricación.

La forma modal de los compuestos que se analizaron en esta investigación muestra que los modos de vibración son en flexión aumentando el número de nodos cada vez que aumenta el valor de la frecuencia natural. Los resultados obtenidos se refieren solo a los modos de flexión por la geometría de la probeta y el rango de excitación de la misma para estudios más concluyentes de la aplicación de estos materiales en aplicaciones dinámicas se debe evaluar también los diferentes modos torsionales.

## **6. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO)**

En este capítulo se presenta el estudio de la morfología de fibras de fique (en configuración aleatoria y tejido), y de vidrio, (en configuración aleatorio), junto a el análisis microestructural de los materiales que componen los biocompuestos, para las siguientes combinaciones: biocompuesto de poliéster con refuerzo fique en configuración aleatoria, biocompuesto bio-epoxy con refuerzo fique en configuración aleatoria, biocompuesto bio-epoxy con refuerzo fique en configuración tejido y compuesto matriz bio-epoxy con refuerzo vidrio. Las observaciones se realizaron por medio de microscopía electrónica SEM.

En el tejido se observó daño y cortes en las fibras de fique que conforman los hilos, mientras que para la configuración aleatoria de la fibra se obtuvo zonas con mayor densidad de la fibra natural. Por otra parte, las fibras de vidrio se observaron sin daños y sobrepuestas por cúmulos una sobre otras.

En el análisis de los materiales se observó una buena adhesión en el compuesto de fibra de vidrio entre la matriz bioepoxy; Para los materiales reforzados con la fibra natural se obtuvieron aglomeraciones de la matriz, espacios y porosidades indicando mediana adherencia, como consecuencia del proceso de manufactura, la naturaleza hidrofóbica de la matriz y las características hidrofílicas de las fibras.

### **6.1 Materiales y métodos**

#### **6.1.1 Materiales y fabricación de los biocompuestos**

Los siguientes materiales se analizaron por medio de microscopía electrónica de barrido.

- Fique en configuración aleatoria (Ver capítulo 3.1.1).
- Fique tejido (Ver capítulo 3.1.2).
- Fibra de vidrio (Ver capítulo 3.1.3).

La caracterización morfológica se realizó a las siguientes cuatro configuraciones de materiales compuestos fibroreforzados con las fibras anteriormente mencionadas:

- Material biocompuesto variando las capas de fibras de fique en configuración aleatoria (una, dos, tres y cuatro) y matriz de poliéster en porcentaje de resina: catalizador de 100: 2 en peso. (Ver capítulo 3.3.1).



- Material biocompuesto con cuatro capas de fibras de fique en configuración aleatoria y matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver capítulo 3.3.2).
- Material biocompuesto con dos capas de fibras de fique en configuración de tejido trenzado bidireccional 0/90 no equilibrado 2:1, con un gramaje de 530 g/m<sup>2</sup> y matriz SuperSap®, resina epoxídica. El porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver capítulo 3.3.3).
- Material compuesto con cuatro capas de fibra de vidrio en configuración aleatoria matriz SuperSap®, resina epoxídica en porcentaje de resina: catalizador fue de 100:33 en peso. (Ver capítulo 3.3.4).

Los materiales fueron fabricados por la técnica de manufactura infusión en vacío.

### **6.1.2 Microscopia electrónica de barrido**

La microscopía electrónica de barrido se realizó utilizando un microscopio marca Tescan modelo MIRA 3 FEG-SEM con detector de electrones secundarios modelo A65c SED el cual se observa en la figura 53. Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de microscopia electrónica de barrido de la Universidad Pontificia Bolivariana con sede en Bucaramanga.



**Figura 53.** Microscopio electrónico de barrido SEM

Inicialmente, se ajustaron valores a un voltaje de aceleración a 3 KV y modo de escaneo en wild field obteniendo imágenes a pocos aumentos en las muestras. Posteriormente, se cambió el modo de escaneo a resolution variando las condiciones hasta obtener imágenes entre 20 X y 5.000 X (escala desde 2 mm hasta 20 micras), y a un voltaje de aceleración de electrones de hasta 10 KV.

Los materiales biocompuestos fueron recubiertos por una pequeña capa de oro a fin de mejorar la conductividad eléctrica utilizando un spotter como se observa en la figura 54.



**Figura 54.** Recubrimiento de los biomateriales

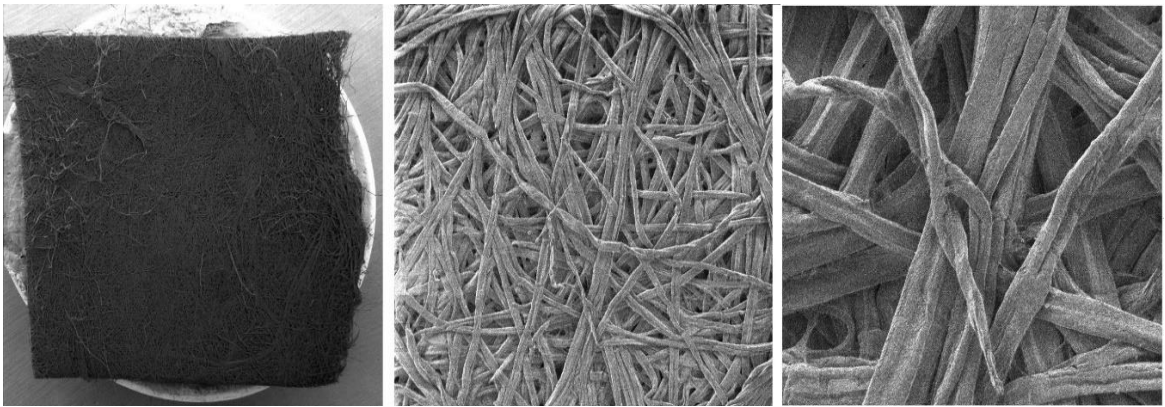
## 6.2 Resultados de la microscopía electrónica de barrido

### 6.2.1 Fibras

A continuación, se adjuntan los resultados de la topografía de las fibras analizadas en las distintas configuraciones.

- **Fique en configuración aleatoria**

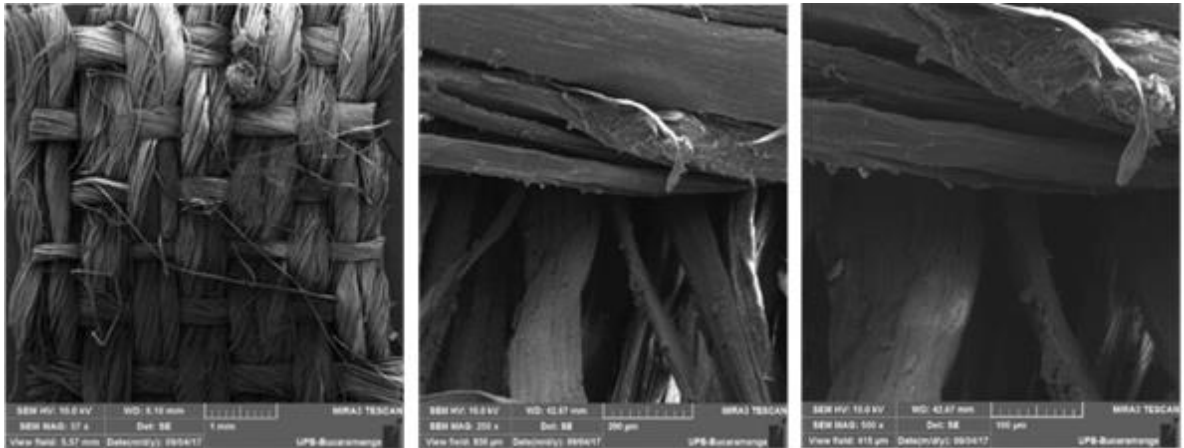
En la figura 55, se observan fibras cortas de fique que están distribuidas aleatoriamente, las mismas se unen debido a que se entrecruzan unas con otras. En algunas zonas se detalla que se cuenta con más densidad de fibra, lo que indica que es un material no homogéneo lo que afectó las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales que se fabricaron con este refuerzo como se observó en capítulo 4 y 5.



**Figura 55.** Análisis SEM fibra fique en configuración aleatoria

- **Fique en configuración tejido**

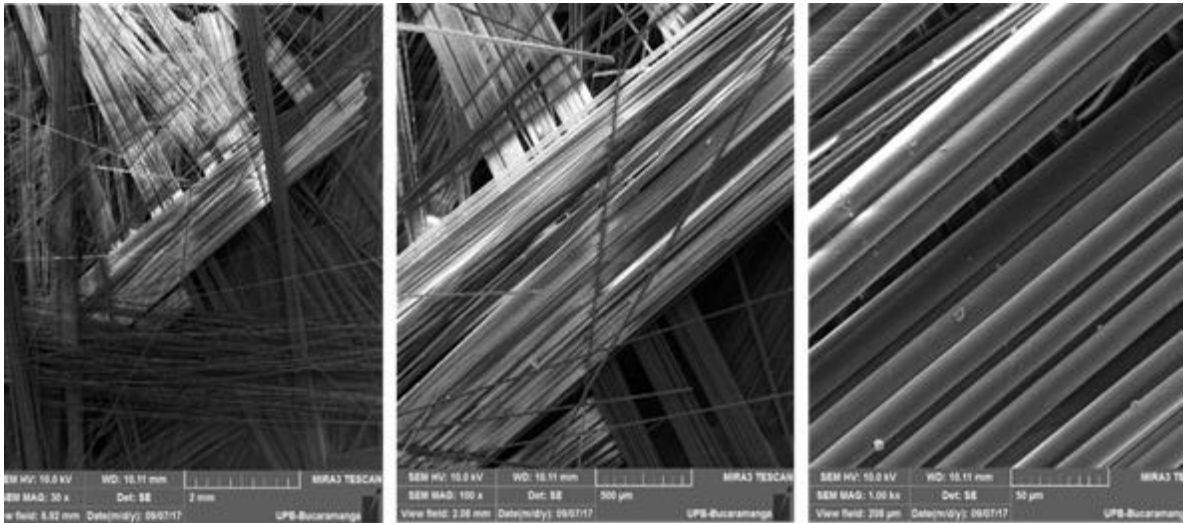
Como se observa en la figura 56 diversas fibras largas de fique se enrollan obteniéndose hilos. En el tejido verticalmente se distribuyeron dos hilos mientras que de manera horizontal solo uno, lo cual evidencia que el tejido no es equilibrado. Se observan algunos daños o cortes en la fibra de fique afectando posteriormente las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales que se fabricaron con este refuerzo como se observó en capítulo 4 y 5.



**Figura 56.** Análisis SEM fibra de fique configuración tejido

- **Fibra de vidrio**

En las figura 57 se observan fibras largas de vidrio las cuales están sobrepuestas por conjuntos en direcciones aleatorias, no se observan daños ni desviaciones en las fibras.



