

# Universidad Autónoma de Baja California

## Facultad de Ingeniería Mexicali

Posgrado en Ciencias e Ingeniería



“Análisis y Evaluación de Fibras Naturales en Materiales Compuestos de Matriz Polimérica aplicados a Álabes de Aerogeneradores de Baja Capacidad”

Grado: Doctorado

Aspirante:

Virginia García Angel

Director de tesis:

Dra. Lidia Esther Vargas Osuna

Co-director:

Dr. Juan de Dios Ocampo Díaz

Mexicali Baja California a 2 de septiembre del 2019

# Índice

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Objetivo General.....                                                                                      | 3  |
| Hipótesis .....                                                                                            | 4  |
| Justificación.....                                                                                         | 5  |
| Capítulo I.....                                                                                            | 6  |
| Estado del Arte.....                                                                                       | 6  |
| 1.1 Antecedentes de Fabricación de Álabes de Aerogeneradores.....                                          | 7  |
| 1.2 Antecedentes de Materiales Compuestos Biodegradables.....                                              | 9  |
| Capítulo II .....                                                                                          | 25 |
| Marco Teórico.....                                                                                         | 25 |
| 2.1 Teoría de Aerogeneradores.....                                                                         | 27 |
| 2.2 Tipos de Fibras Naturales .....                                                                        | 31 |
| 2.3 Tipos de Resinas .....                                                                                 | 37 |
| 2.3.1 Resinas basadas en proteínas .....                                                                   | 39 |
| 2.4 Orientación de Fibras .....                                                                            | 40 |
| 2.4.1 Macro mecánica de Laminados .....                                                                    | 45 |
| 2.5 Aplicaciones de arreglos.....                                                                          | 64 |
| 2.5.1 Arreglo de fibra unidireccional .....                                                                | 64 |
| 2.5.2. Arreglo de fibra bidireccional.....                                                                 | 65 |
| 2.5.3 Arreglo de Fibra Multidireccional.....                                                               | 66 |
| 2.5.4 Arreglo de tipo sándwich.....                                                                        | 67 |
| 2.6 Métodos de Fabricación para Materiales Compuestos .....                                                | 68 |
| 2.7 Método de validación de propiedades mecánicas para materiales compuestos de matriz<br>polimérica. .... | 72 |
| Capítulo III .....                                                                                         | 79 |
| Metodología y Experimentación.....                                                                         | 79 |
| 3.1 Identificación de Materia Prima .....                                                                  | 79 |
| 3.2 Fabricación de muestras para Caracterización .....                                                     | 82 |
| 3.3 Evaluación de Propiedades Mecánicas .....                                                              | 88 |
| 3.4 Identificación de la Aplicación .....                                                                  | 91 |
| 3.5 Evaluación del Perfil Óptimo.....                                                                      | 91 |
| 3.6 Diseño del álabes.....                                                                                 | 92 |
| 3.7 Simulación Aerodinámica .....                                                                          | 93 |
| 3.8 Simulación Estructural.....                                                                            | 99 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 3.9 Análisis de Resultados .....         | 100 |
| Capítulo IV .....                        | 112 |
| Conclusiones.....                        | 112 |
| Recomendaciones para trabajo futuro..... | 114 |
| Referencias.....                         | 115 |

# Objetivo General

El objetivo de este trabajo es el análisis y evaluación mecánica estructural de fibras naturales como sustituto de los materiales compuestos convencionales en álabes de aerogeneradores de baja capacidad sometidos a condiciones extremas de viento y temperatura en regiones aisladas.

## Objetivos Específicos

- Determinar que el material compuesto de matriz polimérica, con el uso de recursos naturales biodegradables, ofrezca una alternativa de operación, manufactura y mantenimiento, más económico que los materiales convencionales.
- Comparar, mediante su análisis, cuatro composiciones diferentes de matriz-refuerzo en base a normas ASTM, que rigen la selección y procesos de fabricación.
- Generar base sólida en los procesos de fabricación de materiales compuestos a base de fibras naturales.

# Hipótesis

Este trabajo plantea la hipótesis de que los materiales compuestos a base de fibras naturales cuentan con la capacidad mecánica y estructural para la fabricación de álabes de aerogeneradores de baja capacidad, sustituyendo los materiales convencionales teniendo una alternativa económica sin sacrificar desempeño estructural.

# Justificación

El desarrollar productos a base de biocompuestos y otras tecnologías innovadoras que puedan disminuir de manera considerable la dependencia generalizada que se tiene en los combustibles fósiles. Los materiales compuestos biodegradables a base de fibra vegetal (naturales/biofibra), son materiales novedosos y representan un área de oportunidad. El uso de materiales a partir de recursos renovables tiene cada vez más importancia y diferentes tipos de industrias en otros países tratan de sustituir o disminuir la materia prima a base de petroquímicos con materiales compuestos derivados de fibras naturales y polímeros <sup>1</sup>.

El desarrollo de materiales de alto rendimiento a base de recursos naturales está aumentando en todo el mundo. El mayor reto en el trabajo de fibras naturales reforzadas con plásticos es su gran variación en las propiedades y características, al grado que se espera un aumento en la producción de materiales y químicos basados en fuentes renovables del 12% actual a un 18% en el 2020, y un 25% en el 2030. Esto representa un crecimiento de 2.33 millones toneladas métricas en 2013 y 3.45 millones de toneladas métricas en 2020 <sup>2</sup>.

Los materiales compuestos de matriz polimérica son utilizados en diferentes campos de aplicación siendo uno de ellos, las energías renovables; donde el uso de fibras de vidrio y fibras de carbono es común para desarrollar los álabes de aerogeneradores, el proceso de fabricación comúnmente utilizado es el moldeo por transferencia de resina (RTM) <sup>3</sup> este proceso además de requerir largos periodos de tiempo, debido al método de preparación de la pieza, los moldes utilizados, materiales y herramientas de alto costo, es de esperar que el valor total de un aerogenerador aumente.

Es por ello, que este proyecto tiene la finalidad de analizar diferentes combinaciones de fibras para estudiar sus propiedades mecánicas y encontrar una combinación de fibra natural y polímero que pueda ser utilizada en álabes de aerogeneradores de baja capacidad, con la finalidad de disminuir los costos y tiempos de fabricación; analizando diferentes métodos de fabricación y por consecuencia reducir el costo total de un aerogenerador sin reducir el desempeño mecánico ante condiciones normales y críticas de operación.

# Capítulo I

## Estado del Arte

En este capítulo se presentan los últimos estudios relacionados a la fabricación de álabes de aerogeneradores y evaluación de fibras naturales, características generales al ser utilizadas como refuerzo en biocompuestos, incluyendo su fuente, estructura, composición, además de los métodos de modificación y las propiedades mecánicas obtenidas por dichos arreglos; dentro de estos estudios, se encuentran puntos a destacar como las matrices más populares de materiales compuestos reforzados con biofibra y basados en recursos petroquímicos renovables, las técnicas de procesamiento, así como los factores que afectan a estos procesos, como son: el contenido de humedad, el tipo de fibra y agentes de acoplamiento. Debido a que, el principal objetivo de este proyecto es encontrar una combinación de fibra-matriz que permita la fabricación de un prototipo funcional en términos de propiedades mecánicas, dentro de esta sección también se describen los últimos estudios para mejorar el desempeño de álabes de aerogeneradores de baja capacidad.

Un material compuesto es la unión de dos o más materiales que al combinarse se obtienen propiedades únicas y diferentes a cualquiera de los dos materiales por separado. Los materiales compuestos se han utilizado por el hombre desde hace cientos de años, los primeros fueron los egipcios<sup>4</sup>, quienes por medio de paja y barro elaboraban sus ladrillos para la fabricación de estructuras, en la segunda guerra mundial se utilizó lino; resinas fenólicas, fibra de madera orientada y pegamento para la fabricación de bombarderos y cascos dragaminas.

A finales de 1950<sup>5</sup> se comenzó a utilizar la fibra de vidrio con resina de poliéster y comenzó el desarrollo de la resina epóxica; pero fue hasta 1960 que los materiales que llamamos compuestos (de alto desempeño) empezaron a ser utilizados en aplicaciones de la industria, militares y en partes aeroespaciales como superficies de control de vuelo. En la actualidad, estos materiales tienen aplicaciones en diferentes sectores como es el sector de transporte, energético, deportivo y de construcción mediante su utilización en elementos aeronáuticos, automotrices, marítimos, hélices, tuberías, tanques, bicicletas, raquetas, palos de golf, entre otros.

## 1.1 Antecedentes de Fabricación de Álabes de Aerogeneradores

La historia de las turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica comenzó en 1888 en Cleveland Ohio, por Charles F. Brush <sup>6</sup> y en Askov, Dinamarca en 1889 por el pionero Poul La Cour <sup>7</sup>. En 1941 la producción de electricidad a partir del viento se realizó mediante turbinas con palas a base de acero, fabricadas por la empresa S. Morgan Smith en Grandpa's Knob en Vermont EE.UU. Debido al material utilizado, el primer prototipo fallo poco después de las 100 horas de operación. Por lo tanto, la importancia de la elección adecuada de los materiales y las limitaciones de los metales como materia para la fabricación de álabes de aerogeneradores fue probada desde los primeros diseños.

A partir de este punto, se buscaron materiales alternativos teniendo como un ejemplo exitoso la turbina eólica Gedser, diseñada por Johannes Juul, con tres álabes compuestos de largueros de acero, carcaza de aluminio y con costillas de soporte fabricados a base de madera; las cuales fueron instaladas en la costa de Gedser en Dinamarca en 1956-1957. Después de la década de los 70, las turbinas eólicas se fabricaron principalmente con álabes compuestos <sup>8,9</sup>.

La turbina Gedser fue la primera historia de éxito en la energía eólica, funcionando durante 11 años sin mantenimiento, debido al uso de materiales compuestos. De esta manera se generó el vínculo entre la tecnología de generación de energía eólica y la aplicación de materiales compuestos ya que la funcionalidad del prototipo está directamente ligada al material utilizado en los álabes de aerogeneradores.

Los materiales compuestos son comúnmente utilizados en los álabes y nacelles de las turbinas eólicas; siendo los álabes la parte compuesta más importante y el componente de mayor costo. Las palas de una turbina eólica constan de dos caras (el lado de la succión y el lado de la presión), unidas y reforzadas por una o varias redes integrales que ensamblan las partes superior e inferior o por una viga interna <sup>10</sup>. Desde el punto de las cargas que soportan los materiales, uno de los laminados en el larguero principal está sujeto a cargas de tensión cíclica (lado de presión) mientras que el otro (lado de succión) está sujeto a cargas cíclicas de compresión-compresión.



Los laminados en los bordes delantero y trasero que llevan los momentos de flexión asociados con las cargas de gravitación están sujetas a cargas de tensión-compresión. Los álabes, que están hechos de las estructuras tipo sándwich están diseñados principalmente contra el pandeo elástico.

Una tendencia importante en el desarrollo de turbinas eólicas es el aumento del tamaño y la ubicación en alta mar. El aumento de tamaño es por el deseo de reducir el costo apalancado de la energía. Con un incremento tamaño, el peso de las palas del rotor aumenta, por lo que encontrar materiales que permitan reducir el costo de fabricación sin reducir propiedades mecánicas es de vital importancia.

Durante las primeras décadas que la generación de energía por turbinas eólicas, los álabes fueron fabricados por el proceso de moldeo a mano, en moldes abiertos. Utilizando como refuerzo fibra de vidrio el cual era impregnado con rodillos y las partes del álabe eran unidas por largueros. Esta tecnología se utilizó principalmente para producir álabes de tamaño pequeño y mediano (hasta 35 y 55 metros). Para álabes más grandes se utilizó la misma tecnología, pero el contenido de refuerzo era mayor. En la década de 1970, varias empresas exploraron diferentes métodos con la finalidad de mejorar la calidad y reducir los costos de mano de obra.<sup>11</sup>

La tecnología de infusión al vacío y los pre-impregnados permitió mejorar la calidad de fabricación<sup>12</sup>. La tecnología de pre impregnados se basa en fibras que ya contienen la cantidad de resina necesaria para la unión entre ellos; lo que permitió la fabricación de formas y diseños más complejos. La tecnología más utilizada para la fabricación de álabes de aerogeneradores es el proceso de infusión de resina, donde las fibras se colocan en molde sellado y la resina se inyecta en una cavidad del molde bajo presión. Después de que la resina llena todo el volumen entre las fibras el componente de cura con altas temperaturas. Las tecnologías de infusión se pueden dividir en 3 bloques: Moldeo por transferencia de resina (RTM) utilizando una presión más alta a la atmosférica y moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM) utilizando una presión inferior a la presión atmosférica<sup>13</sup>. Actualmente, el moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM) es la fabricación más común, donde las capas de telas de fibras secas, en su mayoría fibras unidireccionales, son alineadas a lo largo de la longitud del álabe, se colocan en piezas de molde junto con espumas de polímero o madera de balsa para estructuras sándwich; Para formar un laminado que es grueso por la raíz y gradualmente se vuelve más delgado hacia

la punta, la mayoría de las capas se extienden desde la raíz solo en parte hacia la punta; la terminación de una capa se llama caída de capa. Las telas y posteriormente se cubren con una bolsa de vacío y se hacen herméticas. Después de la aplicación de vacío, fluye resina de baja viscosidad y humedece las fibras. Después de la infusión, la resina se cura a temperatura ambiente. En algunas ocasiones el compuesto se cura a una elevada temperatura, dependiendo de las especificaciones de la resina y fibra utilizada. Sin embargo, este método es un desafío cuando se requieren utilizar múltiples capas de telas secas, ya que deben mantenerse en su lugar y no pueden deslizarse; en la práctica es común tener la formación de arrugas en áreas de doble curvatura y áreas con fibras no humedecidas, además de burbujas de aire entre la matriz y la fibra.

El proceso de infusión suele ser más barato que el proceso de pre impregnados, sin embargo, los compuestos fabricados bajo este último, tienen propiedades mecánicas más estables y menos variables. Este proceso permite alcanzar contenidos de fibras más altos y controlar las propiedades de los materiales <sup>12</sup>.

Hasta el momento se puede observar que en lo que la fabricación de álabes de aerogeneradores la tecnología se ha enfocado a evaluar diferentes métodos de manufactura con la finalidad de reducir costos de fabricación, pero han sido pocos los estudios enfocados en la evaluación de nuevos materiales, es por ello que en la sección 1.2. se habla de los estudios enfocados a nuevas alternativas de materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibras naturales, con la finalidad de evaluar la posibilidad de cambiar el tipo de refuerzo que es comúnmente utilizado en la fabricación de álabes de aerogeneradores.

## 1.2 Antecedentes de Materiales Compuestos Biodegradables

Los polímeros abundan en la naturaleza algunos ejemplos que contiene polímeros naturales son la madera, hojas, frutas, semillas y pieles de animal. El primer polímero termoplástico es la celulosa, que fue descubierto en 1860. Sin embargo, no fue utilizado durante un largo periodo, la razón principal fue el descubrimiento del petróleo crudo y su larga industria para el uso de polímeros sintéticos desde 1950.

Hoy en día, la opinión pública sobre el medio ambiente, cambio climático y los combustibles fósiles limitados son componentes importantes para los gobiernos, compañías, y científicos en cuestión de encontrar alternativas para el petróleo crudo, ya que los plásticos de origen biológico podrían ofrecer contribuciones importantes reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles.

En las últimas dos décadas los plásticos de base biológica han experimentado un renacimiento ya que se han desarrollado nuevos polímeros a partir de materias primas renovables. Por ejemplo, el almidón, que se da naturalmente fue redescubierto como material plástico. Otros ejemplos son el PLA que se puede producir a través de ácido láctico a partir de azúcares fermentables y el PHA's que puede ser producido a partir de aceite vegetal junto a otras materias primas de origen biológico. Para esto muchos de los antiguos procesos han sido re-visitados; tal y como la deshidratación química de etanol que conlleva a etileno, un químico intermediario importante que puede ser convertido subsecuentemente en polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC) y otros plásticos. Aun mas, recientes avances tecnológicos han mejorado sustancialmente las propiedades de nuevos plásticos de base biológica, tal y como la resistencia al calor de PLA, que permite una amplia gama de aplicaciones.

Debido a cuestiones de medio ambiente y sustentabilidad, este siglo ha sido testigo de notables logros en la tecnología verde; en particular, en la ciencia de materiales a través del desarrollo de biocompuestos.

Los primeros estudios de los cuales se encontraron registro comienzan en el año de 1999 con A.K. Bledzki y J. Gassan <sup>14</sup> quienes realizaron una investigación con fibra de plástico reforzado con celulosa natural y artificial, ellos mencionan que las propiedades físicas de las fibras naturales se determinan principalmente por el producto químico y la composición física, tal como la estructura de las fibras, contenido de celulosa, el ángulo de las fibrillas, la sección transversal y por el grado de polimerización, este artículo trata los métodos de tratamiento físicos y químicos que mejoran la adherencia fibra/matriz, sus resultados y efectos sobre las propiedades físicas de los materiales compuestos. Estos diferentes tratamientos cambian entre otros; el carácter hidrófilo de las fibras naturales, de modo que los efectos de la humedad en el material compuesto

se reducen. También mencionan que las fibras naturales se subdividen en base a sus orígenes, dependiendo si proceden de plantas, animales o minerales. En este mismo año Samal, Acharya, Mohanty, et al <sup>15</sup> estudiaron el yute purificado expuesto 72 horas a una mezcla de Benceno y Etanol para obtener mejores propiedades de resistencia a la humedad y resistencia mecánica a un bajo costo.

En el año 2000 Gilles Sèbe, Nihat S. Cetin, Calluma. S. Hill Y Mark Hughes <sup>16</sup> estudiaron compuestos de poliéster reforzados con fibra de cáñamo, preparándolos por medio de moldeo por transferencia de resina (RTM) e investigaron el comportamiento de flexión e impacto. La tensión de flexión en la rotura y el módulo de flexión mostraron una tendencia creciente con el contenido de fibra, en el caso de la resistencia al impacto se encontró que disminuía si se tenía un bajo contenido de fibra.

Hepworth, Hobson, Bruce et al <sup>17</sup> investigaron la utilidad del cáñamo sin tratar y tratado como una fuente de fibra para la fabricación de un material compuesto, para esto utilizaron una máquina de decorticación y clasificaron los tallos mediante dos diferentes procesamiento de descortezado, estos compuestos se sometieron a ensayos de tracción obteniendo que las fibras no tratadas eran susceptibles a la degradación con el tiempo y podría limitar la vida útil de los materiales compuestos, por lo que el procesamiento de cáñamo mejora la unión por medio de la eliminación de los tejidos epidérmicos. Mohanty, Mubarak, Khan y Hinrichsen <sup>18</sup> también estudiaron modificaciones superficiales de dos variedades de tejidos de yute. Se prepararon diferentes formulaciones usando oligómero de diacrilato de uretano (M-1100), monómeros 2-etilhexil acrilato (EHA), 1-vinil 2-pirrolidona (NVP) y fotoiniciador (Irgacure-369) en metanol para modificar la superficie de tejidos de yute a base de una matriz polimérica biodegradable con la finalidad de estudiar su rendimiento en propiedades mecánicas tales como resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y el impacto. Obteniendo como resultado una mejora mayor al 50% en la resistencia a la tracción y 90% en la resistencia al impacto.

Otra investigación notable, fue el estudio de la durabilidad de materiales compuestos fenólicos a base de fibras reforzadas con yute, elaborado por B. Singh, M. Gupta y Anchal Verma en el año 2000 <sup>19</sup> en este caso se estudiaron las propiedades físicas y mecánicas variando las

condiciones de humedad e hidrotérmica notando un grave envejecimiento perjudicial en condiciones de prueba con agua obteniendo decoloración de superficie tanto en la erosión natural y en la acelerada e infestación por hongos en los bordes. Estos resultados mostraron un indicador para evaluar la idoneidad de los materiales compuestos de yute en condiciones críticas de humedad.

Otros estudios fueron enfocados a mejorar la unión entre la fibra y la resina, en el 2001, Sanjay Sarkar y Basudam Adhikari <sup>20</sup> estudiaron 4 tipos de resina de lignina modificada con la finalidad de sustituir el fenol con lignina. Las resinas de lignina modificada se prepararon a partir de lignina purificada a partir de residuos de la industria papelera, para investigar la unión entre el yute y la resina utilizaron estudios de espectroscopia encontrando que el material compuesto con resina de yute es térmicamente más estable.

En el 2002, Dipa Raya, B.K. Sarkara, S. Dasb, A.K. Ranab <sup>21</sup> hicieron análisis dinámicos y térmicos para matrices reforzadas con fibras de yute tratados con NaOH y sin tratar, para determinar sus propiedades en función a la temperatura. Para los compuestos el módulo de almacenamiento aumento al tener una mayor cantidad de fibra debido al refuerzo que permitió una mejor distribución de carga en el refuerzo. Sin embargo, para todos los compuestos el módulo de almacenamiento se redujo con el incremento de la temperatura. En este mismo año D. Ray, B.K. Sarkar y N.R. Bose <sup>22</sup> realizaron un estudio del impacto en fatiga con materiales compuestos de yute y resina vinil éster que contenían fibras con tratamiento alcalino y sin tratar, debido a que el tratamiento alcalino retira la celulosa y mejora la cristalinidad se obtuvo una mejor dispersión en la fibra, como resultado las propiedades de resistencia al a flexión eran superiores en las fibras tratadas, con 4 horas de tratamiento alcalino las fibras de yute dieron una mejor combinación de propiedades de adhesión y de resistencia sin embargo esto no se reflejó en el comportamiento de fatiga, con un tratamiento alcalino de 8 horas en las fibras de yute mostraron un comportamiento ante impacto superior en las propiedades de fatiga.

K. Oksman, M. Skirfvars y J. Selin en el año 2003 <sup>23</sup> realizaron una investigación con el objetivo estudiar si las fibras naturales pueden ser utilizadas como refuerzo de polímeros basados en materias primas renovables. Los materiales que fueron utilizados son fibras de lino y ácido poli

láctico (PLA). El PLA es un polímero termoplástico de ácido láctico y se ha utilizado principalmente para productos biodegradables, como bolsas de plástico y tazas de plantación, pero en principio PLA también puede utilizarse como material de matriz en materiales compuestos. Debido a la naturaleza frágil del PLA, la tricantina fue probada como plastificante para compuestos con matrices PLA y PLA/lino con el fin de mejorar las propiedades de impacto. Los materiales compuestos estudiados fueron fabricados con una extrusora de doble husillo con un contenido de fibra de lino de 30 y 40%. En este estudio los resultados preliminares mostraron que las propiedades mecánicas de materiales compuestos de fibra PLA y lino mejoraron. Con esto se obtuvieron mejoras aproximadas a un 50% en comparación con compuestos similares PP/fibra lino, que se utilizan hoy en muchos paneles de automóviles. En este mismo año Katheleen Van de Velde <sup>24</sup> realizó un estudio similar utilizando compuestos con cascara de coco y resina epóxica, además de estudiar propiedades mecánicas también analizó el efecto de los parámetros de tiempos y temperaturas en el proceso de la fabricación del material compuesto biodegradable.

Weyenberg, Ivens, De Coster, et al <sup>25</sup> estudiaron la influencia de procesamiento químico a través de métodos alcalinos, acetona diluida y silano para fibras de lino, el descortezado de fibras provoca un cambio significativo en propiedades, llegando a la conclusión que al combinar el tratamiento alcalino y la dilución se tienen mejores propiedades mecánicas a la flexión, teniendo un aumento en la resistencia transversal de un 250%. A finales del 2003 Wambua, Ivens y Verpoest <sup>26</sup> estudiaron la posibilidad de remplazar la fibra de vidrio con fibras naturales, estudiaron fibras como el sisal, kenaf, cáñamo, yute y fibra de coco, reforzados con compuestos de polipropileno procesados por moldeo a compresión, al realizar un estudio comparativo de los resultados obtuvieron que las fibras de kenaf, cáñamo y sisal tiene resistencia a la tracción similares, pero en impacto las propiedades del cáñamo superaron el rendimiento del kenaf. En el caso de la fibra de coco mostró propiedades mecánicas muy bajas pero su resistencia al impacto fue mayor que los compuestos elaborados a base del yute y el kenaf. Como conclusión, no se encontraron propiedades de los biocompuestos de fibra natural para comparar de manera favorable a la fibra de vidrio.

En el 2004 Eichhorn y Young <sup>27</sup> comenzaron los estudios de biocompuestos basados en fibras de cáñamo y resina epóxica y su comportamiento en la micromecánica, B.K. Sarkar y Dipa Ray <sup>28</sup> realizaron una investigación del efecto de la concentración de defectos en la resistencia a la fatiga de biocompuestos a base de yute y vinil éster sin tratar y tratados de manera alcalina bajo atmósferas de nitrógeno líquido y atmósferas normales, obteniendo que bajo la temperatura ambiente normal la presencia de tales defectos mejoro proporcionalmente la resistencia de los materiales actuando como un amortiguador para las ondas de choque producidas por impactos repetidos, considerando que en virtud de la atmosfera de nitrógeno líquido los defectos con mayor concentración muestran una función inversa de haber proporcionado más sitios para la humedad absorbida a forma de hielo facilitando la iniciación de grietas reduciendo el número de ciclos que podía soportar le material.

Arbelaiz, Fernández, Cantero, et al <sup>29</sup> en el 2005 investigaron el efecto de tratamientos de fibra y modificación de matriz en las propiedades mecánicas de biocompuestos. Se llevaron a cabo tratamientos con productos químicos como el anhídrido maleico y alcalización de fibra se llevaron a cabo con el fin de modificar la interface de unión de fibra y la matriz polimérica. Los compuestos fueron producidos de dos formas: mezcla interna y extrusión. También analizaron el comportamiento mecánico de la fibra lino y los compuestos híbridos fibra vidrio/lino, estudiando las superficies de fractura por microscopia electrónica los resultados sugieren que es mejor la modificación de matriz para mayor rendimiento mecánico que la modificación superficial de fibra.

En el 2006 Long Yu, Katherine Dean y Lin Li <sup>30</sup> investigaron las mezclas de polímeros y compuestos a base de recursos renovables comentando los avances recientes y presentando una serie de aplicaciones potenciales para esta clase de materiales tales como almidón, proteínas, celulosas o polímeros de fermentación microbiana. En julio del mismo año Manfredi, Rodríguez, Wladyka-Przybylak et al <sup>31</sup> investigaron la degradación térmica y resistencia al fuego en poliéster insaturados, resinas acrílicas modificadas y sus compuestos con fibras naturales, con los resultados obtenidos sobre la resistencia térmica y al fuego fue posible concluir que la fibra de lino parece ser más adecuada para ser utilizado debido al largo tiempo a la ignición y el largo

periodo antes de llegar a la descarga disruptiva, por otro lado los compuestos de fibra de yute mostraron una corta duración en la prueba de fuego pero con una emisión de humo menor. El bajo índice de humo es una ventaja importante, lo que reduce uno de los principales peligros del incendio. Otro trabajo importante fue el de Baley, Busnel, Grohens y Sire <sup>32</sup> quienes trataron la fibra de cáñamo usando etileno y hongos de *Schizophyllum*, con el fin de mejorar la unión con una matriz de polipropileno, estos biocompuestos fueron producidos por fibra de película larga por medio de apilamiento, de nuevo se obtuvo como resultado que las fibras tratadas mejoraron sus propiedades de resistencia mecánica una investigación similar fue realizada por Pracella, Chionna, Anguillesi et al <sup>33</sup> obteniendo los mismos resultados en las fibras tratadas.

Thi-Thu-Loan Doan, Shang Lin Gao y Edith Mader <sup>34</sup> en este mismo año estudiaron el efecto de la modificación de una matriz de material compuesto a base de yute, en esta investigación mencionan que los Polímeros reforzados con fibras naturales pueden exhibir muy diferentes prestaciones mecánicas y resistencias de envejecimiento medio ambiental dependiendo en sus propiedades de interfase, pero la mayoría de los estudios se han centrado en el tratamiento de superficie de fibras encontrando que las propiedades de tracción intrínsecas de fibra de yute son proporcionales a las fibras de área de sección transversal. T.A. Bullions, D. Hoffman, R.A. Gillespie, J. Prince O Brien y A.C. Loos <sup>35</sup> elaboraron diferentes compuestos a base de fibras de pluma moldeadas por compresión a partir de múltiples capas obteniendo resultados en las propiedades mecánicas similares a los compuestos fabricados en base a fibras de estopa.

En el 2007, Betiana A. Acha, María M. Reboledo, Norma E. Marcovich <sup>36</sup> estudiaron la respuesta dinámica y el comportamiento de recuperación de fluencia de los materiales compuestos a partir de tejidos de yute bidireccionales con polipropileno con el fin de mejorar la compatibilidad de las fibras y la matriz se manejaron dos alternativas que era la adición de agentes de acoplamiento y la modificación química de las fibras, en este análisis se pudo observar una clara separación entre las fibras y la matriz cuando la lignina fue utilizada como agente compatibilizante y cuando se utilizaron las fibras modificadas químicamente para preparar el biocompuesto. Con este estudio se pudo relacionar que la deformación progresiva podría estar directamente relacionada con las propiedades interfaciales. En este mismo año Zampaloni, Pourboghrat, Yankovich, et al <sup>37</sup> estudiaron la fabricación de la fibra de kenaf reforzado con láminas de polipropileno que podrían



ser transformadas para una amplia variedad de aplicaciones con propiedades que son comparables a materiales compuestos sintéticos. La investigación realizada en este estudio ha demostrado que el método de fabricación para estos materiales es un proceso de moldeo por compresión de un tamizado en capas de polvo de polipropileno y fibras de kenaf microfinas con un contenido de fibra de 30% y 40% en peso, para proporcionar un refuerzo adecuado y así aumentar la resistencia.

En este mismo periodo, Jamal Mirbagheri, Mehdi Tajvidi, John C. Hermanson e Ismaeil Ghasemi <sup>38</sup> investigaron las propiedades a tensión de polvo a base de madera y el kenaf como fibras reforzadas con polipropileno denominándolas como compuestos híbridos, para este estudio se prepararon fibras a diferentes proporciones y los resultados indicaron que la elaboración del bio-compuesto está estrechamente relacionado con la proporción de las partículas de refuerzo. Otro estudio importante fue el de la variación de las propiedades mecánicas y térmicas de termoplásticos reforzados con fibras naturales por procesamiento de “Haz de Electrones” elaborado por Sok Won Kim, Seugmin Oh y Kyuse Lee <sup>39</sup> obteniendo como resultado que gracias a este procesamiento la conductividad térmica y la resistencia a la tracción cambiaron volviéndose mínimas cuando la dosis de haz de electrones era 10kGy, también logrando una reducción en la deformación al finalizar el ciclo térmico.

En el 2008 Q. Liu y M. Hughes <sup>40</sup> estudiaron el comportamiento en compuestos reforzados con fibra de lino en fracciones superiores al 30% del volumen total por medio del proceso de infusión de resina. Los efectos de variación en densidad, la configuración, el apilamiento de las fibras, fueron analizadas para determinar el comportamiento en la resistencia y la fractura encontrando que la adición de fibras mejoro de 2 a 4 veces el esfuerzo máximo que el compuesto sin refuerzo de lino, ambas combinaciones fueron encontradas ser fuertemente dependiente de la densidad lineal del hilado de trama y la dirección de la propagación de la grieta con respecto a la orientación de la materia textil, sin embargo, la influencia del tipo de tejido no fue significativo. Se concluyó que la dureza está dominada por la fracción de volumen fibra, en lugar de la arquitectura de refuerzo. Por otra parte Maya Jacob John y Sabu Thomas <sup>41</sup> elaboraron una crítica enumerando los pros y los contras del uso de fibras naturales.

Yan Li y K.L. Pickering <sup>42</sup> estudiaron los materiales compuestos reforzados con fibra de cáñamo utilizando tratamientos de quelantes y encimas, el principal objetivo de este trabajo fue investigar el uso estos tratamientos, para separar las fibras de cáñamo a partir de sus paquetes, para mejorar la unión interfacial en el material compuesto. Por medio de análisis químico, FTIR, difracción de rayos X (XRD), análisis térmico y pruebas de tracción de la fibra solo se utilizaron para caracterizar el efecto del tratamiento sobre las fibras de cáñamo, obteniendo como resultado que las fibras tratadas aumentaron su fuerza de tracción máxima de 42 MPa, un aumento del 19% en comparación con materiales compuestos con sin tratamiento las fibras de cáñamo.

En este mismo año Mahmoodul Ha, Rigoberto Burgueño, Amar K. Mohanty y Manjusi Misra <sup>43</sup> investigaron compuestos a base de bio-híbridos por medio de mezclas de poliéster insaturado y nano-partículas a base de aceite de soja reforzadas con arcilla y fibras naturales identificando que los compuestos reforzados con arcilla conservan la rigidez original. Otro estudio importante fue elaborado por Thiranan Kunanoppart, Paul Menut, Marie Helene Morel y Stephane Guilbert <sup>44</sup> quienes estudiaron el efecto del tratamiento térmico sobre la adhesión de fibra/matriz por medio de plástico reforzado a base de fibras naturales elaboradas con gluten de trigo, Este estudio demuestra que el gluten de trigo / compuestos de fibras naturales sus propiedades mecánicas son menos sensibles al tratamiento térmico cuando el contenido de fibra aumenta. La adhesión física entre la fibra y gluten desempeña un papel clave en las propiedades mecánicas compuestas. La temperatura de procesamiento parece ser un parámetro importante que afecta a la adherencia física. De hecho, un tratamiento térmico inferior favorece una mejor presión matriz sensibles propiedades adhesivos. Por lo tanto, el refuerzo superior observado con temperatura de tratamiento inferior puede ser explicado por la mejor adhesión física de la matriz de gluten. Por otra parte, la adición de fibra no modifica el gluten de reticulación, cualquiera que sea la temperatura de procesamiento se utiliza, no afecta la desplastificación de la matriz, otro estudio realizado por los mismo autores fue la elaboración de biocompuestos a base de glicerol y reforzados mediante la adición de fibras naturales con gluten de trigo, el cáñamo y la adición de fibra de madera aumentaron tanto resistencia a la tracción compuesta y el módulo de Young, pero disminuyeron el alargamiento a la rotura. Los materiales resultantes mostraron menor sensibilidad al agua. Además de la fibra no modificada; la agregación de proteínas, provocó un aumento de la temperatura de transición vítrea de la matriz de material compuesto. Este aumento

se atribuye a la migración del plastificante desde la matriz a las fibras, lo que aumentó la matriz módulo de Young. Esta migración se llama matriz de desplastificación que contribuyó a la mejora de las propiedades mecánicas compuestas en general.

En el año 2009 Kestur G, Gregorio Arizaga y Fernando Wipych <sup>45</sup> elaboraron un estudio enfocado a materiales compuestos biodegradables, tanto materiales para la matriz, materiales de refuerzo, tratamientos superficiales, métodos de procesamiento, propiedades que se deben de cumplir como materiales compuestos biodegradables, incluye nuevos caminos para producir polímeros naturales con mejores propiedades mecánicas y estabilidad térmica usando nanotecnología y el uso de polímeros naturales para hacer plásticos biodegradables y sus componentes con fibras lignocelulosas. S. Alix, E. Philippe, A. Bessadok, L. Lebrun, C. Morvan y S. Marais <sup>46</sup> estudiaron el efecto de los tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas de la fibra de lino y su absorción de agua, Estos diferentes tratamientos se realizaron con anhídrido maleico (MA), anhídrido acético (Ac), silano (Si) y estireno (S). Las fibras de lino modificadas se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja y análisis de energía superficial. El efecto de estos tratamientos sobre la absorción de agua se investigó mediante el uso de un método gravimétrico obteniendo isothermas de absorción de agua. Se encontró que los tratamientos (Ac) y en particular (S) reducen la absorción total de agua de las fibras de lino.

Otro estudio interesante en este mismo periodo fue el de Alain Bourmaud y Christophe Baley <sup>47</sup>, quienes analizaron la rigidez de los materiales compuestos de fibra de polipropileno y vegetal después del reciclaje, Los resultados obtenidos demuestran que el módulo de tracción de estos materiales compuestos de fibra de polipropileno / vegetal está bien conservada con el número de ciclos de reprocesamiento. En este trabajo, se investigó la relación entre las propiedades mecánicas de las fibras y las de los materiales compuestos mediante la adopción de la influencia del reciclaje en cuenta.

