

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN ÁLABE DE AEROGENERADOR DE EJE
VERTICAL CONSTITUIDO POR MATERIAL NATURAL COMPUESTO
MEDIANTE F.E.A.

Juan Dayal Castro Bermúdez

Ivan Darío Ortega Anillo

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2018

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN ÁLABE DE AEROGENERADOR DE EJE
VERTICAL CONSTITUIDO POR MATERIAL NATURAL COMPUESTO
MEDIANTE F.E.A.

Tesis por

Juan Dayal Castro Bermúdez

Ivan Darío Ortega Anillo

Para la obtención del título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Manuel de Jesús Martínez

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2018

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi mamá que siempre me ha dado su apoyo, amor incondicional y su confianza; a mi padre que me ha dado consejos, me ha guiado y ha sido mi ejemplo a seguir; a mi hermano que sin a escondidas me ayudó en momentos difíciles y me ha dado palabras de aliento para continuar hasta el final, a mi familia que siempre me recibe con los brazos abiertos para poder descansar y a mis amigos y mi fastidiosita que saben lo que es estudiar aquí y me han hecho sonreír en momentos de tristeza; a todos le agradezco con el corazón.

Ivan Ortega

DEDICATORIA

A mi madre Yaneth y a mi padre Pedro, por siempre apoyarme, ser mi ejemplo de dedicación, perseverancia y amor incondicional.

A mi hermano Swami, por siempre estar conmigo en todo momento, aconsejándome y apoyándome.

A Nandev y Dante para servirles de inspiración.

A Paula, por ser mi fuente de inspiración y por siempre creer en mí.

Dayal Castro

AGRADECIMIENTOS

Al director de trabajo de grado, Manuel de Jesús Martínez, PhD. Por su orientación y disposición para realizar este trabajo.

A los profesores Alberto Pertuz y Andrés González Estrada por su orientación y su ayuda en resolución de dudas para esta labor.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por el préstamo de la máquina MTS para realizar ensayos.

A la Escuela de Diseño y al auxiliar de los talleres por el préstamo de estos y la asesoría y paciencia brindadas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. TURBINAS EÓLICAS.....	19
2.1. TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL.....	20
2.2. TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL.....	21
2.3. TÉRMINOS GENERALES DE LAS TURBINAS EÓLICAS.....	23
2.4. FUNCIONAMIENTO DE LAS TURBINAS EÓLICAS.....	24
2.5 FUERZAS SOBRE UN PERFIL AERODINÁMICO.....	26
3. NOTACIÓN DE ESFUERZOS EN UN SÓLIDO.....	29
3.1. CLASIFICACIÓN DE UN SÓLIDO SEGÚN SUS PROPIEDADES.....	30
3.2. MECÁNICA DE UN SÓLIDO.....	31
4. MATERIALES COMPUESTOS.....	32
4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	32
4.4.1. COMPUESTOS FIBROSOS.....	33
4.1.2. COMPUESTOS LAMINADOS.....	34
4.1.3. COMPUESTOS PARTICULADOS.....	35
4.1.4. COMBINACIÓN DE LOS ANTERIORES.....	35
4.2. MECÁNICA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	36
4.2.1. MECÁNICA DE LOS COMPUESTOS LAMINARES.....	36
5. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	40
5.1. MÉTODO GALERKIN.....	42
5.2 TIPOS DE ELEMENTOS.....	44
6. SIMULACIÓN PRELIMINAR.....	48
6.1 EL MODELO.....	51
6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA DE LATA.....	53
6.3 RESULTADOS DE LA PRIMERA SIMULACIÓN.....	56
7. SIMULACIÓN CON RIGIDIZADOR INTERNO.....	60