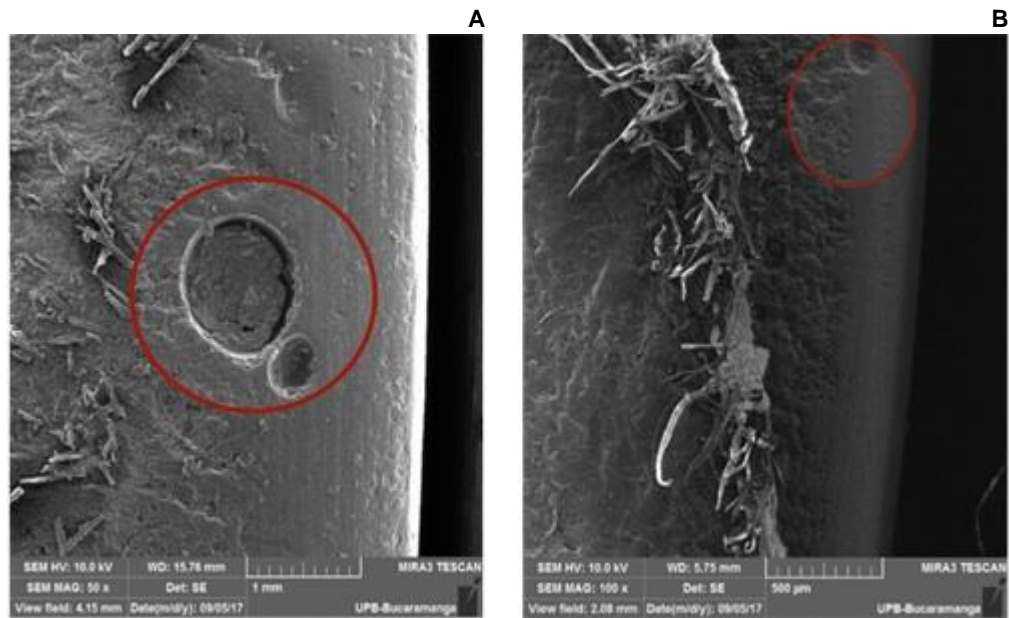
**Figura 57.** Análisis SEM fibra de vidrio

### 6.2.2 Materiales biocompuestos reforzados

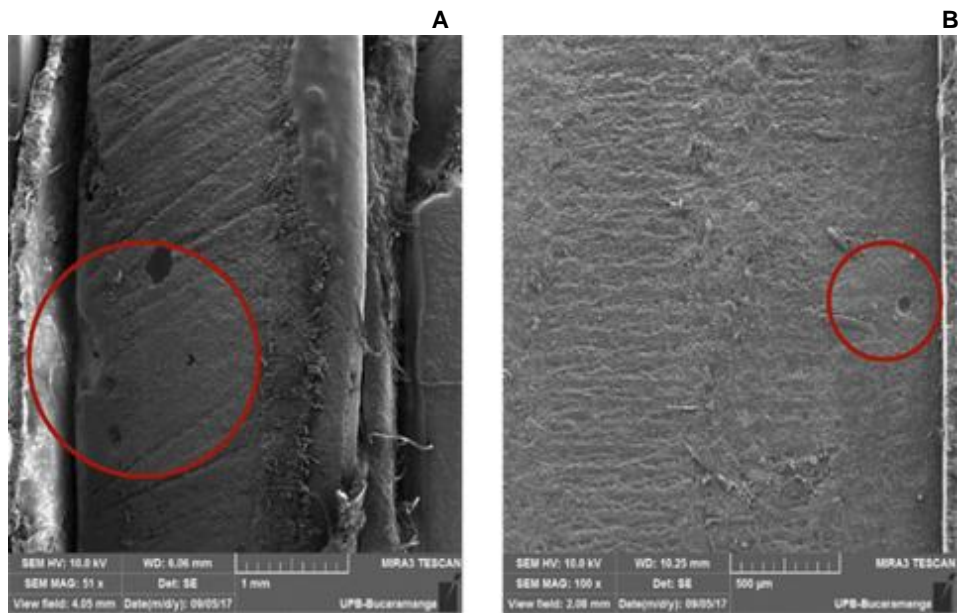
A continuación, se adjuntan los resultados de la topografía de los materiales compuestos reforzados con las fibras anteriormente mencionadas.

- **Compuesto Matriz termoestable poliéster con refuerzo fique en configuración aleatoria**

En las figuras 58 y 59 se observa porosidades en la matriz de los materiales con las distintas capas de fique. Como principal causa de estas microcavidades se atribuye al aire atrapado en el proceso de manufactura de infusión en vacío. Estos defectos afectaron las propiedades mecánicas y dinámica de los materiales ya que generaron concentradores de esfuerzos, que originan, el crecimiento de grietas y posterior falla del material como se observa en el capítulo 4 y capítulo 5.

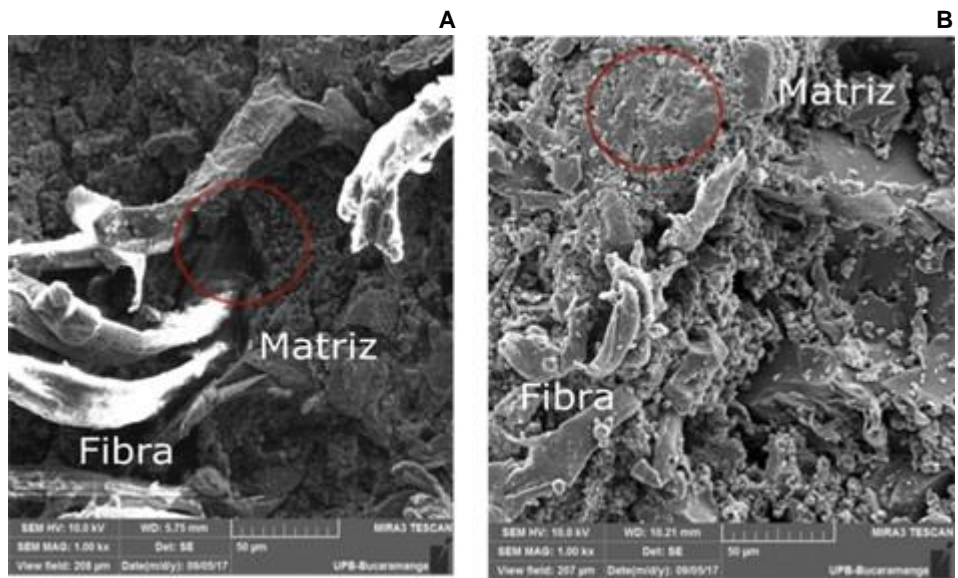


**Figura 58.** Porosidad Biocompuesto fique/poliéster A) Una capa B) Dos capas



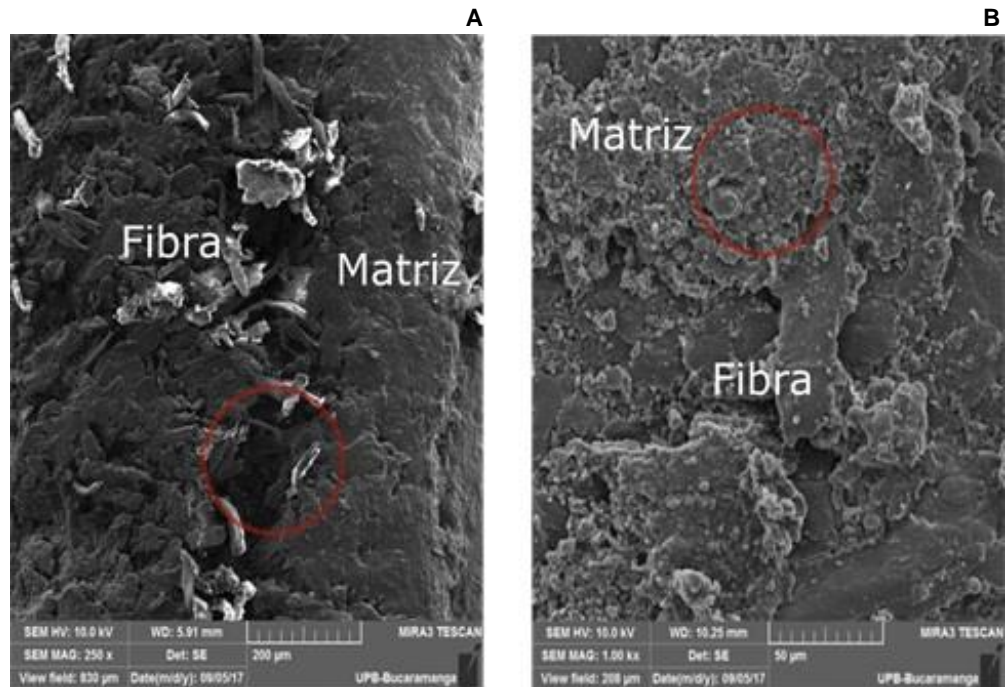
**Figura 59.** Porosidad SEM Biocompuesto fique/poliéster A) Tres capas B) Cuatro capas

A pesar de este fenómeno de porosidad se observa mediana adhesión de la matriz con la fibra, evidenciando algunos sectores con una buena unión fibra-matriz, mientras que en otros espacio, se muestran aglomeraciones de la matriz (Ver figura 60B y 61B) y espacios entre la resina y el fique (Ver figura 60A y 61A). Por otra parte, se observa que la superficie de los biocompuestos se compone de distintos niveles.



**Figura 60.** Adhesión SEM biocompuesto fique/poliéster a) Una capa b) Dos capas

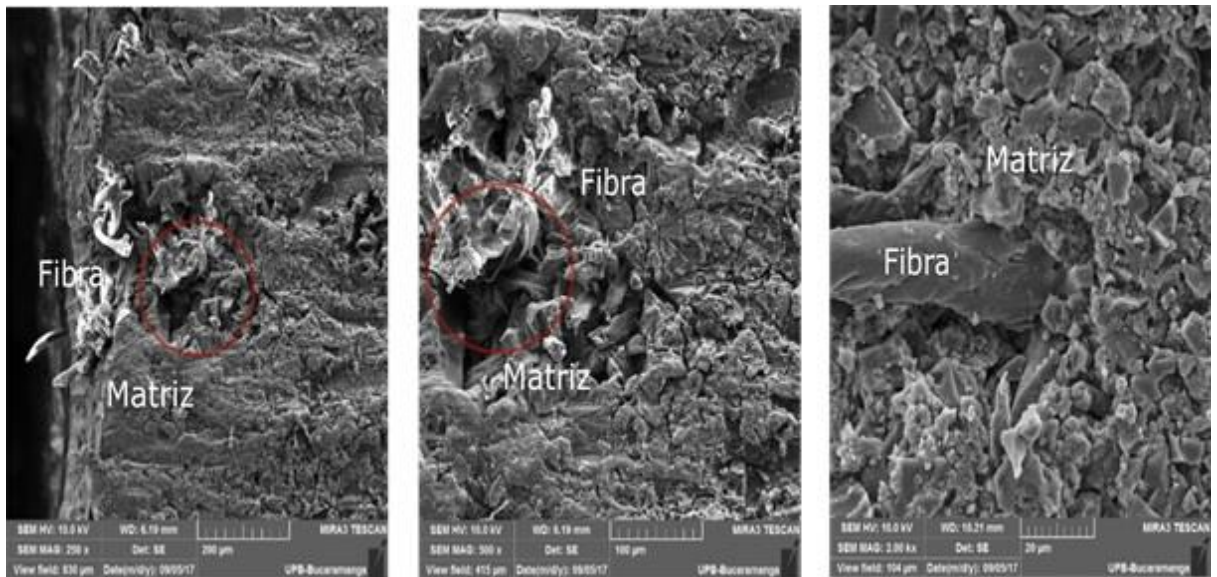




**Figura 61.** Adhesión SEM Biocompuesto figue/políester a) Tres capas b) Cuatro capas

- **Biocompuesto matriz bio-epoxy con refuerzo figue en configuración aleatoria**

La microestructura en la figura 62 del material del biocompuesto bioepoxy/figue en configuración aleatoria a diferentes aumentos permite observar que hubo una mediana adhesión, ya que en algunos puntos se observan espacios y huecos entre la fibra y la resina. Por otra parte, se observa que la superficie se compone de distintos niveles. Estas características afectaron las propiedades mecánicas y dinámicas analizadas en el capítulo 4 y 5 ya que no permitieron la transmisión de la tensión y la vibración entre la resina a la fibra.

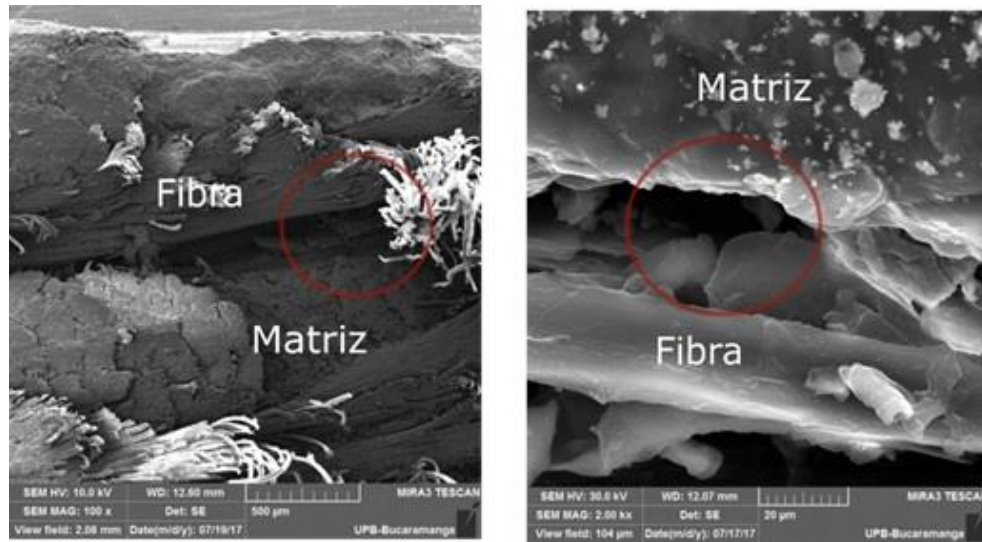


**Figura 62.** Análisis SEM biocompuesto fique/bioepoxy configuración aleatoria

- **Biocompuesto matriz bio-epoxy con refuerzo fique en configuración tejido**

En la figura 63 se observan las imágenes de la morfología del biocompuesto bioepoxy/figue en configuración de tejido a diferentes aumentos. De la microestructura se evidencia espacios entre los constituyentes de fibras de fique y la matriz, lo que indica que hubo una mediana adherencia. Esto se debe a la naturaleza hidrofóbica de la matriz y las características hidrofílicas de las fibras.