G. Cicala, G. Cristaldi, G. Recca, G. Ziegmann <sup>48</sup> investigaron la hibridación de fibras de vidrio con fibras naturales para aplicaciones en la industria de tuberías. Las fibras naturales estudiadas fueron el cáñamo, el lino y el kenaf. El tubo seleccionado para el estudio fue un montaje curvada (90) con bridas en ambos extremos diseñados para soportar una interna presión de 10 bar y en

presencia de soluciones acuosas de ácido. Se analizaron propiedades mecánicas tales como resistencia a la tracción y la prueba de flexión de vidrio híbrida con fibra natural y epoxi en la lámina preparada con fibras naturales mostró propiedades mecánicas inferiores en comparación con láminas con fibra de vidrio. Por esta razón propusieron utilizar un diseño híbrido para el tubo que hace uso de fibra de vidrio y fibras naturales esteras. La adopción de este diseño permitió una reducción de costes del 20% y un ahorro de peso del 23% en comparación a la solución comercial actual.

En el año 2010 John Summersales, Nilmini P.J. Dissanayake, Amandeep S. Virk y Wayne Hall<sup>49</sup> investigaron las fibras de estopa y sus diversas composiciones, este tipo de fibras se definen como aquellas obtenidas por capas de células exteriores de los tallos de diversas plantas, este estudio muestra la posibilidad de utilizar la estopa como fibras de refuerzo para materiales compuestos de matriz polimérica además de presentar las técnicas de separación y cosecha adecuados para producir la fibra de una calidad apropiada, otra investigación interesante fue presentada por Venkateshwaran Narayanan y Ayyasamy Elayaperumal<sup>50</sup> quienes entre los varios materiales han explorado la posibilidad de utilizar fibras a base de plátano como agente de refuerzo en el cemento y materiales compuestos basados en polímeros analizando desde su estructura, física, propiedades mecánicas y diferentes tratamientos de superficie de fibra de plátano. Debido a la baja densidad, se obtiene una alta resistencia, alto módulo de tracción, y bajo alargamiento a la rotura de fibras, los materiales compuestos basados en estas fibras tienen muy buen uso potencial en los diversos sectores como construcción y automotriz. Azman Hassan, Arshad Adam Salema, Farid Nasir Ani y Aznizam Abu Bakar<sup>51</sup> realizaron un trabajo enfocado al aceite de palma para fibras de refuerzo en compuestos poliméricos, el compuesto producido a partir de estos tipos de materiales son de baja densidad, bajo costo, propiedades específicas comparables los materiales compuestos producidos de fibras de aceite de palma de aceite y polímeros comercialmente disponibles han ofrecido algunas propiedades específicas que pueden ser comparables a los materiales compuestos convencionales de fibra sintética. Sin embargo, estas propiedades dependen mucho sobre la compatibilidad de fibras de aceite de palma y matriz con absorción de la humedad como uno de los temas críticos que se convierte en los inconvenientes de los materiales compuestos de fibra de aceite de palma polímero. Al parecer, afectan en gran medida las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos.

M. Asim, Khalina Abdan, M. Jawaaid, M. Nasir y Zahra Dashtizadeh <sup>52</sup> en este año centraron su atención en las hojas de Fibra de piña (PALF) es uno de los materiales de desechos que abundan y están disponibles en Malasia, esto no ha sido estudiado pero se requiere. Un estudio detallado de las propiedades químicas, físicas y mecánicas sacará utilización lógica y razonable del PALF para diversas aplicaciones. Desde la perspectiva socioeconómica, PALF puede ser una nueva fuente de materia prima a las industrias y puede ser un potencial reemplazo de la fibra sintética cara y no renovable. Sin embargo, se tiene poca información referente a este tipo de fibra, en esta investigación los autores cubren la información básica del PALF y en comparación con las propiedades químicas, físicas y mecánicas con otras fibras naturales. Además, resume el trabajo reciente informado sobre propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los compuestos del polímero PALF reforzado con sus posibles aplicaciones.

En el 2011, S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi y M. Kochubabu <sup>53</sup> publicaron un resumen enfocado a tecnología verde en ciencia de materiales a través del desarrollo de biocompuestos. La fibra de aceite de palma (OPF) se extrae de los racimos de fruta vacíos. Está probado como una buena materia prima para biocomposites. El contenido de celulosa OPF está en el rango de 43% -65% y el contenido de lignina está en el rango de 13% -25%. Una compilación de morfología, constituyentes químicos y las propiedades de OPF según lo informado por varios investigadores se recogen y se presentan en este documento. La idoneidad del OPF en diversas matrices de polímeros, como caucho natural, polipropileno, cloruro de polivinilo, fenol formaldehído, poliuretano, epoxi, poliéster, etc. para formar biocompuestos según lo informado por varios los investigadores en el pasado reciente están compilados. Las propiedades de estos compuestos, es decir, físicas, mecánicas, absorción de agua, térmica, degradación, propiedades eléctricas, etc; fueron estudiadas. La resistencia de los materiales compuestos resultantes mejoró. Los materiales compuestos se volvieron más hidrófilos con la adición de OPF. Sin embargo, los tratamientos en la superficie de la fibra mejoraron las propiedades compuestas. El tratamiento alcalino en OPF es preferido para mejorar la adhesión fibra-matriz en comparación con otros tratamientos. El efecto de varios tratamientos en las propiedades de OPF y la de los compuestos resultantes informados por varios investigadores se compilan en este papel. Estabilidad térmica, constante dieléctrica, conductividad eléctrica, etc. de los compuestos mejorados después de la incorporación de OPF. Las propiedades de resistencia se reducen después de la erosión /

degradación. Fibra de sisal Se informó como una buena combinación con OPF en compuestos híbridos.

Huber, T. Mussing, J. Curnow O, Pang S, Bickerton S, Staiger M.<sup>54</sup> presentan una revisión sobre las ventajas y desventajas de los materiales compuestos a base de fibras naturales, siendo compuestos monocomponentes basados en celulósicos y como estos prometen superar el problema crítico de la adhesión de la fibra/matriz en un biocompuesto utilizando materiales celulósicos químicamente similares o idénticos tanto para la matriz como para el refuerzo. En este mismo año (2012) Huber T, en compañía de Pang S, y Staiger M.<sup>55</sup> desarrollan un nuevo método para el procesamiento de materiales compuestos laminados con fibra de celulosa reforzada utilizando dos tipos de fibras naturales e impregnados con un líquido iónico (IL) 1 butil-3-metilimidazolio acetato (BMIMAc), calentando las capas a presión para que las superficies de las fibras se disolvieran parcialmente en el IL y lograr la compactación en el compuesto, los resultados fueron evaluados a través de microestructura y las transformaciones de fase, revelaron que el comportamiento de la disolución de la celulosa artificial tuvieron un mejor comportamiento y una interface matriz fibra más homogénea y por consecuencia mejores propiedades de tracción.

En el 2013, los autores Shanmugam y Thiruchitrambalam<sup>56</sup> realizaron estudios en fibras de hoja de palma y yute, para evaluar las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas enfocándose en tratamientos superficiales de tipo alcalino para determinar si este tiene un efecto positivo en sus propiedades, para ello utilizaron una matriz poliéster y el tipo de arreglo en el refuerzo fue unidireccional, determinando que los compuestos híbridos, mostraban mejores propiedades en tracción y flexión, a diferencia de la resistencia al impacto, se observó que en los compuestos híbridos fue menor que en los compuestos puros. Así mismo, Zhu J, Zhu H, Njuguna J, y Abhyankar<sup>57</sup>, publicaron los resultados de una investigación enfocada en fibras de lino con diferentes matrices poliméricas además del efecto de los tratamientos avanzados como son la mercerización, silano, acilación, peróxido y algunos recubrimientos que tienen la finalidad de mejorar la incompatibilidad de la fibra y la matriz, discutiendo las propiedades y características de los compuestos de lino en diversos polímeros incluyendo polipropileno, ácido polialítico, epoxy, bio-epoxy y resina biofenólica; además de una investigación enfocada a la nanotecnología

aplicada a compuestos basados en fibra de lino. En este mismo año Shah, Schubel y Clifford <sup>58</sup>, buscan el análisis de un compuesto a base de fibra de lino para una aplicación estructural, siendo esta un álabe de aerogenerador de baja capacidad y evaluar si este puede ser un sustituto en un álabe de turbina de baja capacidad, obteniendo como resultado que la fibra/matriz utilizada y dimensiones propuestas, no son viables para condiciones críticas de operación.

En el 2014, Mir, Zitoune, Collombet y Bezzazi <sup>59</sup>, desarrollaron la caracterización de un material compuesto laminado con fibra de yute natural para conocer el comportamiento térmico de la fibra de yute, obteniendo como resultado que el comportamiento mecánico de la fibra a 180 C pierde el 50% de sus propiedades mecánicas, este gradiente se explica por la variabilidad relacionada con el cambio de volumen local de las fibras de yute de un lugar a otro y la naturaleza del tejido de la fibra. Las pruebas de flexión de 3 puntos mostraron una dispersión significativa del esfuerzo de ruptura y las pruebas termomecánicas muestran que el coeficiente término de expansión en la dirección de urdimbre es 48% mayor en comparación de la dirección de la trama. La prueba termo gravimétrica mostró que este tipo de compuesto absorbe hasta un 4% de masa de agua después de 8 horas en una cámara climática con un contenido de humedad del 70%. En el mismo año Santulli y Caruso <sup>60</sup>, estudiaron el efecto de la arquitectura de la fibra en las propiedades de impacto de compuestos a base de tres diferentes tipos cáñamo y resina epóxica, dos de los cuales se realizaron utilizando fibras de cáñamo sueltas en forma unidireccional, mientras que la última, se utilizó un tejido, con la finalidad de evaluar si la reducción de volumen al utilizar fibras tejidas tiene un efecto significativo en las propiedades de impacto.

Srivastava y Maurya <sup>61</sup> publicaron en el 2015 un estudio enfocado a desarrollar un material a base de fibra natural teniendo como ventaja la reducción de la densidad, ahorro en costos de manufactura y menor relación resistencia/peso; para esto la materia prima fue la cascara de coco variando el porcentaje de fibra en un 10, 20 y 30% y analizando sus propiedades mecánicas. En este mismo año, Asim y otros autores <sup>62</sup>, realizaron estudios enfocados a la fibra de hojas de piña, siendo este uno de los materiales de mayor desecho y disponible en Malasia, presentando un resumen de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas e identificando que existen pocos

trabajos entre la adherencia entre las fibras y la compatibilidad del refuerzo de la fibra con la matriz.

En 2016, los estudios enfocados en conocer el comportamiento de un compuesto a base de fibra natural continúan, por lo que Omrani, Menezes y Rohatgi <sup>63</sup>, presentan un resumen de los estudios enfocados al comportamiento tribológico de un material compuesto reforzado de fibra natural, esta revisión presenta desde los tratamientos de las fibras y como pueden mejorar sus propiedades tribológicas, como estas pueden ser comparables a las fibras convencionales además se identifica como la orientación de la fibra también es un factor para determinar su comportamiento ante la fricción y el desgaste. Esta revisión intenta evaluar el efecto del parámetro de prueba, desde una carga normal, la velocidad de deslizamiento en las propiedades y como varían los resultados dependiendo del tipo de refuerzo, y como este tipo de compuestos muestra un potencial para emplearse en diferentes aplicaciones debido a los resultados obtenidos. En este mismo año Azam, Khubab, Yasir, Madeha, Tanveer, Jiri y Vijay <sup>64</sup> realizan un estudio de como tener un tratamiento para evitar la degradación por absorción de agua y microorganismos para evitar perder propiedades mecánicas evaluando el efecto de diferentes tratamientos superficiales y sus propiedades mecánicas.

Dayo, Gao, Wang, Liu, Derradji, Shah y Babar <sup>65</sup> realizan un estudio similar en el 2017 con la finalidad de evaluar fibras cortas de cáñamo tratadas con una solución al 5% de NaOH, con la finalidad de evaluar el efecto del tratamiento en el volumen de la fibra, comportamiento de curado, propiedades termomecánicas y térmicas, utilizando técnicas de FTIR, calorimetría diferencial de barrido (DSC), analizador mecánico dinámico (DMA), análisis termo gravimétrico, y microscopio electrónico de barrido; mostrando como resultado que el impregnado a una temperatura de curado más baja pueden mejorar la unión entre la fibra y la matriz, además de encontrar un aumento del 185% en la resistencia al impacto, 1.3 GPa en módulo de flexión y 109% en la resistencia a la tracción.



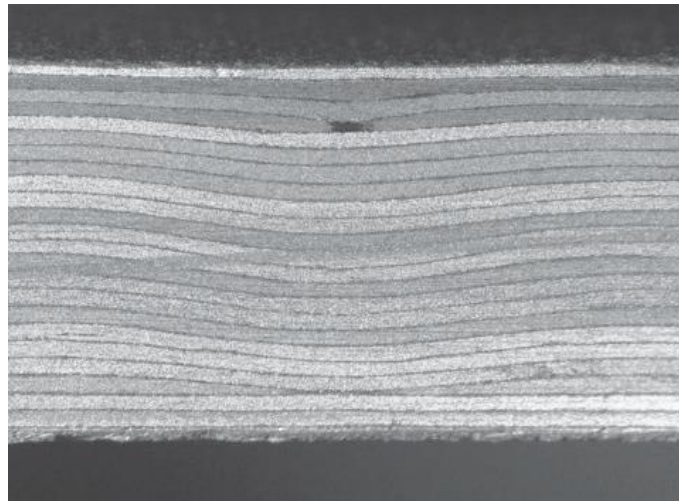
En el 2018, los autores Sepe, Bollino, Bocarusso y Caputo <sup>66</sup> enfocaron sus esfuerzos en analizar la influencia química de los tratamientos sobre fibras de cáñamo en sus propiedades mecánicas, evaluando las características de las fibras por la técnica de espectroscopia infrarroja (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM), obteniendo como resultado una mejora en la unión de la fibra con la matriz a través de un tratamiento alcalino y un agente de acoplamiento (3-glicidiloxipropil), en el caso de las propiedades mecánicas los resultados mostraron una mejora tanto en las propiedades de tracción como flexión. En este mismo año Manimaran, Senthamaraikannan, Sanjay, Marichelvam y Jawaaid <sup>67</sup>, presentan un estudio enfocado a evaluar una nueva fibra, en propiedades físico químicas, térmicas, de tracción y morfológicas de la fibra *Furcraea Foetida*, evaluando desde su contenido de celulosa y lignina, encontrando un índice de cristanilidad del 52.6%. El análisis termo gravimétrico (TGA) revela una constancia térmica de la fibra hasta 320.5 ° C con una energía de activación cinética de 66.64 kJ / mol, que se puede usar como refuerzos en material compuesto termoplástico verde cuyas temperaturas de trabajo están por debajo de 300 ° C. Los resultados de la fibra se compararon con los de otras fibras naturales indicando una alternativa adecuada para la fabricación de compuestos a base de matriz polimérica.

Como conclusión se puede mencionar que existe una gran variedad de fibras naturales y resinas biodegradables a nivel global, sin embargo los estudios actuales se enfocan en el análisis de propiedades exponiendo los biocompuestos a diversos fenómenos o pruebas para conocer su comportamiento y en el caso de la industria aeronáutica o aeroespacial no se ha buscado una aplicación por lo que se considera que el trabajo que esta por realizarse abrirá una nueva área de oportunidad en la aplicación de materiales compuestos a base de fibra natural.

## Capítulo II

### Marco Teórico

Un material compuesto (MC) puede definirse como la combinación macroscópica de un material de refuerzo y un material diferente que actúa como 'ligante' o matriz y con una interface diferencial y reconocible entre ellos. La **Figura 1** es una micrografía, a 25 aumentos, de una sección de material compuesto carbono/epoxi. Cada uno de los constituyentes debe mantener su identidad y no reaccionar entre sí ni disolverse uno en otro, de modo que el material obtenido es una mezcla. El material de refuerzo, en forma de fase discontinua, aporta las propiedades mecánicas de interés y la matriz que engloba al refuerzo y hace del material una estructura es responsable de la resistencia térmica y ambiental del material.



**Figura 1:** Micrografía de una sección de material compuesto carbono/epoxi

La micrografía del refuerzo permite una primera clasificación: MC granulares, MC de fibra corta y MC de fibra larga o continua. Todos los materiales compuestos avanzados están reforzados por fibras continuas de altas características.

Atendiendo a la naturaleza de la matriz, los materiales compuestos pueden clasificarse de acuerdo con el diagrama de la **Figura 2**. La matriz puede ser polimérica, cerámica o metálica; cada uno de estos grupos se subdivide a su vez con materiales específicos, como matriz orgánica de epoxi o

de poliéster, o matriz metálica de aleación de aluminio o de titanio. La elección del tipo de matriz está condicionada fundamentalmente por la temperatura de servicio. Matrices poliméricas hasta 200 °C (algunos tipos especiales como las de poliamida pueden utilizarse hasta los 300 °C), matrices metálicas hasta casi la temperatura de fusión de la aleación correspondiente y matrices cerámicas, vítreas o poli-cristalinas, para temperaturas elevadas, pudiendo utilizarse matrices de carbono para temperatura extremas en atmosfera reductora.

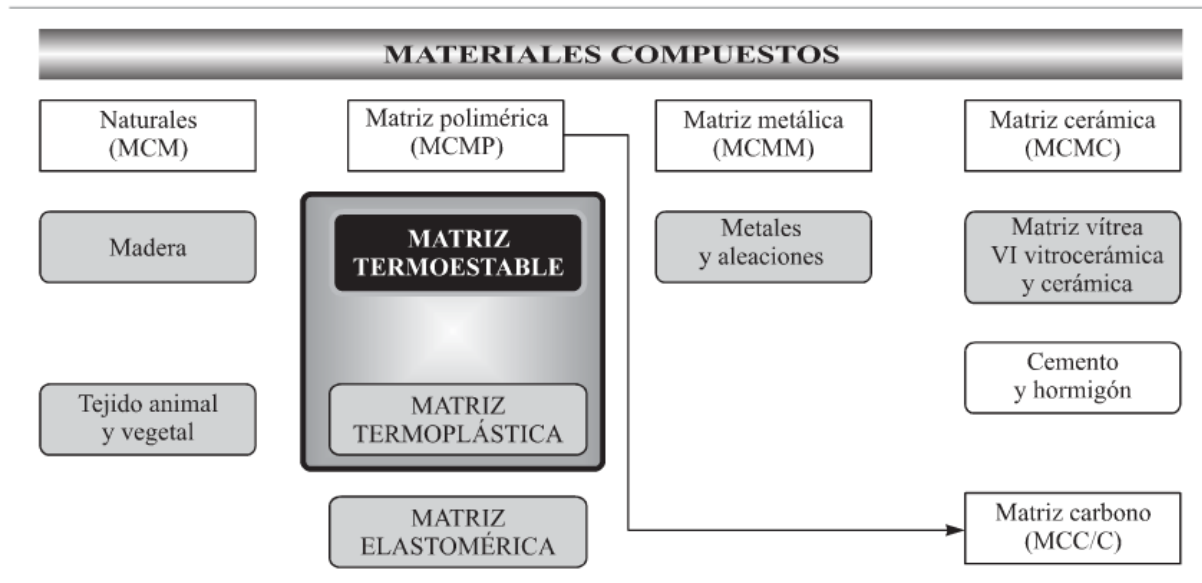


Figura 2: Clasificación de los materiales compuestos.

Los materiales compuestos son atractivos porque combinan propiedades de una manera que en la naturaleza no se encuentran. Estos materiales comúnmente resultan en estructuras ligeras con buenas propiedades de rigidez y deformación para aplicaciones específicas, reduciendo el peso y necesidades energéticas. El mercado de los compuestos reforzados con fibra (Figura 3) es un negocio multimillonario. La fibra de vidrio es la fibra dominante con un 95% de los casos de termoplásticos reforzados y compuestos termoestables.

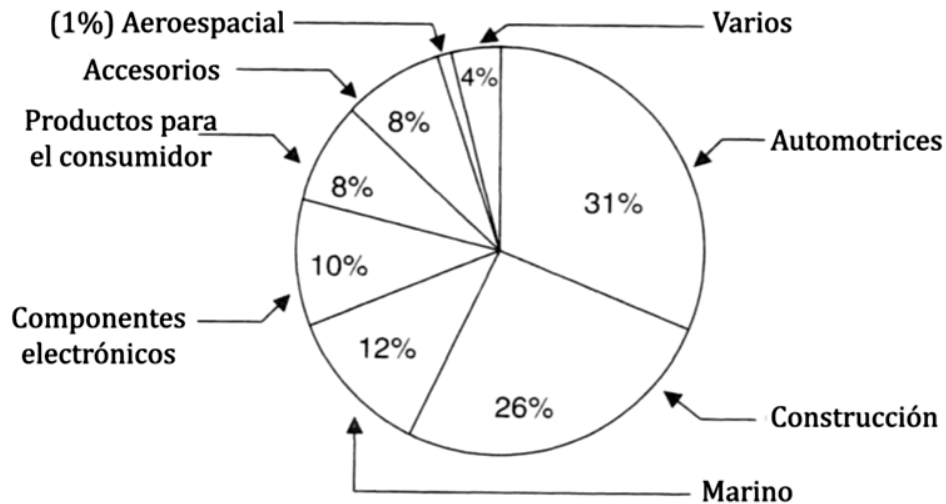


Figura 3: Compuestos plásticos reforzados con fibra usados en 2002 –  $2.28 \times 10^9$  \$ lb.

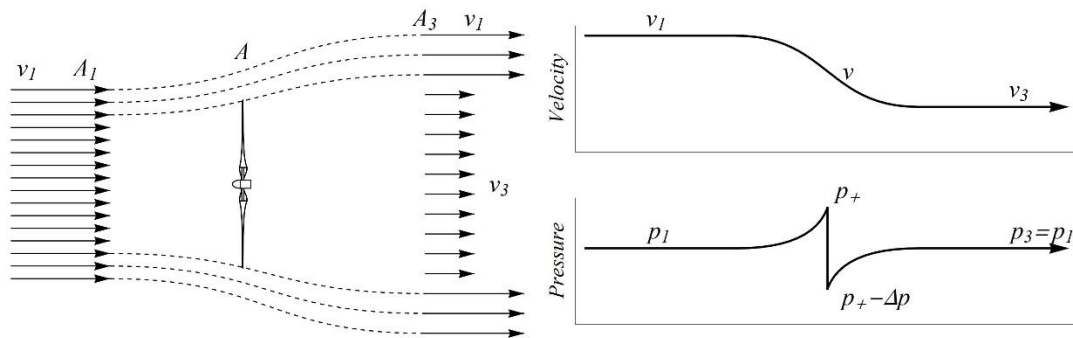
## 2.1 Teoría de Aerogeneradores

Esta sección describe las bases matemáticas para obtener el OPI (Ideal Power Output) de una turbina eólica de baja capacidad, el cual es función directa de los álabes del aerogenerador. Debido a que el perfil aerodinámico tiene una influencia crucial en la eficiencia de los aerogeneradores, los álabes son diseñados utilizando las familias de los perfiles de aeronaves NACA y debido que la punta del álabes está diseñada, con una superficie aerodinámica delgada, esta genera una relación de alta relación de los coeficientes de arrastre y sustentación. Para determinar el perfil óptimo y el IPO, este proyecto se basa en la teoría de Betz, siendo la velocidad de viento uno de los principales parámetros para esta ecuación.

Baja California, México tiene una velocidad de viento promedio registrada de 10-15 m/s, siendo este parámetro la base para calcular el perfil optimo teórico para la investigación. El número de álabes se seleccionó debido a la literatura consultada que indica que no hay una diferencia significativa en la producción de energía entre los HAWT de 3 y 4 álabes y el costo de fabricación es mayor cuando el número de álabes aumenta.<sup>68</sup>

De acuerdo a la teoría de Betz, existe un óptimo para la reducción de la velocidad del viento con el fin de extraer la máxima energía. La potencia del viento es extraída por la desaceleración del viento causada por el aerogenerador (figura 4), pero está claro que la velocidad no se puede

reducir a cero, basándose en la ecuación de Bernoulli, se puede encontrar la relación entre la potencia (P) y la velocidad (v).



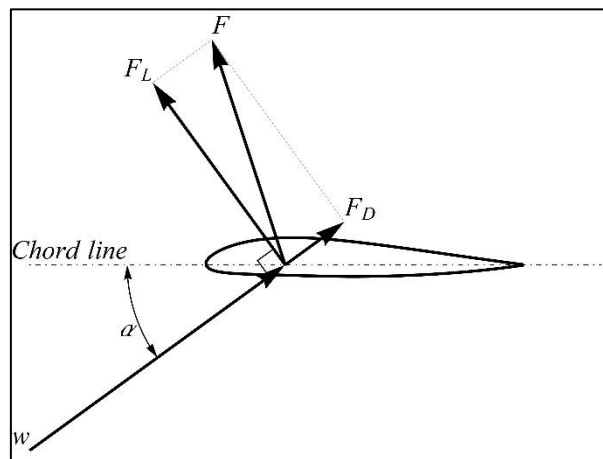
**Figura 4.** Representación del viento a través de los álabes del aerogenerador.

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A C_p \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho v_1^2 A C_T \quad (2)$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente de potencia,  $\rho$  es la densidad del aire,  $v$  es la velocidad de viento y tiene una relación óptima de 16/27, a un factor de interferencia axial de 1/3 de acuerdo a Betz, la producción de energía puede ser determinada como:

$$P_{Betz} = C_{PBetz} \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (3)$$



**Figura 5.** Definición del ángulo de ataque  $\alpha$

Cuando el aire golpea el álabes del aerogenerador en un ángulo  $\alpha$  (ángulo de ataque), la fuerza de la pala  $F$  se puede dividir en dos componentes la fuerza de sustentación  $F_L$  y la fuerza de arrastre

$F_D$ , donde la fuerza de sustentación es perpendicular a la sección de viento (figura 5). Las fuerzas de arrastre y sustentación se calculan como:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho \omega^2 (bc) \quad (4)$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho \omega^2 (bc) \quad (5)$$

Donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre,  $w$  es la velocidad relativa de viento,  $b$  es la longitud del álabe,  $c$  es la longitud de la cuerda. Ambos coeficientes son en función al ángulo  $\alpha$ . La mayoría de los álabes aerodinámicos de baja velocidad ( $M \ll 1$ ) tienen rangos de operación útiles entre 15 a 20 grados, por encima de estos valores, el aire ya no está unido al álabe debido al fenómeno de bloqueo (stall) y la fuerza de sustentación tiene a caer drásticamente.

La relación  $C_L / C_D$  es la "Glide Ratio" (GR), por lo general es de interés para los álabes de aerogeneradores, donde las relaciones mayores a 100 no son raras, y los ángulos de unión que dan el máximo son típicos dentro de los rangos de 5 a 10 grados. La figura 6 muestra los triángulos de velocidad a cierta distancia  $r$ , desde el eje del rotor, se muestra con dos cuchillas ( $B=2$ ) para diseñar el rotor, el ángulo pitch  $\beta$  y la longitud de cuerda  $c$  necesitan ser definidos. Ambos dependen del radio dado por tanto es descrito como  $\beta(r)$  y  $c(r)$

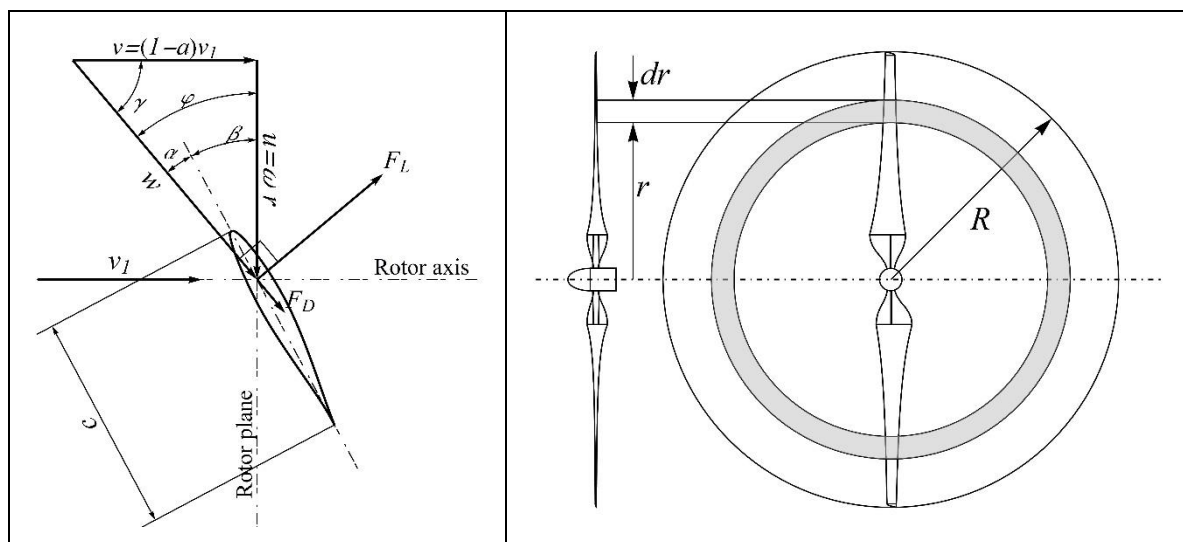


Figura 6. Velocidades y ángulos de representación para la caracterización del viento.

Los ángulos dependen del radio los cuales son:

$\gamma(r)$  = ángulo del viento relativo al eje del rotor

$\varphi(r)$  = ángulo del viento relativo al plano del rotor

$\beta(r)$  = ángulo “pitch” al álabe

El álabe como se muestra en la figura 6B, se está moviendo hacia arriba, por lo que la velocidad de viento vista desde el álabe, se está moviendo hacia abajo con una velocidad  $u$ , por lo tanto:

$$\gamma(r) = \arctan \frac{3rX}{2R} \quad (6)$$

$$\varphi(r) = \arctan \frac{2R}{3rX} \quad (7)$$

Basándose en las ecuaciones 6 y 7, el ángulo “pitch” es determinado por:

$$\beta(r)_{Betz} = \arctan \frac{2R}{3rX} - \alpha_D \quad (8)$$

Donde,  $\alpha_D$  es el ángulo de ataque usado para determinar la orientación del álabe. En la mayoría de los casos, el ángulo se elige para que sea cercano a este, con la finalidad de proporcione la relación máxima de “Glide Ratio”, el cual cae por lo regular en el rango de 5 a 10 grados. Una vez que se establece el ángulo de inclinación, el siguiente paso es calcular las fuerzas que actúan sobre el álabe. La primera es el par, que actúa sobre el plano del rotor:

$$dU = \frac{1}{2} \rho w^2 c d_r C_x \quad (9)$$

Con la siguiente ecuación:

$$C_x = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (10)$$

La segunda es el empuje, actuando sobre la dirección del eje del rotor:

$$dT = \frac{1}{2} \rho w^2 c d_r C_y \quad (11)$$

Usando:

$$C_y = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (12)$$

La mayoría de los perfiles alares cubren la condición de  $C_L \gg C_D$ , de manera que el torque se convierte en:

$$dU = \frac{1}{2} \rho w^2 c d_r C_L \cos \gamma \quad (13)$$

Después la potencia es calculada por:

$$dP = \frac{1}{2} \rho w^2 c d_r C_L \cos \gamma r \omega \quad (14)$$

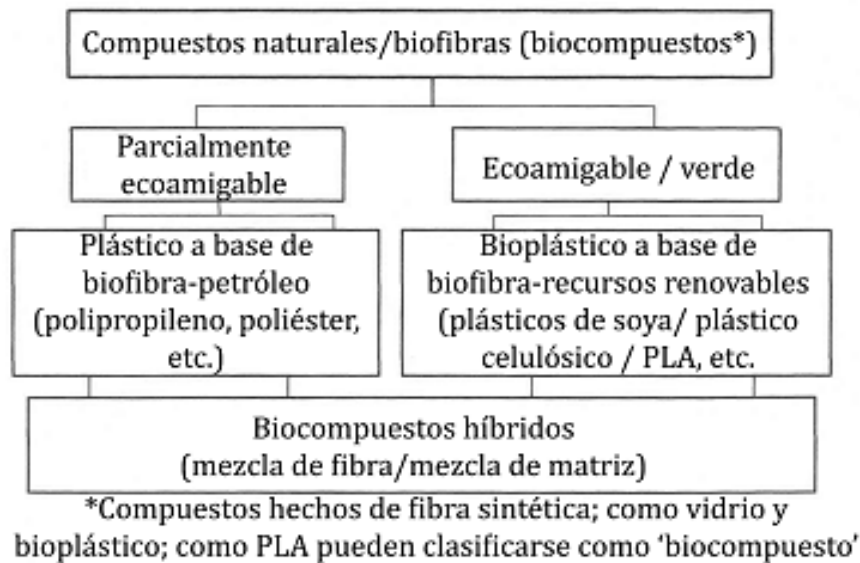
Para encontrar los coeficientes de arrastre y sustentación de los perfiles aerodinámicos, los números típicos de Reynolds que se encuentran en el funcionamiento de las turbinas eólicas de baja capacidad, oscilan en el rango de 5,000 y un millón.

## 2.2 Tipos de Fibras Naturales

Resultados de investigaciones actuales demuestran que, en ciertas aplicaciones de compuestos, las fibras naturales demuestran un desempeño competitivo a las fibras de vidrio.

De manera general, los biocompuestos (**Figura 7**) son materiales compuestos hechos de fibras naturales y polímeros no biodegradables derivados del petróleo como PP (Polipropileno), PE (Polietileno), y epoxis o biopolímeros como PLA (Poliácido láctico) y PHAs (Polihidroxialcanoato). Materiales compuestos derivados de biopolímeros y fibras sintéticas como las de vidrio y carbono también entran dentro de la clasificación de biocompuestos. Los biocompuestos derivados de fibras provenientes de plantas (naturales/biofibras) y plásticos degradables o plásticos derivados de origen natural (biopolímeros / bioplásticos) son más ambientalmente amigables, y estos biocompuestos son algunas veces llamados “compuestos verdes”.





**Figura 7.** Clasificación de compuestos de fuentes biológicas.

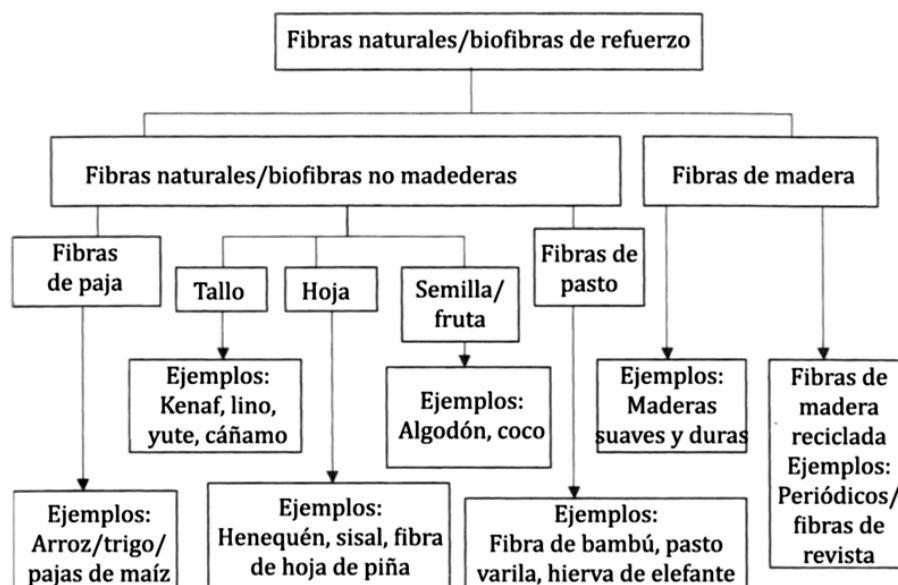
Después de décadas de desarrollo de fibras artificiales de alto desempeño como carbono, aramida, y vidrio, las fibras naturales han ganado un renovado interés, especialmente como un sustituto de la fibra de vidrio en la industria automotriz. Ventajas de las fibras naturales sobre las sintéticas o hechas por el hombre son las siguientes: bajo costo, baja densidad, propiedades aceptables de resistencia específica, facilidad de separación, reducción de dióxido de carbono, y biodegradabilidad. Compuestos de fibras naturales están emergiendo como una alternativa realista a plásticos rellenos de madera o reforzados con vidrio. Los biocompuestos amigables con el ambiente tienen el potencial de ser el nuevo material del siglo XXI y puede ser una solución parcial a muchos problemas ambientales globales.