7.1	PROCEDIMIENTO.....	60
7.2	RESULTADOS.....	63
7.2.1.	ÁLABES CON FIBRA DE VIDRIO-EPOXY.....	64
7.2.2	ÁLABES CON PALMA DE LATA.....	65
7.2.3.	ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA POSICIÓN DEL RIGIDIZADOR.....	65
7.3.	CONCLUSIONES ÁLABE CON RIGIDIZADOR.....	69
8.	CARACTERIZACIÓN DE LA PALMA DE LATA.....	70
8.1.	ANISOTROPÍA DE LA PALMA DE LATA.....	71
8.2.	MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN.....	75
8.3.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN.....	81
8.3.1.	TRACCIÓN LONGITUDINAL.....	81
8.3.2.	TRACCIÓN RADIAL.....	83
8.3.3.	TRACCIÓN TANGENCIAL.....	84
8.3.4.	COEFICIENTE DE POISSON.....	85
8.3.5.	MÓDULOS DE CORTANTE.....	86
8.3.6.	PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SIMULACIÓN.....	89
9.	CRITERIOS DE FALLA.....	91
9.1.	CRITERIO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN MÁXIMA.....	91
9.2.	CRITERIO TSAI-HILL.....	92
9.3	CRITERIO TSAI-WU.....	92
9.4.	CRITERIO HASHIN.....	93
10.	SIMULACIÓN DEL ÁLABE CON PROPIEDADES DE LA PALMA.....	94
10.1.	PROCEDIMIENTO DE LA SIMULACIÓN CON LAS PROPIEDADES DE LA PALMA.....	95
11.	RESULTADOS.....	102
11.1.	ÁLABE DE PALMA CON UNA SOLA CAPA DE MATERIAL.....	102
11.2.	RIGIDIZADOR CON UNA SOLA CAPA DE MATERIAL.....	104
11.3	ÁLABE REFORZADO CON MÁS CAPAS.....	104
12.	CONCLUSIONES.....	107
13.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
	BIBLIOGRAFÍA.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Turbina eólica de eje horizontal	21
Figura 2. Turbina eólica de eje vertical.....	23
Figura 3. Características de un perfil aerodinámico	24
Figura 4. Troncos de madera (Anisótropo)	30
Figura 5. Barras de metal (Isótropo)	30
Figura 6. Estructura de un material compuesto fibroso	33
Figura 7. Capas de vidrio de seguridad.....	34
Figura 8. Estructura del concreto.....	35
Figura 9. Malla de un Sólido.....	42
Figura 10. Tipos de elementos 2D y 3D	45
Figura 11. Tipos de elementos cuadráticos 2d y 3d.....	46
Figura 12. Comportamiento asintótico de una curva.....	47
Figura 13. Distribución de presiones en perfil DU06W200.....	48
Figura 14. Tallo Palma de Lata.....	49
Figura 15. Esfuerzo-Deformación real de la palma de lata	50
Figura 16. Modelo del álabe utilizado	51
Figura 17. Secciones fijas del álabe.....	52
Figura 18. Mallado del modelo del álabe.....	52
Figura 19. Dirección principal de las fibras	53
Figura 20. Direcciones principales de las fibras de la palma	54
Figura 21. Desplazamientos totales	57
Figura 22. Esfuerzos en la dirección principal (longitudinal).....	57
Figura 23. Deformación unitaria en dirección principal.....	58
Figura 24. Perfil del álabe. línea vertical interna indica la posición del refuerzo.....	61
Figura 25. Cargas y condiciones de contorno impuestas.....	62
Figura 26. Malla, refuerzo interno y láminas de material agregadas (líneas verdes).....	62
Figura 27. Variación de los desplazamientos totales en los cuatro álabes	67
Figura 28. Gráfico de la variación de los esfuerzos normales máximos en función de la posición del rigidizador.....	68
Figura 29. Sección transversal del tallo de la palma de lata.....	71
Figura 30. Direcciones principales en la palma.....	72
Figura 31. Fotografía MEB de la Palma de Lata.....	74
Figura 32. Montaje para pruebas en dirección longitudinal.....	77
Figura 33. Montaje para pruebas en la dirección tangencial.....	78
Figura 34. Montaje para pruebas en dirección radial	78
Figura 35. Montaje para pruebas de cortante.....	79
Figura 36. Geometría de las probetas de cortante	80
Figura 37. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección longitudinal.....	82
Figura 38. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección radial.....	83

Figura 39. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección tangencial.....	84
Figura 40. Gráfica de deformaciones longitudinales y tangenciales variando respecto a la aplicación de la carga.....	85
Figura 41. Gráfica esfuerzo cortante-deformación angular cortando la fibra	87
Figura 42. Gráfica esfuerzo cortante-deformación angular cortando paralelo a la fibra.....	87
Figura 43. Orden de apilamiento de las capas de material y sus propiedades	96
Figura 44. Dirección principal de la palma, malla y dirección de apilamiento	97
Figura 45. Soportes del álabe y aplicación de las cargas aerodinámicas	98
Figura 46. Desplazamientos totales del álabe vista lateral	98
Figura 47. Desplazamientos totales del álabe.....	99
Figura 48. Falla por esfuerzo normal en dirección trasversal en la capa superior de palma	99
Figura 49. Resultados de la independencia de malla	100
Figura 50. Desplazamientos totales del álabe con malla fina	101
Figura 51. Desplazamientos totales del álabe con malla fina vista lateral.....	101
Figura 52. Falla de la capa interna de palma por criterio de esfuerzo máximo.....	103
Figura 53. Criterio Tsai-Hill del rigidizador	104
Figura 54. Configuración reforzada con más capas del álabe.....	105
Figura 55. Desplazamientos totales del álabe reforzado con más capas.....	105
Figura 56. Criterio deformación máxima para álabe reforzado.....	105
Figura 57. Criterio tsai-hill para álabe reforzado	105
Figura 58. Criterio esfuerzo máximo para álabe reforzado	106
Figura 59. Criterio hashin para álabe reforzado.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades en la dirección de las fibras calculadas	55
Tabla 2. Propiedades estimadas en la dirección de las fibras.....	56
Tabla 3. Valores de deformación unitaria, desplazamientos totales y esfuerzo en dirección principal.....	58
Tabla 4. Variación de los desplazamientos totales y deformación unitaria respecto al número de elementos.....	59
Tabla 5. Propiedades de fibra de Vidrio-Epoxy.....	63
Tabla 6. Valores para álabe de fibra-epoxy con y sin rigidizador a 0.5 de la longitud de cuerda	64
Tabla 7. Valores para el álabe de palma con costilla a 0.5 y sin ella	65
Tabla 8. Variación de los desplazamientos máximos en función de la posición del rigidizador	66
Tabla 9. Variación de los esfuerzos normales máximos en función de la posición del rigidizador.....	67
Tabla 10. Comparación de las propiedades del PSB y la Palma de Lata.	88
Tabla 11. Propiedades encontradas y utilizadas para la simulación	90
Tabla 12. Valores de FRI para el álabe.....	103
Tabla 13. Valores de FRI para rigidizador.....	104
Tabla 14. Valores FRI para álabe reforzado.....	105