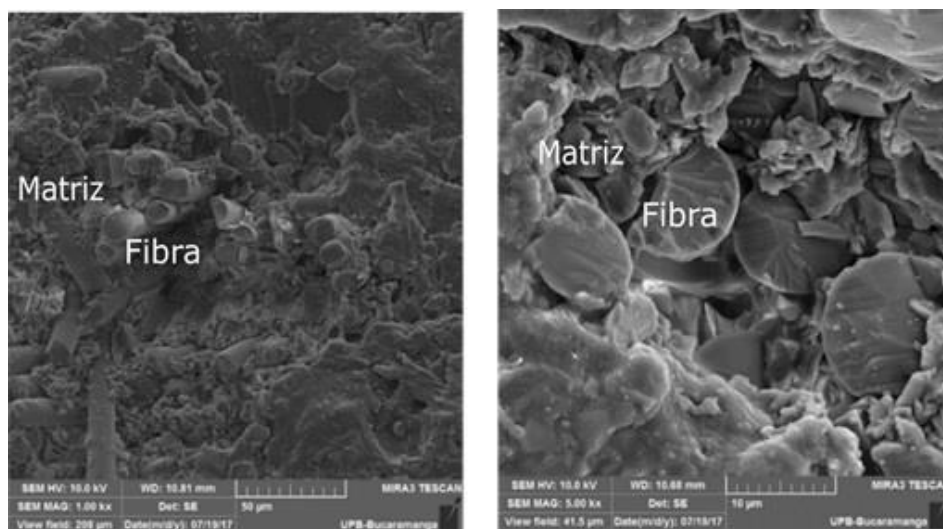


**Figura 63.** Análisis SEM biocompuesto fique/bioepoxy configuración tejido

Esta baja adherencia afectó las propiedades mecánicas y dinámicas del biocompuesto fique, como se observó en el capítulo 4 y capítulo 5, debido a la baja transmisión de la carga y vibración entre la resina a la fibra.

- **Compuesto matriz bio-epoxy con refuerzo vidrio**

Como se observa en la figura 64 las fibras de vidrio y la matriz tuvieron una buena adhesión notándose una mejor unión entre los dos componentes, esto permite que la carga de tensión se transmita a la fibra obteniéndose mejores propiedades mecánicas y dinámicas como se observó en el capítulo 4 y 5.



**Figura 64.** Análisis SEM compuesto fibra de vidrio

### 6.3 Conclusiones y discusión

En el análisis de la morfología mediante microscopía electrónica de barrido de los materiales compuestos estudiados en la presente investigación, se observó una buena adhesión entre la matriz de resina bioepoxy y fibra de vidrio. Como lo indica suresh et al [111] esto se debe al comportamiento polar de la fibra debido a los átomos iónicos de silicio y oxígeno los cuales son los responsables de la formación de una fuerte adhesión entre los componentes del compuesto.

Para los materiales biocompuestos reforzados con la fibra natural se obtuvieron aglomeraciones de la matriz, espacios y porosidades indicando mediana adherencia esto se debió en parte al proceso de manufactura (Afectado por el tiempo de pre impregnado y presión de la bomba, al curado realizado a temperatura ambiente), a la naturaleza hidrofóbica de la matriz y las características hidrofílicas de las fibras. Por tanto, se sugiere tener en cuenta estas variables a fin de obtener laminados libres de defectos. Igualmente, la falta de adhesión entre la fibra y la resina afectaron las propiedades mecánicas en tracción, obteniendo valores inferiores a los obtenidos con la fibra de vidrio. De igual forma, este fenómeno no permitió la transmisión de cargas y vibraciones entre la fibra y la matriz, en el cual se vieron alteradas las propiedades dinámicas del biocompuesto.

Para futuros trabajos se recomienda aplicar tratamientos químicos a la fibra con el fin de mejorar la adhesión entre los componentes como lo recomiendan Gañan [112].

## 7. CONCLUSIONES GENERALES

El proceso de manufactura infusión en vacío es una técnica que permite fabricar materiales biocompuestos con fibras naturales con una buena calidad y repetitividad ya que mejora la impregnación de las fibra natural y la resina termoestable favoreciendo la adhesión entre los componentes y al trabajarse en un molde cerrado disminuye las emisiones de gases que afectan al operador. Sin embargo se deben evaluar los parámetros como la presión de vacío y el tiempo de preimpregnado con el propósito de evitar porosidades internas que afecten las propiedades mecánicas del material.

Las propiedades mecánicas (Esfuerzo de tensión y Modulo de elasticidad) de los biocompuestos con fibras naturales aumentan a mayor cantidad de fibra natural utilizada como refuerzo debido a que aumentan su rigidez transmitiéndose mayor cantidad de carga de la matriz a la fibra. Por otra parte la orientación y longitud de las fibras del refuerzo afectan directamente el comportamiento mecánico obteniéndose mejores desempeño con mayor cantidad de fibras continuas (Largas) ubicadas en la dirección en que se aplique la fuerza.

Los biocompuestos con fibras naturales presentan un buen comportamiento mecánico sin embargo aún no superan las propiedades de los compuestos reforzados con fibras sintéticas debido a que estas últimas presentan una alta hidrofobicidad que conllevan a una mayor adhesión con la matriz polimérica.

El amortiguamiento presentado en los biocompuestos con fibras naturales, debido a la porosidad de las fibras, es superior al de los materiales convencionales presentando alta disipación de energía por vibraciones o impactos, lo que demuestra la importancia del estudio en este tipo de investigaciones para llegar al desarrollo de productos aisladores de vibración o sonido con este tipo de materiales.

Los parámetros modales de los materiales biocompuestos con fibras naturales incrementan su frecuencia natural y amortiguamiento con la cantidad de fibra natural utilizada como refuerzo debido a la rigidización del compuesto que se opone a la transmisión de la vibración. Esta característica es de suma importancia ya que permitirá en un futuro manufacturar piezas de maquinaria donde se podrá predecir o variar la frecuencia natural con la cantidad de refuerzo de fibra natural evitando que la misma entre en resonancia, sin necesidad de modificar la geometría de la pieza o el tipo de material como se realiza convencionalmente con los materiales industriales.

En los materiales biocompuestos con fibras naturales (sin tratamiento de las fibras) se presenta una mediana adhesión entre la fibra y la matriz debido a la naturaleza hidrofóbica de la matriz y las características hidrofílicas de las fibras naturales y a los defectos que se presentan en el momento de la manufactura del material. Esta particularidad afecta directamente las propiedades mecánicas y dinámicas de los mismos ya que no se permite la transmisión de la carga ni la vibración de la matriz a la fibra.

La fibra de fique puede ser utilizada como refuerzo natural para materiales biocompuestos ya que es de fácil aplicación en técnicas de manufactura como es la infusión en vacío y los materiales resultados de estos procesos de fabricación presenta propiedades mecánicas similares a otros elaborados con fibras naturales mucho más estudiadas.

## PRODUCTOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### PONENCIAS

- Medición de la respuesta en frecuencia de material biocompuesto reforzado con fibras de fique, I simposio internacional de ingeniería industrial "una mirada sostenible, universidad de pamplona, 29 septiembre 2016.
- Comparación de la respuesta vibratoria de un material biocompuesto de fique contra un material industrial, VIII Congreso internacional de ingeniería mecánica y mecatrónica y VI de materiales y medio ambiente, Universidad Nacional, 27 abril 2017.
- Analysis of the Dynamic Vibration of a Bio-Composite of Fique Vs. a Composite of Glass Fiber, III Congreso Internacional de ingeniería mecánica y ciencias de la agricultura, Universidad Pontificia Bolivariana, 3 octubre 2017.

### ARTÍCULOS

- Comparative study of the mechanical and vibratory properties of a composite reinforced with fique fibers versus a composite with E-glass fibers, Revista UIS Ingenieria, Universidad Industrial de Santander. Aceptado y publicado. disponible en:  
<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/6932/7185>
- Análisis modal de material compuesto de resina bioepoxy/fibra de fique, Revista entre Ciencia e ingeniería, Universidad Católica de Pereira. Sometido a revisión.
- Caracterización dinámica vibratoria experimental de compuesto reforzado con fibra natural de fique, Revista Iteckne, Universidad Santo Tomas. Sometido a revisión.

### FUTUROS TRABAJOS

- Análisis acústicos de los materiales ( Se están esperando los resultados del ensayo los cuales se realizaron en el Centro Nacional de metrología de México)
- Proyecto UPB- Pamplona fabricación y caracterización de materiales biocompuestos reforzados con fibras de caña de azúcar manufacturado mediante las técnicas de extrusión e inyección. (Esperando financiación interna de la UPB)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. K. Thakur and M. K. Thakur, "Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 109, pp. 102–117, 2014.
- [2] J. P. Torres, L.-J. Vandi, M. Veidt, and M. T. Heitzmann, "The mechanical properties of natural fibre composite laminates: A statistical study," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 98, pp. 99–104, 2017.
- [3] T. Vaisanen, O. Das, and L. Tomppo, "A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 582–596, 2017.
- [4] M. F. Muñoz, M. A. Hidalgo, and J. H. Mina, "Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial.," vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2014.
- [5] L. J. Rodríguez, W. A. Sarache, and C. E. Orrego, "Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*Musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*Furcraea andina*)," *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 5, pp. 27–34, 2014.
- [6] C. Gómez Hoyos and A. Vázquez, "Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3120–3130, 2012.
- [7] C. A. M. Valencia, J. F. Pazos-Ospina, E. E. Franco, J. L. Ealo, D. A. Collazos-Burbano, and G. F. C. Garcia, "Ultrasonic determination of the elastic constants of epoxy-natural fiber composites," *Phys. Procedia*, vol. 70, pp. 467–470, 2015.
- [8] D. P. Navia, A. A. Ayala, and H. S. Villada, "Effect of cassava flour gelatinization on mechanical properties of bioplastics," *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 13, no. 1, pp. 38–44, 2015.
- [9] M. A. Hidalgo-Salazar, J. H. Mina, and P. J. Herrera-Franco, "The effect of interfacial adhesion on the creep behaviour of LDPE-Al-Fique composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 345–351, 2013.
- [10] P. Gañán and I. Mondragon, "Influence of Compatibilization Treatments on the Mechanical Properties of Fique Fiber Reinforced Polypropylene Composites," *Int. J. Polym. Mater.*, vol. 53, no. 11, pp. 997–1013, 2004.
- [11] F. Klimenda and J. Soukup, "Modal Analysis of Thin Aluminium Plate," *Procedia Eng.*, vol. 177, pp. 11–16, 2017.

- [12] B. M. West *et al.*, “Modal analysis of metal additive manufactured parts,” *Manuf. Lett.*, vol. 13, pp. 30–33, 2017.
- [13] R. S. Minette, S. F. SilvaNeto, L. A. Vaz, and U. A. Monteiro, “Experimental modal analysis of electrical submersible pumps,” *Ocean Eng.*, vol. 124, pp. 168–179, 2016.
- [14] P. Weis, L. Kučera, P. Pecháč, and M. Močilan, “Modal Analysis of Gearbox Housing with Applied Load,” *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 953–958, 2017.
- [15] K. Senthil Kumar, I. Siva, P. Jeyaraj, J. T. Winowlin Jappes, S. C. Amico, and N. Rajini, “Synergy of fiber length and content on free vibration and damping behavior of natural fiber reinforced polyester composite beams,” *Mater. Des.*, vol. 56, no. October, pp. 379–386, 2014.
- [16] O. M. E. S. Khayal, “Literature review on imperfection of composite laminated plates,” *J. Microsc. Ultrastruct.*, vol. 5, no. 3, pp. 119–122, 2017.
- [17] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. CRC Press, 2005.
- [18] G. V Mahajan, V. S. Aher, P. G. Student, and I. Sangamner, “Composite Material: A Review over Current Development and Automotive Application,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 11, pp. 2250–3153, 2012.
- [19] P. S, S. KM, N. K, and S. S, “Fiber Reinforced Composites - A Review,” *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 3, 2017.
- [20] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers,” *Materials (Basel)*, vol. 2, no. 4, pp. 2369–2403, 2009.
- [21] T. J. Singh and S. Samanta, “Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 1381–1387, 2015.
- [22] S. Ben, J.-H. Zhao, Y. Zhang, Y. Qin, and T. Rabczuk, “The interface strength and debonding for composite structures: Review and recent developments,” *Compos. Struct.*, vol. 129, 2015.
- [23] K. K. Chawla, *Composite Materials, Science and engineering*, Third edit. Springer, 2012.
- [24] S. R. Lady Joana, “Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano,” Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [25] K. Majeed *et al.*, “Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 391–410, 2013.
- [26] U. S. Bongarde and V. . . Shinde, “Review on natural fiber reinforcement polymer composites,” *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 431–

436, 2014.