Materiales compuestos de fibras naturales se han utilizado cada vez más en la última década. Las preocupaciones ambientales han dado lugar a la sustitución de los materiales compuestos sintéticos y plásticos con materiales compuestos de fibra natural. Muchos compuestos de fibras naturales son biodegradables y provienen de fuentes renovables. Otras ventajas son que son de peso ligero y relativamente barato. La economía 'verde' emergente se basa en la eficiencia energética, materiales de alimentación renovables en productos de polímeros, los procesos industriales que reducen las emisiones de carbono y materiales reciclables, y va acorde a los lineamientos de NFRC (National Fenestration Rating Council, USA). A modo de comparación,

hacer crecer 1 tonelada de fibra de yute requiere menos de 10% de la energía utilizada para la producción de polipropileno. Las fibras naturales se considera que son 100% biodegradables.

Cada año, los agricultores cosechan alrededor de 35 millones de toneladas de fibras naturales de una gran variedad de plantas y animales - de ovejas, conejos, cabras, camellos y alpacas, desde bolas de algodón, abacá y hojas de sisal y cáscaras de coco, de los tallos de yute, plantas de cáñamo, lino y ramio.

Sin importar las variaciones anatómicas de especies específicas de plantas, todas comparten una similitud, su componente estructural orgánico fundamental es la celulosa. La mayoría de las fibras vegetales también contienen, en composiciones distintas y contenido, los polímeros estructurales orgánicos hemicelulosa(s) y lignina(s). Teniendo estos tres componentes orgánicos, las fibras de plantas son llamadas fibras lignocelulósicas, materiales lignocelulósicos o simplemente lignocelulosa. Los compuestos reforzados con biofibras representan una fuente potencial no tradicional, con valor agregado de ingresos para la comunidad agricultora.



**Figura 8:** Representación esquemática de clasificación de fibras naturales/biofibras de refuerzo.



**Figura 9.** Imágenes de algunas fibras naturales y fuentes de fibras naturales.

Actualmente muchas fibras no derivadas de la madera (p.e., cáñamo, kenaf, lino, y sisal) están siendo utilizadas comercialmente en biocompuestos en combinación con polipropileno para aplicaciones automotrices.

Generalmente, una fibra es un objeto que es estirado, con un índice de longitud – diámetro de algo más de uno. Uno puede pensar que las fibras naturales son cualquier tipo de fibra extraídas de la naturaleza, de una planta, un animal, o un mineral (**Tabla 1**). Las fibras naturales pueden ser procesadas a mano, con herramientas simples o mediante procesos industriales sofisticados para hacerlas útiles para un propósito específico, pero están claramente distinguidas de las fibras fabricadas que son sintetizadas.

Las fibras de rayón, por ejemplo, son químicamente reconstituidas a partir de la celulosa obtenida de las plantas, pero no son vistas generalmente como fibras naturales debido al grado del proceso químico requerido.

Este trabajo se enfoca a fibras naturales de fuentes vegetales y minerales, las cuales aparecen en la tabla siguiente.

| Fibras naturales                   |                            |                                           |                                                                                                          |                              |                                                       |                                                             |                                                                                                   |                                    |                                 |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Vegetal (celulosa o lignocelulosa) |                            |                                           |                                                                                                          |                              |                                                       |                                                             | Animal (Proteína)                                                                                 |                                    | Mineral                         |
| Semilla                            | Fruta                      | Estopa                                    | Hojas                                                                                                    | Madera                       | Tallo                                                 | Caña, hierva o pasto                                        | Lana/Pelo                                                                                         | Seda                               | Asbestos                        |
| Algodón<br>Kapok<br>Algodoncillo   | Coco<br>(fibra de cáscara) | Lino<br>Cáñamo<br>Yute<br>Ramina<br>Kenaf | Piña (Palma)<br>Abacá<br>(cáñamo de Manila)<br>Henequén<br>(agave fourcroydes)<br>Sisal (agave sisalana) | Madera blanda<br>Madera dura | Trigo<br>Maíz<br>Cebada<br>Centen o<br>Avena<br>Arroz | Bambú<br>Bagazo<br>Esparto<br>Sabai<br>Phragmites<br>Ricino | Lana de cordero<br>Pelo de cabra<br>Lana de angora<br>Cachemira<br>Yak<br>Pelo de caballo<br>Etc. | Seda<br>Tussah<br>Seda<br>Mulberry | Brucita fibrosa<br>Wollastonita |

**Tabla 1:** Clasificación de fibras naturales.

En este reporte se enfocará a las fibras vegetales y minerales (celulosa o lignocelulosa). Todas estas fibras son cosechadas como plantas en varias partes del mundo y son comúnmente utilizadas para fabricar cuerdas, respaldo de alfombras, bolsas, entre otras cosas. Los componentes de las fibras naturales son microfibrillas de celulosa dispersas en una matriz amorfa de lignina y hemicelulosa. Dependiendo del tipo de fibra natural, el contenido de celulosa está en el rango de 60 – 80\% del peso y el contenido de lignina está en el rango de 5 – 20\% del peso. En adición, el contenido de humedad puede ser de más del 20\% del peso. Las propiedades de algunas de las fibras naturales mencionadas en la **Tabla 1**.

**Tabla 1:** Propiedades de fibras naturales selectas.

| Propiedad              | Cáñamo    | Lino       | Sisal     | Yute      |
|------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Densidad ( $gr/cm^3$ ) | 1.48      | 1.4        | 1.33      | 1.46      |
| Módulo (GPa)           | 70        | 60 – 80    | 38        | 10 – 30   |
| Esfuerzo de tensión    | 550 – 900 | 800 – 1500 | 600 – 700 | 400 – 800 |

|                            |     |           |       |     |
|----------------------------|-----|-----------|-------|-----|
| Elongación a la rotura (%) | 1.6 | 1.2 – 1.6 | 2 – 3 | 1.8 |
|----------------------------|-----|-----------|-------|-----|

Existen muchas limitaciones en el uso de fibras naturales para materiales compuestos. El esfuerzo de tensión de las fibras naturales es relativamente bajo. Otras limitaciones son un bajo punto de fusión y absorción de humedad. A temperaturas más altas de 200°C, las fibras naturales comienzan a degradarse, primero por la degradación de la hemicelulosa y luego por la degradación de la lignina. La degradación lleva al desprendimiento de olor, decoloración, liberación de gases volátiles, y deterioro de las propiedades mecánicas.

La madera consiste principalmente en celulosa fibrosa en una matriz de lignina, mientras que la mayoría de los mamíferos tienen huesos hechos de fibrillas de colágeno orientadas y en capas, en una matriz de fosfato de proteína – calcio.

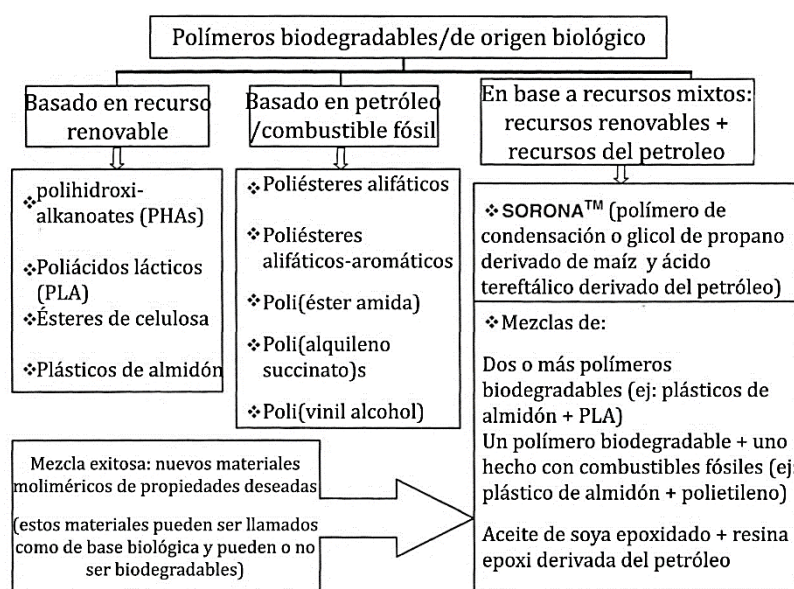
Las fibras de celulosa son un recurso renovable fácilmente disponible, que requiere separación y purificación. La fuente y el tipo de celulosa determinan las aplicaciones puesto que la estructura está predeterminada para cada aplicación, aunque puede ser modificada. La celulosa es modificada por la transformación de la estructura cristalina de tipo I a tipo II, la derivación y el injerto. La celulosa tiene un alto módulo y resistencia, aunque es sensible a la humedad. La celulosa es hidrófila, mientras que la mayoría de los polímeros son hidrófobos, por lo tanto, requiere de compatibilidad o agentes de acoplamiento cuando se combina con otros polímeros.

Las fibras de celulosa son convertibles en micro y nano formas para el control de la reología y gran área de superficie, dando mejoras eficientes a baja concentración. Limitaciones de procesamiento ocurren debido a la sensibilidad a la temperatura, pérdida excesiva de humedad provoca la fragilidad y las altas temperaturas causan deshidratación química seguida por la degradación.

El procesamiento se ha ampliado debido al uso de NMMO (N-óxido de N-metilmorfolina) y líquidos iónicos como disolventes eficientes. Con estos y muchos tratamientos más específicos y modificaciones, la celulosa está encontrando un renovado interés como material avanzado y en nano-materiales.

## 2.3 Tipos de Resinas

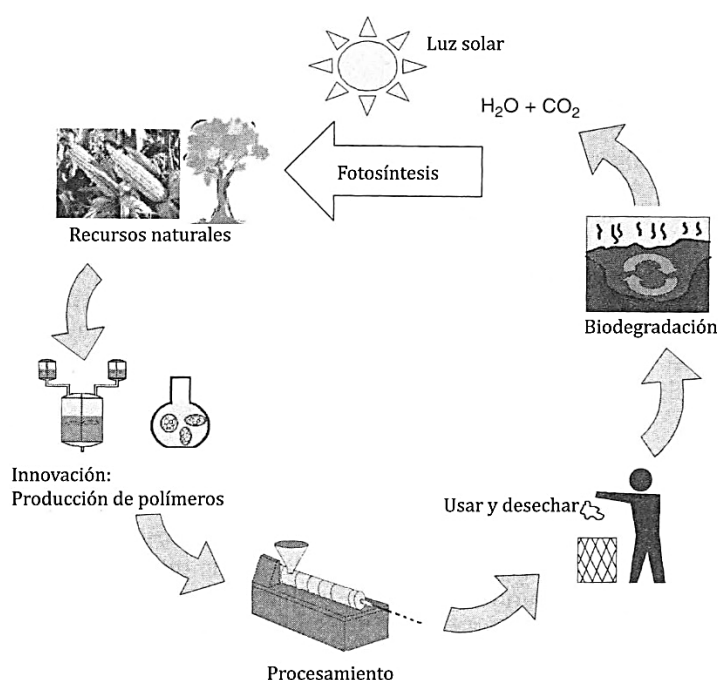
La clasificación de los polímeros biodegradables / derivados orgánicamente es representada en la **Figura 10**. Los polímeros derivados orgánicamente pueden o no pueden ser biodegradables, dependiendo de la composición y estructura, así como de las condiciones ambientales a las cuales está sometido.



**Figura 10.** Clasificación general de polímeros biodegradables/con base biológica.

Las fuentes renovables de materiales poliméricos ofrecen una respuesta para mantener el desarrollo sustentable de una tecnología económica y ecológicamente atractivas. Las innovaciones en el desarrollo de materiales de biopolímeros, la preservación de materias primas de origen fósil, la degradabilidad biológica completa, la reducción en el volumen de desperdicios y compostabilidad, reducción de emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, así como el incremento de la utilidad de recursos agrarios para la producción de nuevos materiales “verdes” son algunas de las razones del incremento del interés público. Los polímeros biodegradables han ofrecido a científicos una solución posible al problema de la acumulación de basura asociadas a los plásticos tradicionales derivados del petróleo. Los polímeros biodegradables pueden ser definidos como aquellos que mediante fotodegradación, oxidación, e hidrólisis, inducen un ataque microbiano que puede alterar el polímero durante el proceso de degradación. Otra definición establece que los polímeros biodegradables son capaces de llevar a cabo la

descomposición principalmente por acción enzimática de microorganismos al dióxido de carbono, metano, componentes inorgánicos, o biomasa en un periodo de tiempo específico. Los biopolímeros pueden ser obtenidos de fuentes renovables y también pueden ser sintetizados de químicos provenientes del petróleo. La mezcla de dos o más biopolímeros puede producir un nuevo biopolímero diseñado para requerimientos específicos. La biodegradabilidad no es solo una función de origen sino también de estructura química y ambiente degradante. Cuando un material biodegradable es obtenido completamente de fuentes renovables, puede ser llamado material polimérico verde. El ciclo de los polímeros compostables biodegradables es representado esquemáticamente en la **Figura 11**.



**Figura 11.** Ciclo de vida de polímeros biodegradables puede mantener un balance de CO<sub>2</sub> en el ambiente.

La resina termoestable epoxi de origen biológico fue sintetizada del aceite karanja (aceite no comestible). El aceite fue epoxidado utilizando agua oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y ácido acético. Este aceite epoxidado después fue reaccionado con ácidos de origen biológico, como ácido cítrico formando Bioepoxi CA y ácido tartárico formando Bioepoxi TA. Estas resinas totalmente biológicas fueron caracterizadas utilizando técnicas espectroscópicas, cromatografía de permeación en gel, microscopía electrónica de barrido, análisis térmico (TGA, DSC) y resistencia a la tensión. Datos del análisis termogravimétrico revelaron que la estabilidad térmica de las

resinas bioepoxi CA y bioepoxi TA fueron comparables con las resinas epoxi de origen del petróleo (P1-epoxy) y (P2-epoxy). El ensayo de biodegradabilidad fue conducido utilizando un consorcio de bacterias ha revelado que el bioepoxi CA se degradó por arriba del 82% en 69 días mientras que el bioepoxi TA se degradó 95% en 259 días contra la nula degradación del P2-epoxy bajo condiciones similares. La propiedad larvicida de las resinas bioepoxi fue estudiada contra larvas de mosquito. Ensayos revelaron que el bioepoxi CA tuvo una mortalidad de 100% en 24 horas mientras que el bioepoxi TA tuvo una mortalidad del 34% en 72 horas contra el epoxi a base de petróleo (P1-epoxy) que tuvo una mortalidad del 100% en 24 horas.

### 2.3.1 Resinas basadas en proteínas

En años recientes, resinas derivadas de la soya han sido consideradas como una alternativa potencial a los adhesivos basados en el petróleo porque son renovables, biodegradables, y ambientalmente amigables. Las proteínas de soya han sido utilizadas para reemplazar las resinas UF (*Urea-formaldehyde*) y PF (*Phenol formaldehyde*) y *para reducir emisiones de formaldehído y para resolver problemas de acoplamiento en aglomerados de alta densidad. Aglomerados de paja de trigo de baja densidad han sido fabricados con adhesivos de proteína de soya modificada (SPI).*

Algunos polímeros biodegradables, a base de petróleo, tales como el alcohol de polivinilo, y algunos poliésteres y poliuretanos, poseen excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, ya que son recursos no renovables a base de petróleo, se está prestando más atención a los polímeros a base de vegetales y fibras que son anualmente renovables y totalmente sostenibles. El bambú, por ejemplo, crece tan rápido que se puede cosechar tres o incluso cuatro veces al año. La proteína, almidón, celulosa, etc. se han utilizado para preparar las resinas o materiales compuestos biodegradables. La proteína de soya se ha utilizado para la fabricación de plásticos biodegradables 'verdes' y compuestos debido a su bajo costo y la disponibilidad en todo el mundo.

Los granos de soya se cultivan ampliamente en todo el mundo. La proteína de soya contiene 18 aminoácidos incluidos los que contienen grupos funcionales polares, tales como grupos carboxilo, amina e hidroxilo que son capaces de reaccionar químicamente. Estos grupos reactivos pueden ser utilizados para la modificación química para mejorar las propiedades mecánicas y



físicas de la proteína y por lo tanto mejorar las propiedades de los materiales compuestos hechos usando ellos.

## 2.4 Orientación de Fibras

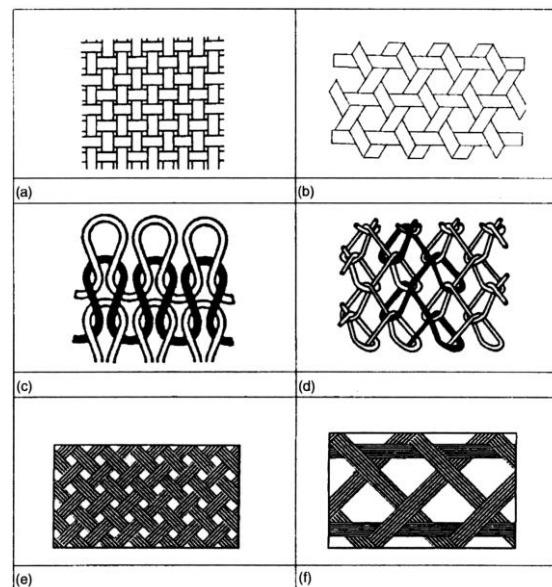
La arquitectura de las fibras está definida como el arreglo de las fibras en un compuesto, que no solo influencia las propiedades del compuesto, sino también su procesamiento. Las características de la arquitectura de la fibra que influencia las propiedades mecánicas incluyen continuidad, orientaciones de la fibra, corrugado o *crimpado* de fibra, y entrelazado de fibra. Durante el procesamiento, existen características que se pueden manejar y que también afectan las propiedades y el desempeño del material compuesto final. Cada arquitectura de fibra tiene propiedades únicas, y si es propiamente utilizada, puede proveer una oportunidad no solo de dar desempeño estructural, sino también de producir una variedad de formas estructurales y formas.

En arquitectura de fibras unidimensional, las hebras de fibras (yarns) están orientadas todas en una dirección. La orientación unidireccional de fibras continuas en el compuesto produce la resistencia máxima y modulo en la dirección de la fibra, pero mucha menos resistencia y modulo en dirección transversal de la fibra. Se pueden fabricar laminados multicapas en una sola dirección, pero un problema de esto es la delaminación debido al esfuerzo que existe entre las capas del laminado.

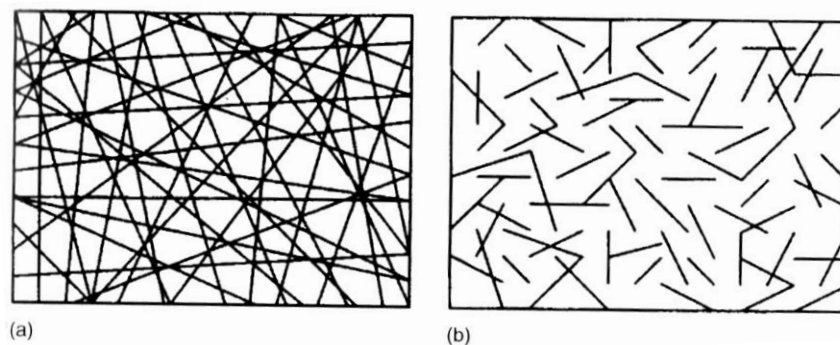
La arquitectura bidimensional con fibras continuas puede ser bidireccional o multidireccional. En una arquitectura bidimensional, las hebras de fibra (strands) son tejidas o entrelazadas juntas en dos direcciones mutuamente perpendiculares (**Figura 15 a**). Estas dos direcciones son llamadas “warp” y “fill”, y representan direcciones de 0° y 90°, respectivamente. Las hebras se ondulan mientras se mueven arriba y abajo para formar la estructura entrelazada. Cambiando el número de hilos de fibra por unidad de ancho en la dirección warp y fill, una variedad de propiedades pueden ser obtenidas en esas dos direcciones. Si el número de hebras de fibra es la misma en dirección warp y fill, entonces las propiedades son las mismas en estas dos direcciones y la tela está balanceada. Sin embargo, las propiedades en otras direcciones aún son pobre.

Una arquitectura bidimensional puede ser vareada también usando fibras orientadas aleatoriamente, ya sea con longitudes continuas o discontinuas (**Figura 13**).

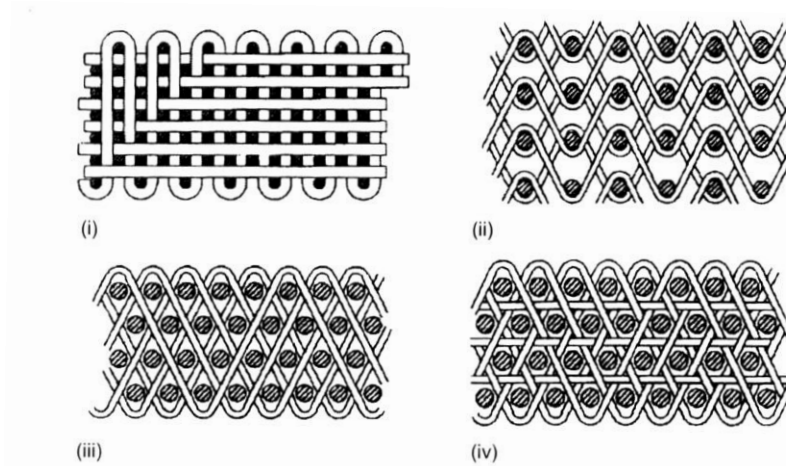
Los compuestos hechos con arquitecturas de fibra uni o bidimensionales son débiles en la dirección  $z$  (dirección del grosor) y comúnmente fallan por delaminación. Para mejorar las propiedades interlaminares, son agregadas fibras in la dirección del grosor, creando una arquitectura tridimensional (**Figura 14**).



**Figura 12.** Arquitecturas de fibras bidimensionales con fibras continuas. (a) Tela bidireccional, (b) Tela multidireccional, (c) Tela de punto por trama, (d) Tejido de punto por urdimbre, (e) Tela trenzada biaxial, y (f) Tela trenzada triaxial.



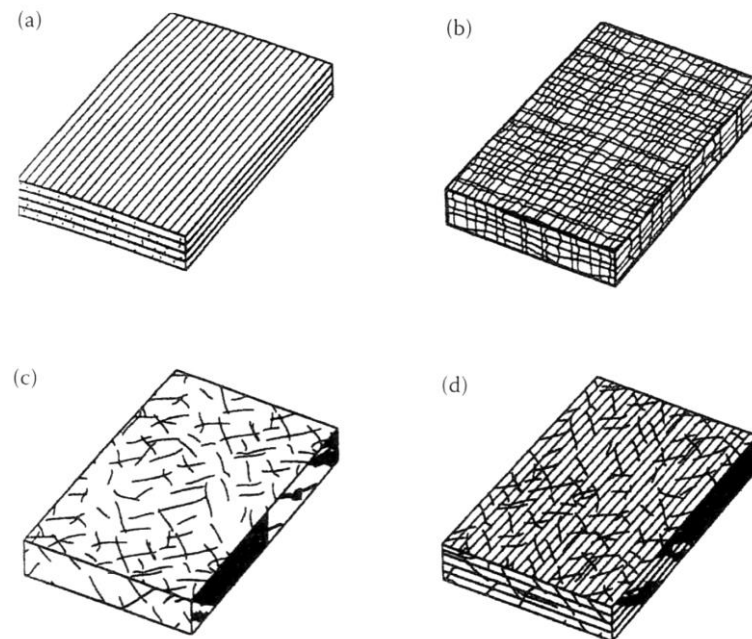
**Figura 13.** Arquitectura de fibra bidimensional con fibras aleatorias. (a) Estera de fibra continua (CFM) y (b) Estera de hebras cortadas (CSM).



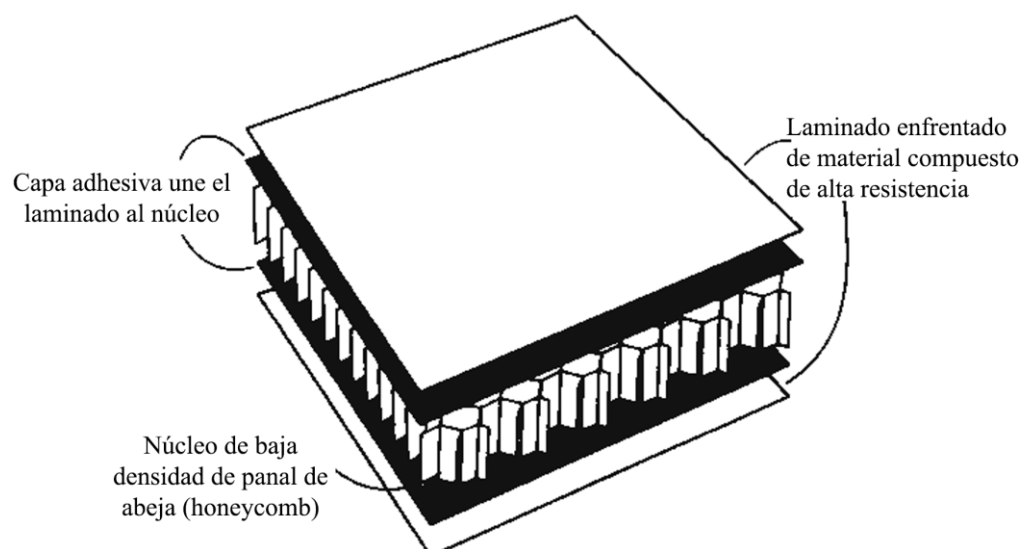
**Figura 14.** Ejemplos de arquitecturas de fibras tridimensionales. (i) 3D, (ii) 2D o entrelazado en ángulo, (iii) 3X, y (iv) 3X con hilos paralelos integrados.

La necesidad de colocar las fibras en diferentes direcciones acorde a la aplicación particular ha llevado a varios tipos de compuestos, como se muestra en la **Figura 15**. En el laminado de compuesto de fibra continua (**Figura 15 a**), las láminas individuales de fibra/matriz continua están orientadas en las direcciones requeridas y unidas entre sí para formar un laminado. Aunque el laminado de fibra continua es utilizado extensivamente, el potencial de delaminación, o separación de la lámina, es aún un problema mayor porque el esfuerzo interlaminar está dominado por la matriz. Los compuestos de fibra tejida (**Figura 15 b**) no tienen láminas distintas y no son susceptibles a la delaminación, pero el esfuerzo y la rigidez son sacrificadas porque las fibras no son tan derechas como en el laminado de fibra continua. Los compuestos de fibra cortada pueden tener fibras cortas dispersadas aleatoriamente en la matriz, como se muestra en la **Figura 15 c**. Los compuestos de fibra cortada son usados extensamente en aplicaciones de alto volumen debido a su reducido costo de producción, pero sus propiedades mecánicas son considerablemente más pobres que aquellos compuestos con fibras continuas. Finalmente, los compuestos híbridos consisten en una mezcla de fibras continuas y cortadas, como se muestra en la **Figura 15 d**, así como también puede ser la mezcla de fibras de materiales distintos. Otra configuración común de material compuesto es la estructura sándwich (**Figura 16**), que consiste en un arreglo de hojas de material compuesto de alta resistencia enfrentadas (que pueden ser de cualquier tipo de compuesto de la **Figura 15**) unidas a un núcleo de espuma o en panal de abeja

de bajo peso. Las estructuras sándwich tienen un índice de flexión de rigidez – peso extremadamente alto y son utilizados ampliamente en las estructuras aeroespaciales.



**Figura 14.** Tipos de compuestos con refuerzo de fibra. (a) Compuesto de fibra continua, (b) compuesto tejido, (c) compuesto de fibra cortada, y (d) compuesto híbrido



**Figura 15.** Estructura sándwich de material compuesto

Las primeras estructuras de materiales compuestos fueron tipo "sándwich", y se obtenían ensamblando por pegado (o soldadura) dos láminas delgadas y de alta resistencia, denominadas pieles, y una placa gruesa de material ligero, denominada núcleo, de bajas características mecánicas. Esquemáticamente, se muestra la configuración de este tipo de materiales en la (Figura 15). Tradicionalmente, materiales con núcleo de peso ligero tales como núcleo de espuma, núcleo entramado, núcleo en panal han sido usado para la fabricación de estructuras sándwich con éxito limitado.

La industria de los compuestos conoce desde hace tiempo que la resistencia y rigidez de una estructura de compuestos puede incrementarse significativamente con poco peso adicional mediante la laminación de un material núcleo entre dos revestimientos.

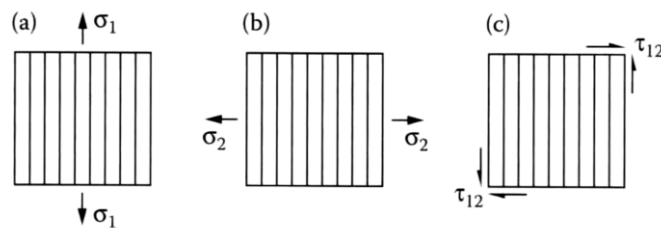
Pero en tiempos más recientes, nuevas estructuras sándwich con núcleo compuesto han sido fabricadas, ensayadas y modeladas. Los núcleos híbridos consisten en un esqueleto de polímeros reforzados que se rellenan por una espuma sintáctica en las áreas de vano. Las nuevas estructuras se fabrican usando nuevos procesos de fabricación.

Materiales núcleo innovadores que se han probado con éxito incluyen espumas conformables, honeycomb y corcho aglomerado. Estos materiales pueden utilizarse para obtener formas que produzcan curvas para adaptarse a los moldes. Las botellas y tejido de alfombras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas se usan para producir núcleos y así disminuir el coste de las estructuras de compuestos. Los bio-polímeros renovables están bien alineados con las nuevas clasificaciones verdes. Entre las características más favorables de estos materiales de cara a su aplicación, cabe citar las siguientes:

a) Ligereza: Debido a la incorporación de un núcleo entre las dos hojas, se distribuye la carga más eficientemente y es posible la reducción de material para conseguir las mismas características estructurales que un material común. Así, por ejemplo, la cúpula de San Pedro en Roma, realizada a base de piedra, tiene una densidad de  $2600 \text{ Kg/m}^2$ . Si se hubiese utilizado material compuesto tipo sándwich (cosa imposible por la época en que se construyó) a base de acero en las pieles junto con un núcleo de espuma de poliuretano, la densidad resultante hubiera sido de  $33 \text{ Kg/m}^2$ .

b) Rigidez a flexión: Esto se debe a que el aumento en el grosor del material incrementa la cantidad de energía necesaria para poder doblar el material. Esta energía es distribuida a través de toda la estructura debido a la estructura en forma de panal de abeja, una de las geometrías más resistentes.

c) Aislamiento térmico: Este tipo de materiales presenta un aislamiento término bueno, debido a la manera en que los diferentes materiales con diferentes propiedades conductivas distribuyen y transmiten el calor a través de la sección transversal del sándwich. Este tipo de materiales presentan pobre aislamiento acústico y mala resistencia al fuego.



**Figura 16.** Estados simples de esfuerzo usados para definir constantes de ingeniería en láminas. (a) Estrés normal longitudinal aplicado, (b) estrés transversal normal aplicado, y (c) estrés cortante en el plano aplicado.

En base al tipo de esfuerzo que se presenta en un laminado se generan distintos tipos de arreglos para aprovechar las características mecánicas de los laminados, así como para reducir o incluso aprovechar algunas de las desventajas de un tipo de laminado sometido a un tipo de esfuerzo, como se muestra en la **Figura 16**.

## 2.4.1 Macro mecánica de Laminados

Para una mejor comprensión de la macro mecánica de los laminados de materiales compuestos, los conocimientos de las propiedades de los materiales son esenciales. Los tipos de materiales se clasifican según el comportamiento para una condición de carga en particular. Estos son:

### a) Materiales anisotrópicos

Es aquel donde no hay planos de simetría de propiedad del material. Por lo tanto, tiene diferentes propiedades físicas en diferentes direcciones en relación con la orientación de la estructura de los cristales, es decir; sus propiedades son dependientes de la dirección.

69

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Existen 21 constantes elásticas independientes en relación de esfuerzo deformación, como se muestra en la matriz. En estas relaciones, hay acoplamientos entre los esfuerzos y las deformaciones. Los esfuerzos normales producen no solo deformaciones normales en otras direcciones, debido al efecto Poisson, también deformaciones cortantes debido al efecto de influencia mutua. Del mismo modo, los esfuerzos cortantes producen cortantes, también producen esfuerzos normales. En un material anisotrópico, se producen una combinación de deformación extensional y de cortante debido a los esfuerzos normales que actúan en cualquier dirección. Este fenómeno de crear deformaciones extensionales o cortantes se denominan cortantes de extensión de acoplamiento y son comunes en los materiales isotrópicos <sup>70</sup>.

### b) Materiales monoclinicos

Tiene un solo plano de simetría de propiedades del material. Si el plano xy (es decir plano 1-2) es considerado como plano de simetría de material, solo se cuenta con 13 constantes elásticas independientes en la matriz de rigidez como se muestra a continuación:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Debido a que solo existe un solo plano de simetría en las propiedades del material, los esfuerzos cortantes de los planos en cual los ejes es el eje perpendicular del plano de simetría del material (es decir, plano 2-3 y plano 3-1) contribuirá solo a las deformaciones por cizallamiento en los planos correspondientes y las tensiones normales no van a contribuir a los esfuerzos cortantes en estos planos.

### c) Materiales ortotrópicos

Existen tres planos ortogonales de simetría en las propiedades de un material ortotrópico. Los compuestos reforzados con fibra, en general, contienen los tres planos ortogonales de las propiedades de los materiales, las interacciones de estos tres planos se denominan direcciones principales de material, el comportamiento del material se llama especialmente ortotrópico cuando las tensiones normales son aplicadas en las mismas direcciones del material. De otra manera se le llama material generalmente ortotrópico, cuando su comportamiento es casi equivalente a un material anisotrópico. Existen nueve constantes elásticas independientes de la matriz de rigidez como se indica a continuación en un material especialmente ortotrópico.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

A partir de la relación esfuerzo deformación, es claro que las tensiones normales aplicadas en uno de las direcciones principales del material ortotrópico, provoca el alargamiento en la dirección en la que se aplican los esfuerzos y las contracciones en las otras dos direcciones transversales.

Sin embargo, las tensiones normales aplicadas en cualquier dirección que no sea la dirección del material principal crea deformaciones extensionales y de cortante.



**d) Materiales isotrópicos transversales**

Si un material tiene ejes de simetría en su eje longitudinal y todas las direcciones perpendiculares a su eje longitudinal (es decir, más de tres ejes de simetría mutuamente perpendiculares), el material se conoce como transversalmente isotrópico (compuestos unidireccionales); para estos casos existen 5 constantes elásticas independientes:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

**e) Materiales isotrópicos.**

En un material isotrópico, las propiedades son las mismas en todas las direcciones (axial, lateral y entre). Por lo tanto, el material contiene un número infinito de planos de simetría de propiedades de material, pasando por un punto. Es decir, las propiedades del material son direccionalmente independientes, por lo tanto, existen dos constantes elásticas independientes.