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN ÁLABE DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CONSTITUIDO POR MATERIAL NATURAL COMPUESTO MEDIANTE F.E.A. *

AUTORES: JUAN DAYAL CASTRO BERMÚDEZ
IVAN DARÍO ORTEGA ANILLO**

PALABRAS CLAVES: Turbina eólica, perfil aerodinámico, palma de lata, material compuesto, F.E.A.

CONTENIDO:

El presente trabajo es una investigación realizada para conocer el comportamiento mecánico de un álabe de aerogenerador de eje vertical constituido por material natural compuesto bajo las condiciones de viento del Cañón del Chicamocha colombiano. Para este propósito se caracterizó el material del cual se constituye el álabe realizando pruebas mecánicas de tracción y cortante. Luego de adquirir las propiedades se realizó una simulación mecánica utilizando el programa ANSYS, el cual permite resolver problemas de ingeniería mediante el uso del método de los elementos finitos. En dicha simulación se utilizó un perfil DU06W200 y un compuesto experimental de palma de lata y aglomerante al cual se le realizaron simplificaciones para su estudio. Las cargas a las cuales fue sometido el álabe son las encontradas en un proyecto de grado anterior realizado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS. Finalmente, se analiza el comportamiento del álabe y del material, se obtienen conclusiones y se dan recomendaciones para estudios posteriores.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Manuel de Jesús Martínez, PhD

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL ANALYSIS OF A VERTICA AXIS WIND TURBINE (VAWT) CONSTITUTED BY COMPOSITE NATURAL MATERIAL USING F.E.A.*

AUTHORS: JUAN DAYAL CASTRO BERMÚDEZ
IVAN DARIO ORTEGA ANILLO**

KEY WORDS: Wind Turbine, Airfoil, *Palma de Lata*, Composite Material, F.E.A.

CONTENTS

The present work is a research performed to know the mechanical behavior of a blade from a vertical axis aero generator constituted by natural composite material under the wind conditions of the Colombian *Chicamocha* Canyon, for this purpose the material by which the airfoil is constituted was characterized through mechanical tensile tests. After acquiring the properties a mechanical simulation using the program ANSYS was made, this program allows solving engineering problems by means of the finite element method. In this simulation a DU06W200 airfoil and an experimental *palma de lata* - binding composite, which was simplified for its study, were used. The loads to which the airfoil was subjected to, are found in a thesis developed in the Mechanical Engineering School at UIS. Finally, the material and blade behavior were analyzed, conclusions are drawn, and recommendations are given for future research.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel de Jesús Martínez, PhD

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son uno de los temas de investigación más importantes de los últimos tiempos, esto se debe a la gran implementación de compuestos de fibra de vidrio y carbono en gran cantidad de aplicaciones de ingeniería¹, además el estudio de los materiales compuestos² tiene una complejidad inherente a su estructura, a su manufactura y a la anisotropía³⁻⁴ que presentan, lo cual hace que sea un tema de gran interés para la investigación.

Las ideas ecológicas y sustentables han dado gran impacto en el avance de la ciencia, queriendo estrechar las brechas que aún existen entre la naturaleza y la tecnología, gracias al deseo de reducir el impacto de la contaminación y disminuir la cantidad de residuos sólidos. Un ejemplo controversial se observa en las turbinas eólicas, siendo uno de sus principales materiales de construcción los compuestos a base de fibra de vidrio que son contaminantes potenciales del agua⁵ y de difícil reciclaje⁶. Tal como se muestra en el documento de Wind Europe⁷ una de las alternativas deseadas para el manejo de los compuestos sintéticos es

¹ GONZÁLEZ-ESTRADA, Octavio Andrés; LEAL, Joaquín; REYES-HERRERA, Juan David. Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. *Revista UIS Ingenierías*, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 105-116, jun. 2016. ISSN 2145-8456

² SENE, Tarcísio S., et al. Glass fiber hybrid composites molded by RTM using a dispersion of carbon nanotubes/clay in epoxy. *Materials Research*, 2013, vol. 16, no 5, p. 1128-1133.