- [27] M. A. Hidalgo, M. F. Muñoz, and K. J. Quintana, “Desempeño mecánico del compuesto polietileno-aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique,” vol. 31, no. 2, pp. 187–194, 2011.
- [28] S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur, “Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, p. 1253–1272., 2009.
- [29] M. M. Kabir, H. Wang, T. Aravinthan, F. Cardona, and K.-T. Lau, “Effects of Natural Fibre Surface on Composite Properties : a Review,” *Energy, Environ. Sustain.*, no. January, pp. 94–99, 2007.
- [30] R. M. ROWELL, “1 - Natural fibres: types and properties,” in *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, K. L. Pickering, Ed. Woodhead Publishing, 2008, pp. 3–66.
- [31] M. S. Salit, “Tropical Natural Fibres and Their Properties,” in *Tropical Natural Fibre Composites: Properties, Manufacture and Applications*, Singapore: Springer Singapore, 2014, pp. 15–38.
- [32] J. E. Peinado, L. F. Ospina, L. Rodríguez, J. Miller, C. Carvajal, and R. Negrete, *Guía ambiental del subsector fiqueero*, vol. 2. 2006.
- [33] P. Gañán and I. Mondragon, “Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties,” *Polym. Compos.*, vol. 23, no. 3, pp. 383–394, 2002.
- [34] J. Holbery and D. Houston, “Natural-fibre-reinforced polymer composites in automotive applications,” *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 58, no. 11, pp. 80–86, 2006.
- [35] R. D. S. G. Campilho, *Natural Fiber Composites*. Taylor & Francis, 2015.
- [36] R. D. J. Johnson, V. A. Prabu, P. Amuthakkannan, and K. A. Prasath, “A review on biocomposites and bioresin based composites for potential industrial applications,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 112–121, 2017.
- [37] D. dos S. Rosa and D. M. Lenz, “Biocomposites: Influence of Matrix Nature and Additives on the Properties and Biodegradation Behaviour,” in *Biodegradation - Engineering and Technology*, R. Chamy and F. Rosenkranz, Eds. Rijeka: InTech, 2013.
- [38] S. M. Sapuan and N. Bin Yusoff, “The Relationship Between Manufacturing and Design for Manufacturing in Product Development of Natural Fibre Composites,” in *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, M. S. Salit, M. Jawaid, N. Bin Yusoff, and M. E. Hoque, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 1–15.



- [39] J. Summerscales and S. Grove, "7 - Manufacturing methods for natural fibre composites," in *Natural Fibre Composites*, A. Hodzic and R. Shanks, Eds. Woodhead Publishing, 2014, pp. 176–215.
- [40] M. Arifur Rahman, F. Parvin, M. Hasan, and M. E. Hoque, "Introduction to Manufacturing of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites," in *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, M. S. Salit, M. Jawaid, N. Bin Yusoff, and M. E. Hoque, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 17–43.
- [41] A. K. Rana, A. Mandal, and S. Bandyopadhyay, "Short jute fiber reinforced polypropylene composites: Effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 6, pp. 801–806, 2003.
- [42] S. M. Khoshnava, R. Rostami, M. Ismail, A. R. Rahmat, and B. E. Ogunbode, "Woven hybrid Biocomposite: Mechanical properties of woven kenaf bast fibre/oil palm empty fruit bunches hybrid reinforced poly hydroxybutyrate biocomposite as non-structural building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 155–166, 2017.
- [43] M. Iorio, M. L. Santarelli, G. González-Gaitano, and J. González-Benito, "Surface modification and characterization of basalt fibers as potential reinforcement of concretes," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 427, pp. 1248–1256, 2018.
- [44] F. Corrales, F. Vilaseca, M. Llop, J. Gironès, J. A. Méndez, and P. Mutjè, "Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites," *J. Hazard. Mater.*, vol. 144, no. 3, pp. 730–735, 2007.
- [45] M. Li, S. Zhou, and X. Guo, "Effects of alkali-treated bamboo fibers on the morphology and mechanical properties of oil well cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 619–625, 2017.
- [46] H. Abdellaoui, H. Bensalah, M. Raji, D. Rodrigue, R. Bouhfid, and A. el kacem Qaiss, "Laminated Epoxy Biocomposites Based on Clay and Jute Fibers," *J. Bionic Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 379–389, 2017.
- [47] W. Kim and A. Argento, "11 - High strain rate testing of natural fiber composites," in *Natural Fibre Composites*, A. Hodzic and R. Shanks, Eds. Woodhead Publishing, 2014, pp. 303–322.
- [48] P. J. HERRERA-FRANCO and A. VALADEZ-GONZALEZ, "12 - Mechanical testing of natural-fiber composites," in *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, K. L. Pickering, Ed. Woodhead Publishing, 2008, pp. 375–401.
- [49] H. Ghasemnejad and A. Aboutorabi, "13 - The response of natural fibre composites to impact damage: a case study," in *Natural Fibre Composites*, A. Hodzic and R. Shanks, Eds. Woodhead Publishing, 2014, pp. 345–364.

- [50] M. S. Islam, K. L. Pickering, and N. J. Foreman, "Influence of alkali treatment on the interfacial and physico-mechanical properties of industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 5, pp. 596–603, 2010.
- [51] N. Graupner and J. Müssig, "A comparison of the mechanical characteristics of kenaf and lyocell fibre reinforced poly(lactic acid) (PLA) and poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 12, pp. 2010–2019, 2011.
- [52] M. Khalfallah *et al.*, "Innovative flax tapes reinforced Acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications," *Mater. Des.*, vol. 64, pp. 116–126, 2014.
- [53] E. Rodríguez, R. Petrucci, D. Puglia, J. M. Kenny, and A. Vázquez, "Characterization of Composites Based on Natural and Glass Fibers Obtained by Vacuum Infusion," *J. Compos. Mater.*, vol. 39, no. 3, pp. 265–282, 2005.
- [54] B. Baghaei, M. Skrifvars, and L. Berglin, "Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 50, pp. 93–101, 2013.
- [55] A. K. Rana, A. Mandal, B. C. Mitra, R. Jacobson, R. Rowell, and A. N. Banerjee, "Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Effect of compatibilizer," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 69, no. 2, pp. 329–338, 1998.
- [56] M. Zampaloni *et al.*, "Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 6, pp. 1569–1580, 2007.
- [57] A. K. Bledzki, A. A. Mamun, M. Lucka-Gabor, and V. S. Gutowski, "The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites," *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp. 413–422, 2008.
- [58] R. Karim, M. Fahim Rahman, M. Hasan, S. Islam, and A. Hassan, "Effect of Fiber Loading and Alkali Treatment on Physical and Mechanical Properties of Bagasse Fiber Reinforced Polypropylene Composites," *J. Polym. Mater.*, vol. 30, pp. 423–433, 2013.
- [59] E. M. Fernandes, V. M. Correlo, J. F. Mano, and R. L. Reis, "Cork–polymer biocomposites: Mechanical, structural and thermal properties," *Mater. Des.*, vol. 82, no. Supplement C, pp. 282–289, 2015.
- [60] N. Saba *et al.*, "Thermal and dynamic mechanical properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 102, pp. 822–828, 2017.
- [61] G. Dorez, A. Taguet, L. Ferry, and J. M. Lopez-Cuesta, "Thermal and fire behavior of natural fibers/PBS biocomposites," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 98,

no. 1, pp. 87–95, 2013.

- [62] F. Shukor, A. Hassan, M. Saiful Islam, M. Mokhtar, and M. Hasan, “Effect of ammonium polyphosphate on flame retardancy, thermal stability and mechanical properties of alkali treated kenaf fiber filled PLA biocomposites,” *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 425–429, 2014.
- [63] A. Elkhaoulani, F. Z. Arrakhiz, K. Benmoussa, R. Bouhfid, and A. Qaiss, “Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene,” *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 203–208, 2013.
- [64] B. F. Abu-Sharkh and H. Hamid, “Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: Mechanical and thermal analysis,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 85, pp. 967–973, 2004.
- [65] A. Khalina, R. A. Talib, and I. S. M. A. Tawakkal, “The Influence of Mercerised Kenaf Fibres Reinforced Polylactic Acid Composites on Dynamic Mechanical Analysis,” in *Composite Science and Technology*, 2011, vol. 471, pp. 815–820.
- [66] M. A. López-Manchado and M. Arroyo, “Thermal and dynamic mechanical properties of polypropylene and short organic fiber composites,” *Polymer (Guildf)*, vol. 41, no. 21, pp. 7761–7767, 2000.
- [67] M. John, B. Francis, S. Thomas, and K. Varughese, “Dynamical mechanical analysis of sisal/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites,” *Polym. Compos.*, vol. 27, pp. 671–680, 2006.
- [68] N. Saba, M. Jawaid, O. Alothman, and P. M. Tahir, “A Review on Dynamic mechanical analysis of natural fibre reinforced polymer composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, 2015.
- [69] J. He and Z.-F. Fu, “3 - Basic vibration theory,” in *Modal Analysis*, J. He and Z.-F. Fu, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 49–78.
- [70] B. Balachandran and E. B. Magrab, *Vibraciones*. Paraninfo, 2006.
- [71] M. Abdel Wahab, *Dynamics and vibration: an introduction*. John Wiley, 2008.
- [72] J.-M. Berthelot, “Damping Analysis of Orthotropic Composites with Interleaved Viscoelastic Layers: Modeling,” *J. Compos. Mater. - J Compos MATER*, vol. 40, pp. 1889–1909, 2006.
- [73] J. Pitchaimani, N. Ganesan, and C. Padmanabhan, “Vibration and acoustic response of a composite plate with inherent material damping in a thermal environment,” *J. Sound Vib.*, vol. 320, pp. 322–338, 2009.
- [74] R. Chandra, S. P. Singh, and K. Gupta, “Damping studies in fiber-reinforced composites - a review,” *Compos. Struct.*, vol. 46, no. 1, pp. 41–51, 1999.

- [75] F. Cakir and H. Uysal, "Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepreg composites," *J. Cult. Herit.*, vol. 16, no. 3, pp. 284–292, 2015.
- [76] T. I. Thinh and T. H. Quoc, "Finite element modeling and experimental study on bending and vibration of laminated stiffened glass fiber/polyester composite plates," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 4 SUPPL., pp. S383–S389, 2010.
- [77] V. C. Ioan Curtu, Mariana Domnica Stanciu, "The Modal Analysis of Plates Made of Woven Composite Materials," *Bul. AGIR nr.*, vol. 8204, no. 1, pp. 2–5, 2011.
- [78] G. M. Mota, P. Sollero, F. B. Batista, and E. L. Albuquerque, "Modal Analysis Technique for Anisotropic Composite," vol. 7, no. 2, pp. 95–100, 2008.
- [79] S. H. Zhang and H. L. Chen, "A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers," *Compos. Struct.*, vol. 74, no. 1, pp. 63–69, 2006.
- [80] D. X. Lin, R. G. Ni, and R. D. Adams, "Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastics Plates," *J. Compos. Mater.*, vol. 18, no. 2, pp. 132–152, 1984.
- [81] E. F. Crawley, "The Natural Modes of Graphite/Epoxy Cantilever Plates and Shells," *J. Compos. Mater.*, vol. 13, no. 3, pp. 195–205, 1979.
- [82] É. L. Oliveira, N. M. M. Maia, A. G. Marto, R. G. A. da Silva, F. J. Afonso, and A. Suleman, "Modal characterization of composite flat plate models using piezoelectric transducers," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 79, pp. 16–29, 2016.
- [83] M. Rajesh and J. Pitchaimani, "Dynamic mechanical analysis and free vibration behavior of intra-ply woven natural fiber hybrid polymer composite," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 3, pp. 228–242, 2016.
- [84] D. A. Akash, N. . Thyagaraj, and L. . Sudev, "Experimental study of dynamic behaviour of hybrid jute/sisal fibre reinforced polyester composites," *Int. J. Sci. Eng. Appl.*, vol. 2, no. 8, pp. 170–172, 2013.
- [85] M. Rajesh, K. Hemanth, R. Prabhu, S. M. C, and K. G. Binu, "Processing and Testing of Hybrid Sandwich Composites for Vibration Damping and Mechanical Properties," vol. 6, pp. 22–27, 2016.
- [86] A. Savin, I. Curtu, and M. Stanciu, "Modal Analysis of lignocelluloses based composite materials," *40th Int. Conf. Mech. Solids, Acoust. Vib. 6th Int. Conf. "Advanced Compos. Mater. Eng.*, pp. 278–283, 2016.
- [87] G. Genc and H. Koruk, "Identification of the Dynamic Characteristics of Luffa Fiber Reinforced Bio-Composite Plates," *Bioresources*, vol. 12, pp. 5358–5368, 2017.