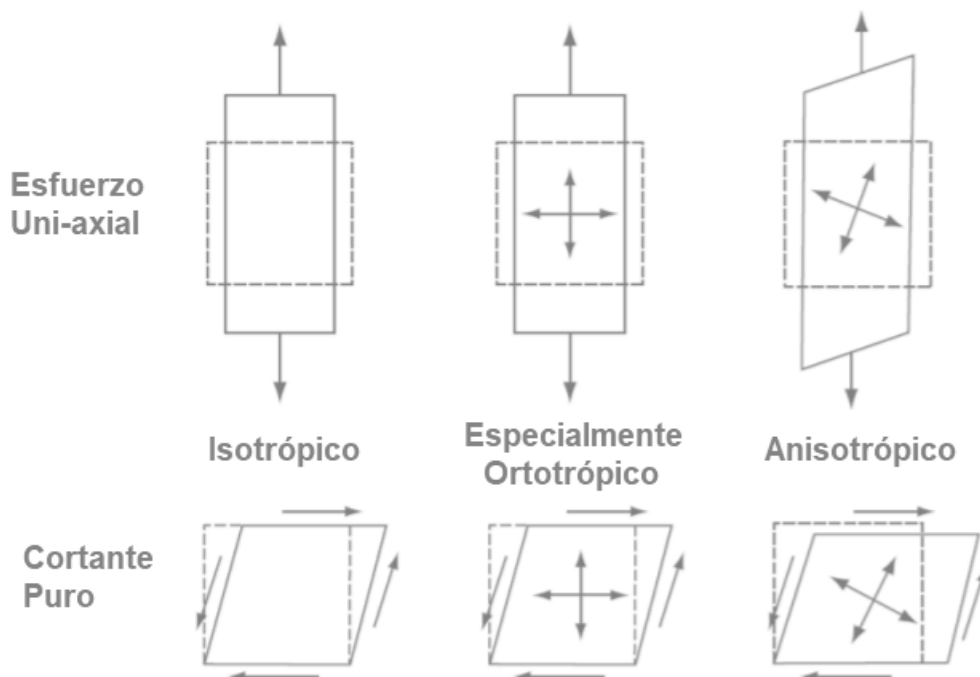
$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Los esfuerzos normales de tracción aplicados en cualquier dirección sobre un material isotrópico solo causan alargamiento en la dirección de los esfuerzos y contracciones en las direcciones transversales. No producirá ningún esfuerzo cortante en el material. Del mismo modo, los

esfuerzos cortantes producen solo deformaciones de cortante correspondientes, y no deformaciones normales.

Como las propiedades del material son direccionalmente independientes, el material isotrópico tiene la misma resistencia en todas direcciones. Como tal, no es posible una estructura eficiente (sin desperdiciar material estructuralmente). Un ejemplo de esto es en una viga, si la carga se aplica en la dirección transversal, la viga se doblará extendiéndose y contrayéndose en la dirección longitudinal. En la dirección lateral no se aplica carga y la resistencia en la dirección lateral está infrautilizada.

Por lo tanto, el material isotrópico en la estructura de la viga no es un diseño eficiente, ya que el material está infrautilizado. Por otro lado, las fibras unidireccionales que están alineadas en la dirección longitudinal tendrán una alta resistencia en la dirección longitudinal y baja resistencia en la otra dirección; de esta manera, se convierte en un diseño eficiente. Si la estructura está tomando un sistema de carga compleja, las propiedades isotrópicas serán ideales y con un arreglo de fibras aleatorio se pueden lograr propiedades cuasi-isotrópicas <sup>71</sup>.



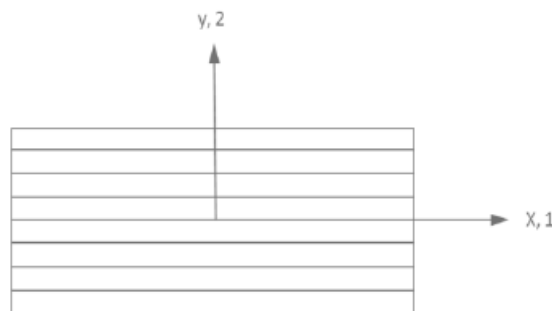
**Figura 17.** Diferencias entre las deformaciones de esfuerzos uni-axiales y cortantes.

De la figura 17 se puede observar claramente que un material isotrópico o especialmente ortotrópico se comportan de manera similar. Pero la magnitud de la deformación en la dirección dependiente en este caso ortotrópico, en el caso del isotrópico no lo es. En el material anisotrópico, tiene acoplamiento entre las deformaciones normales y cortantes, Para resumir las constantes elásticas de cada tipo de material se da la tabla 2.

**Tabla 2.** Constantes elásticas de diferentes materiales.

| Material                    | 3D                   |                           | 2D                   |                           |
|-----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|
|                             | Número de constantes | Constantes Independientes | Número de constantes | Constantes Independientes |
| Anisotrópico                | 36                   | 21                        | 9                    | 6                         |
| Generalmente ortotrópico.   | 36                   | 9                         | 9                    | 4                         |
| Especialmente ortotrópico.  | 12                   | 9                         | 5                    | 4                         |
| Transversalmente Isotrópico | 12                   | 5                         | 5                    | 4                         |
| Isotrópico.                 | 12                   | 2                         | 5                    | 2                         |

Considerando una placa plana de material compuesto unidireccional de sección transversal uniforme, si se aplican cargas a lo largo de los bordes y no hay cargas fuera del plano, entonces, se puede considerar como un caso de esfuerzo plano.



**Figura 18.** Laminado Ortotrópico de material compuesto de matriz polimérica

Como la placa es muy delgada, los esfuerzos normales a lo largo de la carga  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  y  $\tau_{yz}$  pueden ser considerados de tal manera que varía de manera despreciable en todo el espesor. Por lo tanto, se puede suponer que son cero dentro del laminado, es decir:

$$\sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0 \text{ y } \tau_{yz} = 0$$

Este supuesto, reduce las ecuaciones de esfuerzo – deformación tridimensional a esfuerzo bidimensional de la ley generalizada de Hooke:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

Por lo tanto si  $\sigma_z = 0$ , entonces:

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} [\sigma_x + \sigma_y]$$

Permitiendo que las direcciones principales del material sean designadas por la dirección longitudinal L, y la dirección transversal T. Considerando varias condiciones de carga, las deformaciones correspondientes en las direcciones longitudinales y transversales se determinan de la siguiente manera:

a) Cuando se aplica una carga longitudinal:

$$\sigma_L \neq 0, \quad \sigma_T = \tau_{LT} = 0$$



**Figura 19.** Condición longitudinal de carga de un material compuesto

Las deformaciones correspondientes a esta condición de carga son las siguientes:

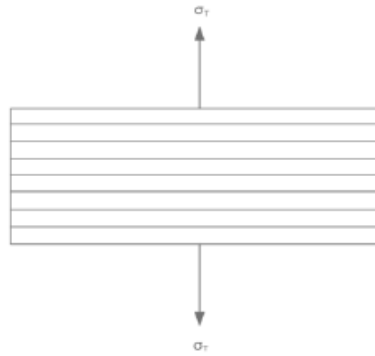
$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L}$$

$$\varepsilon_T = -\nu_{LT} \frac{\sigma_L}{E_L}$$

$$\gamma_{LT} = 0$$

b) Cuando se aplica una carga transversal:

$$\sigma_T \neq 0, \quad \sigma_L = \tau_{LT} = 0$$



**Figura 20.** Condición transversal de carga de un material compuesto

Las deformaciones que corresponden a esta condición de carga son las siguientes:

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_T}{E_T}$$

$$\varepsilon_T = -\nu_{LT} \frac{\sigma_T}{E_T}$$

$$\gamma_{LT} = 0$$

c) Cuando se aplica una carga de cortante:

$$\tau_{LT} \neq 0, \quad \sigma_L = \sigma_T = 0$$



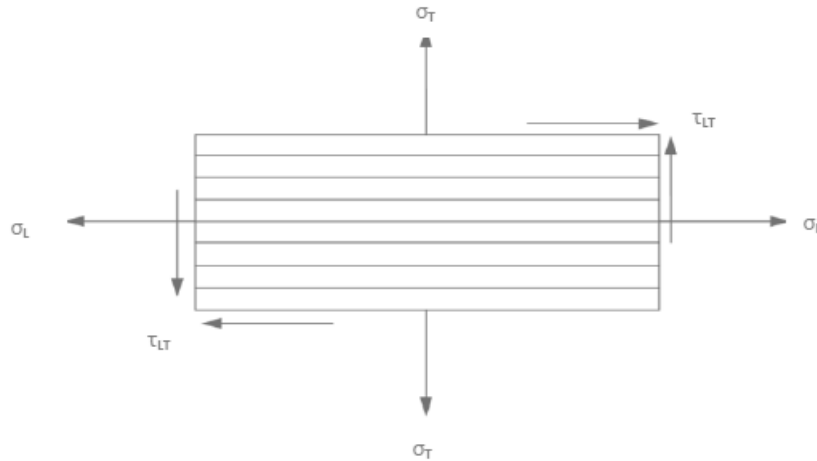
**Figura 21.** Condición de carga en cortante de un material compuesto

Las deformaciones que corresponden a este tipo de esfuerzo son las siguientes:

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_T = 0$$

d) Cuando se aplican todas las cargas anteriores:



**Figura 22.** Condición de cargas combinadas en un material compuesto

Las deformaciones que corresponden a este tipo de carga son las siguientes:

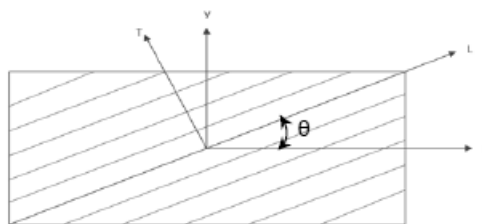
$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sigma_T}{E_T}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \nu_{TL} \frac{\sigma_L}{E_L}$$

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

#### Capa anisotrópica (Generalmente ortotrópico):

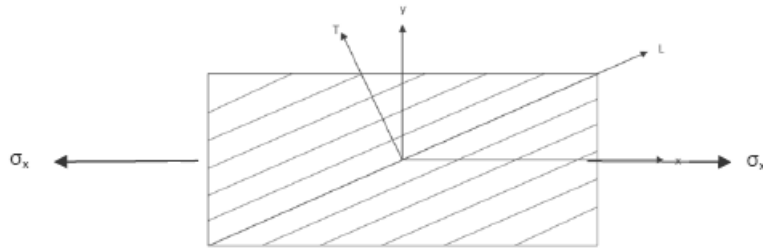
Cuando el laminado ortotrópico se carga en la dirección distinta a su eje principal, el comportamiento del laminado es anisotrópico. En la figura 23, se muestra un ejemplo de comportamiento anisotrópico si la carga se aplica a lo largo de las direcciones x o y:



**Figura 23.** Laminado generalmente ortotrópico de un material compuesto

Cundo una carga es aplicada solo de manera longitudinal a lo largo del eje X:

$$\sigma_x \neq 0, \quad \sigma_y = \tau_{xy} = 0$$



**Figura 24.** Condición de carga longitudinal

Las deformaciones que corresponden a este tipo de laminado son las siguientes:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x}$$

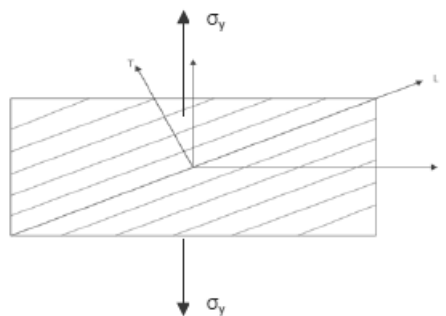
$$\varepsilon_y = -\nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}$$

$$\gamma_{xy} = -m_x \frac{\sigma_x}{E_L}$$

Donde,  $m_x$  es el coeficiente de influencia mutua y  $E_L$  es el modulo del compuesto a lo largo de la dirección  $L$ .

En el caso de que se aplique una carga transversal, las condiciones son las siguientes:

$$\sigma_y \neq 0, \quad \sigma_x = \tau_{xy} = 0$$



**Figura 25.** Condición de carga transversal

Las deformaciones que corresponden a este tipo de condición de carga son las siguientes:

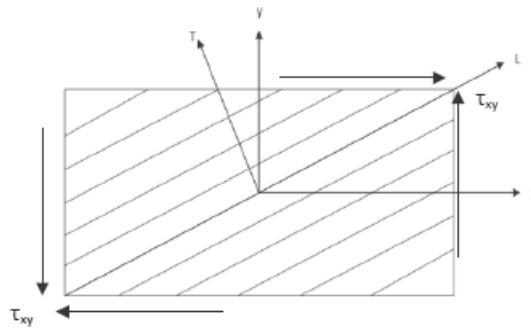
$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y}$$

$$\varepsilon_y = -\nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y}$$

$$\gamma_{xy} = -m_y \frac{\sigma_y}{E_L}$$

Cuando la carga que se aplica es cortante:

$$\tau_{xy} \neq 0, \quad \sigma_x = \sigma_y = 0$$



**Figura 26.** Condiciones de carga en cortante en un material compuesto.

Las deformaciones correspondientes a este tipo de carga son las siguientes:

$$\varepsilon_x = -m_x \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$

$$\varepsilon_y = -m_y \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$

$$\gamma_{xy} = -m_y \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}$$

En el caso de que todas las cargas anteriormente mencionadas se apliquen sobre el mismo material compuesto:

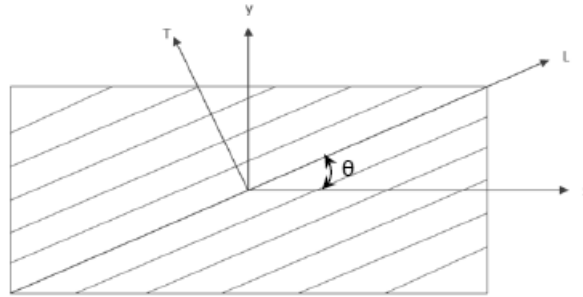
$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} - m_x \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} - m_y \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$



$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} - m_x \frac{\sigma_x}{E_L} - m_y \frac{\sigma_{xy}}{E_L}$$

Para la transformación de las constantes de ingeniería, es de interés derivar y conocer las expresiones explícitas, a lo largo de los ejes de los materiales principales. Considerando un laminado ortotrópico con sus ejes principales (L y T) orientados en un ángulo  $\theta$  con ejes de referencia (x, y) como se muestra en la figura 27.



**Figura 27.** Laminado Ortotrópico de un material compuesto

Considerando que el único esfuerzo distinto a cero, que actúa sobre el laminado es  $\sigma_x$

$$\sigma_x \neq 0, \sigma_y = \tau_{xy} = 0$$

Los esfuerzos normales y cortantes a lo largo de las direcciones L y T pueden calcularse mediante la ley de esfuerzo-deformación:

$$\sigma_L = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\therefore \sigma_L = \sigma_x \cos^2 \theta$$

$$\sigma_T = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\therefore \sigma_T = \sigma_x \sin^2 \theta$$

$$\tau_{LT} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy}(\cos 2\theta - \sin 2\theta)$$

$$\therefore \tau_{LT} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta$$

Las relaciones anteriores se sustituyen en las relaciones de deformación derivadas previamente para el laminado ortotrópico en las direcciones L y T.

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sigma_T}{E_T}$$

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \nu_{TL} \frac{\sigma_L}{E_L}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T} - \nu_{TL} \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L}$$

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

$$\gamma_{LT} = -\frac{\sigma_x \sin \theta \cos \theta}{G_{LT}}$$

Las deformaciones en las direcciones x, y se pueden obtener tomando la inversa de la ley de deformación, la cual puede ser descrita de la siguiente manera:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_L \cos^2 \theta + \varepsilon_T \sin^2 \theta - \gamma_{LT} \sin \theta \cos \theta$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_L \sin^2 \theta + \varepsilon_T \cos^2 \theta + \gamma_{LT} \sin \theta \cos \theta$$

$$\gamma_{xy} = 2(\varepsilon_L - \varepsilon_T) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{LT} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Sustituyendo los valores de  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $\gamma_{LT}$  las ecuaciones se transforman en las siguientes:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \left( \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T} - \nu_{LT} \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L} \right) \sin^2 \theta + \left( \frac{\sigma_x \sin \theta \cos \theta}{G_{LT}} \right) \sin \theta \cos \theta \\ &= \sigma_x \left[ \left( \frac{\cos^2 \theta}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sin^2 \theta}{E_T} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{\sin^2 \theta}{E_T} - \nu_{LT} \frac{\cos^2 \theta}{E_L} \right) \sin^2 \theta + \left( \frac{\sin \theta \cos \theta}{G_{LT}} \right) \sin \theta \cos \theta \right] \\ &= \sigma_x \left[ \frac{\cos^4 \theta}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_T} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} - \nu_{LT} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_L} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{G_{LT}} \right] \\ &= \sigma_x \left[ \frac{\cos^4 \theta}{E_L} - \nu_{LT} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} - \nu_{TL} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_T} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{G_{LT}} \right] \\ &= \sigma_x \left[ \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} - 2\nu_{LT} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_L} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{G_{LT}} \right] \end{aligned}$$

$$\varepsilon_x = \sigma_x \left[ \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{G_{LT}} - \frac{2v_{LT}}{E_L} \right) \sin 2\theta^2 \right]$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_L \sin^2 \theta + \varepsilon_T \cos^2 \theta + \gamma_{LT} \sin \theta \cos \theta$$

$$= \left( \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L} - v_{TL} \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T} \right) \sin^2 \theta + \left( \frac{\sigma_x \sin^2 \theta}{E_T} - v_{LT} \frac{\sigma_x \cos^2 \theta}{E_L} \right) \cos^2 \theta - \left( \frac{\sigma_x \sin \theta \cos \theta}{G_{LT}} \right) \sin \theta \cos \theta$$

$$= \sigma_x \left[ \left( \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_L} - v_{TL} \frac{\sin^4 \theta}{E_T} \right) + \left( \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{E_T} - v_{LT} \frac{\cos^4 \theta}{E_L} \right) - \left( \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{G_{LT}} \right) \right]$$

$$= \sigma_x \left[ \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \frac{v_{LT}}{E_L} \right]$$

$$= \sigma_x \left[ \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - (1 - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta) \frac{v_{LT}}{E_L} \right]$$

$$= -\sigma_x \left[ \frac{v_{LT}}{E_L} - \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2v_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right]$$

$$\varepsilon_y = -\sigma_x \left[ \frac{v_{LT}}{E_L} - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2v_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \sin^2 2\theta \right]$$

$$\gamma_{xy} = 2(\varepsilon_L - \varepsilon_T) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{LT} (\cos^2 \theta \sin^2 \theta)$$

$$= \sigma_x \left[ \left( \frac{2 \cos^3 \theta \sin \theta}{E_L} - v_{TL} \frac{2 \sin^3 \theta \cos \theta}{E_T} - \frac{2 \sin^3 \theta \cos \theta}{E_T} \right) + v_{LT} \left( \frac{2 \cos^3 \theta \sin \theta}{E_L} - \frac{\cos^3 \theta \sin \theta}{G_{LT}} + \frac{\sin^3 \theta \cos \theta}{G_{LT}} \right) \right]$$

$$= \sigma_x \sin 2\theta \left[ \left( \frac{\cos^2 \theta}{E_L} - v_{TL} \frac{\sin^2 \theta}{E_T} - \frac{\sin^2 \theta}{E_T} \right) + v_{LT} \left( \frac{\cos^2 \theta}{E_L} - \frac{\cos^2 \theta}{2G_{LT}} + \frac{\sin^2 \theta}{2G_{LT}} \right) \right]$$

$$\gamma_{xy} = \sigma_x \sin 2\theta \left[ \frac{-v_{LT}}{E_L} - \frac{1}{E_T} + \frac{1}{2G_{LT}} + \cos^2 \theta \left( \frac{1}{E_L} + \frac{2v_{LT}}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{2G_{LT}} \right) \right]$$

### Determinación de las constantes elásticas

Una vez que se encuentran las deformaciones, las constantes elásticas se pueden determinar a través de la Ley de Hooke, el módulo de elasticidad en la dirección x viene dado por:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$$

De esta ecuación,  $E_x$  y  $\epsilon_x$  pueden ser calculados como:

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{G_{LT}} - \frac{2v_{LT}}{E_L} \right) \sin 2\theta^2$$

La expresión para  $E_y$  se puede obtener substituyendo  $\theta + 90$  para  $\theta$  en la ecuación anterior:

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_T} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{G_{LT}} - \frac{2v_{LT}}{E_L} \right) \sin 2\theta^2$$

Mientras que la relación de Poisson se define como:

$$v_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

$$v_{xy} = -\varepsilon_y \frac{E_x}{\sigma_x}$$

$$\frac{v_{yx}}{E_y} = \frac{v_{TL}}{E_T} - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2v_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \sin 2\theta^2$$

Cuando la tensión normal  $\sigma_x$  se aplica en una dirección distinta a la dirección distinta a la dirección L y T, se puede inducir una deformación de cizallamiento dada por las ecuaciones anteriores. Por lo tanto, se puede definir un coeficiente de influencia mutua  $m_x$ , que relacione el esfuerzo cortante con un esfuerzo normal de la siguiente manera:

$$v_{xy} = -m_x \frac{\sigma_x}{E_L}$$

$$m_x = -\gamma_{xy} \frac{E_L}{\sigma_x}$$

Sustituyendo los valores de  $\sigma_x$  y  $\gamma_{xy}$ :

$$m_x = \sin 2\theta \left[ v_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{2G_{LT}} - \cos^2 \theta (1 + 2v_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{G_{LT}}) \right]$$

De igual manera,  $m_y$  la cual se relaciona en compartir la elongación con el esfuerzo normal  $\sigma_y$  está definido por:

$$\gamma_{xy} = -m_y \frac{\sigma_y}{E_L}$$

$$m_y = \sin 2\theta \left[ v_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{2G_{LT}} - \sin^2 \theta (1 + 2v_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{G_{LT}}) \right]$$

Para obtener la expresión de  $G_{xy}$  se asume que el único esfuerzo que es diferente de cero actual obre el plano  $\tau_{xy}$ . Los esfuerzos a lo largo de las direcciones principales del material compuesto están dados por:

$$\varepsilon_L = 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\sigma_T = -2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_{LT} = \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Las deformaciones correspondientes dada la Ley de Hooke:

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \nu_{LT} \frac{\sigma_T}{E_T}$$

$$\varepsilon_L = \left( \frac{1}{E_L} + \frac{\nu_{LT}}{E_T} \right) 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \nu_{LT} \frac{\sigma_L}{E_L}$$

$$\varepsilon_T = \left( \frac{1}{E_T} + \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right) - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{xy}}{G_{LT}}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores dadas las deformaciones por esfuerzos cortantes  $\gamma_{xy}$

$$\gamma_{xy} = 2(\varepsilon_L - \varepsilon_T) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{LT}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\gamma_{xy} = 4\tau_{xy} \left\{ \left[ \left( \frac{1}{E_L} + \frac{\nu_{TL}}{E_T} \right) - \left( \frac{1}{E_T} + \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right) - 1 \right] \sin 2\theta \cos 2\theta + \frac{1}{G_{LT}} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \right\}$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{\gamma_{xy}}{\tau_{xy}} = \frac{1}{E_L} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \left( \frac{1}{E_L} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \cos^2 \theta$$

Como lo hacen los esfuerzos normales, los esfuerzos cortantes  $\tau_{xy}$  también causaran deformaciones directas  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  en las direcciones x, y respectivamente:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} - m_x \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} - m_y \frac{\tau_{xy}}{E_L}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} - m_x \frac{\sigma_x}{E_L} - m_y \frac{\sigma_y}{E_L}$$

### Materiales especialmente ortotrópicos bajo esfuerzos planos:

En condiciones de esfuerzo plano, se asume que los esfuerzos normales al plano son iguales a cero. Es decir, se supone que el plano  $x, y$  es el plano de carga, y el esfuerzo normal está en el plano 1-2:

$$\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$$

El número de constantes elásticas independientes de un material ortotrópico en condiciones de esfuerzos planos se reduce a 4 de 9 en el caso tridimensional. Por lo tanto, la relación esfuerzo deformación está dada por la siguiente matriz:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} = 0 \\ \tau_{23} = 0 \\ \tau_{31} = 0 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

$$\sigma_{11} = C_{11}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{13}\varepsilon_{33}$$

$$\sigma_{22} = C_{13}\varepsilon_{11} + C_{32}\varepsilon_{22} + C_{33}\varepsilon_{33}$$

$$\gamma_{23} = 0$$

$$\gamma_{13} = 0$$

$$\tau_{12} = C_{66}\gamma_{12}$$

Después de eliminar  $\varepsilon_{33}$ , la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \left( C_{11} - \frac{C_{132}}{C_{33}} \right) \varepsilon_1 + \left( C_{12} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \right) \varepsilon_2$$

$$\sigma_2 = \left( C_{12} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \right) \varepsilon_1 + \left( C_{22} - \frac{C_{232}}{C_{33}} \right) \varepsilon_2$$

$$\tau_{12} = C_{66}\gamma_{12}$$

De otra manera:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Donde:

$$Q_{11} = \left( C_{11} - \frac{C_{132}}{C_{33}} \right)$$

$$Q_{22} = \left( C_{22} - \frac{C_{232}}{C_{33}} \right)$$

$$Q_{12} = \left( C_{12} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \right)$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Para materiales compuestos especialmente ortotrópicos, los coeficientes de rigidez pueden estar relacionados con las constantes de la siguiente manera:

$$Q_{11} = \left( \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \right)$$

$$Q_{22} = \left( \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \right)$$

$$Q_{12} = \left( \frac{\nu_{TL}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \right)$$

$$Q_{66} = G_{66}$$

La relación esfuerzo- deformación es:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_{22}}$$

$$S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_{22}}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

Los esfuerzos en un laminado isotrópico en condiciones de esfuerzo plano están representados de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Donde:

$$Q_{11} = Q_{22} = \left( \frac{E}{1 - \nu^2} \right)$$

$$Q_{12} = \left( \frac{\nu E}{1 - \nu^2} \right)$$

$$Q_{66} = G = \left( \frac{E}{2(1 - \nu)} \right)$$

Mientras que la relación esfuerzo - deformación es:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{E}$$



$$S_{12} = \frac{-\nu}{E}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G}$$

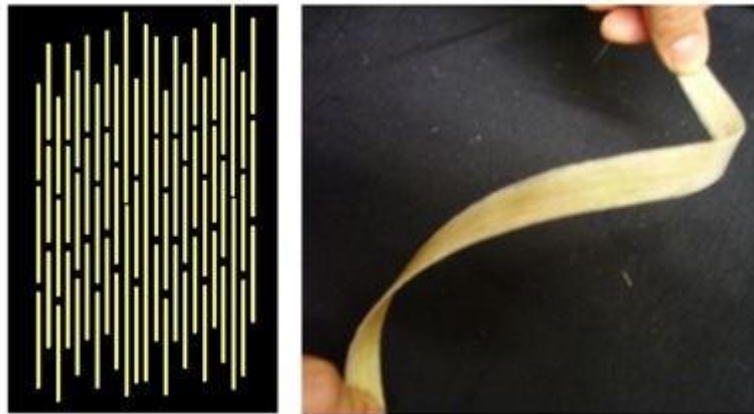
## 2.5 Aplicaciones de arreglos

En primera instancia, los materiales compuestos con fibras naturales tienen aplicaciones que además de depender de su configuración geométrica y arreglos, depende de las condiciones ambientales, pues las fibras naturales son grandes captadores de humedad, lo que debilitaría al material compuesto, hincharía la fibra y terminaría, en el peor de los casos, rompiendo la matriz polimérica, generando fallas estructurales significativas. Las aplicaciones de cada tipo de arreglo dependen de las necesidades de las aplicaciones, pues no todos los tipos de arreglos sirven para las mismas aplicaciones, e incluso dentro de las mismas aplicaciones no siempre es utilizado el mismo tipo de arreglo, pues como fue mencionado anteriormente, depende de las condiciones ambientales a las que se verá sometido el material.

### 2.5.1 Arreglo de fibra unidireccional

Los arreglos con fibra unidireccional son utilizados cuando se requiere un material con resistencia a la tensión grande y una elasticidad baja. Además, se utilizan cuando se requiere un material con forma regular, pues en zonas con dobleces o ángulos muy cerrados se vuelven frágiles (más), pues la forma irregular provoca esfuerzos cortantes en estas zonas al presentarse un esfuerzo axial para los cuales son diseñados estos materiales. La aplicación comercial de estos arreglos generalmente se limita a cofres de autos de gama alta, cascos de lanchas y algunos artículos deportivos, como palos de golf y cuadros de bicicletas. En la Universidad Católica de Lovaina se inventó un método de extracción innovador y un proceso adicional de limpieza / alineación de las fibras de bambú, probados en máquinas de prototipo a escala de laboratorio. Estos procesos se han diseñado no sólo para proporcionar una producción continua de fibras largas bien alineadas con excelentes propiedades mecánicas, sino también, con principios mecánicos que pueden ser la base a escala para el futuro de la producción industrial. El paso adicional es desarrollar un proceso de pre-industrial para producir una preforma unidireccional

de fibra de bambú o material pre-impregnado ("prepreg"), listo para ser utilizado en la industria de compuestos para aplicaciones de alta tecnología (**Figura 28**).



**Figura 28:** a) Representación esquemática de un arreglo unidireccional de fibras discontinuas y b) Cinta de fibra continua unidireccional de bambú - polipropileno.

### 2.5.2. Arreglo de fibra bidireccional

De los arreglos existentes, el más utilizado es el laminado de fibra de tela tejida, o bidireccional, las cuales no tienen láminas distintas y se utilizan en aplicaciones donde no sea necesaria una aplicación grande de esfuerzo normal o axial, pero se desea una duración más larga del material, debido a que es menos susceptible a delaminaciones, a diferencia del laminado de fibra continua que es susceptible a la delaminación, pero soporta cargas axiales en sentido de la fibra más grandes.

Otra razón para la cual se utilizan los laminados de fibra tejida es porque son capaces de soportar cargas cortantes, debido a su configuración entrelazada que le da una elasticidad más grande al material compuesto que el material compuesto de fibra unidireccional, pero el esfuerzo y la rigidez son sacrificadas debido al propio entrelazamiento de las fibras, que no permiten que las cargas se distribuyan en todas las fibras de manera cuasi-uniforme. Dentro de los arreglos bidireccionales de fibra tejida existen varios tipos de tela utilizada, y cada una tiene un nombre según el tipo de tejido, y cada una tiene un tipo de aplicación.

Un tipo de tejido de fibra bidireccional y la más común y sencilla es la de tipo "plain weave", la cual se caracteriza por un entrelazado que forma una cruz por arriba y el siguiente entrelazado forma una cruz por abajo, así en ambas direcciones warp y wift. Este tipo de tejido también se le

llama balanceado por su tejido que es igual en ambas direcciones. Es fuerte y resistente, utilizado para la moda y la decoración telas, así como materiales que presentan fuerzas cortantes como se mencionó anteriormente. Algo importante acerca de la aplicación de los materiales compuestos con fibras bidireccionales es que, a pesar de presentar una resistencia a la tensión pobre en comparación con las fibras unidireccionales, y teniendo en cuenta que resisten cargas cortantes relativamente grandes (teniendo en cuenta que se trata de materiales rígidos y frágiles), pueden utilizarse para aplicaciones donde se requiera obtener una geometría distinta a la plana, pues tienen la capacidad de soportar cargas una vez conformado el material compuesto, a diferencia del material con fibras unidireccionales.

### 2.5.3 Arreglo de Fibra Multidireccional

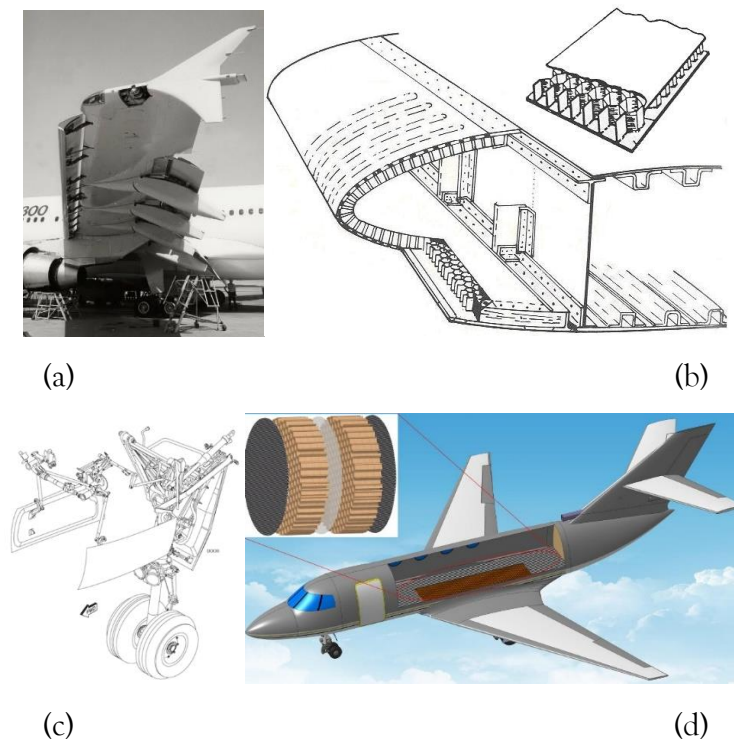
Algunas veces se requiere de un material que resista cargas en diferentes direcciones, y que al utilizar un laminado bidireccional o unidireccional fallarían sin remedio, pues las cargas a las que sería sometido arrancaría el refuerzo de la matriz o le provocaría delaminación. Para asegurarse de que estos materiales no sufran un daño como el mencionado, se fabrican materiales con capas en las direcciones hacia donde estará dirigida la carga, de este modo el laminado resiste de manera más eficiente, además de permitir la flexibilidad del material. Uno de los usos de fibras multidireccionales es la de paneles estructurales de material compuesto en alas de aviones como en el nuevo a350 (**Figura 29 a**). Otro tipo de uso para el laminado multidireccional es la fabricación de cascos de embarcaciones como el de la **Figura 29 b** de un catamarán donde se utilizó un moldeo por deposición manual de capas de fibra de carbono multiaxial.



**Figura 29:** Ejemplos de uso de fibra multidireccional. (a) Ala de un Airbus a350. (b) Casco producido utilizando el proceso manual por deposición de capas con compresión de vacío.

## 2.5.4 Arreglo de tipo sándwich

Las estructuras sándwich de compuestos se han usado extensamente en las estructuras aeroespaciales, construcción de barcos, infraestructuras, etc., debido a su relación de peso ligero y alta resistencia. Algunos ejemplos de la aplicación de estos compuestos se muestran en la **Figura 30**.



**Figura 30.** Aplicaciones de estructuras sándwich en industria aeroespacial. a) Vista lateral de flaps y slats desplegados en un A310-300. b) Vista interior de un borde de ataque con estructura de material compuesto de tipo sándwich. c) Puerta de tren de aterrizaje. d) Estructura de "honeycomb" del piso de un avión.

Otras aplicaciones en las que se utilizan estructuras sándwich son las siguientes:

- Estructuras interiores de la cabina
- Paneles de piso de la cabina
- Componentes de la góndola del motor (nacelle)
- Paneles de borde de ataque del ala
- Paneles de compartimiento de carga
- Estructuras del alerón y timón

## 2.6 Métodos de Fabricación para Materiales Compuestos

De acuerdo a Derek Hull <sup>72</sup>, los materiales compuestos se fabrican por procesos en molde abierto y en procesos de molde cerrado. Para la primera categoría se cuenta con los siguientes:

1. Método de contacto manual (Hand Lay Up) <sup>73</sup>: Es denominado así debido a las bajas o nulas presiones que necesita. Es uno de los métodos más utilizados dentro de la industria aeroespacial debido a su gran flexibilidad. Se trata de un proceso lento con más de 50 etapas individuales. La etapa de colocación manual de los laminados, consume en torno a la mitad del tiempo total del proceso.

Este proceso consiste en impregnar las fibras con resina, e ir apilando las capas dentro de un molde, en la orientación desaseada hasta lograr el arreglo de fibras específico.

2. Bobinado (Filament Winding): Es un proceso de fabricación en el que se enrollan refuerzos continuos a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota en torno de su eje de giro. Las velocidades de trabajo se encuentran entre 90-100 m/min para fibras de vidrio y entre los 15-30 m/min para las fibras de carbono y aramida. Mediante este proceso se pueden alcanzar volúmenes de fibra de hasta un 75% siendo posible controlar el contenido de resina. No obstante, es necesario que la pieza sea de revolución y sin curvaturas entrantes. La forma de la pieza debe permitir la extracción del mandril. Existen 3 modelos de bobinado:

a) Bobinado helicoidal: el movimiento de rotación del mandril se combina con el movimiento de traslación longitudinal del cabezal de impregnación.

b) bobinado circunferencial: se trata de una variante del bobinado helicoidal per con un ángulo enrollado de 90 grados.

c) bobinado polar o plano: tanto el movimiento de rotación como el de traslación longitudinal es realizado por el mandril, permaneciendo fijo el cabezal de impregnación.