³ GIBSON, Ronald. *PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS*. Boca Raton : Taylor & Francis, 2012. 978-1-4398-5006-0.

⁴ SURESH, G.; JAYAKUMARI, L. S. Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks. *Polímeros*, 2015, vol. 25, no 1, p. 49-57.

⁵ GALIMANY, Eve; RAMÓN, Montserrat; DELGADO, Maximino. First evidence of fiberglass ingestion by a marine invertebrate (*Mytilus galloprovincialis* L.) in a NW Mediterranean estuary. *Marine pollution bulletin*, 2009, vol. 58, no 9, p. 1334-1338

⁶ BEAUSON, Justine; BRØNDSTED, Povl. Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. En *MARE-WINT*. Springer, Cham, 2016. p. 421-432.

⁷ Wind Europe. Discussion paper on managing composite blade waste. [En línea] [Citado el: 29 de 01 de 2018.] <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf>.

prevenir la producción de desperdicio, por esto, si se reduce el uso de materia prima sintética reemplazándola con materiales biodegradables⁸, se reduciría notablemente tanto los residuos sólidos como la contaminación inherente a la manufactura de compuestos artificiales⁹. Este proyecto pretende generar la alternativa del uso de la Palma de Lata (*Bactris Guineensis*) como reemplazo de las fibras sintéticas para aplicaciones que posean cargas bajas, de modo que se usen materiales orgánicos para su fabricación.

La palma de Lata es encontrada en regiones de Sudamérica¹⁰ y se aprovecha para la obtención de bebidas con alto contenido de antioxidantes¹¹ y vinos, su tallo ha sido usado en refuerzos de construcciones antiguas pero pocos estudios¹²⁻¹³ se han centrado en la caracterización mecánica de la palma de lata, en consecuencia, se hizo necesario estudiar el comportamiento mecánico de esta palma y así dar los primeros pasos al diseño de elementos estructurales que aprovechen esta materia prima.

Una de las aplicaciones más conocidas para los materiales compuestos son las turbinas eólicas, estas han ganado popularidad a nivel mundial debido a su capacidad de generar energía “limpia” con corrientes de viento. Sin embargo, la mayoría de la energía eléctrica a nivel global sigue teniendo un origen fósil, el cual

⁸ MISHNAEVSKY JR, Leon, et al. Small wind turbines with timber blades for developing countries: Materials choice, development, installation and experiences. *Renewable Energy*, 2011, vol. 36, no 8, p. 2128-2138.

⁹ HO, Mei-po, et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no 8, p. 3549-3562.

¹⁰ Plotkin M., & Famolare L. Sustainable harvest and marketing of rain forest products. Island Press. 1992. ISBN 978-1559631686.

¹¹ OSORIO, Coralia; CARRIAZO, José G.; ALMANZA, Ovidio. Antioxidant activity of corozo (*Bactris guineensis*) fruit by electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy. *European Food Research and Technology*, 2011, vol. 233, no 1, p. 103-108.

¹² PRADA GARZON, R. G.; GIL GONZALES, REY. y SOTO, A. Análisis y Caracterización de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Palma de Lata. Bucaramanga: UIS, 2008.

¹³ CHÁVEZ, D.; GARCIA, F.; PERTUZ, A. Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la pala de lata. Bucaramanga: UIS, 2016.

empeora la situación que se vive actualmente de cambio climático producto del efecto invernadero que generan dichas fuentes de energía. Además, ya que las turbinas están construidas con estos materiales acarrear consigo un problema que va en contra de su propósito con el medio ambiente.

En Colombia para el año 2010 más del 25% de la energía producida en el país era de origen fósil¹⁴, lo cual no está mal. Sin embargo, la meta según los científicos es reducir las emisiones de carbono al aire lo más pronto posible, lo que significa que el objetivo para el valor mostrado es de 0%.

En este estudio se pretende investigar el comportamiento de la palma de lata como material estructural para álabes de turbinas eólicas de eje vertical para incursionar desde la academia en el desarrollo sostenible del país y de tal manera contribuir con su desarrollo a nivel económico, cultural y social.

1. OBJETIVOS

¹⁴Unidad de Planeación Minero Energética. INFORME SECTORIAL SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA EN COLOMBIA. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <http://www.siel.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=L9AASwJjMz8=>.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento mecánico de un material compuesto de origen natural obtenido de la palma de lata, para ser usado como álabe de aerogenerador, bajo las condiciones de viento del cañón del Chicamocha utilizando la técnica de análisis por elementos finitos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar el perfil del álabe del cual se deberá obtener la distribución de presiones que será aplicada al modelo.
- Desarrollar el modelo del álabe mediante una técnica numérica basándose en el perfil y las propiedades mecánicas del material de estudio.
- Seleccionar el tipo de solicitaciones en el álabe que simulen el comportamiento al que será sometido en condiciones reales.
- Determinar el comportamiento mecánico del modelo.
- Analizar los resultados obtenidos comparando con resultados encontrados en la literatura.