- [88] D. C. Darrow, P. A. Propatic, and T. H. Brayden Jr, "Elimination of mold surface porosity on composite parts," *J. Adv. Mater.*, vol. 27, pp. 41–46, 1995.
- [89] L. Hamill, T. Centea, G. Nilakantan, and S. Nutt, "Surface Porosity in Out-of-Autoclave Prepreg Processing: Causes and Reduction Strategies," *International SAMPE Technical Conference*. 2014.
- [90] M. L. Herring, J. I. Mardel, and B. L. Fox, "The effect of material selection and manufacturing process on the surface finish of carbon fibre composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 6–7, pp. 926–940, 2010.
- [91] M. L. Herring and B. L. Fox, "The effect of a rapid curing process on the surface finish of a carbon fibre epoxy composite," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 5, pp. 1035–1043, 2011.
- [92] L. Hamill, T. Centea, and S. Nutt, "Surface porosity during vacuum bag-only prepreg processing: Causes and mitigation strategies," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 75, pp. 1–10, 2015.
- [93] M. Hidalgo, M. Muñoz, and K. Quintana, "Análisis Mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional," *Rev. Lat. Met.*, vol. 32, no. 1, pp. 89–95, 2012.
- [94] P. Gañán and I. Mondragon, "Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 73, no. 3, pp. 783–795, 2003.
- [95] M. A. Hidalgo-Salazar, M. F. Muñoz, and J. H. Mina, "Influence of Incorporation of Natural Fibers on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Composites LDPE-Al Reinforced with Fique Fibers," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015.
- [96] P. Gañán and I. Mondragon, "Fique fiber-reinforced polyester composites: Effects of fiber surface treatments on mechanical behavior," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, pp. 3121–3128, 2004.
- [97] D. P. Navia, A. A. Ayala, and H. S. Villada, "Determinación de isotermas de adsorción de agua en biocompuestos de harina termoplastica y fique," *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroind.*, vol. 11, no. 1, pp. 144–154, 2013.
- [98] S. D. Arjona, F. Perdomo, and R. M. De Gutiérrez, "Ecolaminados de pead-fibras de fique," *Junio*, vol. 3, no. N° 1, pp. 43–50, 2001.
- [99] D. P. Navia, A. A. Ayala, and H. S. Villada, "Biocompuestos de harina de yuca obtenidos por termo- compresión. efecto de las condiciones de proceso," *Inf. Tecnol.*, vol. 26, no. 5, pp. 55–62, 2015.
- [100] D. P. Navia, A. A. Ayala, and H. S. Villada, "Adsorción de vapor de agua Bioplastios elaborados con Harina de dos variedades de yuca," *Inf. Tecnol.*, vol. 25, pp. 23–32, 2014.

- [101] D. P. Navia, H. S. Villada, and A. A. Ayala, "Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca," *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroind.*, vol. 2, no. 2, pp. 77–85, 2013.
- [102] P. Ganan, "Effect of Fiber Treatments on Mechanical Behavior of Short Figue Fiber-reinforced Polyacetal Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 39, no. 7, pp. 633–646, 2005.
- [103] F. Ramón Valencia, A. Lopez-Arraiza, J. I. Múgica, J. Aurrekoetxea, J. C. Suarez, and B. Ramón-Valencia, "Influence of seawater immersion in low energy impact behavior of a novel colombian figue fiber reinforced bio-resin laminate," *Dyna*, vol. 82, no. 194, pp. 170–177, 2015.
- [104] M. Sumaila, I. Amber, and M. Bawa, "Effect of Fiber Length on the Physical and Mechanical Properties of Random Orinted, Nonwoven Short Banana (Musa," *Cellulose*, vol. 2, no. 1, pp. 39–49, 2013.
- [105] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 98–112, 2015.
- [106] D. P. Navia, "Desarrollo de un Material para empaques de alimentos a partir de harina de yuca y fibras de fique.," Universidad del Valle, Santiago de cali, Colombia, 2011.
- [107] S. Han, H. Benaroya, and T. Wei, "Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories," *J. Sound Vib.*, vol. 225, no. 5, pp. 935–988, 1999.
- [108] H. Mendoza-Nava, M. Talavera-Ortega, F. de los Santos, S. Mendoza-Facio, and O. Jimenez-Arévalo, "Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono fabricados por el método de infusión para aplicaciones aeronáuticas," *Memorias del XX Congr. Int. Anu. la SOMIM*, no. October, 2014.
- [109] M. Rajesh and J. Pitchaimani, "Dynamic mechanical analysis and free vibration behavior of intra-ply woven natural fiber hybrid polymer composite," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 3, pp. 228–242, 2016.
- [110] N. Mendes, "Extraction of valid modal properties from measured data in structural vibrations," University of london, 1988.
- [111] G. Suresh and L. S. Jayakumari, "Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks," *Polim. E Tecnol.*, vol. 25, no. 1, pp. 49–57, 2015.
- [112] C. Gómez Hoyos, V. A. Alvarez, P. G. Rojo, and A. Vázquez, "Figue fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application," *Fibers Polym.*, vol. 13, no. 5, pp. 632–640, 2012.

## ANEXOS

### ANEXO A. Fichas técnicas de las resinas utilizadas

#### Ficha técnica

#### Resina Poliéster

##### Propiedades mecánicas del grado de curado de la resina

Dureza Barcol	60	EN 59
Resistencia a la flexión	140 Mpa	EN 63
E-Módulo, flexión	3800 Mpa	EN 63
Resistencia a la tensión	80 Mpa	EN 61
E-Módulo, tensión	3800 Mpa	EN 61
HDT	75 °C	EN ISO 75 A

##### Propiedades mecánicas de resina reforzada (vidrio/resina 30/70)

Resistencia a la flexión	210 Mpa	EN 63
E-Módulo, flexión	7900 Mpa	EN 63
Resistencia a la tensión	100 Mpa	EN 61
E-Módulo, tensión	8300 Mpa	EN 61

#### Condiciones de almacenaje

El producto tiene una estabilidad de 3 meses, tiene que ser almacenado en recipientes de acero inoxidable o envases acolchados (totalmente prohibidos recipientes de fibra de vidrio o de hojalata), a 20 °C temperatura, en un lugar oscuro/ventilado. Hay que mantener fuera de contacto con sales de hierro y cobre, peróxidos orgánicos e inorgánicos. Es aconsejable agitar el producto antes de su uso.

#### Seguridad

El producto es inflamable y nocivo.

Más información en las fichas de seguridad.

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

#### SECTION 1: Identification

**Material name:** Super Sap BRT Epoxy Resin  
**Trade Name:** Super Sap BRT Epoxy Resin  
**Product code:** 11\_CCR  
**Recommended use of the product and restriction on use:**  
Modified liquid epoxy resin.



#### Manufacturer or supplier details

<b>Manufacturer:</b>	<b>Supplier:</b>
Entropy Resins, Inc.	(Europe / Africa / Middle East)
30621 San Antonio St.	Ferrer-Dalmau
Hayward, CA 94544 USA	Rosalía de Castro 21
1-310-882-2120	08025 Barcelona, Spain
info@entropyresins.com	+34 93 487 40 15
	info@entropyresins.eu

**Emergency telephone number:**  
**3E Company**  
Inside USA: 1-760-476-3962  
International / not specified: 1-760-476-3962  
**National Chemical Emergency Helpline**  
Inside China: +86-0532-8388-9090

#### SECTION 2: Hazard(s) identification

**GHS classification:**  
Skin irritation, category 2.  
Eye irritation, category 2A.  
Skin sensitization, category 1.  
Chronic aquatic hazard, category 2.

#### Label elements

##### Hazard pictograms:



**Signal word:** Warning

**Hazard statements:**  
H315 Causes skin irritation.  
H317 May cause an allergic skin reaction.  
H319 Causes serious eye irritation.  
H411 Toxic to aquatic life with long lasting effects.

**Precautionary statements:**  
P261 Avoid breathing dust/fume/gas/mist/vapors/spray.  
P264 Wash skin thoroughly after handling.



## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

P272 Contaminated work clothing should not be allowed out of the workplace.  
P273 Avoid release to the environment.  
P280 Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.  
P302+P352 If on skin: Wash with soap and water.  
P305+P351+P338 If in eyes: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses if present and easy to do. Continue rinsing.  
P321 Specific treatment (see supplemental first aid instructions on this label).  
P333+P313 If skin irritation or a rash occurs: Get medical advice/attention.  
P362 Take off contaminated clothing and wash before reuse.  
P391 Collect spillage.  
P501 Dispose of contents and container as instructed in Section 13.

Hazards not otherwise classified: None

### SECTION 3: Composition/information on ingredients

Identification	Name	Wt. %
CAS number: 25068-38-6	Reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin); epoxy resin	85-95
CAS number: 100-51-6	Benzyl Alcohol	<10
CAS number: 57834-33-0	Benzoic acid, 4-[[[(methylphenylamino)methylene]amino]-ethyl ester	<10
CAS number: 68609-97-2	Alkyl (C12-14) glycidyl ether	<10

### SECTION 4: First aid measures

#### Description of first aid measures

##### After inhalation:

Loosen clothing as necessary and position individual in a comfortable position.  
Maintain an unobstructed airway.  
Get medical advice/attention if you feel unwell.

##### After skin contact:

Wash affected area with soap and water.  
Seek medical attention if symptoms develop or persist.

##### After eye contact:

Rinse/flush exposed eye(s) gently using water for 15-20 minutes.  
Remove contact lens(es) if able to do so during rinsing.  
Seek medical attention if irritation persists or if concerned.

##### After swallowing:

Rinse mouth and then drink plenty of water.  
Do not induce vomiting.  
Get medical advice/attention if you feel unwell.

#### Most important symptoms and effects, both acute and delayed

Generated by SDSPublisher (patent-pending) www.GSMSDS.com, 1-813-435-5161

Page 2 of 9

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

**Acute symptoms:**

No information available.

**Delayed symptoms:**

No information available.

**Immediate medical attention and special treatment:**

No information available.

### SECTION 5: Firefighting measures

**Extinguishing media****Suitable extinguishing media:**

Use appropriate fire suppression agents for adjacent combustible materials or sources of ignition.

**Unsuitable extinguishing media:**

No information available.

**Specific hazards during fire-fighting:**

Thermal decomposition can lead to release of irritating gases and vapors.

**Special protective equipment for firefighters:**

Wear protective eye wear, gloves and clothing.

Refer to Section 8.

Use typical firefighting equipment, self-contained breathing apparatus, special tightly sealed suit.

**Additional information:**

Heating causes a rise in pressure, risk of bursting and combustion.

Shut off sources of ignition.

Carbon monoxide and carbon dioxide may form upon combustion.

### SECTION 6: Accidental release measures

**Personal precautions, protective equipment and emergency procedures:**

Ensure adequate ventilation.

Ensure air handling systems are operational.

Wear protective eye wear, gloves and clothing.

**Environmental precautions:**

Should not be released into the environment.

Prevent from reaching drains, sewer or waterway.