Este proceso se utiliza para producir cilindros huecos con alta resistencia. La fibra es proporcionada a través de un baño de resina y después es bobinada sobre el cilindro apropiado. Cuando han sido aplicadas las suficientes capas, el cilindro se cura en un horno. Por último, la pieza moldeada se separa del mandril.

Las aplicaciones de este proceso incluyen tanques químicos y de almacenamiento de combustibles, recipientes a presión y cubiertas de motores de cohetes.

Los modelos del proceso proporcionan la siguiente información en función de la posición y del tiempo:

- Temperatura en el interior del material compuesto y del mandril.
- Grado de curado en el interior del material compuesto.
- Viscosidad en el interior del material compuesto.
- Posición de las fibras.
- Tensiones en el interior del material compuesto y en el mandril.
- Nivel de porosidad en el interior del material compuesto.
- Tiempo de curado.

3. Proceso en autoclave: Este proceso se lleva a cabo en un auto clave de materiales compuestos y es utilizado para consolidar y curar componentes realizados con materiales compuestos de matriz polimérica, mediante el uso de temperatura y presión. Las variables de las que depende principalmente este proceso son la temperatura y la presión aplicadas, y vienen definidas por el tipo de material a procesar:

- En materiales termoestables son necesarias altas temperaturas para reducir la viscosidad del polímero e iniciar la reacción química de curado. Estas condiciones están en el rango de 175 grados C y 600 kPa, pero en ocasiones pueden llegar a rangos de 300-400 C y 1 MPa.
- En materiales termoplásticos los requerimientos de temperatura no son los mismos que en termoestables, ya que no hay reacción química que activar para conseguir el curado.
- El uso de presión en el proceso es necesario para mantener en todo momento las láminas juntas, y eliminar posibles defectos que pudieran formarse (poros o delaminaciones).

La mayor ventaja del conformado en autoclave es la gran flexibilidad para procesar distintas familias de materiales, cualquier polimérico puede ser procesado, siempre y cuando su ciclo de cura se encuentre dentro de las limitaciones de temperatura y presión de la autoclave.

Para los procesos de fabricación de molde cerrado se cuentan con los siguientes<sup>74</sup>:

1. SMC (Sheet Moulding Compounds): consiste en el moldeo de una resina termoestable reforzada generalmente con fibra de vidrio en forma de hilos cortados o continuos, obteniendo la pieza final a través de polimerización de la resina por aplicación de presión y temperatura.

Este método de fabricación posee una etapa preliminar en la que se crea el preimpregnado que después se utilizará para realizar la pieza final deseada. Este pre-proceso se basa en utilizar mechas de fibra de vidrio en cordones continuos que se cortan en pedazos (de unos 5cm) sobre una capa de relleno de resina transportada sobre una película de polietileno. Posteriormente, una vez la capa inferior tiene todas las fibras distribuidas se coloca otra capa de relleno de resina sobre la primera formando un sándwich. Este sándwich se compacta y enrolla en rodillos de embalaje calibrados. Los rollos de preimpregnado se almacenarán para dejar que la fibra se asiente con la matriz termoestable. Las fibras de vidrio pueden presentarse no sólo como fibras cortadas, sino también hay casos en los que se utilizan hilos continuos o como mezcla de ambos (hilos continuos y fibras cortadas), en este último caso se obtendrían las mejores propiedades mecánicas.

Finalmente, los rollos de material compuesto se llevan a una prensa, donde se cortan con la configuración adecuada para la pieza a obtener y se colocan en un ajustado molde metálico calentado. Posteriormente la prensa hidráulica se cierra y el SMC fluye uniformemente bajo presión por todo el molde formando el producto final.

Las características principales son:

- Buena estabilidad dimensional.
- Excelente acabado superficial por ambas caras.
- Buenas propiedades de resistencia mecánica.
- Posibilidad de obtener geometrías complejas.
- Alta capacidad de automatización.

Es un proceso que, por su elevada capacidad de automatización, se utiliza principalmente en producción de grandes series, siendo el automóvil su principal sector (capotas, paneles delanteros). Este fenómeno hace que el SMC sea actualmente el método más utilizado en la fabricación de materiales compuestos con resinas termoestables.

2. Inyección: La infiltración de materiales compuestos por inyección, utiliza la misma tecnología que el moldeo por inyección de plásticos tradicional. Pero a diferencia de introducir en el molde únicamente un polímero (ya sea termoplástico o termoestable), se introduce el polímero más un refuerzo. Las fibras más utilizadas son de vidrio, carbono y aramida. Estos refuerzos afectan notablemente a las propiedades mecánicas del material final. Pero por otro lado presentan algunos inconvenientes como:

- Dificultad para controlar el posicionamiento de las fibras en la pieza.
- Las fibras pueden reducir notablemente su longitud por rotura con el tornillo sin fin que alimenta el proceso.

3. Pultrusión: Se trata de un proceso automático muy versátil mediante el que se obtienen perfiles de sección constante. Se utiliza una fibra embebida en una resina termoestable, la cual reacciona cuando se aplica calor. Se tira del material (pull) para evitar roturas y desalineamiento de fibras. Mediante este proceso se puede producir cualquier sección compleja siempre que su espesor sea constante. Además, debido a la precisión de la superficie del molde se obtienen acabados de alta calidad. No obstante, la velocidad del proceso es relativamente baja (3 m/min) comparada con la velocidad de extrusión (30 m/min). Además, resulta muy complicado orientar las fibras en ángulos óptimos.

El proceso de pultrusión consta de varias etapas:

- Las fibras de refuerzo se presentan en forma de bobinas o rollos para favorecer el flujo continuo del material.
- Se colocan en carretes sobre ejes con rodamientos especiales para mantener constante la tensión del hilo al ser devanado.



- Cuando las fibras se dirigen hacia el sistema de impregnación se hacen pasar por unas placas de alineamiento para evitar torsiones, nudos o daños en los refuerzos.
- La clave de todo el proceso de pultrusión es el molde. Debe alinear las fibras y comprimir las hasta la fracción en volumen deseada, asegurando el curado del material en un tiempo relativamente corto.
- Alrededor del molde se colocan placas calefactadas para provocar el calentamiento de la pieza y favorecer la reacción de polimerización de la resina. El parámetro de control más importante es la temperatura interior del molde, que oscila entre los 100°C y 150°C.
- En el mecanismo de tracción debe existir una distancia de al menos 3 metros entre éste y la salida para asegurar el correcto enfriamiento del perfil mediante convección natural o forzada (por chorro de agua o aire).

4. RTM (Resin Transfer Moulding)<sup>75</sup>: Se trata de un proceso de fabricación en molde cerrado a baja presión. Puede resumirse en cinco etapas:

- Se coloca el tejido de fibras secas en el molde y éste es cerrado.
- Se inyecta la resina en el molde mediante una bomba.
- Se sella la entrada de resina y la salida de aire.
- Se aplica calor (curado)
- Tras un período de enfriamiento se abre el molde y se retira la pieza

Debido a la posibilidad de moldear las fibras en seco antes de la inyección de la resina, se consigue una mejor orientación de las fibras, aumentando las propiedades mecánicas del material.

## 2.7 Método de validación de propiedades mecánicas para materiales compuestos de matriz polimérica.

### 2.7.1 ASTM D-3039

Este método determina el plano propiedades de tracción de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de alto módulo<sup>76</sup>. Los materiales compuestos se limitan a formas

de fibra continua o compuestos reforzados con fibras discontinuas en la que el laminado es equilibrado y simétrico con respecto a la dirección de prueba. Una tira plana delgada de material que tiene una sección transversal rectangular constante se monta en las mordazas de una máquina de ensayo mecánico. La resistencia a la rotura del material puede ser determinada a partir de la carga máxima soportada antes de la falla. En esta prueba, la tensión se controla con la cepa o desplazamiento y la respuesta de tensión-deformación del material se puede determinar, a partir de la cepa final a la tracción, módulo de tracción de elasticidad, coeficiente de Poisson, y la tensión de transición.

Este método de ensayo está diseñado para producir datos de las propiedades de tracción de las especificaciones de materiales, investigación, desarrollo, control de calidad, diseño estructural y análisis. Los factores que influyen en la respuesta a la tracción y por lo tanto deben ser reportados son los siguientes: materiales, método de preparación de la probeta, acondicionamiento de la muestra, el medio ambiente de la prueba, la muestra de alineación y agarre, la velocidad de la prueba, tiempo, temperatura, contenido de vacío, y porcentaje en volumen de refuerzo.

En este método existen diversos factores que pueden llegar a afectar los resultados obtenidos en las pruebas por lo que se deben de controlar en la medida de lo posible, algunos de estos son: La falta de control de la alineación de la fibra y el daño inducido se conocen las causas de la dispersión de datos al realizar este tipo de pruebas, Un alto porcentaje de fracasos está relacionado con el agarre, especialmente cuando se combina con la dispersión de los datos de material si se presentó una mala fabricación de la probeta. Otro factor importante es el sistema de alineación de flexión excesiva provocará un fallo prematuro, así como un módulo altamente inexacto de la determinación de la elasticidad.

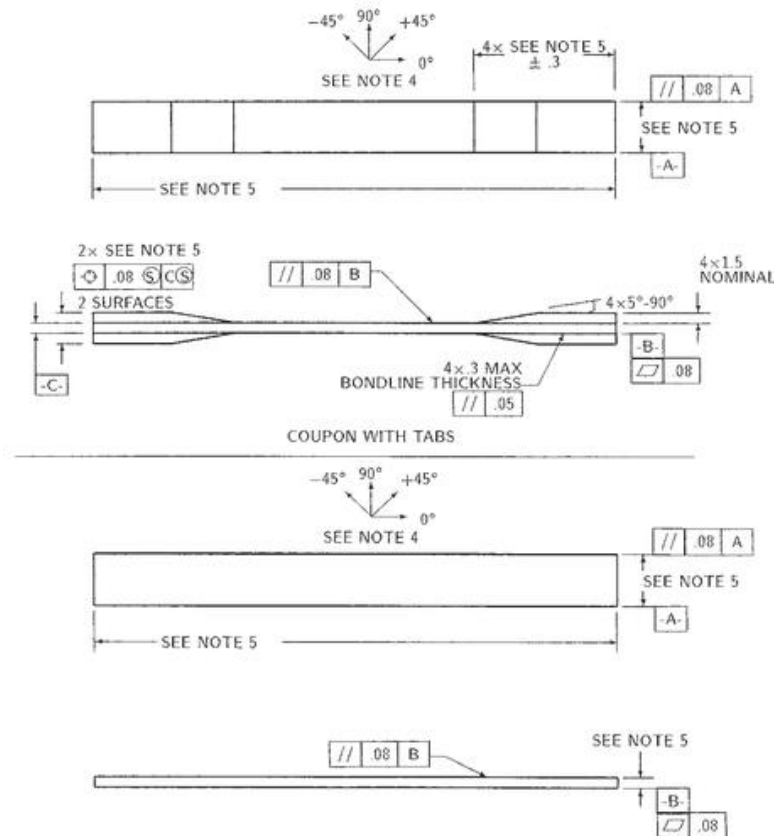


Figura 31. Dimensionamiento de Probetas en base a la norma ASTM D3039

Se debe hacer todo lo posible para eliminar el exceso de flexión del sistema de prueba, esto puede provocar dobleces como resultado de los apretones desalineados o de los mismos especímenes si no estén bien instalados en el sistema de sujeción o fuera de tolerancia producida por la mala preparación de la muestra, además los efectos de borde en laminados suelen provocar un fracaso prematuro y menor rigidez como resultado de borde de ablandamiento en los laminados que contienen capas fuera de eje. En el caso de dimensionamiento y tolerancias la **figura 31** muestra las dimensiones a considerar para el tipo de pruebas a realizar en esta investigación.

### 2.7.2 ASTM D-695-02

Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades mecánicas de los plásticos rígidos reforzados y no reforzados, incluidos los materiales compuestos de alto modulo cuando

son sometidos a cargas de compresión a tasas de esfuerzo o cargas uniformes relativamente bajas<sup>77</sup>.

Esta prueba proporciona información sobre las propiedades de compresión de los plásticos, estas incluyen el módulo de elasticidad, la tensión a la fluencia, la deformación más allá del punto de fluencia (a menos que el material se aplane y no se fracture). Los materiales que tienen un orden de baja ductilidad pueden no exhibir un punto de elasticidad. En el caso de un material que falla en la compresión por una fractura o rotura, la resistencia a la compresión tiene un valor muy definido. En el caso de un material que no falla en la compresión por una fractura por rotura, la resistencia a la compresión es arbitraria, dependiendo del grado de distorsión que se considera que indica una falla completa del material. Muchos materiales plásticos continuaran deformándose en compresión hasta que produzca un disco plano, y el esfuerzo de compresión (nominal) aumentara constantemente en el proceso, sin que se produzca ninguna fractura bien definida. La resistencia a la compresión no puede tener un significado real en estos casos.

Las pruebas de compresión proporcionan un método estándar de obtención de datos para investigación, desarrollo, control de calidad, aceptación o rechazo según especificaciones y propósitos especiales. Las pruebas no pueden considerarse significativas para el diseño de ingeniería en aplicaciones que difieren ampliamente de la escala de tiempo de carga de esta prueba estándar. Tales aplicaciones requieren pruebas adicionales tales como impacto, fluencia y fatiga. Para esto la norma considera las siguientes definiciones:

Tensión de compresión: la relación de la deformación por compresión a la longitud de la muestra de prueba, es decir el cambio de longitud por unidad de longitud original a lo largo del eje longitudinal.

Resistencia a la compresión: El máximo esfuerzo a compresión (nominal) llevado por una muestra de prueba.

Resistencia a la compresión en la ruptura: es el esfuerzo de compresión sostenido en el momento del fallo de la muestra de prueba si se produce la rotura de la muestra.

Esfuerzo de compresión: la carga de compresión por unidad de área en la sección transversal mínima original dentro de los límites, llevados por el espécimen de prueba en un momento determinado, se expresa en vigencia por unidad de área.

Para esta prueba el número mínimo de especímenes son cinco, por cada condición del material en el caso de materiales isotrópicos. La velocidad de prueba será la velocidad relativa de movimiento de las mordazas o accesorios de prueba, siendo la velocidad estándar de  $1.3 \pm 0.3$  mm/min. Para proceder con la prueba es necesario medir el ancho y el espesor de la muestra, se debe de calcular y registrar el valor mínimo de la sección transversal, medir la longitud de la muestra para posteriormente colocar la muestra entre las superficies de la herramienta de compresión, teniendo cuidado de alinear la línea central de su carga con el eje de la línea central del embolo para garantizar que los extremos de la muestra son paralelos a la superficie de la herramienta de compresión.

### 2.7.3 ASTM D-2344

Este método de prueba determina la resistencia “short-beam” de los materiales compuestos reforzados con fibra de alto modulo <sup>78</sup>. El espécimen es una viga corta mecanizada a partir de un laminado plano o curvo con 0.25 pulgadas de espesor. La muestra se carga en una prueba de 3 puntos. La aplicación de este método se limita a compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra continua o discontinua. Para ello la norma considera los siguientes términos:

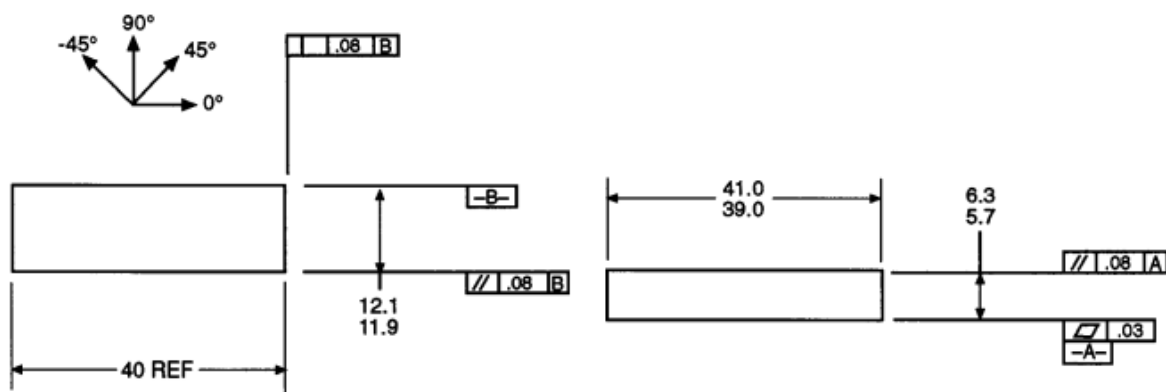
Laminado equilibrado: un refuerzo continuo de fibra, laminado en que la medida de cada capa con respecto al eje de referencia del laminado está equilibrada por una lámina del mismo material.

Resistencia “short-beam”: la tensión de cortante calculada en el plano medio del fallo del evento específico. Aunque la falla por cortante es dominante en este método de prueba, los esfuerzos internos son complejos y los modos de falla diversos. Las soluciones para determinar elasticidad propuestas, demuestran las insuficiencias en la teoría clásica. Estas soluciones muestran que la distribución parabólica del esfuerzo cortante como es predicho no ocurre de manera recurrente en los planos a medio camino entre la punta de carga y los puntos de apoyo. Las distribuciones

de estrés se vuelven sesgadas con tensiones máximas que se producen cerca de la punta de carga y puntos de soporte.

Combinando con esfuerzos de compresión transversales y en el plano, se ha demostrado que esta es la manera en que inicia la falla, sin embargo, para los materiales con matrices más dúctiles, el rendimiento del plástico puede aliviar la situación, debajo de la punta de la carga y permitir que otros modos de falla ocurran, como tensión de la fibra en la superficie inferior. Por consiguiente, a menos que se haya observado claramente una falla inter-laminar en el plano medio, este tipo de esfuerzo se determina con esta prueba, método que no puede ser atribuido a una propiedad de cortante, ya que el uso de la ecuación no proporcionara un valor preciso para la resistencia.

Para esta prueba las muestras se cargan en el centro como se muestra en la figura 32, el espécimen termina descansando sobre dos soportes que permiten el movimiento lateral, aplicando la carga.



**Figura 32.** Dimensionamiento de probetas y configuración de prueba en base a la norma ASTM D2344

En este tipo de prueba se pueden identificar fallas por resina, propiedades inter-laminares y se ha encontrado que los resultados de la prueba son repetibles para una determinada geometría, sistema de materiales y secuencia de apilamiento.

## 2.7.4 ASTM D790-03

Determina las propiedades de plásticos reforzados y no reforzados a flexión, incluyendo compuestos de alto modulo y materiales aislantes eléctricos en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o cortadas a partir de láminas<sup>79</sup>. Este método de prueba es normalmente aplicado a materiales rígidos como semi-rígidos, sin embargo, la resistencia a la flexión no se

puede determinar en aquellos materiales que no se fracture o no falle la superficie exterior de prueba, dentro del límite de tensión del 5%. Este método utiliza un sistema de carga de tres puntos aplicado a una viga simplemente apoyada. Maneja dos procedimientos:

Procedimiento A: Diseñado principalmente para materiales que el punto de ruptura es comparable a pequeñas deflexiones.

Procedimiento B: Diseñado para materiales que sufren grandes deflexiones durante la prueba.

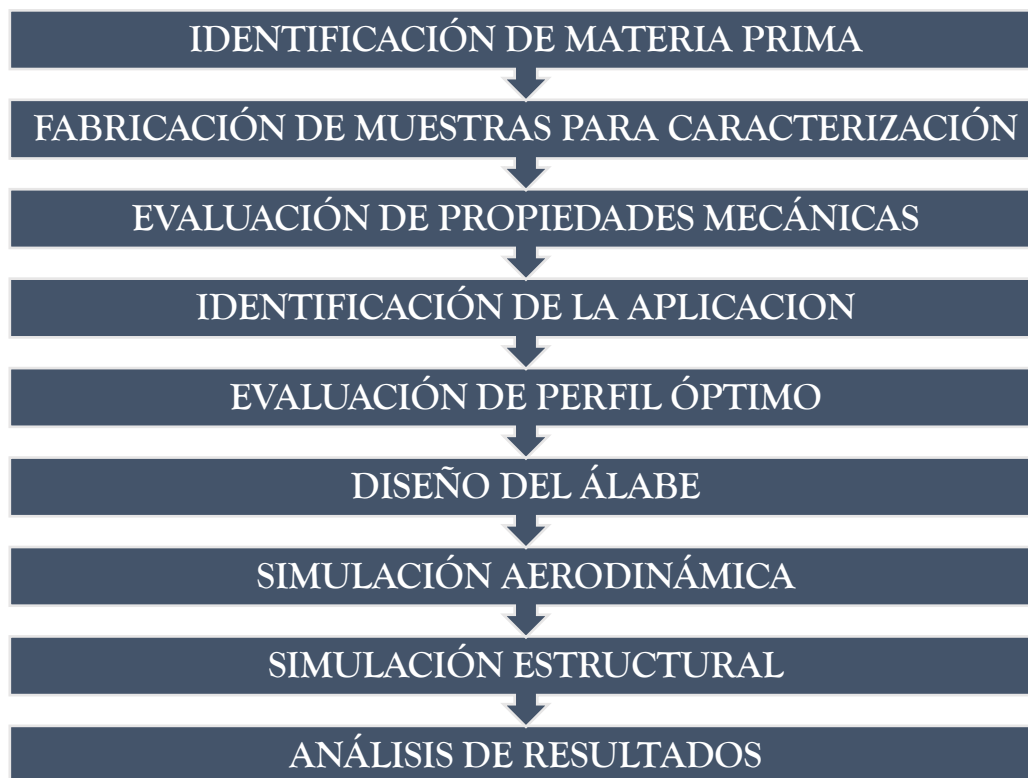
El procedimiento A, es utilizado para medir las propiedades de flexión, particularmente el módulo de flexión. El procedimiento B se puede utilizar para medir la resistencia a la flexión. Para la prueba una barra de sección transversal rectangular descansa sobre dos soportes y se carga en medio de los soportes. Una relación de intervalo de profundidad de soporte de 16:1 es utilizada a menos que haya razones para sospechar que pueda requerirse una relación de extensión a profundidad. La muestra se desvía hasta que se produce la ruptura en la superficie exterior de la muestra de ensayo o hasta una tensión máxima se alcanza.

El procedimiento A se emplea a una tasa de deformación de 0.01 mm/mm/min. Para el procedimiento B se utiliza un rango de 0.1 mm/mm/min. Para materiales isotrópicos o especímenes moldeados la muestra de cada material debe de ser por lo menos cinco especímenes. Las condiciones recomendadas son pruebas planas y de borde en especímenes cortados en dirección longitudinal y transversal de la muestra. Los fines de esta prueba “longitudinalmente” designa el eje principal de anisotropía y se interpretara en el sentido de la dirección del laminado conocido por ser más fuerte en flexión. En el caso de la sección transversal, indica la dirección de la muestra que se sabe es más débil en flexión y debe estar a 90 grados de la dirección longitudinal.

## Capítulo III

### Metodología y Experimentación

Para la elaboración de este proyecto se tomó en cuenta el siguiente diagrama de flujo con la finalidad de asegurar la repetitividad en los resultados los pasos a seguir fueron los siguientes:



**Figura 33.** Diagrama de flujo de metodología del proyecto

#### 3.1 Identificación de Materia Prima

En esta etapa del proyecto se analizaron las diferentes propiedades de fibras naturales de origen vegetal y mineral que cumplieran con las especificaciones de manejar un tratamiento superficial para evitar la hidrofobia de las fibras y mejorar la unión entre la matriz y el refuerzo, además de ser fibras tejidas para mejorar la distribución de la carga a lo largo del material compuesto, la matriz seleccionada fue una matriz epóxica, siendo esta la que cuenta con mejor desempeño.



Para las fibras seleccionadas, se buscaron fibra de lino, cáñamo, yute y basalto, siendo la última de origen mineral y el resto de origen vegetal.

Las condiciones establecidas para seleccionar las fibras naturales y minerales se basaron en dos puntos primordiales, que estas tuvieran un tratamiento superficial de acetilación o alcalinización con la finalidad de evitar la absorción de humedad en la fibra y mejorar la unión entre refuerzo y matriz, y que estuvieran tejidas en orientaciones 0/90 para poder tener una distribución de carga uniforme en el refuerzo.

Ante estas consideraciones las fibras seleccionadas y disponibles en el mercado con estas condiciones fueron las siguientes: Lino, Yute, Cáñamo y Basalto, la figura 33, muestra las fibras con sus respectivos tejidos son ser impregnadas por resina.



**Figura 33.** Fibras seleccionadas de izquierda a derecha: Cáñamo, Yute, Lino y Basalto.

En el caso de la matriz seleccionada esta es resina líquida modificada que contiene materiales bio-degradables provenientes de productos y flujos residuales de otros procesos industriales, como la producción de pasta de madera y biocombustibles, este producto contiene excelentes propiedades de elongación y de adhesión.

#### ***Grado de rendimiento:***

- Mejor rendimiento mecánico.
- Amplia gama de procesos y aplicaciones.

### ***Reducción del Impacto Ambiental:***

- Reducción mínima del 50% en emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero (en comparación con el 100% de epóxicos derivados del petróleo, depende del contenido final del sistema, medición del ACV usando ISO 14040:2006).
- Eliminación de subproductos nocivos.
- Menor consume de energía y agua.

### ***Consideraciones para el Medio ambiente y la seguridad del usuario.***

- Subproductos perjudiciales reducidos, como los hidrocarburos clorados.
- Menor consume de energía y agua durante el procesamiento.
- Reducción de componentes sensibilizadores para aumentar la seguridad del usuario.

### ***Componentes:***

- *Aceite de Pino*

Subproducto de la pasta de papel, material prima basada en el pino como alternativa económica a los productos petroquímicos tradicionales y proporcionan propiedades mecánicas únicas en las resinas, como mejor adhesión y elasticidad.

- *Residuos y aceites vegetales de grado no alimenticio.*

Los subproductos de la producción de biocombustibles proporcionan una ruta de química ecológica a uno de los principales componentes de nuestra producción de epoxi. Esta materia prima renovable reemplaza componentes petroquímicos adicionales en nuestras resinas con un recurso renovable.

**Tabla 3.** Propiedades de la resina epóxica seleccionada

| Propiedades físicas típicas |           |
|-----------------------------|-----------|
| Propiedades                 | Valor     |
| Apariencia                  | Amber     |
| Color                       | 3-9       |
| Viscosidad (cPs @ 25C)      | 2000-4000 |

|                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| Densidad (Gravedad específica @ 25C) | 1.15          |
| Contenido de Bio-Carbono             | 25.8% - 32%   |
| Bio-contenido por masa               | 37.7% - 51.3% |

**Tabla 4.** Propiedades del catalizador seleccionado

| Propiedad                              | 1000 Catalizador  |
|----------------------------------------|-------------------|
| Proporción de mezcla en peso           | 100:48            |
| Proporción de mezcla en volumen        | 2:1               |
| Sistema de contenido de biomasa        | 39% - 48%         |
| Viscosidad de la mezcla (cPs @ 77F)    | 2000 - 3000       |
| Tiempo de gelación (min, 150g @ 77F)   | 22                |
| Set de la película delgada (hrs @ 77F) | 2                 |
| Tiempo libre de pegajosidad (hrs @77F) | 3                 |
| Ciclo de curado                        | 7 días @ 77 F     |
| Modulo de tension (Psi)                | $3.6 \times 10^5$ |
| Resistencia a la tracción (Psi)        | 9,000             |
| Modulo de flexión (Psi)                | $3.0 \times 10^5$ |
| Resistencia a la flexión (Psi)         | 12,000            |
| Elongación a la ruptura (%)            | 7                 |
| Tg (F)                                 | 180               |

## 3.2 Fabricación de muestras para Caracterización

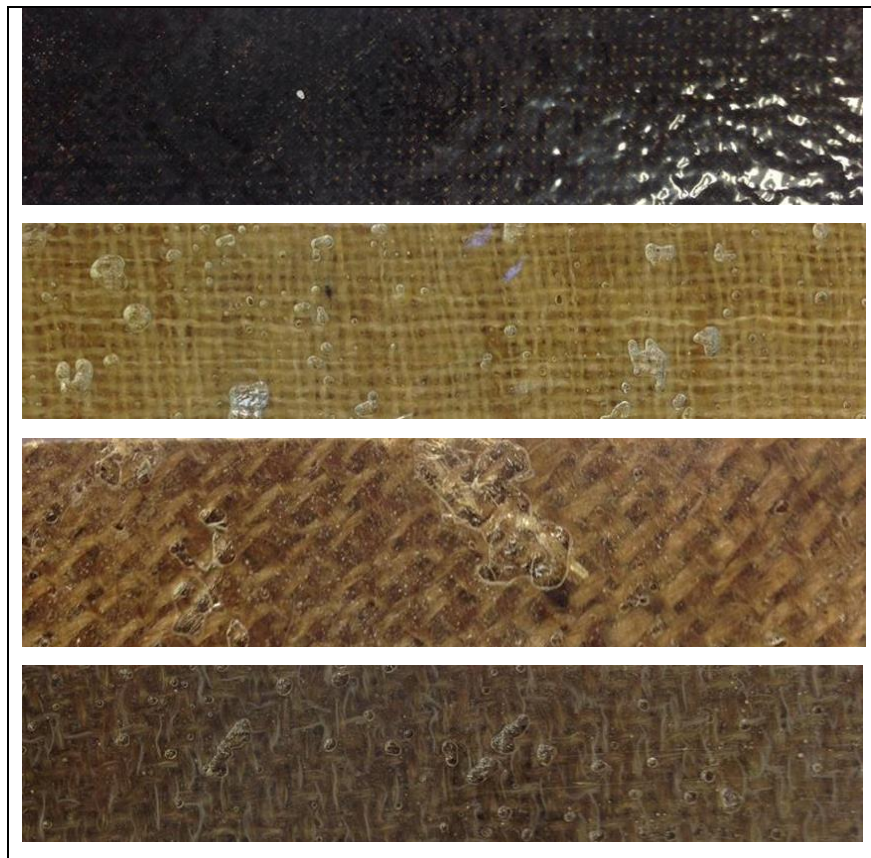
Para este punto se buscó el mejor proceso para fabricar los especímenes y evaluar las propiedades mecánicas de los diferentes materiales compuestos a base de fibra natural, para esto se evaluaron los procesos de hand lay up, moldeo por vacío e infusión los cuales se describen con mayor detalle en la sección 2.7, las muestras fueron fabricadas en base a las normas ASTM D3039, ASTM D695-02, ASTM D2344 y ASTM D790-03.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas se probaron diferentes procesos de fabricación con la finalidad de evitar irregularidades superficiales, tanto en espesor y zonas secas:

## 1. Hand Lay Up

Este proceso implica el posicionamiento del material de refuerzo (fibra) en la placa plana. Estas capas de fibra se impregnan con resina en estado líquido con espátula, para asegurar una buena humectación del material de refuerzo. El paso se repite hasta lograr el espesor deseado, en este caso la norma ASTM D-3039 indica un espesor de 2.5 mm. Los laminados se dejan curar bajo condiciones atmosféricas normales.

Durante la fabricación de muestras la resina indica una relación con el catalizador de 2 a 1, en este caso el proceso provoco un acabado superficial no uniforme en todas las fibras dejando zonas con mayor cantidad de resina que otras como se muestra en la figura 34.



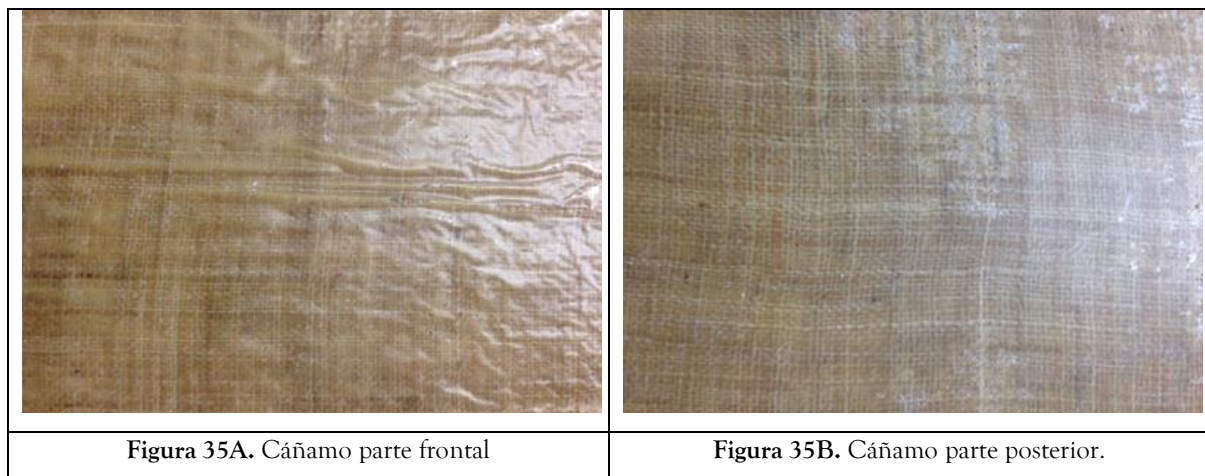
**Figura 34.** Muestras de materiales compuestos fabricadas con hand lay up.

Estas irregularidades superficiales se presentaron en ambos lados de las muestras provocando variaciones en los resultados de las pruebas mecánicas, por lo que no se considera un método adecuado para la fabricación de las muestras y fue descartado del proceso.

## 2. Hand Lay Up – Moldeo por vacío

Con la finalidad de solucionar el problema del acabado superficial y las zonas de exceso de resina, se probó moldear los paneles de fibras naturales y bio-resina con vacío, esta técnica consiste en crear presión sobre un laminado durante su ciclo de curado, la presurización del laminado cumple varias funciones, como remover el aire atrapado entre las capas, compactar las fibras proporcionando laminados más uniformes, evitar que la orientación del laminado se modifique durante el curado, reducir la humedad, optimizar las relaciones esfuerzo matriz en las piezas.

Con este método el acabado superficial mejoro medianamente, pero solo con la superficie inferior del laminado, en el caso de la superficie superior las líneas del proceso de embolsado quedaron impregnados en la muestra y debido a la viscosidad de la resina el vacío no alcanzo a extraer el exceso de la resina, la figura 35 muestra la parte frontal y posterior del laminado con fibra de cáñamo, además se encontraron problemas de acabado superficial identificándose zonas secas en las muestras.

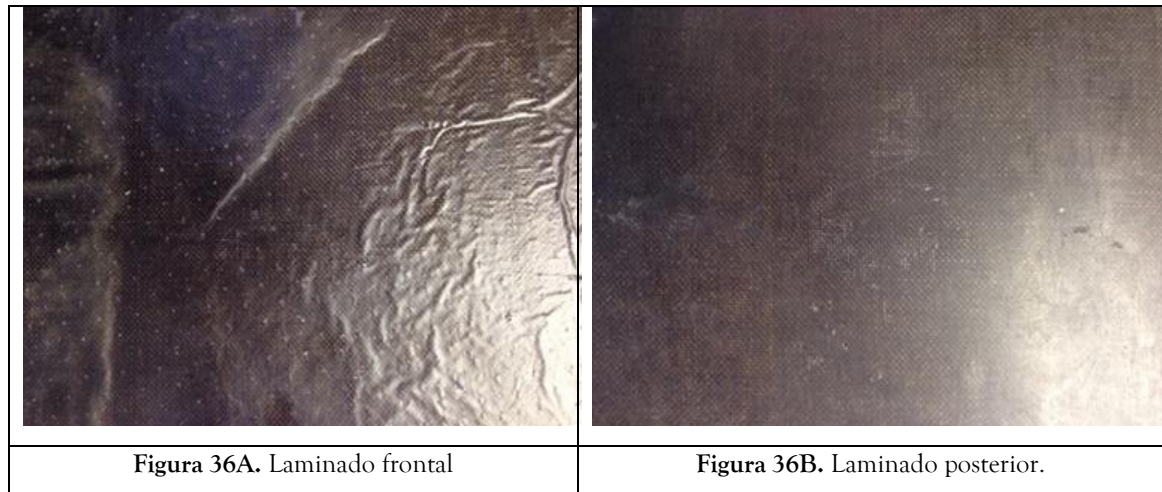


## 3. Hand Lay Up, aplicando vacío y placas.

Se probó aplicar vacío una vez impregnadas las fibras con resina y colocar dos placas en la parte superior e inferior de los laminados, esto con el fin de solucionar el problema del acabado superficial.