2. TURBINAS EÓLICAS

Una turbina eólica es una máquina que transforma la energía cinética del viento en electricidad. Como generadores de energía, las turbinas eólicas están conectadas a algún tipo de red eléctrica. Su funcionamiento se basa en la transformación mecánica de la energía desde las hélices, pasando por un sistema de transmisión mecánico del cual sale un eje de alta velocidad que va finalmente a un generador eléctrico. Las turbinas eólicas se clasifican principalmente en dos grandes grupos según su eje principal en: turbinas de eje horizontal y turbinas de eje vertical (por sus siglas en inglés respectivamente: HAWT y VAWT).

2.1. TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL

Como su nombre lo indica, el eje principal de esta turbina eólica está posicionado de forma horizontal, este tipo de turbinas generalmente son mucho más grandes que sus contrapartes (eje vertical) y permiten aprovechar más energía de un determinado flujo de viento y por esto son las más populares en la actualidad. Funcionan mejor con flujos laminares.

Las partes que componen este tipo de turbinas son¹⁵:

- Rotor: El cual contiene las hélices.
- Tren conductor: Incluye las partes rotatorias de la turbina a excepción del rotor.
- Sistema de rotación: Permite posicionar la turbina para acomodarse a la dirección del viento.
- Góndola: Es donde se encuentra el generador, el sistema de transmisión, el freno y el sistema de posicionamiento.
- Torre: Encargada de sostener las partes anteriormente mencionadas.

¹⁵ J, MANWELL y MACGOWAN, J Y REGERS, A. Wind Energy Explained. Washington: WILLEY, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1

Figura 1. Turbina eólica de eje horizontal



*Fuente: pixabay. [En línea][Citado el 26/02/18]
<https://pixabay.com/en/wind-windmill-electricity-turbine-3106630/>*

2.2. TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL

Este tipo de turbina eólica posee un eje principal ubicado de forma vertical, lo cual obliga a sus hélices a girar siempre a la misma altura del suelo. Son generalmente

más pequeñas y livianas que las turbinas eólicas de eje horizontal y funcionan mejor en condiciones de viento que cambia de dirección y de alta turbulencia. Su generador puede ser ubicado en el suelo. Este tipo de turbinas se clasifican a su vez según su forma, las más conocidas son las de tipo Darrieus, Savonius, y H-rotor.

Las partes de una turbina eólica de eje vertical son¹⁶:

- Cable guía: Se encarga de mantener el rotor fijo y minimizar la vibración mecánica.
- Centro: Es el punto al cual se hallan unidas las hélices, hay dos de estos: uno superior y otro inferior.
- Rotor: Es el corazón de la turbina eólica, consiste de las hélices y el centro. Es el componente encargado de coleccionar la energía del viento.
- Hélices: Son la parte más básica y crucial de la turbina. Son las encargadas de interactuar con el viento.
- Eje: Es la parte que gira por acción de las hélices. Está conectado al generador.
- Freno: Se encarga de mantener la rotación del eje a una velocidad de operación segura.
- Transmisión: Incrementa la velocidad del eje para transformarla en energía eléctrica.

¹⁶ Green Mechanic. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <http://www.green-mechanic.com/2013/03/vertical-axis-wind-turbine-parts.html>.

- Generador: Transforma la energía rotacional que sale de la transmisión en energía eléctrica.

Figura 2. Turbina eólica de eje vertical

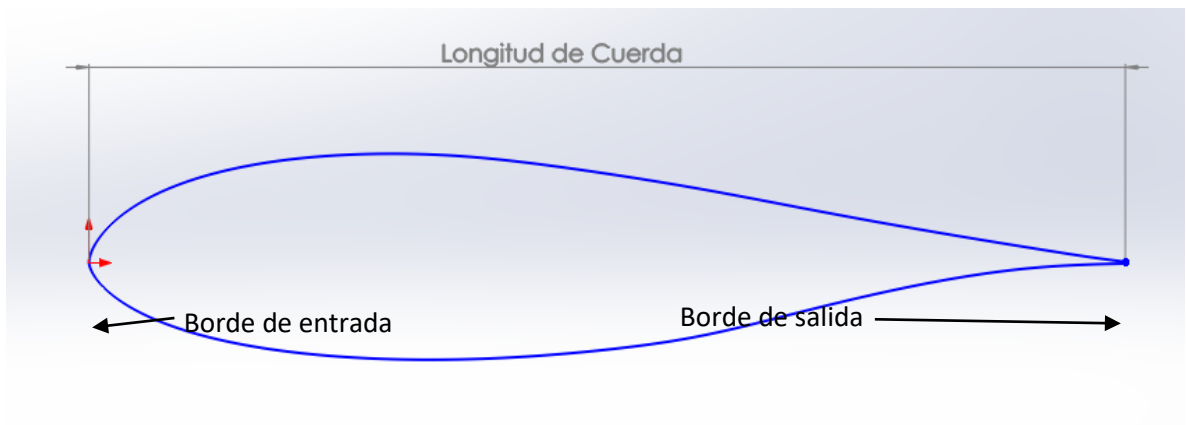


*Fuente: shutterstock. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.]
https://www.shutterstock.com/image-photo/silent-urban-styled-wind-turbine-blue-95223898?irgwc=1&utm_medium=Affiliate&utm_campaign=Hans%20Braxmeier%20und%20Simon%20Steinberger%20GbR&utm_source=44814&utm_term=*