**Methods and material for containment and cleaning up:**

Absorb with non-combustible liquid-binding material (sand, diatomaceous earth (clay) , acid binders, universal binders).

Dispose of contents / container in accordance with local regulations.

**Reference to other sections:**

None

### SECTION 7: Handling and storage

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

#### Precautions for safe handling:

Do not eat, drink, smoke or use personal products when handling chemical substances.  
Avoid breathing mist or vapor.  
Use only with adequate ventilation.

#### Conditions for safe storage, including any incompatibilities:

Store in a cool, well-ventilated area.  
Store away from foodstuffs.

### SECTION 8: Exposure controls/personal protection

#### Components with workplace control parameters:

Component name	Identifier	Permissible concentration
Benzyl Alcohol	100-51-6	WEEL TWA 10.0 ppm

#### Appropriate engineering controls:

Emergency eye wash fountains and safety showers should be available in the immediate vicinity of use or handling.  
Provide exhaust ventilation or other engineering controls to keep the airborne concentrations of vapor and mists below the applicable workplace exposure limits (Occupational Exposure Limits-OELs) indicated above.

#### Respiratory protection:

When necessary, use NIOSH-approved breathing equipment.

#### Eye protection:

Safety goggles or glasses, or appropriate eye protection.

#### Skin and body protection:

Select glove material impermeable and resistant to the substance.

#### General hygienic measures:

Wash hands before breaks and at the end of work.  
Avoid contact with skin, eyes and clothing.  
Perform routine housekeeping.  
Wash contaminated clothing before reusing.

### SECTION 9: Physical and chemical properties

Appearance (physical state, color):	Clear/pale yellow liquid	Explosion limit lower: Explosion limit upper:	Not determined or not available. Not determined or not available.
Odor:	Slight	Vapor pressure:	Not determined or not available.
Odor threshold:	Not determined or not available.	Vapor density:	Not determined or not available.

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

<b>pH-value:</b>	Not determined or not available.	<b>Relative density:</b>	Not determined or not available.
<b>Melting/Freezing point:</b>	Not determined or not available.	<b>Solubilities:</b>	Negligible
<b>Boiling point/range:</b>	Not determined or not available.	<b>Partition coefficient (n-octanol/water):</b>	Not determined or not available.
<b>Flash point (closed cup):</b>	> 200°C (> 392°F)	<b>Auto/Self-ignition temperature:</b>	Not determined or not available.
<b>Evaporation rate:</b>	Not determined or not available.	<b>Decomposition temperature:</b>	Not determined or not available.
<b>Flammability (solid, gaseous):</b>	Not determined or not available.	<b>Dynamic viscosity:</b>	8 - 13 Pa·s @ 25°C
<b>Density:</b>	1100 - 1200 kg/m <sup>3</sup> @ 25°C	<b>Kinematic viscosity:</b>	Not determined or not available.

### SECTION 10: Stability and reactivity

**Reactivity:**

Does not react under normal conditions of use and storage.

**Chemical stability:**

Stable under normal conditions of use and storage.

**Possibility of hazardous reactions:**

None under normal conditions of use and storage.

**Conditions to avoid:**

None known.

**Incompatible materials:**

None known.

**Hazardous decomposition products:**

None known.

### SECTION 11: Toxicological information

**Exposure routes:**

No information available.

**Acute toxicity:**

**Oral:**

Reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin); epoxy resin: LD50 Rat 13,800 mg/kg.

Benzyl Alcohol: LD50 Rat 1,230 mg/kg.

**Skin corrosion/irritation:**

Benzyl Alcohol BLK: Rabbit No skin irritation 24h.

**Serious eye damage/irritation:**

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

Benzyl Alcohol BLK: Rabbit Eye irritation 24h.

**Respiratory or skin sensitization:**

No information available.

**Carcinogenicity:**

No information available.

**IARC (International Agency for Research on Cancer):**

None of the ingredients are listed.

**NTP (National Toxicology Program):**

None of the ingredients are listed.

**Germ cell mutagenicity:**

No information available.

**Reproductive toxicity:**

No information available.

**STOT-single and repeated exposure:**

No information available.

**Aspiration toxicity:**

No information available.

**Additional toxicological information**

No information available.

### SECTION 12: Ecological information

**Ecotoxicity:**

Benzyl Alcohol: Fish, LC50 - Lepomis macrochirus (Bluegill) - 10 mg/l - 96 h.

Benzyl Alcohol: Aquatic invertebrates, EC50 - Daphnia magna (Water flea) - 55 mg/l - 24 h.

**Persistence and degradability:**

No information available.

**Bioaccumulative potential:**

No information available.

**Mobility in soil:**

No information available.

**Other adverse effects:**

No information available.

### SECTION 13: Disposal considerations

**Disposal methods:**

It is the responsibility of the waste generator to properly characterize all waste materials according to applicable regulatory entities. (US 40CFR262.11).

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200


Effective date: 03.11.2016

Super Sap BRT Epoxy Resin

### SECTION 14: Transportation information


#### Land transport:

##### DOT (49 CFR) transport

<b>UN Number:</b>	3082
<b>UN Proper shipping name:</b>	Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (Reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin); epoxy resin)
<b>UN Transport hazard classes:</b>	9
<b>Packing group:</b>	III
<b>Danger label:</b>	9 Miscellaneous dangerous substances and articles 
<b>Environmental hazards:</b>	Yes
<b>Special precautions for user:</b>	The DOT regulations above apply to Non-Bulk shipments only. Product is not regulated for air, rail and motor vehicle packages less than 119 gal (450 L). Product is regulated by vessel. 49 CFR / Highway, Rail & US Air Transport: Not Regulated per 49 CFR Regulation 171.4 Paragraph C and 172.101 Appendix B.
<b>Limited quantity:</b>	5L

#### Air transport:

##### IATA-DGR

<b>UN Number:</b>	3082
<b>UN Proper shipping name:</b>	Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (Reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin); epoxy resin)
<b>UN Transport hazard classes:</b>	9
<b>Packing group:</b>	III
<b>Danger label:</b>	9 Miscellaneous dangerous substances and articles 
<b>Environmental hazards:</b>	Yes
<b>Special precautions for user:</b>	None
<b>Limited quantity:</b>	30 kg G (Passenger and cargo aircraft) - Pkg Inst.:



## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200


Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

Quantity exception:	Y964 E1
---------------------	------------

#### Sea transport:

##### IMDG

UN Number:	3082
UN Proper shipping name:	Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (Reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin); epoxy resin)
UN Transport hazard classes:	9
Packing group:	III
Danger label:	9 Miscellaneous dangerous substances and articles 
EMS code:	F-A, S-F
Environmental hazards:	Yes
Special precautions for user:	None
Limited quantity:	5L - Pkg Inst.: P001 LP01
Quantity exception:	E1
Transport in bulk according to Annex II of MARPOL73/78 and the IBC Code: Not applicable	

#### SECTION 15: Regulatory information

##### North American

###### SARA Section 311/312 (Specific toxic chemical listings):

Not classified.

###### SARA Section 302 (Extremely hazardous substances):

None of the ingredients are listed.

###### SARA Section 313 (Specific toxic chemical listings):

None of the ingredients are listed.

###### TSCA (Toxic Substances Control Act):

All ingredients are listed.

###### TSCA Rules and Orders:

Not applicable.

###### Proposition 65 (California):

###### Chemicals known to cause cancer:

None of the ingredients are listed.

###### Chemicals known to cause reproductive toxicity for females:

None of the ingredients are listed.

## Safety Data Sheet

According to OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 19110.1200

Effective date: 03.11.2016

### Super Sap BRT Epoxy Resin

**Chemicals known to cause reproductive toxicity for males:**

None of the ingredients are listed.

**Chemicals known to cause developmental toxicity:**

None of the ingredients are listed.

#### Canada

**DSL (Canadian Domestic Substances List):**

All ingredients are listed.

### SECTION 16: Other information

**Abbreviations and Acronyms:** None

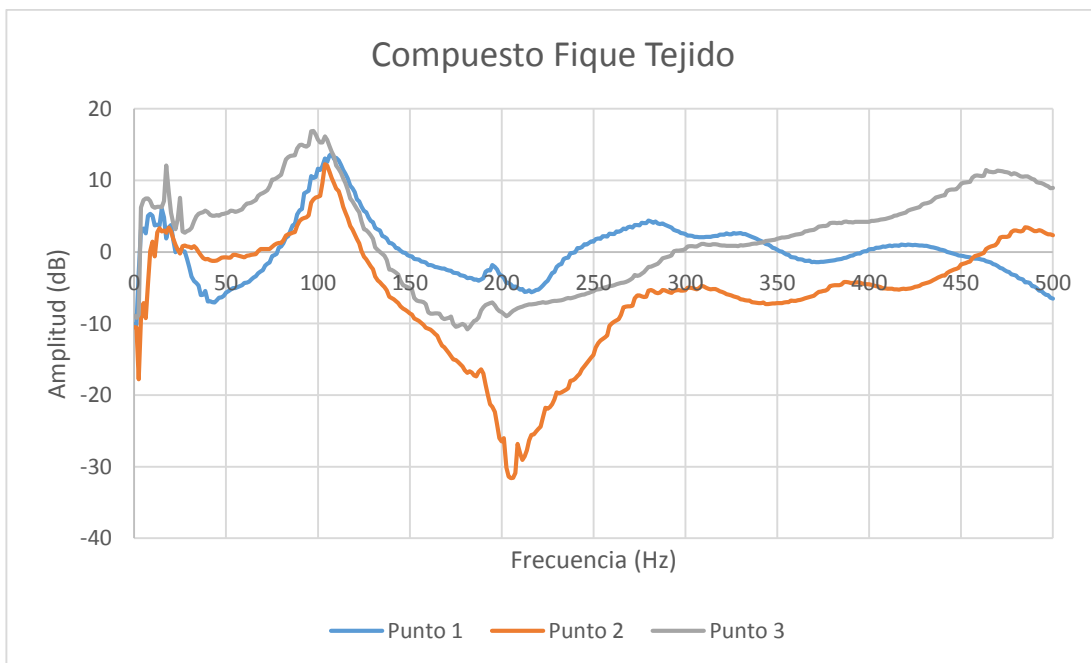
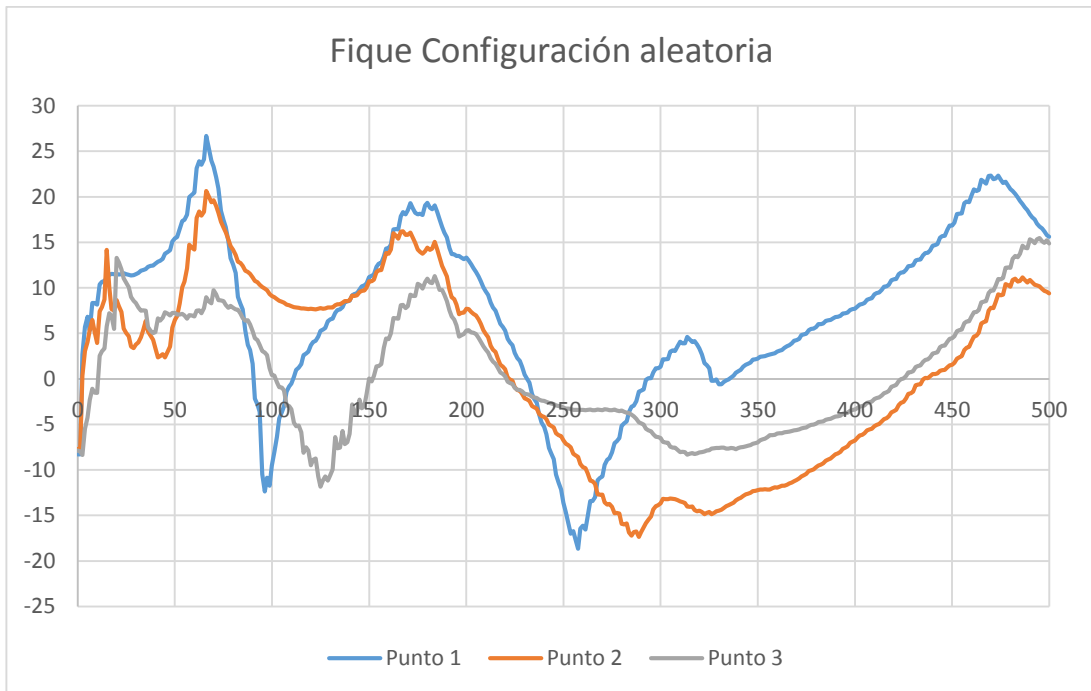
This product has been classified in accordance with hazard criteria of the Controlled Products Regulations and the SDS contains all the information required by the Controlled Products Regulations. The responsibility to provide a safe workplace remains with the user. The user should consider the health hazards and safety information contained herein as a guide and should take those precautions required in an individual operation to instruct employees and develop work practice procedures for a safe work environment. The information contained herein is, to the best of our knowledge and belief, accurate. However, since the conditions of handling and use are beyond our control, we make no guarantee of results, and assume no liability for damages incurred by the use of this material. It is the responsibility of the user to comply with all applicable laws and regulations applicable to this material.