Con este método el acabado superficial mejoro, pero solo con la superficie inferior del laminado, en el caso de la superficie superior las líneas del proceso de embolsado y el “release film” quedaron impregnados en la muestra debido al peso de la lámina de aluminio que no permitió que el vacío eliminara el exceso de resina, la figura 36 muestra la parte frontal y posterior del laminado con fibra de basalto, además de los problemas superficiales se detectó que en muchas zonas del laminado se presentaron zonas secas.



#### 4. RTM – Transferencia de resina por infusión.

Se trata de un proceso de fabricación en molde cerrado a baja presión. Puede resumirse en cuatro etapas:

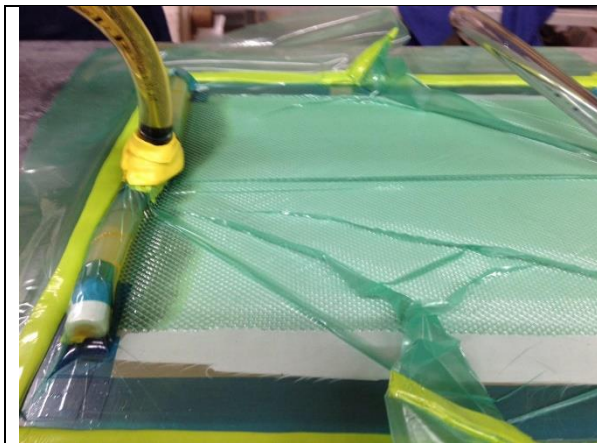
- Se coloca el tejido de fibras secas en el molde y éste es cerrado.
- Se inyecta la resina en el molde mediante una bomba.
- Se sella la entrada de resina y la salida de aire.
- Tras un período de enfriamiento se abre el molde y se retira la pieza.

Al identificarse zonas secas de forma circular en los laminados anteriores, se llegó a la conclusión que era necesario realizar un proceso de eliminación de aire en la resina, para esto se aplicó vacío a la mezcla de resina antes de hacer el proceso de inyección en RTM, en este proceso se aplicó vacío por un periodo de 5 minutos a una presión de 20 in de Hg. La figura 37 muestra el proceso de extracción de aire.



**Figura 37.** Proceso de eliminación de aire en mezcla de resina y catalizador.

Durante el proceso de RTM (figura 31) se identificó que la alta viscosidad de la resina no permitió que por el proceso de inyección alcanzara a impregnar completamente las fibras secas, el tiempo de gelación de la resina de 30 minutos no fue suficiente ya que solo alcanzo a impregnar la mitad del panel como se muestra en la figura 38.



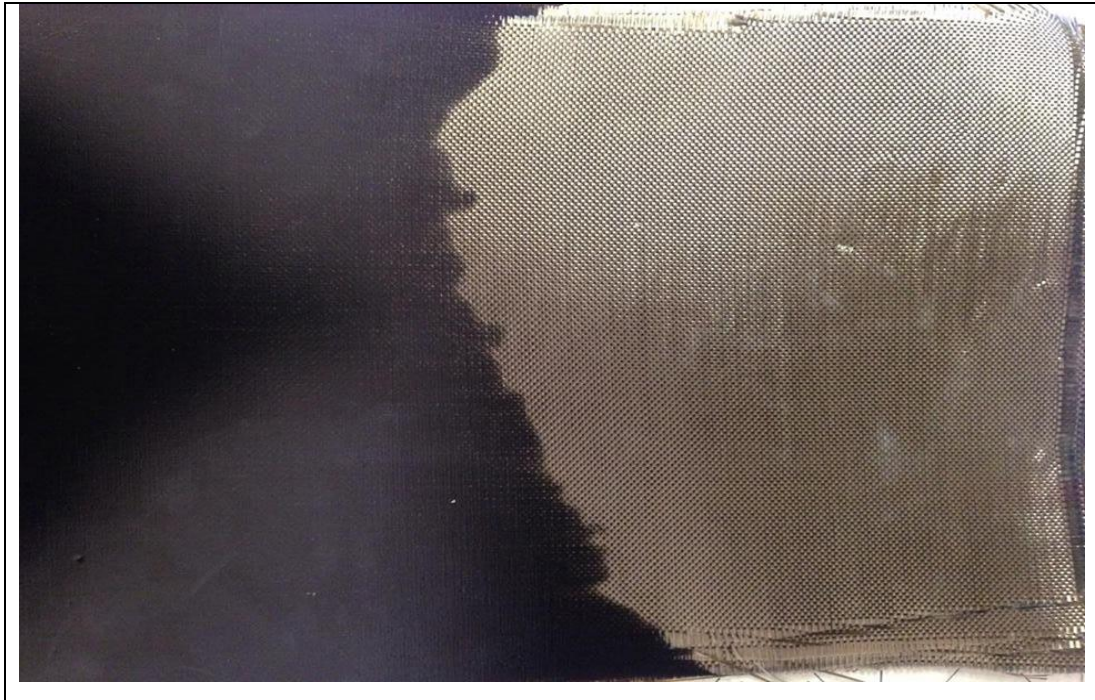
**Figura 38A.** Inicio del proceso de inyección.



**Figura 38B.** Finalizado del RTM.

Para este proceso se permitió que la resina curara durante el tiempo establecido por el fabricante que fueron 12 horas, la figura 39 muestra el acabado final en la parte superior del moldeo, en la parte inferior se identificó que la resina no alcanzo a impregnar las capas de fibra.

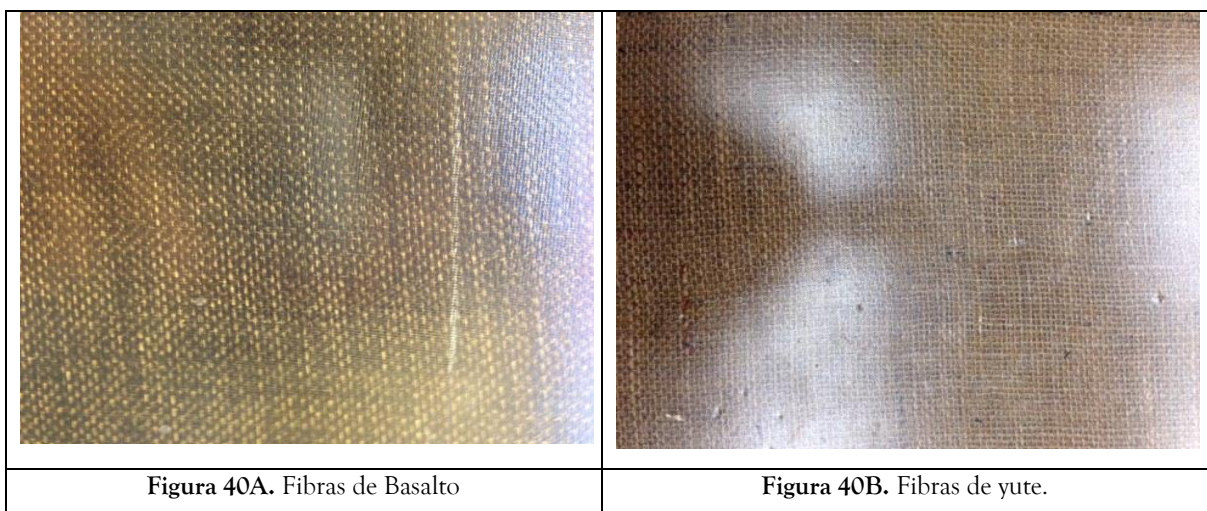




**Figura 39.** Laminado de basalto por RTM

##### 5. Hand Lay Up - molde cerrado y aplicando vacío.

El método con el que se obtuvieron mejores resultados fue a través de hand lay up utilizando dos placas de aluminio y aplicando una presión distribuida en toda la placa permitiendo que el exceso de resina se liberara por los extremos, en este caso también se realizó el proceso de eliminación de aire en la mezcla de la resina antes de impregnar las capas de fibra, la figura 40 muestra el acabado superficial de las fibras de basalto y yute.





### 3.3 Evaluación de Propiedades Mecánicas

En esta sección se busca conocer las características de material compuesto a base de fibras naturales pre-fabricados con la finalidad de conocer sus propiedades a tracción, compresión, flexión y cortante en base a las normativas anteriormente mencionadas.

Una vez identificado el mejor proceso de fabricación se fabricaron las muestras para la evaluación mecánica, obteniendo las siguientes propiedades físicas de cada una de las muestras:

**Tabla 5.** Propiedades de compuesto Yute-Epóxica

| FIBRA                        |                    | RESINA EPOXICA               |                    |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| Densidad                     | Volumen Fraccional | Densidad                     | Volumen Fraccional |
| 1460 kg/m <sup>3</sup>       | 0.22               | 1020 kg/m <sup>3</sup>       | 0.78               |
| Módulo de Young              |                    | Módulo de Young              |                    |
| 780 MPa                      |                    | 2.65 GPa                     |                    |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |                    | Módulo de Rigidez (Cortante) |                    |
| 550 MPa                      |                    | 0.98 GPa                     |                    |
| Relación de Poisson          |                    | Relación de Poisson          |                    |
| 0.38                         |                    | 0.35                         |                    |

**Tabla 6.** Propiedades de compuesto Lino-Epóxica

| FIBRA                        |                    | RESINA EPOXICA               |                    |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| Densidad                     | Volumen Fraccional | Densidad                     | Volumen Fraccional |
| 1500 kg/m <sup>3</sup>       | 0.39               | 1020 kg/m <sup>3</sup>       | 0.61               |
| Módulo de Young              |                    | Módulo de Young              |                    |
| 50 GPa                       |                    | 2.65 GPa                     |                    |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |                    | Módulo de Rigidez (Cortante) |                    |
| 500 MPa                      |                    | 0.98 GPa                     |                    |
| Relación de Poisson          |                    | Relación de Poisson          |                    |
| 0.4                          |                    | 0.35                         |                    |

**Tabla 7.** Propiedades de compuesto Cáñamo-Epóxica

| FIBRA                        |                    | RESINA EPOXICA               |                    |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| Densidad                     | Volumen Fraccional | Densidad                     | Volumen Fraccional |
| 1400 kg/m <sup>3</sup>       | 0.34               | 1020 kg/m <sup>3</sup>       | 0.66               |
| Módulo de Young              |                    | Módulo de Young              |                    |
| 414 MPa                      |                    | 2.65 GPa                     |                    |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |                    | Módulo de Rigidez (Cortante) |                    |
| 930 MPa                      |                    | 0.98 GPa                     |                    |
| Relación de Poisson          |                    | Relación de Poisson          |                    |
| 0.221                        |                    | 0.35                         |                    |

**Tabla 8.** Propiedades de compuesto Basalto-Epóxica

| FIBRA                           |                           | RESINA EPOXICA                  |                           |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Densidad                        | Volumen Fraccional<br>0.5 | Densidad                        | Volumen Fraccional<br>0.5 |
| 2,630 kg/m <sup>3</sup>         |                           | 1020 kg/m <sup>3</sup>          |                           |
| Módulo de Young                 |                           | Módulo de Young                 |                           |
| 89 GPa                          |                           | 2.65 GPa                        |                           |
| Módulo de Rigidez<br>(Cortante) |                           | Módulo de Rigidez<br>(Cortante) |                           |
| 21.7 GPa                        |                           | 0.98 GPa                        |                           |
| Relación de Poisson             |                           | Relación de Poisson             |                           |
| 0.26                            |                           | 0.35                            |                           |

Para la evaluación de propiedades mecánicas se consideraron las normas mencionadas, el número de muestras está definida por cada una de las normas mencionadas en el capítulo II, incluyendo las dimensiones de las muestras a fabricar.

Debido a que los materiales compuestos cuentan con diferentes propiedades en base a su plano de trabajo, los compuestos fueron evaluados en orientaciones de fibra 0/90 y +/- 45 grados, la velocidad de prueba fue de 2 mm/ min con un tiempo estimado de 10 minutos por cada muestra. Una vez que las muestras estuvieron listas, se respetaron las dimensiones que se muestran en la tabla 9 para cada tipo de prueba.

**Tabla 9.** Dimensiones de los especímenes para evaluación de propiedades mecánicas.

| Estándar ASTM | Espesor (in) | ancho (in) | alto (in) |
|---------------|--------------|------------|-----------|
| D3039         | 0.25         | 1          | 12        |
| D695-02       | 0.25         | 1          | 12        |
| D790-03       | 0.5          | 1          | 12        |
| D2344         | 0.25         | 0.5        | 12        |

Las muestras fueron probadas en una maquina universal que cuenta con una carga máxima de operación de 44, 483 N, lo cual garantiza la fractura de las muestras como se presenta en la figura 41.



**Figura 41.** Pruebas mecánicas en fibras de basalto con orientación 0/90

Una vez realizadas las pruebas mecánicas establecidas por cada norma, las tablas 10, 11, 12 y 13 muestran los resultados obtenidos de los diferentes tipos de compuestos de matriz polimérica a base de fibras naturales.

**Tabla 10.** Propiedades mecánicas de Yute-Epóxica

|                              |
|------------------------------|
| Densidad                     |
| 1,116.8 kg/m <sup>3</sup>    |
| Modulo de Young              |
| 2.23 GPa                     |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |
| 0.88 GPa                     |
| Relación de Poisson          |
| 0.356                        |

**Tabla 11.** Propiedades mecánicas de Lino-Epóxica

|                              |
|------------------------------|
| Densidad                     |
| 1207.2 kg/m <sup>3</sup>     |
| Modulo de Young              |
| 21.11 GPa                    |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |
| 0.792 GPa                    |
| Relación de Poisson          |
| 0.3695                       |

**Tabla 12.** Propiedades mecánicas de Yute-Epóxica

|                              |
|------------------------------|
| Densidad                     |
| 1,149.2 kg/m <sup>3</sup>    |
| Modulo de Young              |
| 1.89 GPa                     |
| Módulo de Rigidez (Cortante) |
| 0.963 GPa                    |
| Relación de Poisson          |
| 0.3061                       |

**Tabla 13.** Propiedades mecánicas de Yute-Epóxica

|                         |
|-------------------------|
| Densidad                |
| 1,825 kg/m <sup>3</sup> |
| Modulo de Young         |
| 45.82 GPa               |
| Shear's Modulus         |
| 11.34 GPa               |
| Relación de Poisson     |
| 0.305                   |

### 3.4 Identificación de la Aplicación

Una vez conocidas las propiedades de los nuevos materiales compuestos a base de fibra natural y matriz polimérica, se buscó una aplicación viable que lograra tener un impacto significativo en reducción de costos de fabricación y manufacturabilidad, para eso se optó por evaluar la sustitución del material convencional utilizado en álabes de aerogeneradores de baja capacidad (fibra de vidrio) y evaluar la viabilidad de los nuevos compuestos a base de fibra vegetal y mineral.

### 3.5 Evaluación del Perfil Óptimo

Para lograr definir el rendimiento del prototipo a fabricar, se evaluaron diferentes perfiles NACA, para determinar cuál de ellos permite un mejor rendimiento a bajas velocidades de viento, se obtuvieron las curvas de los coeficientes de arrastre y sustentación de cada uno de ellos y la potencia neta.

Los perfiles aerodinámicos seleccionados, serán evaluados en un rango de -15 a 20 grados para el ángulo de ataque. Una vez que se conozcan los coeficientes de arrastre y sustentación, será posible determinar las fuerzas de arrastre y sustentación en un perfil aerodinámico mediante las

funciones, donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre (ecuaciones 4 y 5). La familia de curvas que será obtenida de la evaluación del IPO, ayudará a determinar el tamaño del álabe.

Por lo tanto, la selección adecuada de un perfil aerodinámico es un paso importante en la metodología de este proyecto, del cual se consideraron 5 secciones estándar, los cuales se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14.** Selección de perfiles NACA basados en GR ( $C_L/C_D$ ) para evaluación aerodinámica.

| NACA Shape | GR  |
|------------|-----|
| 64212      | 90  |
| 22112      | 90  |
| 24112      | 105 |
| 25112      | 110 |
| 4412       | 120 |

### 3.6 Diseño del álabe

Para el diseño del prototipo se utilizó un software de modelado en 3D en base a los resultados obtenidos en la evaluación aerodinámica, tanto en longitud, espesor, ángulo de ataque y perfil.

Para obtener el diseño óptimo del álabe del aerogenerador, el trabajo de varios autores<sup>80, 81, 82</sup> se utilizó como punto de partida, lo que proporciona una visión general de los modelos, técnicas, herramientas y enfoques experimentales comúnmente utilizados para aumentar el rendimiento de este tipo de sistemas. Todas las geometrías de los álabes del aerogenerador fueron creadas por superficies NURBS utilizando los valores discretos (x, y, z) calculados por la metodología de Betz. Para lograr transiciones de superficie suaves, la transición de pendiente entre las superficies de la punta del álabe a la base se mantuvo continua. Para obtener los modelos CAD, la implementación se realizó en un procesador matemático y luego se tradujo mediante macros a un sistema CAD estándar. El esquema de la geometría final de la turbina eólica utilizada para la simulación FEA se muestra en la figura 42. El álabe debe girarse alrededor del eje elástico ya que, de acuerdo a los cálculos de la metodología de Betz, el ángulo  $\beta$  debe tener variación. La posición del centro elástico y la forma del álabe puede cambiar modificando la posición de los repuestos. En la punta de la turbina, se introducen pérdidas de fuerza de elevación en el álabe, similares a

las encontradas en los vórtices de la punta del viento en los álabes de la turbina. El efecto anterior se puede reducir agregando una forma triangular al final del álabe. La forma de la punta seleccionada es un tipo recto debido a su facilidad de manufactura. La figura 38B muestra la corrección de la punta utilizada para el perfil aerodinámico. Los parámetros del perfil son de una longitud de 4.0438 m que comienza en forma cilíndrica en la base y luego se hace la transición al perfil NACA, con una relación de velocidad de punta máxima de  $\lambda = 7$ .

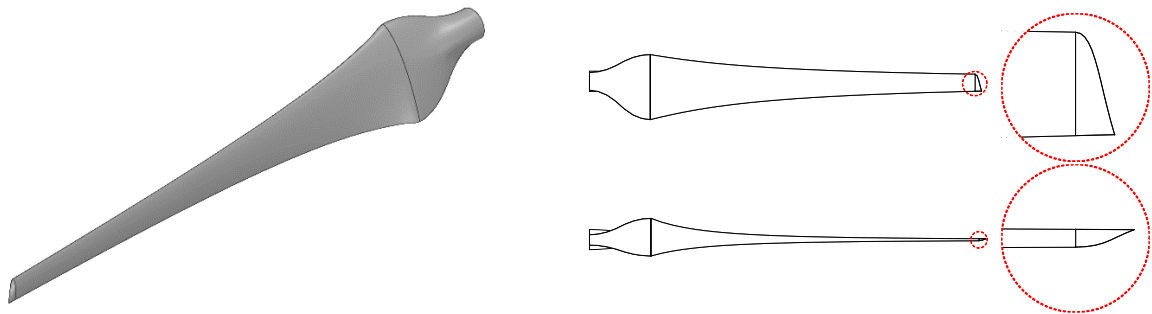


Figure 42. Esquema del álabe del aerogenerador y arreglo de punta.

### 3.7 Simulación Aerodinámica

Una vez diseñado el perfil se procedió a evaluar el comportamiento del álabe a diferentes cargas de viento para determinar sus contornos de presión y las zonas críticas en un rango de 12 a 40 m/s. Para la simulación de CFD, se utilizó una malla tetraédrica no estructurada; el tamaño de malla promediado de todas las geometrías de turbina discretizadas fue de 3,077,000 celdas y una función de tamaño de malla se unió a las paredes del álabe para capturar los fenómenos de la capa límite. La figura 43, muestra el detalle de la rejilla cerca de la pared del álabe.

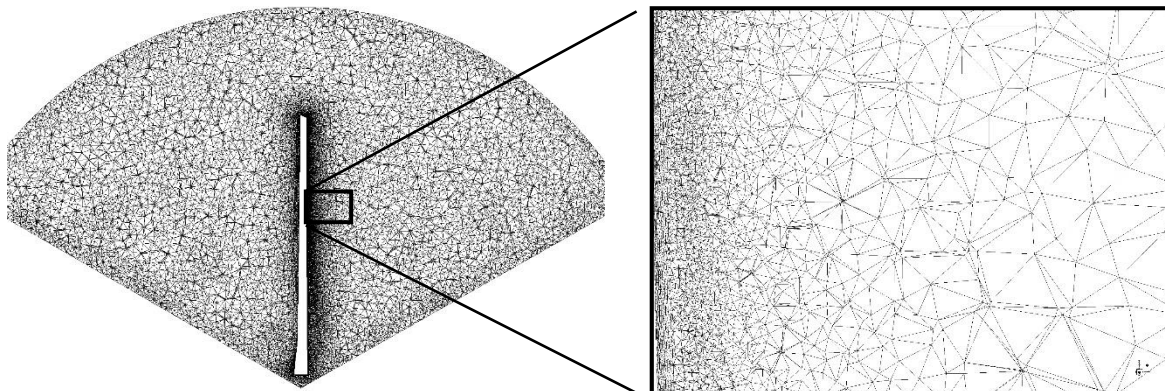
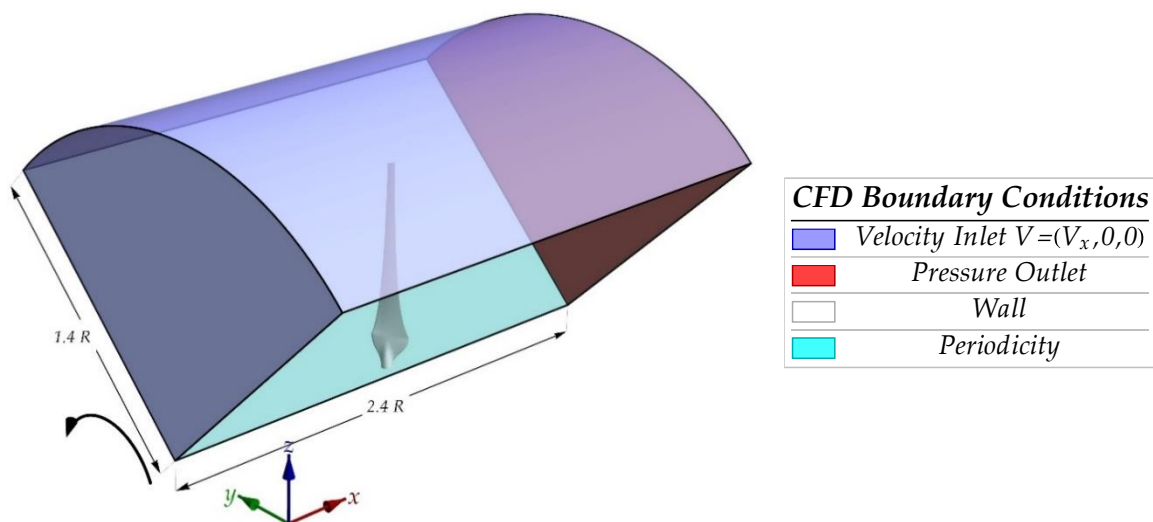


Figura 43. Discretización espacial de la turbina eólica (Malla)

La longitud del dominio computacional se extendió a  $1.2 R$  hacia las direcciones delantera y trasera. Las dimensiones del dominio se muestran en la figura 44. El estudio de independencia de la malla muestra que la convergencia es buena y que el coeficiente de potencia y la presión de carga del viento alcanzan un comportamiento estable cuando los valores de la cuadrícula son mayores a 2,000.000 y la primera capa de altura de la cuadrícula es  $y^+ < 0.45$  mm;  $y^+ < 170$  mm.

Toda la discretización de la turbina contiene un numero de rejillas mayor a 2,500,000 por lo que el estudio de convergencia de fusión tiene la función objetivo en el coeficiente de potencia, que está directamente relacionado con el par y la carga de viento. El estudio de convergencia de la malla se centra en el tamaño de la malla promedio y la malla de la capa limite.

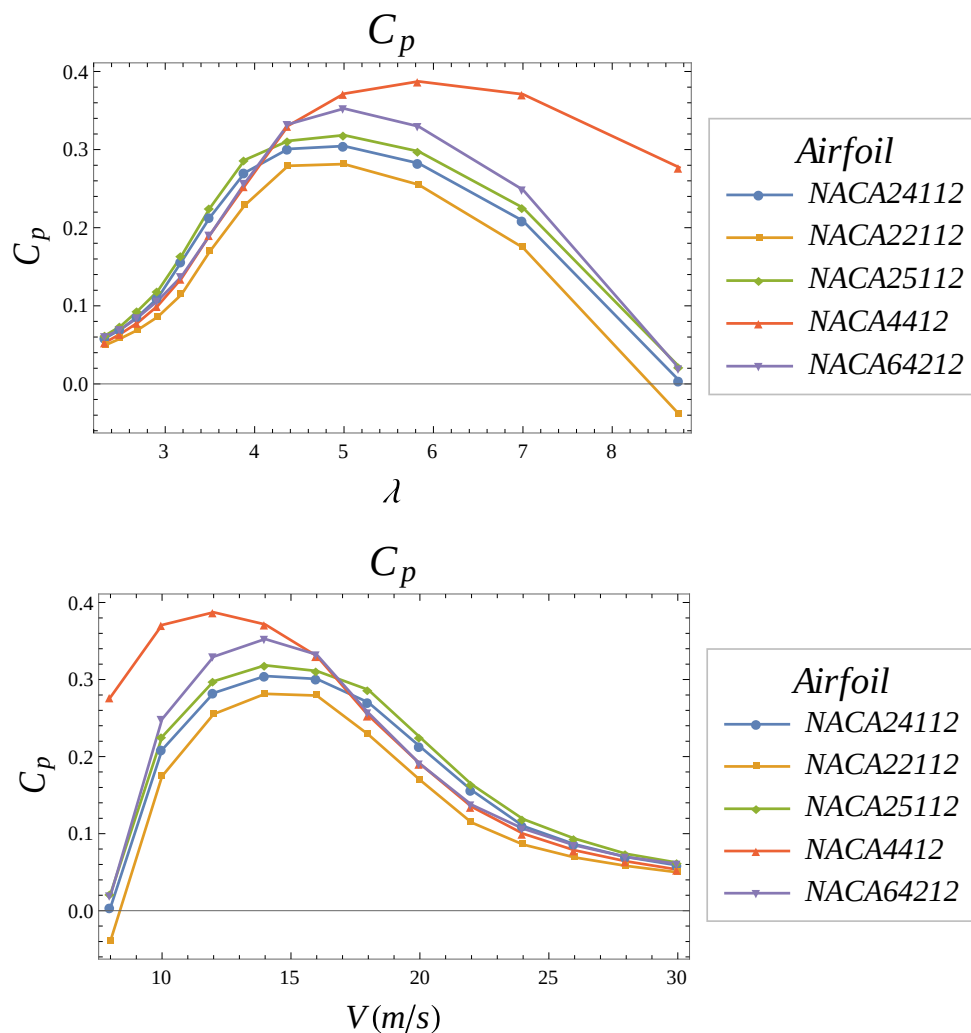


**Figura 44.** Volumen de fluido para el análisis aerodinámico y condiciones de frontera utilizadas en la simulación de CFD.

Para lograr considerables reducciones de tiempo en las simulaciones, se asume una condición de frontera periódica. La velocidad de flujo libre en la dirección X se aplica sobre las superficies azules. La condición de la atmosfera se establece para la superficie de salida. Las superficies de los álabes se modelaron como límites de pared con la condición de no deslizamiento. Un marco de referencia rotacional considera una velocidad angular de 14 rad/s. La solución de campo de flujo se basa en un modelo de RANS incompresible, se seleccionó el modelo de turbulencia SST  $\kappa - \omega$  para resolver el flujo constante y se usó un software especializado para implementar el

modelo (Fluent 17.2). Todas las turbinas eólicas se simularon en un rango de velocidad de viento de flujo libre de 2 a 30 m/s utilizando pasos de 2 m/s (y 40 m/s para obtener la distribución de presión de carga de viento en condición crítica). Los 80 resultados de las simulaciones se muestran en las figuras 45 – 48.

Desde este punto en adelante, es posible calcular el coeficiente de potencia y empuje. Los valores no dimensionales que cuantifican la eficiencia de la turbina eólica. Llamados coeficientes de potencia ( $C_p$ ) y empuje ( $C_{Tr}$ ), son la relación de la potencia y el empuje extraídos del viento a la potencia total en el viento que cruza el área de la turbina. Estos valores son esenciales para determinar la potencia de salida final de la turbina eólica y el empuje al que será expuesto el álabes. La figura 45, corresponde a los resultados de CFD del coeficiente de potencia a diferentes relaciones de velocidad de punta y velocidades de viento.



**Figura 45.** Evaluación del coeficiente de potencia vs. La velocidad de punta y la velocidad de viento.



Teniendo en cuenta que el límite de Betz, determina un valor teórico de coeficiente máximo de  $(16/27)$ , entre el rango de relación de velocidad de punta es de cero a cuatro, todos los perfiles expresan un comportamiento similar, donde el coeficiente de potencia aumenta a medida que aumenta la relación de velocidad de punta. En este rango, el coeficiente de potencia tiene un valor cercano a 0.3; para los perfiles aerodinámicos 4412 y 64212, encontramos que el mejor rendimiento es donde  $\lambda$  tiene un valor cercano a 6. Sin embargo, el rendimiento del perfil 4412 es superior al 64212 (en un 20%). Comprando los perfiles 24112 y 25112, sus curvas de rendimiento son similares; por lo tanto, su punto máximo es  $\lambda = 5$ , donde el valor del coeficiente de potencia es 0.3. El perfil 22112 tuvo el menor desempeño, con un coeficiente cercano a 0.26 y un 35% menos que el rendimiento máximo del perfil aerodinámico.

La figura 45, también muestra los rangos de velocidad óptimos entre 10 y 15 m/s para un rendimiento óptimo, después de pasar este punto, el coeficiente de potencia comienza a disminuir drásticamente para todos los perfiles aerodinámicos. Los perfiles con mejor comportamiento son los NACA 4412 Y 64212; su rendimiento óptimo se alcanzó cuando la velocidad de viento estaba entre los 12 y 14 m/s respectivamente. Para los perfiles restantes hay un punto óptimo de operación cuando la velocidad de viento alcanza los 15 m/s. Además, observamos que, si bien todos los perfiles están sujetos a altas velocidades entre rangos de 23 a 30 m/s, el coeficiente de potencia es prácticamente el mismo en torno a 0.1, con pérdidas del 82% en comparación con el coeficiente ideal de la teoría de Betz.

La figura 46, muestra los resultados de empuje para todas las turbinas, aunque los perfiles tienen un rendimiento similar al coeficiente de empuje, los puntos máximos de operación difieren del coeficiente de potencia. La figura 46A, muestra que el punto máximo de operación viene dado por el perfil aerodinámico 4412 con un valor de 0.18 cuando la relación de velocidad de punta tiene un valor de  $\lambda = 7$ , seguido por el perfil 64212 con un valor máximo de 0.15 cuando  $\lambda = 6$ . En los perfiles restantes, el rendimiento óptimo se ubica en una relación de velocidad de punta de  $\lambda = 5$ , con los valores de  $C_{Tr}$  cercanos a 0.13, una vez que la relación de velocidad de punta pasa el punto óptimo de operación, el rendimiento disminuye, alcanzando un punto donde la diferencia entre el perfil con mejor rendimiento y el resto se duplica.

La figura 46B muestra que el punto óptimo se encontró cuando la velocidad del viento alcanza 10 m/s para los perfiles restantes, el óptimo está cerca de 12 m/s. Además, a velocidades de viento más altas, entre 20 y 30 m/s, el coeficiente de empuje se mantiene estable para las diferentes superficies aerodinámicas.

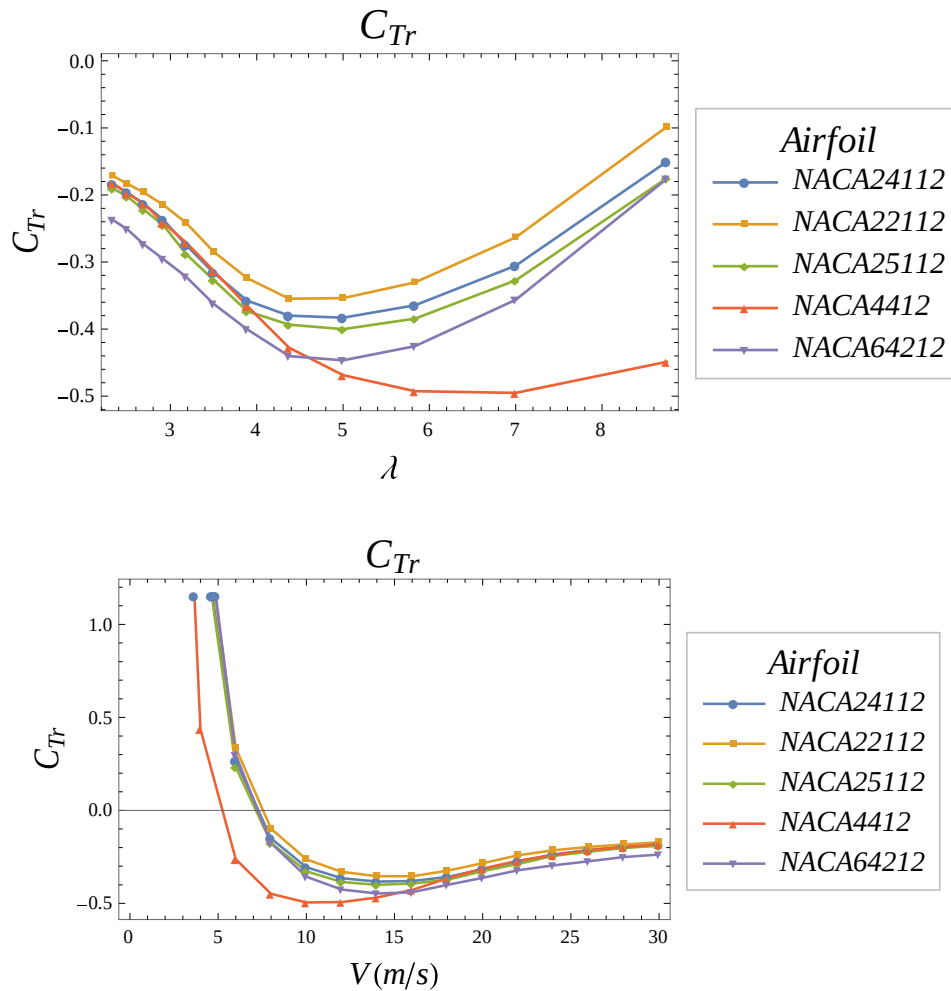
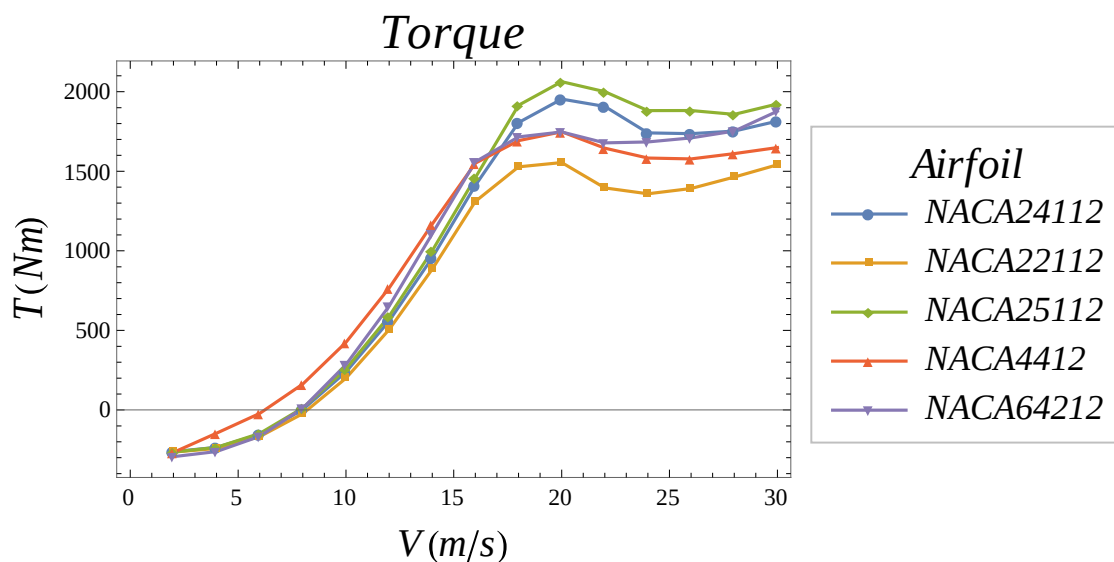


Figura 46. Curvas de  $C_{Tr}$  vs ( $\lambda$ ) y  $V$ .