2.3. TÉRMINOS GENERALES DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Los perfiles tienen varias características que los diferencian entre sí. La cuerda es la distancia entre el borde de entrada y de salida, el espesor máximo es la distancia máxima que existe entre la parte superior e inferior del álabe medida perpendicular a la línea de curvatura media, el borde de ataque es la parte anterior y el borde de salida la parte posterior del perfil.

Figura 3. Características de un perfil aerodinámico



Desde este punto de vista, el ángulo de ataque es el que se encuentra entre la velocidad relativa del viento y la cuerda (Figura 4). El ángulo entre la línea de curvatura media y la línea del borde de salida, el radio del borde de entrada son otras de las características.

2.4. FUNCIONAMIENTO DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Ya que este trabajo de grado está enfocado a turbinas eólicas de eje vertical se hará énfasis en la aerodinámica de estas. Cabe aclarar que la aerodinámica involucrada en el análisis de turbinas eólicas depende de su eje, es decir que las

turbinas de eje horizontal se analizan de manera diferente a la presentada a continuación.

La potencia de una turbina eólica se puede expresar en términos del torque como:

$$P = T \omega \quad (1)$$

Donde ω es la velocidad angular y T es el torque. Las cargas estructurales en los álabes de las turbinas generalmente se dan a través de la fuerza normal que es la componente de la fuerza aerodinámica en la dirección radial.

La fuerza tangencial se define como:

$$T = N F_t r \quad (2)$$

Donde N es el número de álabes, F_t es la fuerza en la dirección tangencial y r es el radio de la turbina. El ángulo de posición del álabe respecto al rotor se llama ángulo azimutal θ . La geometría de la turbina y las condiciones de operación son determinantes en la magnitud y dirección de la fuerza tangencial. La velocidad del álabe se puede expresar como:

$$\vec{V}_b = \omega r \hat{\theta} \quad (3)$$

Donde $\hat{\theta}$ es el vector unitario en la dirección tangencial la cual es positiva en la dirección contraria a las manecillas del reloj (Figura 5). La velocidad relativa del viento es la diferencia entre la velocidad del viento y la velocidad del álabe:

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V}_d - \vec{V}_a \quad (4)$$

El ángulo del de la velocidad relativa del viento cuando la dirección del flujo de viento es paralela al eje x en el plano cartesiano está dado por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\cos(\theta)}{\frac{r * \omega}{V_d} + \sin(\theta)}\right) \quad (5)$$

El ángulo de ataque α es la suma entre el ángulo de la velocidad relativa del viento y el ángulo del álabe β .

$$\alpha = \varphi - \beta \quad (6)$$

2.5. FUERZAS SOBRE UN PERFIL AERODINÁMICO

El flujo de aire sobre el álabe produce diferencias de presiones, estas son las que producen las fuerzas que mueven la turbina. El flujo en la parte superior del perfil es más rápido, por lo tanto, genera una caída de presión que tiende a mover el álabe hacia arriba.

La resultante de las fuerzas debido a las presiones se puede descomponer en dos: la sustentación y el arrastre. La sustentación es perpendicular a la dirección del flujo de viento y se debe a la diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del perfil, el arrastre es una fuerza que se opone al avance del álabe y es paralelo a la dirección del viento, la cual se debe a la fricción en la superficie y también a la desigualdad en las presiones.

Se pueden definir coeficientes adimensionales que se utilizan en el diseño de rotores y generalmente describen el comportamiento del álabe bajo condiciones de viento específicas.

Coeficiente de sustentación:

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2} * \rho * U^2 * c} \quad (7)$$

$$= \frac{(Fuerza\ de\ sustentación)/(Unidad\ de\ longitud)}{(Fuerza\ dinámica)/(Unidad\ de\ longitud)}$$

Coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2} * \rho * U^2 * c} \quad (8)$$

$$= \frac{(Fuerza\ de\ arrastre)/(Unidad\ de\ longitud)}{(Fuerza\ dinámica)/(Unidad\ de\ longitud)}$$

Coeficiente de cabeceo:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} * \rho * U^2 * A * c} = \frac{Momento\ de\ cabeceo}{Momento\ dinámico} \quad (9)$$

Donde ρ es la densidad del aire, U es la velocidad del flujo, c es la cuerda, l es la longitud del álabe y A es el área proyectada del perfil (cuerda x longitud del álabe).

3. NOTACIÓN DE ESFUERZOS EN UN SÓLIDO

En un material se pueden presentar diferentes sollicitaciones de origen externo como fuerzas o momentos aplicados, dentro del material los esfuerzos que estos generan se transmiten continuamente en todas las direcciones, las componentes resultantes pueden estar en cualquier dirección respecto a ejes coordenados arbitrarios.