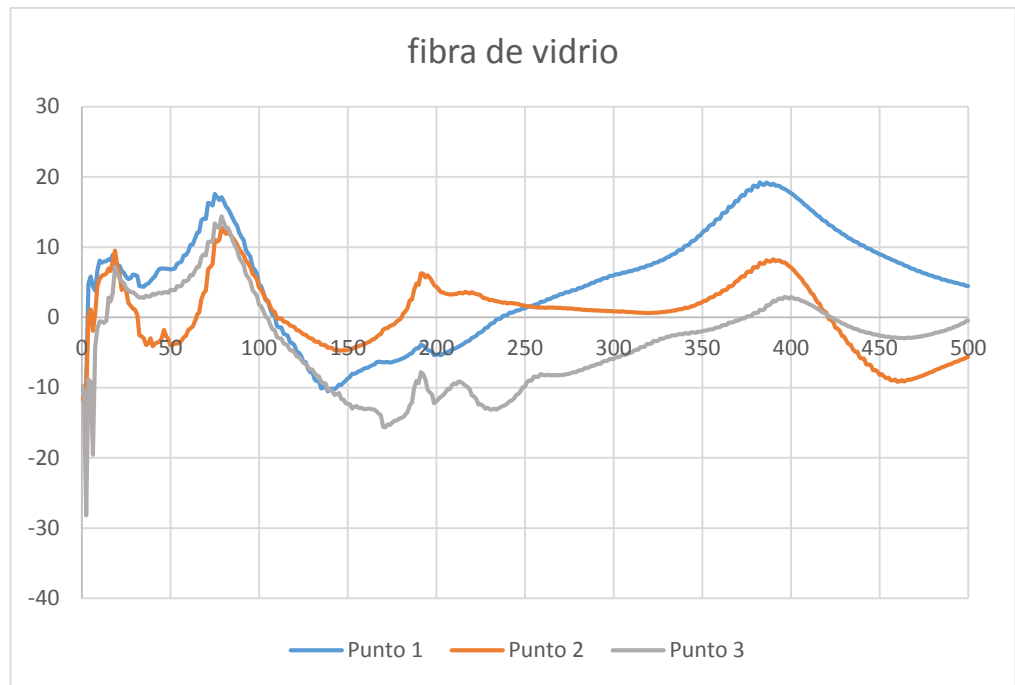
**NFPA:** 2-0-0

**HMIS:** 2-0-0



## ANEXO B. Análisis modal experimental primeros tres puntos biomateriales.





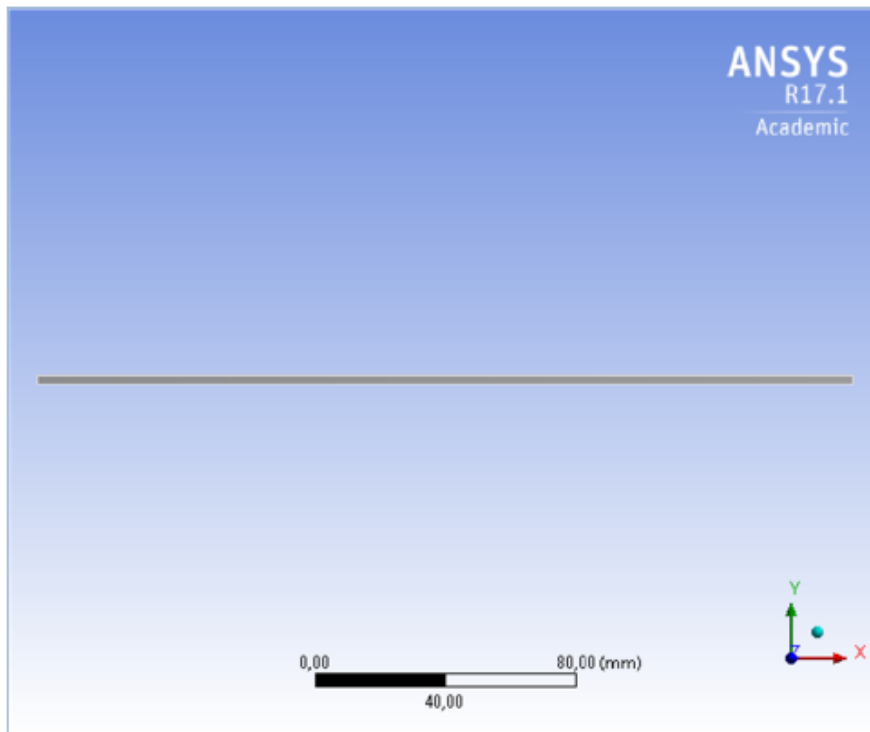
## ANEXO C. INFORME ANSYS.

Biocompuesto fique configuración aleatoria.



### Project

First Saved	Friday, September 15, 2017
Last Saved	Saturday, September 16, 2017
Product Version	17.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



# Contents

- [Units](#)
- [Model \(C4\)](#)
  - o [Geometry](#)
    - [Surface](#)
  - o [Coordinate Systems](#)
  - o [Mesh](#)
  - o [Modal \(C5\)](#)
    - [Pre-Stress \(None\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Displacement](#)
    - [Solution \(C6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - o [aleatorio fique](#)

## Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (C4)

### Geometry

TABLE 2  
Model (C4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	C:\Users\Administrador\Desktop\Probeta de vidrio_files\dp0\SYS-4\DM\SYS-4.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
2D Behavior	Plane Stress
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	250, mm
Length Y	2,5, mm
<b>Properties</b>	
Volume	7500, mm <sup>3</sup>
Mass	7,8999e-006 t
Surface Area(approx.)	750, mm <sup>2</sup>
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	1

Active Bodies	1
Nodes	4871
Elements	1332
Mesh Metric	None
<b>Basic Geometry Options</b>	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
<b>Advanced Geometry Options</b>	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Administrador\AppData\Local\Temp
Analysis Type	2-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 3**  
**Model (C4) > Geometry > Parts**

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Meshed
<b>Graphics Properties</b>	
Visible	Yes
Transparency	1
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	10, mm
Thickness Mode	Refresh on Update
Behavior	None
<b>Material</b>	
Assignment	aleatorio fique
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
Length X	250, mm
Length Y	2.5, mm
<b>Properties</b>	
Volume	7500, mm <sup>3</sup>
Mass	7,8999e-008 t
Centroid X	125, mm
Centroid Y	1,5 mm
Centroid Z	0, mm
Moment of Inertia Ip1	5,9249e-008 t·mm <sup>2</sup>

Moment of Inertia Ip2	4,1145e-002 t·mm <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	4,1151e-002 t·mm <sup>2</sup>
Surface Area(approx.)	750, mm <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>	
Nodes	4871
Elements	1332
Mesh Metric	None
<b>CAD Attributes</b>	
DMSheetThickness	0

## Coordinate Systems

TABLE 4  
Model (C4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	Global Coordinate System
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
<b>Origin</b>	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
<b>Directional Vectors</b>	
X Axis Data	[ 1, 0, ]
Y Axis Data	[ 0, 1, ]

## Mesh

TABLE 5  
Model (C4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (30,0 °)
Min Size	0,750 mm
Max Face Size	0,750 mm
Growth Rate	Default
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (0,56250 mm)
Minimum Edge Length	3,0 mm
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272

Maximum Layers	2
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	0
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	No
Use Sheet Thickness for Pinch	No
Pinch Tolerance	Default (0,6750 mm)
Generate Pinch on Refresh	No
Sheet Loop Removal	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	4871
Elements	1332
Mesh Metric	None

## Modal (C5)

**TABLE 6**  
Model (C4) > Analysis

Object Name	Modal (C5)
State	Solved
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Modal
Solver Target	Mechanical APDL
<b>Options</b>	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

**TABLE 7**  
Model (C4) > Modal (C5) > Initial Condition

Object Name	Pre-Stress (None)
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Pre-Stress Environment	None

**TABLE 8**  
Model (C4) > Modal (C5) > Analysis Settings

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
<b>Options</b>	
Max Modes to Find	8
Limit Search to Range	No
<b>Solver Controls</b>	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
<b>Rotordynamics Controls</b>	
Conolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
<b>Output Controls</b>	

Stress	No
Strain	No
Nodal Forces	No
Calculate Reactions	No
General Miscellaneous	No
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	C:\Users\Administrador\Desktop\Probeta de vidrio_files\dp0\SYS-4\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mm

**TABLE 9**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Loads**

Object Name	Displacement
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
<b>Definition</b>	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0, mm
Y Component	Free
Suppressed	No

### Solution (C6)

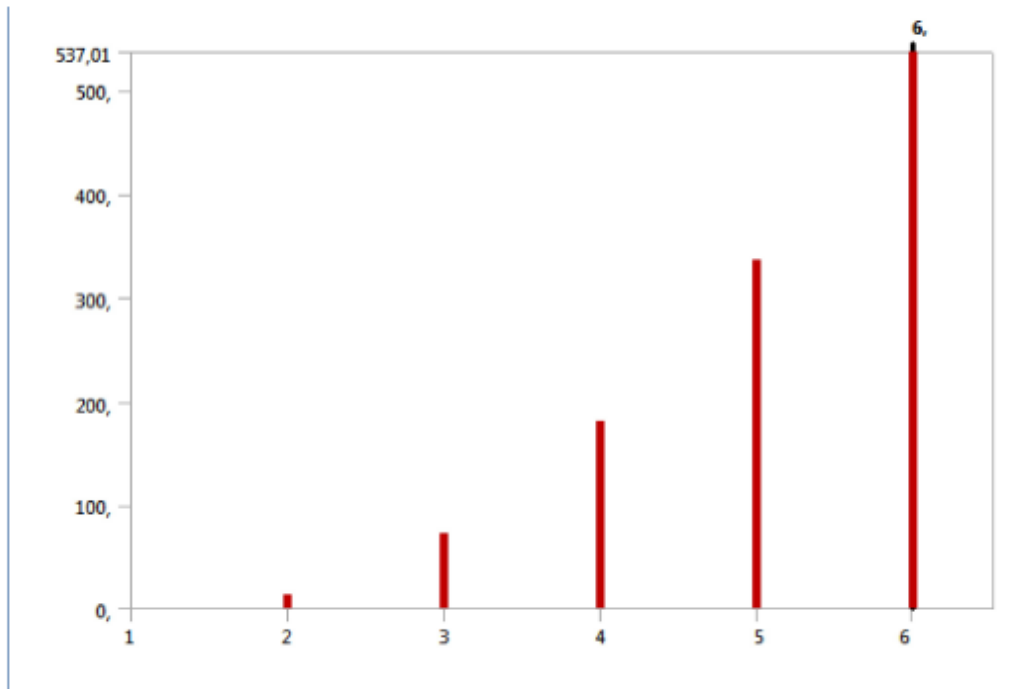
**TABLE 10**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution**

Object Name	Solution (C6)
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	2, s
MAPDL Memory Used	285, MB
MAPDL Result File Size	1,375 MB
<b>Post Processing</b>	
Calculate Beam Section Results	No

The following bar chart indicates the frequency at each calculated mode.