La potencia de salida de la turbina eólica se calcula mediante la ecuación (15) donde  $P$  es la potencia,  $T$  es el torque y  $\omega$  es la velocidad angular de los álabes de la turbina eólica.

$$P = T\omega \quad (15)$$

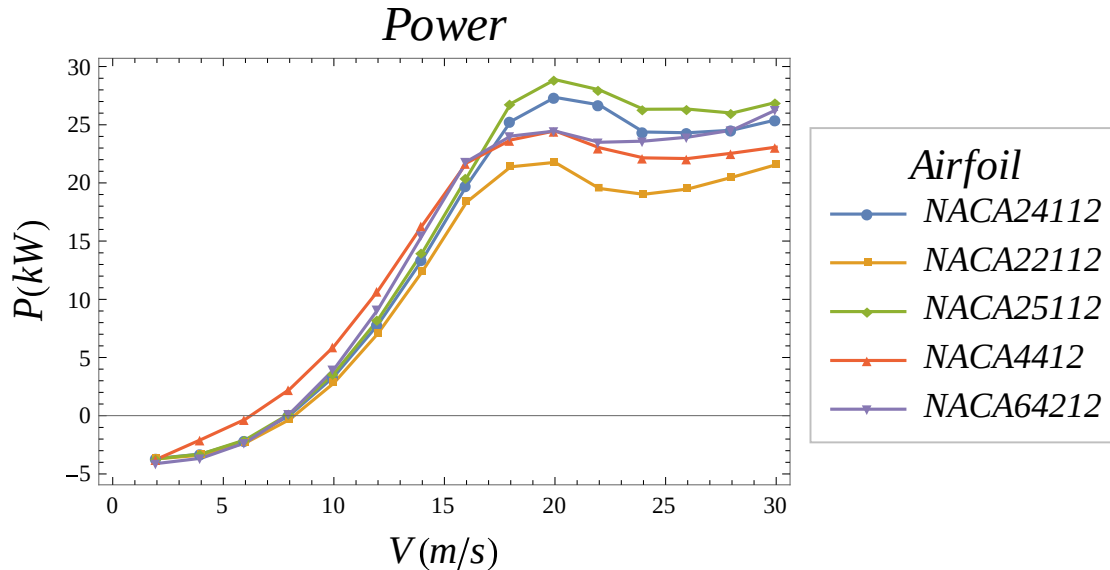
Por lo tanto, fue necesario evaluar el par del álabe a diferentes velocidades de viento. La figura 47, muestra la evaluación del torque desde un rango de 0 a 30 m/s. En este gráfico, a medida que aumenta la velocidad del viento, el par aumenta en todos los perfiles, dentro del rango de 2 a 19 m/s, los perfiles están sujetos a cambios repentinos a medida que aumenta la velocidad. Después de este punto, el torque en todos los perfiles se mantuvo relativamente constante, el perfil aerodinámico con mayor torque fue el NACA 4412, obteniendo un valor de 2600 N-m a una velocidad de viento de 25 m/s, el rendimiento máximo del perfil 25112 es cuando la velocidad de viento alcanza los 26 m/s, pero permanece un 7% por debajo del valor de par máximo. El resultado más bajo lo dio el perfil 22112 con un par de 1400 N-m (30% por debajo del valor máximo). Como resultado el perfil con mejor rendimiento fue el NACA 4412 (los valores de torque más altos se obtuvieron usando este perfil). Este hallazgo apoya las curvas anteriores de  $C_p$  para el rango de operación de la turbina.



**Figura 47.** Evaluación de torque para perfiles NACA a diferentes velocidades de viento.

También se observa que en el rango de velocidades de 10 a 20, el resultado de producción de energía es similar para todos los perfiles aerodinámicos y este rango está entre los 10 y 20 kW. Sin embargo, cuando se pasa este punto de equilibrio, la producción de energía se desestabiliza después de los 20 m/s, mostrando una variación marcada en todos los perfiles (figura 48). Como resultado final, el perfil que presenta el rendimiento óptimo es el NACA 4412, con una potencia de salida máxima de 24 kW por cada álabe a una velocidad de viento de 20 m/s.

Para esta sección en función a los resultados obtenidos en los gráficos, el perfil NACA 4412 tuvo mejor desempeño, lo que va acorde a los datos de coeficiente de par de potencia, así como carga de viento correspondiente.



**Figura 48.** Evaluación de potencia para perfiles NACA a diferentes velocidades de viento.

### 3.8 Simulación Estructural

Al conocer los contornos de presión del álabes con mejor rendimiento, estos resultados fueron importados a una simulación estructural con la finalidad de determinar su esfuerzo máximo y deformación al cambiar el material del álabes, importando los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para dar de alta los módulos de elasticidad, relaciones de Poisson y módulos de cortante de los materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibra natural. Para investigar la viabilidad de los diferentes materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibra natural en álabes de aerogeneradores de baja capacidad, se comparó el rendimiento de los nuevos materiales con el material convencional (fibra de vidrio) en condiciones normales de operación y críticas, las cuales fueron establecidas en la sección 3.7.

En la simulación estructural, el álabes se considera hueco, sin refuerzos de núcleo o costilla. Las cargas impuestas fueron la carga de viento dada por la distribución de presión en la superficie del álabes y la carga centrífuga dada por la velocidad angular de  $-14 \text{ rad/s}$  alrededor del eje X. La

distribución de presión se obtuvo mediante la simulación de CFD. Teniendo en cuenta la peor condición de operación de  $V = 40 \text{ m/s}$  se consideró un soporte fijo en el borde circular inferior, que simula el empotramiento del eje a la raíz. La figura 49, muestra las condiciones de contorno.

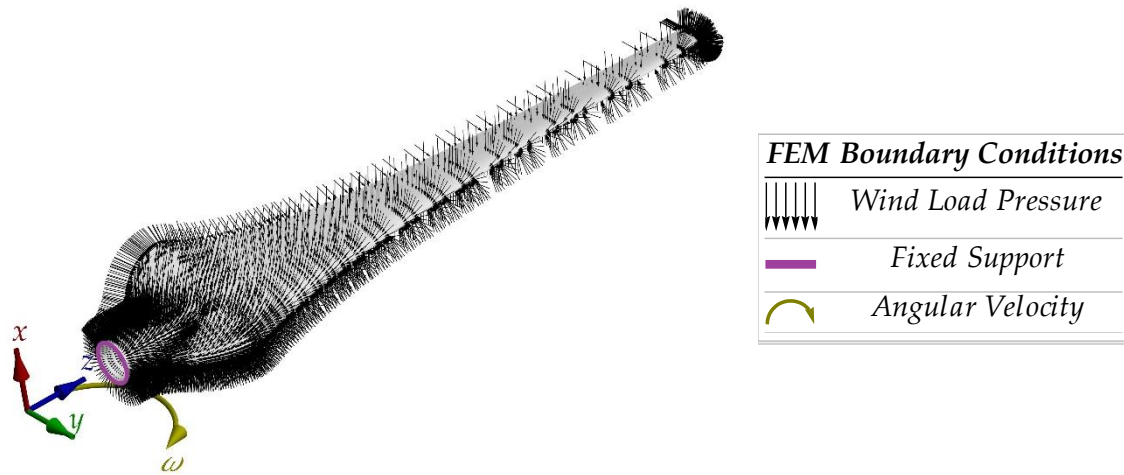


Figura 49. Condiciones de frontera FEM

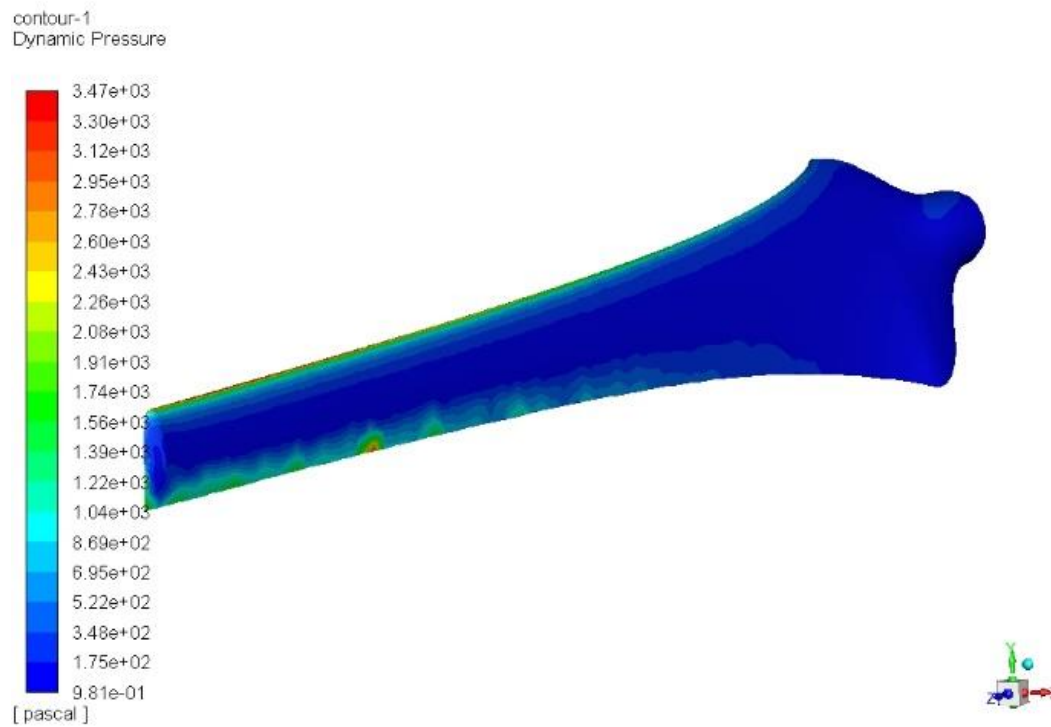
Es importante mencionar que para la evaluación estructural se consideró que la orientación de las fibras como bidireccional para la manufactura del álabes se considera que las fibras se encuentran en la misma dirección con una orientación de 0/90 utilizando 11 capas, logrando un espesor de 0.25 in. Una vez conocidos los esfuerzos y deformaciones del álabes de aerogenerador de baja capacidad sometidos a cargas normales y críticas de operación, con diferentes materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibra natural se compararon los resultados obtenidos para determinar el material óptimo en base a los criterios de diseño establecidos.

### 3.9 Análisis de Resultados

Por la simulación de CFD, se encontró que en condiciones normales de operación (velocidad de viento promedio de 12 m/s; velocidad máxima de viento de 40 m/s) la presión máxima fue de  $3.43 \times 10^3 \text{ Pa}$  y la presión mínima de 9.81 Pa. La presión máxima se encuentra en los bordes del álabes, específicamente en la zona inferior.

Para el punto de operación crítico de 40 m/s, la presión máxima se ubica al o largo del álabes con un valor de  $1.24 \times 10^4 \text{ Pa}$ , y la presión mínima se ubica en el cubo de la turbina con un valor de 7.47 Pa.

Dado que la presión dinámica depende de la velocidad al cuadrado, es de esperar que a medida que la velocidad aumenta, la presión dinámica a la que está expuesta el álabe también lo hace, las figuras 50 y 51 muestran los resultados obtenidos y los contornos de presión, los cuales fueron posteriormente importados al análisis estructural para realizar la validación de los diferentes materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibras naturales.



**Figura 50.** Contorno de presión para una velocidad de viento de 12 m/s

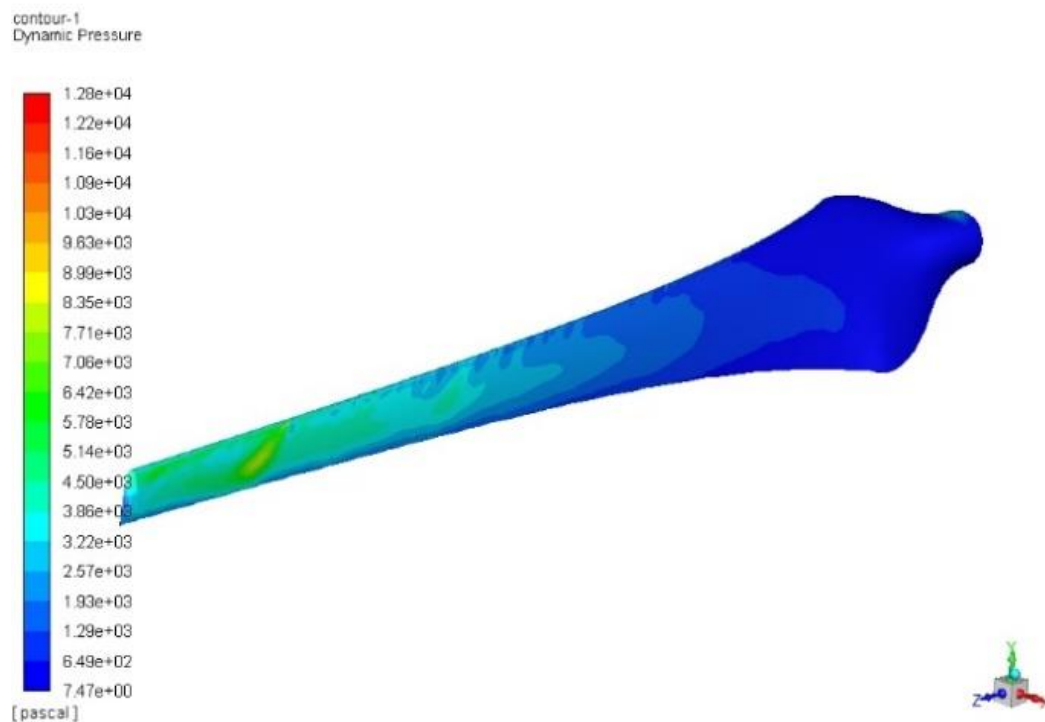


Figura 51. Contorno de presión para una velocidad de viento de 40 m/s.

Para la evaluación estructural, se obtuvo la deformación y el esfuerzo de Von-Mises. El álabe se consideró como un material ortotrópico y espesor constante. Para esta evaluación, el prototipo se diseñó bajo elemento Shell, y el tipo de solucionador fue estático lineal – estructural. La tabla 15 muestra los resultados obtenidos para el material convencional (fibra de vidrio).

Tabla 15. Desempeño de álabe 4412 con fibra de vidrio (E-glass)

| Velocidad de Viento | Resultados           | E-glass/epoxy         |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 12 m/s              | Esfuerzo Equivalente | $3.78 \times 10^6$ Pa |
|                     | Deformación Total    | 0.5209 m              |
| 40 m/s              | Equivalent Stress    | $4.72 \times 10^7$ Pa |
|                     | Esfuerzo Equivalente | 0.8035 m              |

Para probar el comportamiento estructural del álabe en diferentes materiales, se debe crear un nuevo material en el software utilizando las propiedades determinadas de manera experimental a través de la normativa ASTM, tales son densidad, Módulo de Young, Modulo de Cortante y

relación de Poisson. Una vez creado el material el álabe es mallado, teniendo un dominio computación que se discretizó en 44,592 nodos.

Este análisis se hizo utilizando elementos Shell (44921); las condiciones de frontera fue un soporte fijo en la sección circular del álabe cercado al rotor que simula en empotramiento. Las figuras 48 a la 64 muestran las simulaciones y los resultados obtenidos para cada condición de material compuesto de matriz polimérica a base de fibra natural.

Las figuras 52 y 53 muestran los resultados obtenidos de la fibra de lino a condiciones normales de operación obteniendo un esfuerzo máximo de  $5.32 \times 10^6$  Pa y una deformación total de 0.3726 metros.

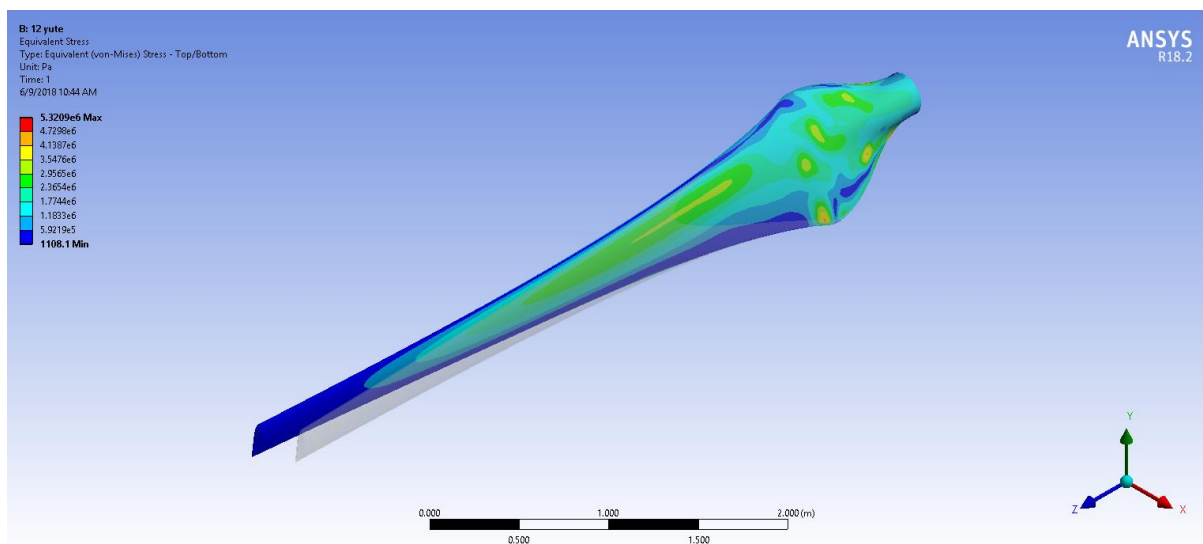


Figura 52. Esfuerzo Von-Mises fibra de Lino a 12 m/s



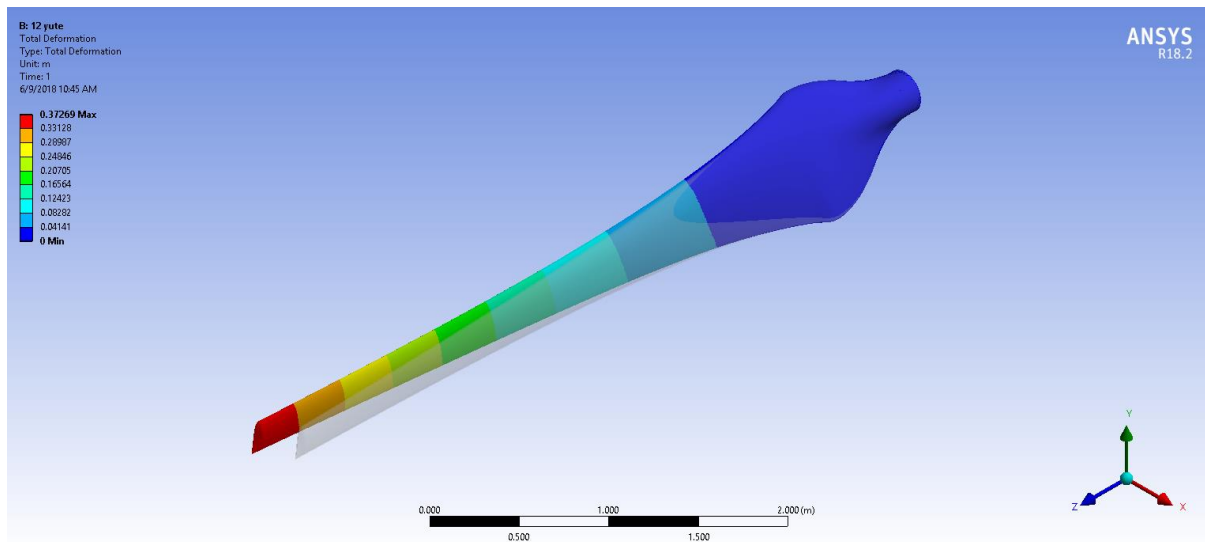


Figura 53. Deformación total de fibra de Lino a 12 m/s

Para la simulación de las condiciones críticas de operación la fibra de lino mostro un esfuerzo máximo de  $7.21 \times 10^7$  Pa, y una deformación de 5.49 metros. Las figuras 54 y 55 muestran las zonas críticas donde se identifican las concentraciones de esfuerzos siendo la zona cercana al empotramiento donde se localiza el esfuerzo máximo, y la punta del álabe donde se localiza la deformación máxima.

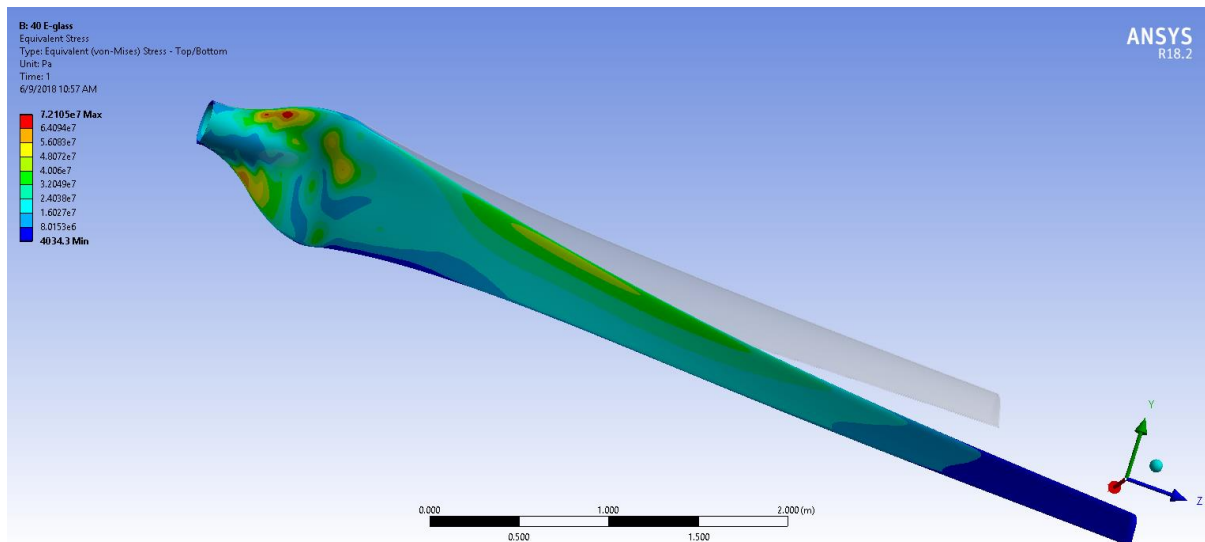


Figura 54. Esfuerzo Von-Mises de fibra de Lino a 40 m/s

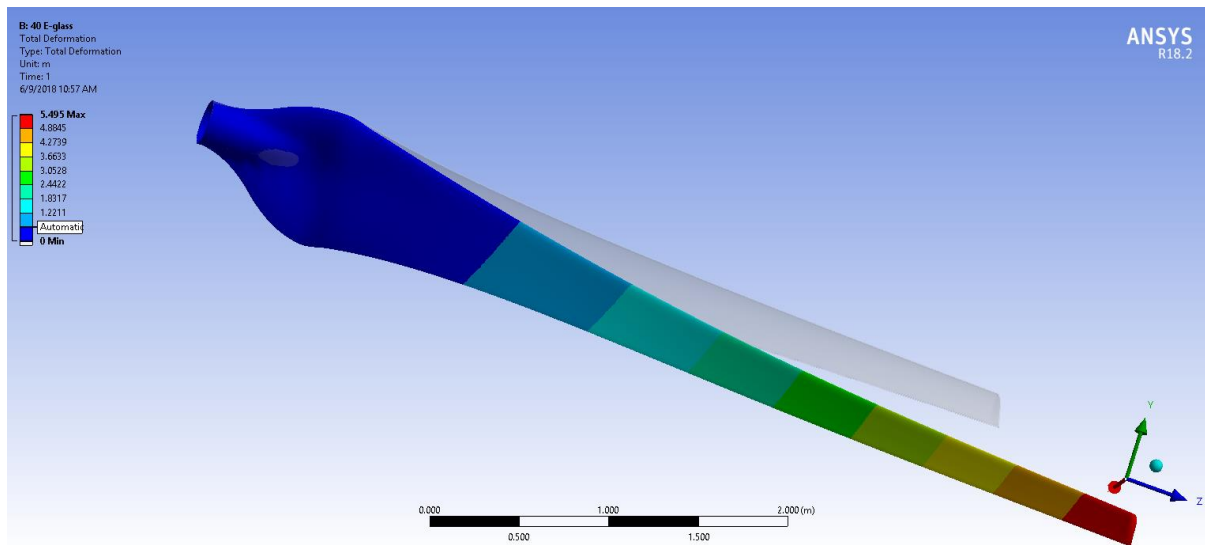


Figura 55. Deformación total de fibra de Lino a 40 m/s

En el caso de la fibra de Yute, las figuras 56 y 57 muestran los resultados obtenidos para la condición normal de operación, donde el esfuerzo máximo es similar al que se presenta en la fibra de lino, teniendo un valor de  $5.28 \times 10^6$  Pa y una deformación total de 0.3671 metros, en este caso la deformación total se sigue presentando en la misma zona.

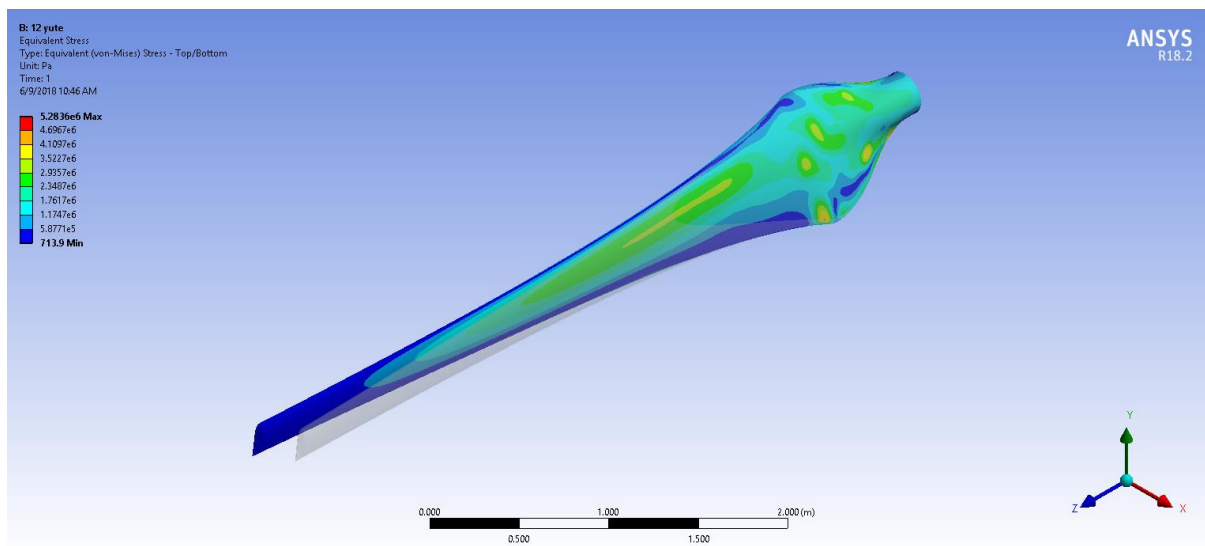


Figura 56. Esfuerzo Von-Mises de fibra de Yute a 12 m/s

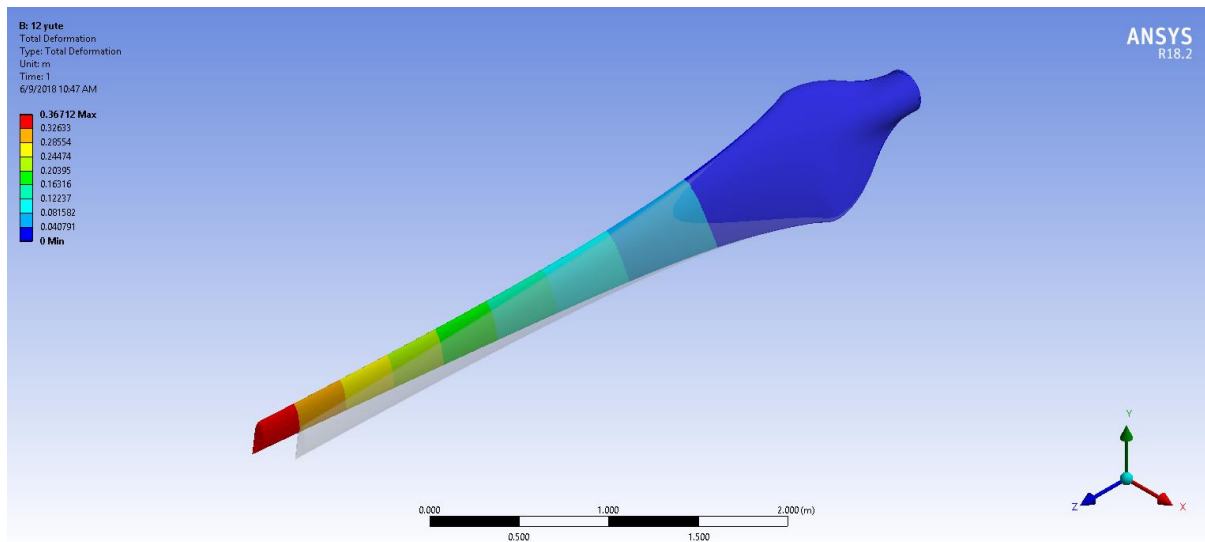


Figura 57. Deformación Total de fibra de Yute a 12 m/s

En el caso de la fibra de Yute a condiciones críticas de operación, el material bajo un espesor constante no soporta las cargas aerodinámicas y estructurales que se generan en el perfil, debido a que la deformación total y esfuerzo que presenta es excesivo teniendo como resultados un  $7.15 \times 10^7$  Pa y una deformación total de 5.4097 metros. Las figuras 58 y 59 muestran los resultados obtenidos en la simulación FEA.

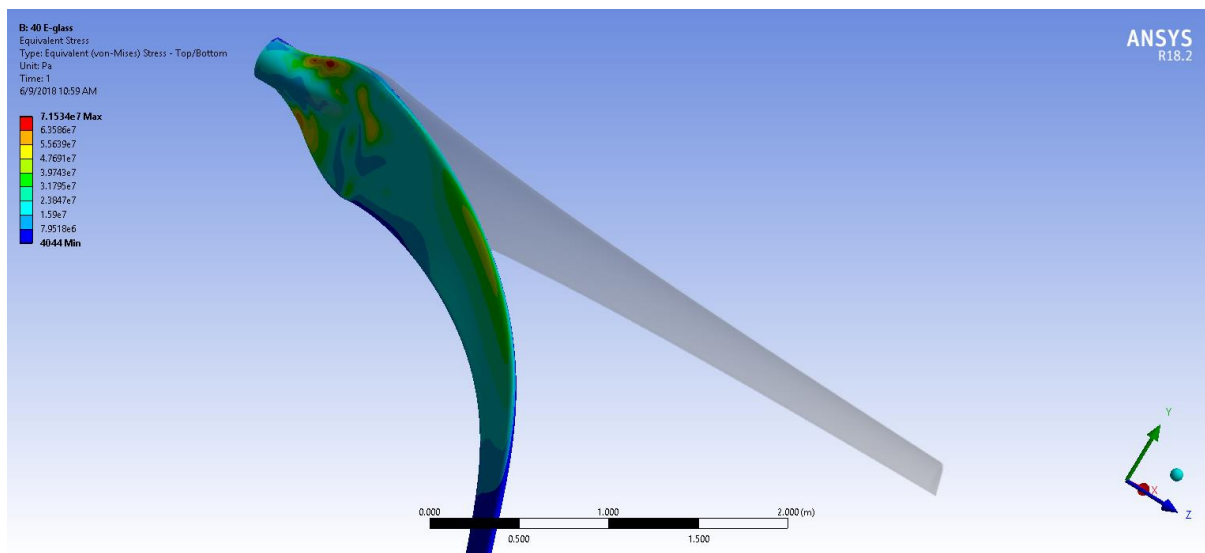


Figura 58. Esfuerzo Von- Mises de fibra de Yute a 40 m/s

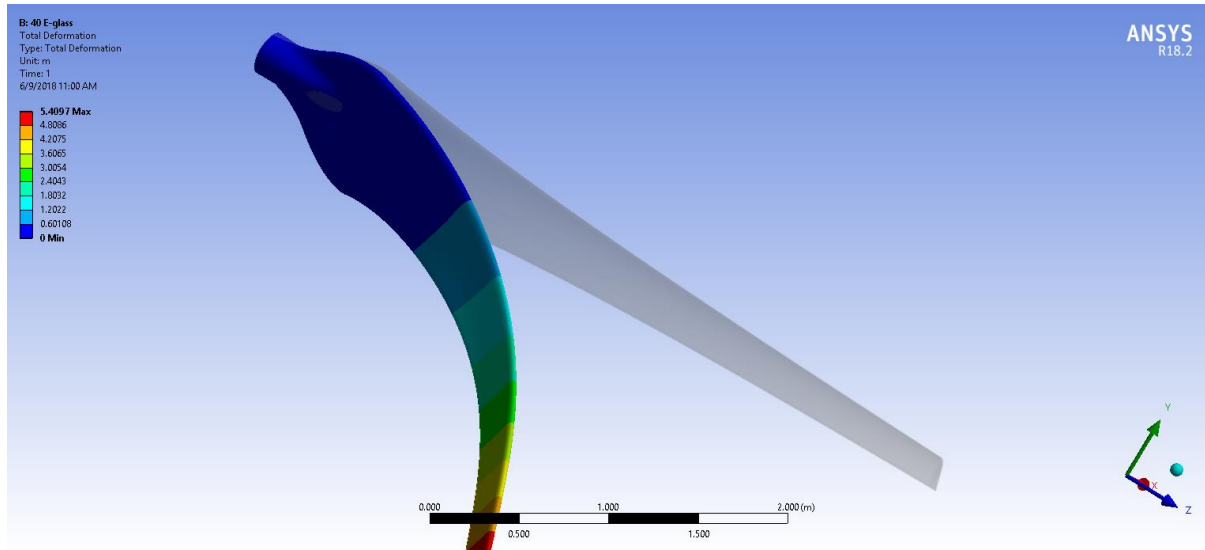


Figura 59. Deformación total de fibra de Yute a 40 m/s

En el caso de la fibra de cáñamo, a condiciones normales de operación fue la que presento el menor esfuerzo, dentro de la categoría de materiales compuestos de matriz polimérica a base de fibra natural-vegetal con un valor total de  $5.18 \times 10^6$  Pa, mostrando una deformación total de 0.3418 metros, siendo esta deformación un 8% menor al resto de las fibras naturales de origen vegetal que se evaluaron en el álabe de aerogenerador de baja capacidad. Las figuras 60 y 61 muestran los resultados obtenidos de esta simulación.