**FIGURE 1**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6)**





**TABLE 11**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6)**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,226
4,	180,63
5,	335,37
6,	537,01

**TABLE 12**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
<b>FE Connection Visibility</b>	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

**TABLE 13**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Results**

Object Name	Total	Total	Total	Total	Total
-------------	-------	-------	-------	-------	-------

	Deformation	Deformation 2	Deformation 3	Deformation 4	Deformation 5
State	Solved				
<b>Scope</b>					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	All Bodies				
<b>Definition</b>					
Type	Total Deformation				
Mode	2,	3,	4,	5,	6,
Identifier					
Suppressed	No				
<b>Results</b>					
Minimum	0,88812 mm	0,30144 mm	0,27404 mm	1,698 mm	0,90888 mm
Maximum	711,57 mm			711,58 mm	
Minimum Occurs On	Surface Body				
Maximum Occurs On	Surface Body				
<b>Information</b>					
Frequency	13,559 Hz	73,226 Hz	180,63 Hz	335,37 Hz	537,01 Hz

**TABLE 14**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,226
4,	180,63
5,	335,37
6,	537,01

**TABLE 15**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation 2**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,226
4,	180,63
5,	335,37
6,	537,01

**TABLE 16**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation 3**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,226
4,	180,63
5,	335,37
6,	537,01

**TABLE 17**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation 4**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,226
4,	180,63

5,	335,37
6,	537,01

**TABLE 18**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation 5**

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	13,559
3,	73,228
4,	180,83
5,	335,37
6,	537,01

## Material Data

### aleatorio fique

**TABLE 19**  
**aleatorio fique > Constants**

Density	1,0533e-009 tonne mm <sup>-3</sup>
---------	------------------------------------

**TABLE 20**  
**aleatorio fique > Color**

Red	Green	Blue
103,	192,	205,

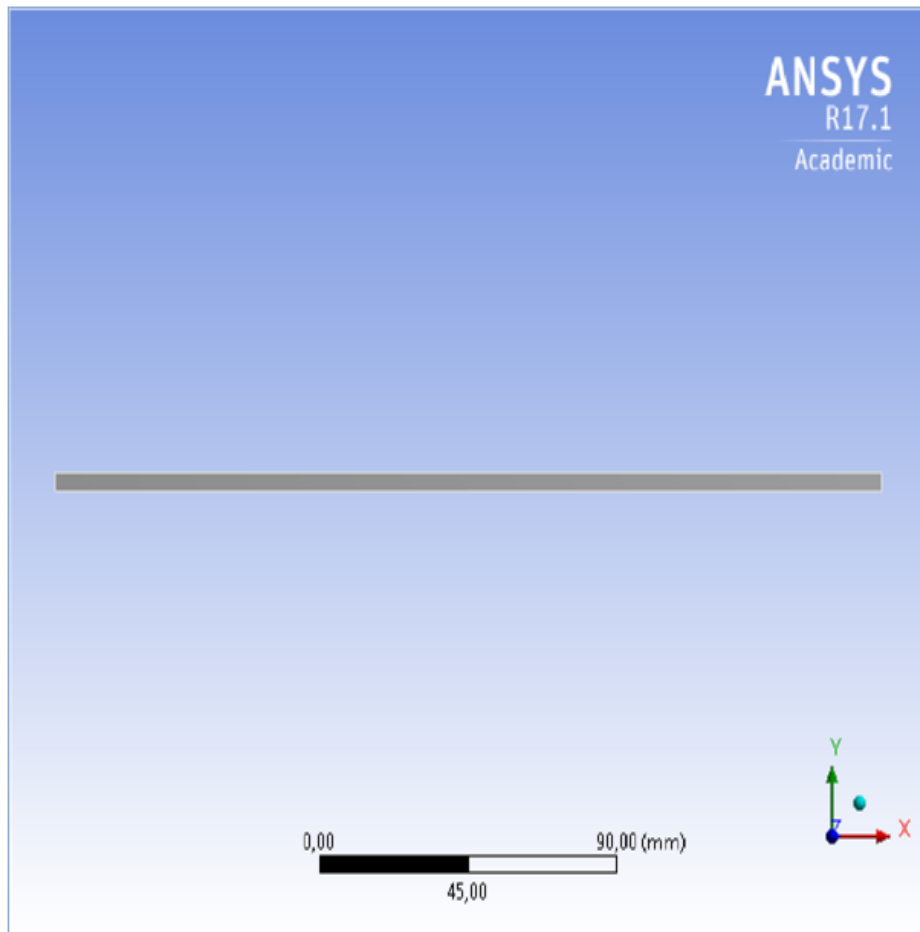
**TABLE 21**  
**aleatorio fique > Isotropic Elasticity**

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	1273,	0,3	1060,8	489,81



## Project

First Saved	Friday, September 15, 2017
Last Saved	Friday, September 15, 2017
Product Version	17.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



## Contents

- [Units](#)
- [Model \(B4\)](#)
  - o [Geometry](#)
    - [Surface Body](#)
  - o [Coordinate Systems](#)
  - o [Mesh](#)
  - o [Modal \(B5\)](#)
    - [Pre-Stress \(None\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Displacement](#)
    - [Solution \(B6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - o [TEJIDO DE FIQUE](#)

## Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (B4)

### Geometry

TABLE 2  
Model (B4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	C:\Users\Administrador\Desktop\Probeta de vidrio_files\dp0\SYS-3\DM\SYS-3.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
2D Behavior	Plane Stress
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	250, mm
Length Y	4,4 mm
<b>Properties</b>	
Volume	11000 mm <sup>3</sup>
Mass	1,0211e-005 t
Surface Area(approx.)	1100, mm <sup>2</sup>
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	1

Active Bodies	1
Nodes	3187
Elements	908
Mesh Metric	None
<b>Basic Geometry Options</b>	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
<b>Advanced Geometry Options</b>	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Administrador\AppData\Local\Temp
Analysis Type	2-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 3**  
**Model (B4) > Geometry > Parts**

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Meshed
<b>Graphics Properties</b>	
Visible	Yes
Transparency	1
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	10, mm
Thickness Mode	Refresh on Update
Behavior	None
<b>Material</b>	
Assignment	TEJIDO DE FIQUE
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
Length X	250, mm
Length Y	4,4 mm
<b>Properties</b>	
Volume	11000 mm <sup>3</sup>
Mass	1,0211e-005 t
Centroid X	125, mm
Centroid Y	2,2 mm
Centroid Z	0, mm
Moment of Inertia Ip1	1,6474e-005 t·mm <sup>4</sup>

Moment of Inertia Ip2	5,3184e-002 t·mm <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	5,32e-002 t·mm <sup>2</sup>
Surface Area(approx.)	1100, mm <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>	
Nodes	3187
Elements	908
Mesh Metric	None
<b>CAD Attributes</b>	
DMSheetThickness	0

## Coordinate Systems

**TABLE 4**  
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	Global Coordinate System
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
<b>Origin</b>	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
<b>Directional Vectors</b>	
X Axis Data	[ 1, 0, ]
Y Axis Data	[ 0, 1, ]

## Mesh

**TABLE 5**  
Model (B4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Shape Checking	Standard Mechanical
Element <del>Midside</del> Nodes	Program Controlled
<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (30,0 °)
Min Size	1,10 mm
Max Face Size	1,10 mm
Growth Rate	Default
Automatic Mesh Based <del>Defeaturing</del>	On
<del>Defeaturing</del> Tolerance	Default (0,8250 mm)
Minimum Edge Length	4,40 mm
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272

Maximum Layers	2
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	0
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	No
Use Sheet Thickness for Pinch	No
Pinch Tolerance	Default (0,990 mm)
Generate Pinch on Refresh	No
Sheet Loop Removal	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	3187
Elements	908
Mesh Metric	None

## Modal (B5)

**TABLE 6**  
Model (B4) > Analysis

Object Name	Modal (B5)
State	Solved
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Modal
Solver Target	Mechanical APDL
<b>Options</b>	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

**TABLE 7**  
Model (B4) > Modal (B5) > Initial Condition

Object Name	Pre-Stress (None)
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Pre-Stress Environment	None

**TABLE 8**  
Model (B4) > Modal (B5) > Analysis Settings

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
<b>Options</b>	
Max Modes to Find	8
Limit Search to Range	No
<b>Solver Controls</b>	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
<b>Rotordynamics Controls</b>	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
<b>Output Controls</b>	



Stress	No
Strain	No
Nodal Forces	No
Calculate Reactions	No
General Miscellaneous	No
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	C:\Users\Administrador\Desktop\Probeta de vidrio_files\dp0\SYS-3\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mm

**TABLE 9**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Loads**

Object Name	Displacement
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
<b>Definition</b>	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0, mm
Y Component	Free
Suppressed	No

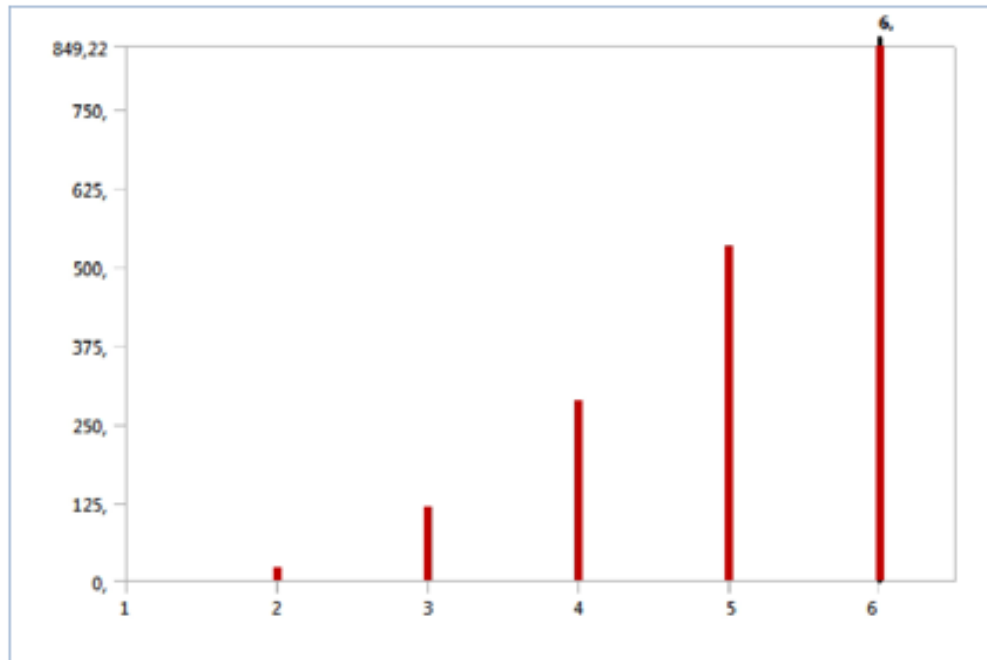
### Solution (B6)

**TABLE 10**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution**

Object Name	Solution (B6)
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	2, s
MAPDL Memory Used	282, MB
MAPDL Result File Size	1, MB
<b>Post Processing</b>	
Calculate Beam Section Results	No

The following bar chart indicates the frequency at each calculated mode.

**FIGURE 1**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6)**



**TABLE 11**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6)**

Mode	Frequency [Hz]
1.	2,6162e-003
2.	21,567
3.	116,4
4.	286,78
5.	531,53
6.	849,22

**TABLE 12**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
<b>FE Connection Visibility</b>	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

**TABLE 13**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Total Deformation 4

State	Solved			
<b>Scope</b>				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
<b>Definition</b>				
Type	Total Deformation			
Mode	2,	3,	4,	5,
Identifier				
Suppressed	No			
<b>Results</b>				
Minimum	1,2605 mm	0,33884 mm	3,2109 mm	0,14758 mm
Maximum	625,88 mm			625,89 mm
Minimum Occurs On	Surface Body			
Maximum Occurs On	Surface Body			
<b>Information</b>				
Frequency	21,567 Hz	116,4 Hz	286,78 Hz	531,53 Hz

**TABLE 14**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Total Deformation**

Mode	Frequency [Hz]
1,	2,6162e-003
2,	21,567
3,	116,4
4,	286,78
5,	531,53
6,	849,22

**TABLE 15**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Total Deformation 2**

Mode	Frequency [Hz]
1,	2,6162e-003
2,	21,567
3,	116,4
4,	286,78
5,	531,53
6,	849,22

**TABLE 16**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Total Deformation 3**

Mode	Frequency [Hz]
1,	2,6162e-003
2,	21,567
3,	116,4
4,	286,78
5,	531,53
6,	849,22

**TABLE 17**  
**Model (B4) > Modal (B5) > Solution (B6) > Total Deformation 4**

Mode	Frequency [Hz]
1,	2,6162e-003
2,	21,567
3,	116,4
4,	286,78
5,	531,53
6,	849,22

## Material Data

### TEJIDO DE FIQUE

TABLE 18  
TEJIDO DE FIQUE > Constants  
| Density | 9,283e-010 ~~tonne~~.mm<sup>-3</sup> |

TABLE 19  
TEJIDO DE FIQUE > Color

Red	Green	Blue
181,	194,	156,

TABLE 20  
TEJIDO DE FIQUE > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	1320,	0,3	1100,	507,89