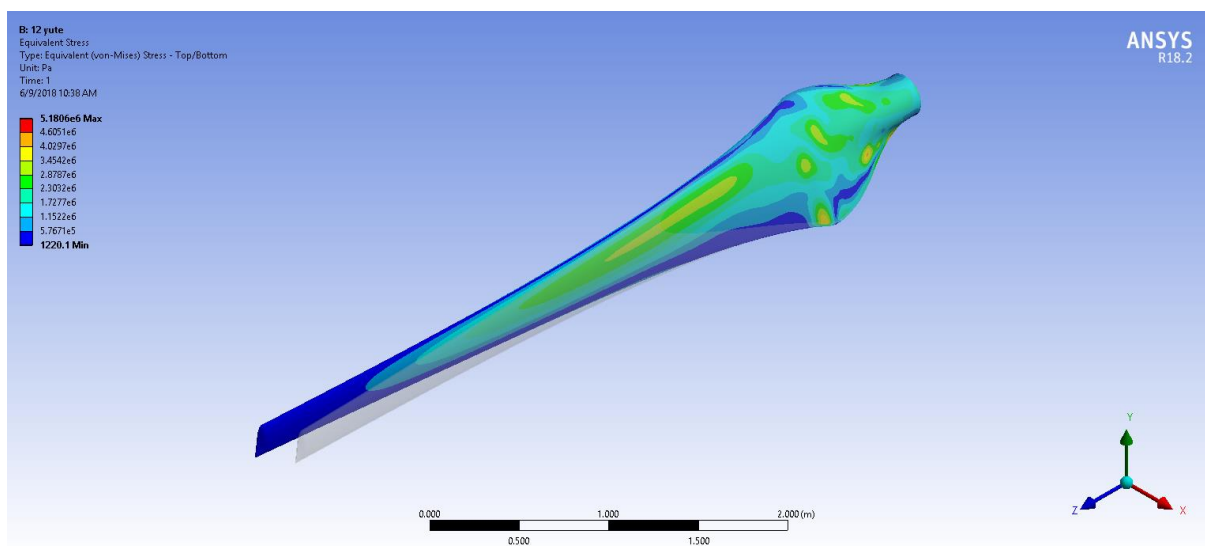


Figura 60. Esfuerzo Von-Mises para fibra de cáñamo a 12 m/s.

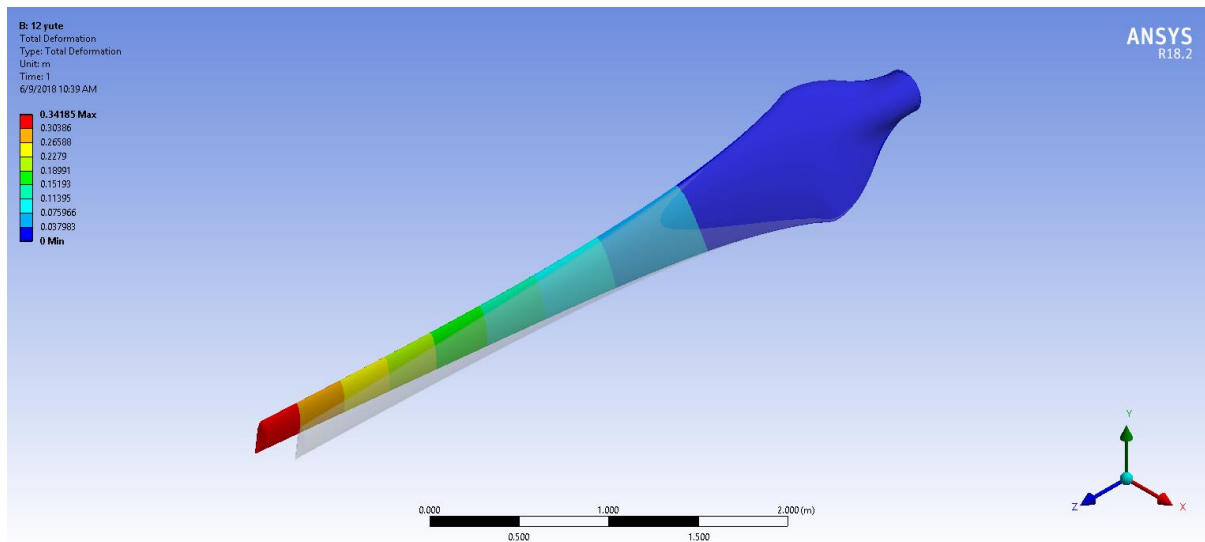


Figura 61. Deformación Total para fibra de cáñamo a 12 m/s.

En el caso de las condiciones críticas de operación, la fibra de cáñamo presento el mismo comportamiento que el resto de los materiales compuestos a base de fibra vegetal, lo que dio como resultado un esfuerzo de  $6.94 \times 10^7$  Pa y una deformación total de 5.0956 metros. Las figuras 62 y 63 muestran el comportamiento estructural del material al ser sometido a la velocidad de viento de 40 m/s.

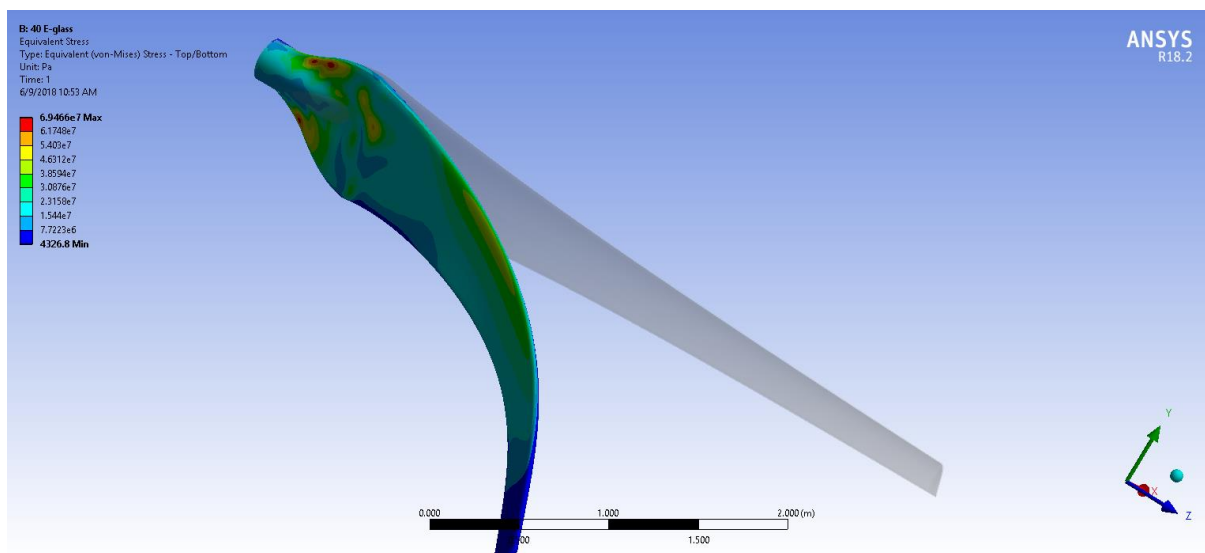
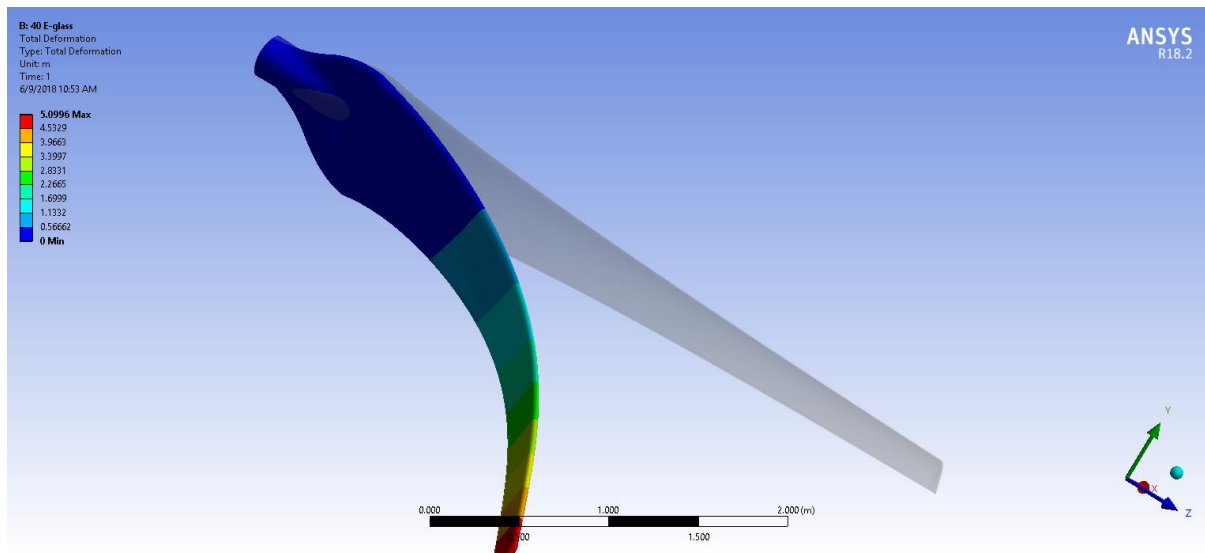
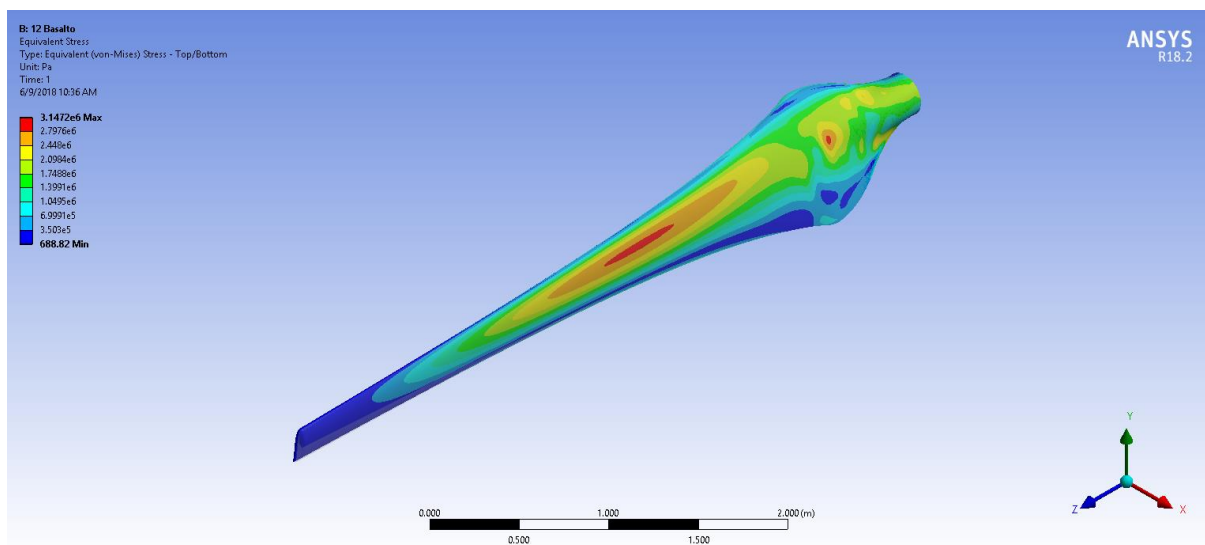


Figura 62. Esfuerzo Von-Mises para fibra de cáñamo a 40 m/s.



**Figura 63.** Deformación total para fibra de cáñamo a 40 m/s.

En el caso del material compuesto basado en fibra mineral de basalto, se encontró en la condición normal de operación un esfuerzo equivalente a  $3.14 \times 10^6$  Pa y una deformación total de 0.0161 metros. La comparación de este resultado con el compuesto de fibra de vidrio muestra una reducción del 16% en el esfuerzo Von-Mises y de un 96% en la deformación total. Las figuras 64 y 65 muestran los resultados obtenidos de la simulación.



**Figura 64.** Esfuerzo Von-Mises para la fibra de Basalto a 12 m/s.

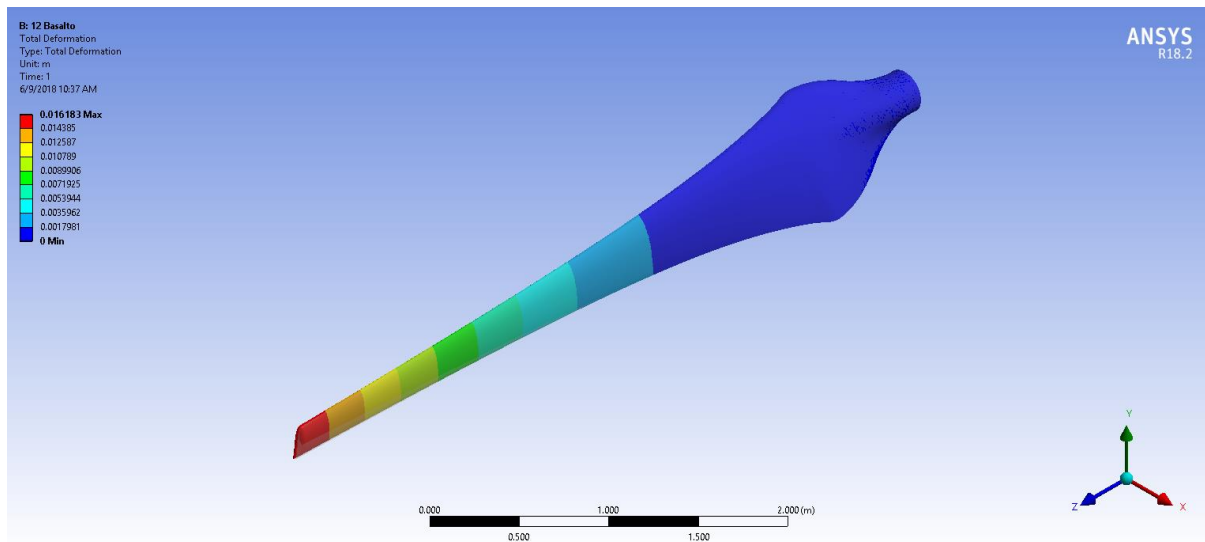


Figura 65. Deformación Total para la fibra de Basalto a 12 m/s.

Para la condición crítica de operación, la fibra de basalto obtuvo un esfuerzo de  $4.55 \times 10^7$  Pa, logrando una reducción en el esfuerzo comparado con la fibra de vidrio de un 4%, en el caso de la deformación total, se obtuvo un valor de 0.2555 metros, lográndose una reducción de deformación del 68% comparado con el material convencional, lo que permite considerar a la fibra de basalto como una opción viable para la sustitución del material convencional en la fabricación de álabes de aerogeneradores de baja capacidad. Las figuras 66 y 67 muestran los resultados obtenidos.

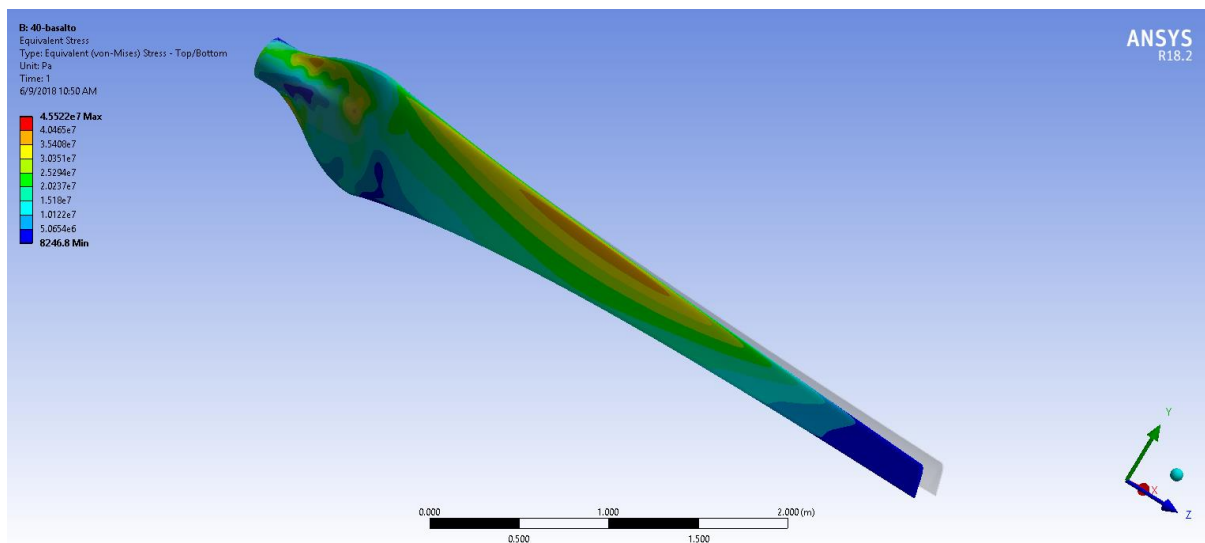
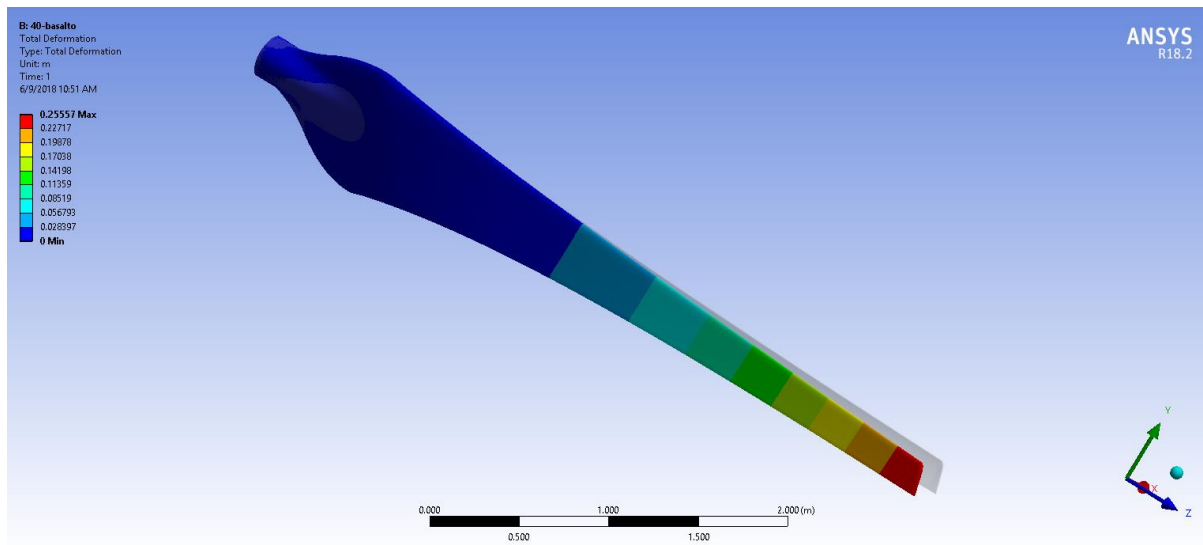


Figura 66. Esfuerzo Von-Mises para la fibra de Basalto a 40 m/s.



**Figura 67.** Deformación Total para la fibra de Basalto a 40 m/s.



## Capítulo IV

### Conclusiones

- En base a los resultados obtenidos en la evaluación de fibras naturales como sustituto a los materiales convencionales, se logró determinar que las combinaciones de fibra/matriz analizadas, pueden sustituir el uso de la fibra de vidrio bajo condiciones normales de operación, sin embargo, al estar expuesto a condiciones críticas como velocidades de 40 m/s solamente el compuesto a base de fibra de basalto y resina epóxica, es capaz de soportar las cargas generadas en la estructura del álabe.
- Debido al proceso de fabricación utilizado, fue posible identificar que la fibra de basalto son fibras de alta resistencia y alto modulo, fáciles de manejar y no necesitan equipo de procesamiento especializado, se pueden reciclar y son compatibles con muchas resinas poliméricas, en el caso de las fibras vegetales el procesamiento fue más complicado debido a la porosidad de las fibras lo que generó defectos superficiales con los procesos de fabricación comúnmente utilizados para la fabricación de álabes de aerogeneradores.
- El análisis aerodinámico de CFD permitió la selección óptima del álabe del aerogenerador y obtener la distribución de presión, la cual fue necesaria para predecir el comportamiento estructural de una turbina eólica de baja capacidad a condiciones reales en Baja California México, logrando identificar que el perfil aerodinámico con mejor rendimiento para producción de potencia fue el NACA 4412, logrando alcanzar hasta 35 kW y una potencia mínima de salida de 2 kW.
- Los resultados mostrados indican que se pueden utilizar fibras naturales para los álabes de aerogeneradores de baja capacidad, siendo las fibras naturales minerales las que mejor desempeño estructural muestran en condiciones críticas y normales de operación.
- En los resultados de deformación se puede observar que el fenómeno de deformación concuerda con el punto donde el álabe está expuesto a la carga máxima. Mientras que la

deformación a condiciones normales de operación aparece a dos tercios del álabe, sin sufrir deformación plástica.

- Basados en los resultados FEM obtenidos, los álabes de basalto-epóxica, satisfacen los requerimientos de diseño e integridad estructural para una turbina eólica de 35 kW de producción de energía, con un radio de pala de 5 metros de largo, en condiciones normales y críticas, validando que las fibras de basalto son una alternativa viable para sustituir las fibras convencionales (E-Glass).
- El compuesto basalto-epóxica, tiene un Módulo de Young un 23% más alto que el de E-Glass-epóxica, y para el Módulo de cortante los resultados muestran un 20% mayor que el material convencional.
- Bajo condiciones normales de operación, tanto las fibras de origen vegetal como mineral cumplen con el requerimiento estructural.
- Bajo condiciones críticas de operación, únicamente la fibra de basalto cumple con el requerimiento estructural.
- La fibra de basalto tiene mejor rendimiento estructural que la fibra de vidrio, ya que la deformación total ocasionada en condiciones normales de operación se reduce en un 96% y en condiciones críticas en un 68%.
- La menor densidad de las fibras de basalto permite el ahorro de peso de los componentes. Se encontró que el álabe de basalto es un 2% más ligero que el basalto a base de E-Glass-Epóxica.

## Recomendaciones para trabajo futuro

- Evaluar las fibras vegetales bajo las mismas condiciones de operación, pero utilizando refuerzos de fibra en las zonas que fueron detectadas como críticas con la finalidad de mejorar el desempeño del material compuesto de matriz polimérica a base de fibra natural sin sacrificar el peso del prototipo.
- Evaluar el álabe bajo un método experimental para corroborar los resultados obtenidos bajo las simulaciones establecidas, con la finalidad de corroborar los resultados teóricos y obtener el porcentaje de error entre la simulación y los resultados experimentales.
- En el caso de las fibras de basalto al ser un material relativamente nuevo, se considera de gran importancia seguir caracterizando el material y evaluarlo a diferentes condiciones como cargas dinámicas y fenómenos de impacto.
- Evaluar otros procesos de fabricación con el álabe seleccionado para determinar el óptimo.
- Evaluar la fibra de basalto en álabes de mayor capacidad como un posible sustituto a la fibra de carbono.

# Referencias

- <sup>1</sup> Bavan, Saravana & Channabasappa, Mohan Kumar. (2010). Potential use of natural fiber composite materials in India. *Journal of Reinforced Plastics and Composites - J REINF PLAST COMPOSITE*. 29. 3600-3613. 10.1177/0731684410381151.
- <sup>2</sup> Li Shen, Juliane Haufe, Martin K. Patel "Product Overview and Market Projection of emergin bio-based Plastics" 2009.
- <sup>3</sup> Challis, A. L. 1987. Use of Composite Materials for Wind Turbines. *Proceedings of BWEA/DEN Workshop*, Harwell.
- <sup>4</sup> Abdelrahman A., Mohamadien M., Rizkalla S., and Tadros G. (2003). "Use of ACM in Rehabilitation Projects in Egypt". *Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies*. ACI SP-215. USA. Pages 361-372.
- <sup>5</sup> Quinlivan J.T., Fenbert H.R. (1995) Composite Applications in Commercial Transport Aircraft. In: Prasad P.N., Mark J.E., Fai T.J. (eds) *Polymers and Other Advanced Materials*. Springer, Boston, MA
- <sup>6</sup> History of Wind Turbines. Available online: <http://xn~drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/brush.htm> (accessed on 8 November 2017).
- <sup>7</sup> Webpage of Poul La Cour Museum. Available online: <http://www.poullacour.dk> (accessed on 8 November 2017).
- <sup>8</sup> Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. *Wind Energy Explained*; Wiley: Chichester, UK, 2002.
- <sup>9</sup> Brøndsted, P.; Lilholt, H.; Lystrup, A. Composite materials for wind power turbine blades. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2005, 35, 505–538. [CrossRef]
- <sup>10</sup> Brøndsted, P.; Nijssen, R. (Eds.) *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*; Woodhead Publishing: Oxford, UK, 2013; p. 484.
- <sup>11</sup> Walker, K. Renewable Energy Embraces Graphene: Improved Wind Turbine Technology. Available online: <http://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=455> (accessed on 14 November 2013).
- <sup>12</sup> Watson, J.C.; Serrano, J.C. Composite Materials for Wind Blades. *Wind Syst. Mag.* 2010, 46–51. Available online: [http://www.ppgfiberglass.com/getmedia/0b0f3799-494a-40e8-b67d-b64fc7ee8adc/bWindSystems\\_PPG.pdf.aspx](http://www.ppgfiberglass.com/getmedia/0b0f3799-494a-40e8-b67d-b64fc7ee8adc/bWindSystems_PPG.pdf.aspx) (accessed on 8 November 2017).
- <sup>13</sup> Beckwith, S.W. Resin Infusion Technology. *SAMPE J.* 2007, 43, 66–70.
- <sup>14</sup> A.K. Bledzki y J Gassan "Composites reinforced with cellulose based fibres" 0079-6700/99 1999 Elsevier Science Ltd.
- <sup>15</sup> R.K. Samal, S. Acharya, M. Mohamty, M.C. Ray "FTIR Spectra and Physico-Chemical Behavior of Vinyl Ester Participated Transesterification and Curing of Jute" Mayo 1999.
- <sup>16</sup> Gilles Sèbe, Nihat S. Cetin, Calluma. S. Hill Y Mark Hughes "RTM Hemp Fibre-Reinforced Polyester Composites" *Applied Composite Materials*, 2000
- <sup>17</sup> D.G. Hepworth, R.N. Hobson, D.M. Bruce, J.W. Farrent "The use of unretted hemp fibre in Composite Manufacture" 2000
- <sup>18</sup> A.K. Mohanty, Mubarak A. Khan y G. Hinrichsen "Surface Modification of Jute and its influence on performance of biodegradable jute fabric/Bipol Composites." 2000

- <sup>19</sup> B. Singh, M. Gupta y Anchal Verma "The durability of jute fibre reinforced phenolic composites" *Composite Science and Technology*, 2000.
- <sup>20</sup> Sanjay Sarkar y Basudam Adhikari "Jute Felt Composite from Lignin Modified Phenolic Resin" 2001.
- <sup>21</sup> Dipa Raya, B.K. Sarkara, S. Dasb, A.K. Ranab "Dynamic Mechanical and Thermal analysis of vinylester-resin-matrix composites reinforced with untreated and alkali-treated jute fibres." 2002.
- <sup>22</sup> D. Ray, B.K. Sarkar y N.R. Bose "Impact fatigue behavior of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali treated jute Fibres" 2002.
- <sup>23</sup> K. Oksman, M. Skirfvars y J. Selin "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid PLA composites" 2003.
- <sup>24</sup> Katherleen Van de Velde "Effect of Material and Process parameters on the Mechanical properties of unidirectional and multidirectional flax/polypropylene composites" 2003.
- <sup>25</sup> Van De Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., Verpoest, I. Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites, *Composites Science and Technology*, 63, 1241-1246, 2003.
- <sup>26</sup> Paul Wambua, Jan Ivens, Ignaas Verpoest "Natural fibres: Can they replace glass fiber reinforced plastics" 2003.
- <sup>27</sup> S.J. Eichhorn y R.J. Young "Composite Micromechanics of hemp fibres and epoxy resin microdroplets" 2004.
- <sup>28</sup> B.K. Sarkar y Dipa Ray "Effect of the defect concentration on the impact fatigue endurance of untreated and alkali trated jute-vinylester composites under normal and liquid nitrogen atmosphere." 2004.
- <sup>29</sup> A. Arbelaiz, B. Fernández, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea e I. Mondragon "Mechanical properties of flax/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization" 2005.
- <sup>30</sup> Long Yu, Katherine Dean y Lin Li "Polymer blends and composites from renewable resources" 2006.
- <sup>31</sup> Liliana B. Manfredi, Exequiel S. Rodríguez, Maria Wladyka-Przybylak y Analía Vázquez "Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and ther composites with natural fibres" 2006.
- <sup>32</sup> Chritophe Baley, Frédéric Busnel, Yves Grohens y Olivier Sire "Influence of chemical tratments on Surface properties and adhesión of flax fibre-polyester reisen" 2006
- <sup>33</sup> Mariano Pracella, Dontella Chionna, Irene Anguillesi, Zbigniew Kulinki y Ewa Piorkowska "Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with Hemp fibres" 2006
- <sup>34</sup> Thi-Thu-Loan Doan, Shang Lin Gao y Edith Mader "Jute/Polypropylene composites I. Effect of Matrix modification" 2006
- <sup>35</sup> T.A. Bullions, D. Hoffman, R.A. Gillespie, J. Prince O Brien y A.C. Loos "Contributions of feather fibers and various cellulose fibers to the mechanical properties of polypropylene matrix composites" 2006.
- <sup>36</sup> Betiana A. Acha, María M. Reboredo, Norma E. Marcovich "Creep and dynamic mechanical behavior of PP-Jute composites: Effect of the interfacial adhesion" 2007.
- <sup>37</sup> M. Zampaloni b, F. Pourboghrat, SA Yankovich, BN Rodgers y J. Moore y otros "Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions" 2007.
- <sup>38</sup> Jamal Mirbagheri, Mehdi Tajvidi, John C. Hermanson e Ismael Ghasemi "Tensile Properties of Wood Flour/Kenaf Fiber Polypropylene Hybrid Composites" 2007
- <sup>39</sup> Sok Won Kim, Seugmin Oh y Kyuse Lee "Variation of Mechanical and Thermal Properties of the thermoplastics reinforced with natural fibers by electron Beam Processing" 2007

- <sup>40</sup> Liu y M. Hughes “The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites” 2008.
- <sup>41</sup> Maya Jacob John y Sabu Thomas “Biofibres and Biocomposites” 2008.
- <sup>42</sup> Yan Li y K.L. Pickering “Hemp fibre reinforced composites using chelator and enzyme treatments” 2008.
- <sup>43</sup> Mahmoodul Ha, Rigoberto Burgueño, Amar K. Mohanty y Manjusi Misra “Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers” 2008.
- <sup>44</sup> Thiranan Kunanoppart, Paul Menut, Marie Helene Morel y Stephane Guilbert “Plasticized wheat gluten reinforcement with natural fibers: Effect of thermal treatment on the fiber/matrix adhesion” 2008.
- <sup>45</sup> Kestur G, Gregorio Arizaga y Fernando Wipych “Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers” 2009.
- <sup>46</sup> S. Alix, E. Philippe, A. Bessadok, L. Lebrun, C. Morvan y S. Marais “Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres” 2009.
- <sup>47</sup> Alain Bourmaud y Christophe Baley “Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling” 2009.
- <sup>48</sup> G. Cicala, G. Cristaldi, G. Recca, G. Ziegmann “Properties and performances of various hybrid glass/natural fibre composites for curved pipes” 2009.
- <sup>49</sup> John Summersales, Nilmini P.J. Dissanayake, Amandeep S. Virk y Wayne Hall “A review of bast fibres and their composites Part 1: Fibres as reinforcements” 2010
- <sup>50</sup> Venkateshwaran Narayanan y Ayyasamy Elayaperumal “Banana Fiber Reinforced polymer composites – A review” 2010
- <sup>51</sup> Azman Hassan, Arshad Adam Salema, Farid Nasir Ani y Aznizam Abu Bakar “A review on oil palm empty fruit bunch fiber reinforced polymer composite materials” 2010.
- <sup>52</sup> M. Asim, Khalina Abdan, M. Jawaid, M. Nasir y Zahra Dashtizadeh “A review on Pineapple Leaves fibre and its composites” 2015
- <sup>53</sup> S. Shinoja, R. Visvanathanb, S. Panigrahi, M. Kochubabua “Oil Palm fiber (OPF) and its composites A review” 2011.
- <sup>54</sup> Huber T, Mussig J, Curnow O, Pang S, Bickerton S, Staiger M. “A Critical review of all-cellulose composites” 2012, J Mater Sci.
- <sup>55</sup> Huber T, Pang S, Staiger M. “All Cellulose Composite Laminates” 2012, Composites Part A. 1738-1745.
- <sup>56</sup> Shanmugam D, Thiruchitrambalam M, “Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites” 2013, Materials and Design, 533-542.
- <sup>57</sup> Zhu J, Zhu H, Njuguna J, Abhyankar H. “Recent Development of Flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices” 2013, Materials, 5171-5198.
- <sup>58</sup> Shah D, Schubel P, Clifford M. “Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine case study” 2013, Composites Part B. 172-181.
- <sup>59</sup> Mir A, Zitoun R, Collombet F, Bezzazi B. “Study of Mechanical and Thermomechanical properties of jute/epoxy composite laminate” 2014

- <sup>60</sup> Santulli C, Caruso P. "Effect of fibre Architecture on the Falling Weight Impact properties of hemp/epoxy composites" 2014
- <sup>61</sup> Srivastava A, Maurya M. "Preparation and mechanical characterization of epoxy based composite developed by biowaste" 2015, International Journal of research in engineering and technology. Vol. 04, 2321-7308.
- <sup>62</sup> Asim M, Abdan K, Jawaid M, Nasir M, Dashtizadeh Z, Ishak M, Hoque E. "A review on Pineapple Leaves fibre and its composties" 2015, International Journal of Polymer Science.
- <sup>63</sup> Omrani E, Menezes P, Rohatgi P. "State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world" 2016, Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 19, Issue 2, pages 717-736.
- <sup>64</sup> Azam A, Khubab S, Yasir N, Madena J, Tanveer H, Jiri M, Vijay B. "Hydrophobic Treatment of natural fibers and their composites - A review" 2016, SAGE Journals, Vol. 47, Issue:8, 2153-2183.
- <sup>65</sup> Dayo A, Gao B, Wang J, Liu W, Derradji M, Hussain A, Babar A. "Natural Hemp Fiber reinforced polybenzoxazine composites: Curing behavior, mechanical and thermal properties" 2017, Composites Science and Technology. Vol. 144, pag: 114-124.
- <sup>66</sup> Sepe R, Bollino F, Bocarusso L, Caputo F. "Influence of Chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites" 2018, Composites part B: Engineering, Vol. 133, 210-217.
- <sup>67</sup> Manimaran P, Senthamaraiannan P, Sanjay M.R., Marichelvam M.K, Mohammad J. "Study of characterization of Furcraea Foetida new natural fiber as composite reinforcement for lightweight applications" 2018, Carbohydrate Polymers, Vol. 181, 650-658.
- <sup>68</sup> David Wood, Small Wind Turbines Analysis, Design and Applications. Green Energy and Technology. Springer.
- <sup>69</sup> Dept. of Aerospace Engg., Indian Institute of Technology, Madras
- <sup>70</sup> Analysis and Performance of Fibre composites, - B.D. Agarwal, L.J. Broughtman and K.Chandrashekar John Wiley & Sons. Inc.
- <sup>71</sup> Principles of Composite Material Mechanics, R.F. Gibson, CRC Press.
- <sup>72</sup> Hall D, Clyne T.W. "An Introduction to Composites Materials" 2003, Cambridge Solid State Science Series.
- <sup>73</sup> Miravete A. "Materiales Compuestos" 2019, AEMAC, ISBN 10: 8492134984 ISBN 13: 9788492134984.
- <sup>74</sup> Gutowski T. "Advanced composites manufacturing" (1997). Ed. John Wiley & Sons. ISBN 04-7115-301-X..
- <sup>75</sup> Diaz Santos M. "Fabricación y mecanizado de materiales compuestos". 1992, EUIT Aeronáutica, Sección publicaciones.
- <sup>76</sup> ASTM D-3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- <sup>77</sup> ASTM D-695-02, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- <sup>78</sup> ASTM D-2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- <sup>79</sup> ASTM D-790-03, Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.

- 
- <sup>80</sup> Shafiqur Rehman, Md. Mahbub Alam, Luai M. Alhems, M. Mujahid Rafique. Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement. *Energies*, 2018. 506.
- <sup>81</sup> Tarfaoui M, Pradillon J.Y, Shah O.R.: Numerical investigation of a large composite wind turbine with different spar profiles using finite-element method. *La Houille Blanche*, n°5, 2015, p. 29-35.
- <sup>82</sup> Mostapha T, Khadimallah H, Abdellatif I, Pradillon J.Y.: Design and Finite Element Modal Analysis of 48m Composite Wind Turbine Blade. *Applied Mechanics and Materials* 12/2011; 146:170-184