Para el análisis de estos esfuerzos se toma como referencia un cubo infinitesimalmente pequeño de material, a partir de dicho cubo se generan los clásicos ejes de referencia x, y, z paralelos a las normales de las caras del cubo.

Las componentes de los esfuerzos actúan entonces de dos maneras distintas una vez establecido el eje coordenado: De forma normal a la superficie de las caras o de forma paralela a las caras actuando sobre las mismas, respectivamente se denominan esfuerzos normales y cortantes.

La notación de cada componente contiene tres elementos, una magnitud (σ o τ), y dos direcciones (x, y o z), donde la primera dirección se refiere a donde actúa o de donde parte el esfuerzo, la segunda es la dirección¹⁷.

¹⁷Mechanical Engineering Laboratory. [En línea] [Citado el: 2018 de 01 de 22.] <http://lim.ii.udc.es/docencia/din-sismec/circuitos.pdf>.

3.1. CLASIFICACIÓN DE UN SÓLIDO SEGÚN SUS PROPIEDADES

Los materiales según el comportamiento de sus propiedades mecánicas se pueden clasificar como isótropos y anisótropos. Los primeros son aquellos en los cuales las propiedades se mantienen iguales a lo largo del material, los anisótropos tienen como característica que sus propiedades en un eje coordenado son diferentes a las propiedades en otra dirección ortogonal, es decir, las propiedades a lo largo del eje x son diferentes a las propiedades en el eje y , por lo tanto su estudio es un poco más complejo.

Un ejemplo de material isótropo sería el acero que presenta características iguales sin importar la dirección de sollicitación, un ejemplo de material anisótropo es la madera, que al estar formada por pequeñas fibras orientadas sus propiedades son mejores en dicha dirección que en las otras dos ortogonales a esa.

*Figura 4. Troncos de madera
(Anisótropo)*



*Fuente: pixabay. [En línea]
[Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<https://pixabay.com/en/firewood-background-stake-trunks-3101276/>.*

*Figura 5. Barras de metal
(Isótropo)*



*Fuente: pixabay. [En línea]
[Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<https://pixabay.com/en/iron-rebar-house-construction-2326791/>.*

3.2. MECÁNICA DE UN SÓLIDO

Para describir el comportamiento de un material mediante el método utilizado en este trabajo es necesario conocer la relación entre esfuerzos y deformaciones en un sólido, dicha relación se puede obtener mediante la ley de Hooke utilizada en tres dimensiones.

La forma tensorial de la ley de Hooke de la elasticidad en un sólido se puede escribir como

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (10)$$

En la cual el término σ_{ij} representa el vector de esfuerzos, ε_{kl} representa el vector de deformaciones y C_{ijkl} es la matriz de rigidez del material. La forma tensorial de la ley de Hooke también puede escribirse en términos de la matriz de flexibilidad como se observa en la ecuación 11, siendo esta la inversa de la matriz de rigidez. Ahora para los materiales ortótropos se puede representar matricialmente como se visualiza en la ecuación 12, de modo que las componentes de los esfuerzos serán los esfuerzos normales σ_L , σ_T y σ_R en las direcciones principales y los esfuerzos cortantes τ_{LT} , τ_{TR} y τ_{LR} . Así mismo se advierte que las deformaciones paralelas a las direcciones principales son ε_L , ε_T y ε_R , y las deformaciones angulares se representan como γ_{LT} , γ_{TR} y γ_{LR} .

$$\varepsilon_{kl} = S_{ijkl}\sigma_{ij} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

4. MATERIALES COMPUESTOS

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes de forma que las propiedades del material final son superiores a las de sus componentes; Tienen como ventaja el hecho de que su buen diseño permite el refuerzo o incluso mejoramiento de las propiedades que los constituyentes exhiben por si solos. Algunas de las propiedades que se pueden mejorar con un material compuesto son¹⁸:

- Módulo de elasticidad
- Rigidez
- Resistencia a la corrosión

4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Generalmente los materiales compuestos se clasifican en cuatro:

- Fibrosos
- Laminares
- Particulados
- Combinaciones de los anteriores

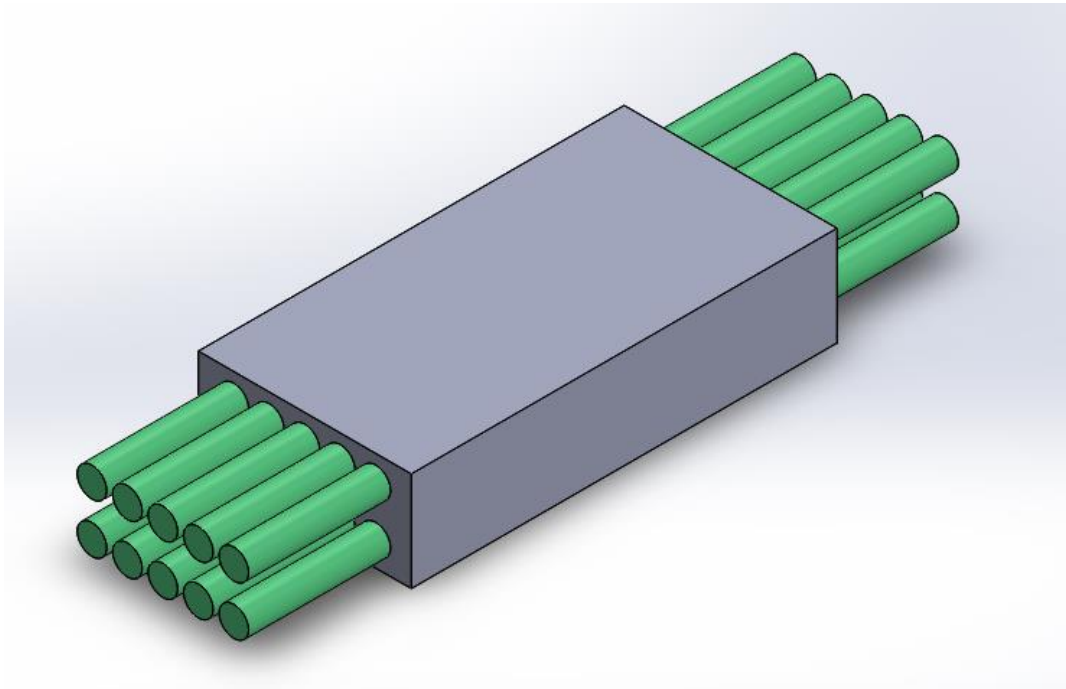
¹⁸JONES, Robert. MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS. Philadelphia: Taylor & Francis, Inc, 1999. ISBN 978-1560327127

4.1.1. COMPUESTOS FIBROSOS

Las fibras de un material normalmente son mucho más resistentes que el material en forma burda, por ejemplo, las fibras de vidrio son mucho más resistentes que el mismo vidrio, esto se debe a que a escala microscópica los materiales en fibras tienen menos imperfecciones como la alineación de los cristales o dislocaciones.

Por esto los compuestos fibrosos se caracterizan por poseer largas fibras de material dentro de una matriz de otro, en este tipo de materiales la segunda cumple la función de unir, proteger y transferir esfuerzos entre las fibras.

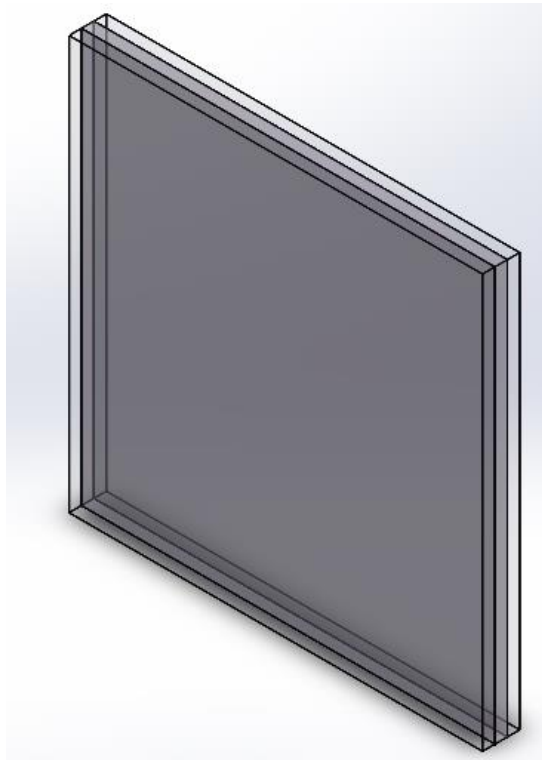
Figura 6. Estructura de un material compuesto fibroso



4.1.2. COMPUESTOS LAMINADOS

Los compuestos laminados constan de dos o más capas de diferentes materiales unidas, esto se hace con el propósito de obtener las propiedades útiles de ambos materiales. El ejemplo más común de este tipo de compuesto es el vidrio laminado de seguridad que se utiliza en los automóviles el cual consta de dos capas de vidrio que encierran a una de plástico especial.

Figura 7. Capas de vidrio de seguridad



4.1.3. COMPUESTOS PARTICULADOS

Como su nombre lo indica consisten de partículas de uno o varios materiales suspendidas en matriz de otro, el ejemplo más común es el concreto, generalmente no se habla de este como material compuesto debido a que es objeto de estudio de la ingeniería civil, aun así podría decirse que es el compuesto más común y corriente fabricado por el hombre.

Figura 8. Estructura del concreto



*Fuente: 34. Pixabay. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<https://pixabay.com/en/wall-concrete-stone-concrete-wall-3075140/>*

4.1.4. COMBINACIÓN DE LOS ANTERIORES

La combinación de los diferentes tipos de materiales resultan en propiedades aún mejores como es el caso de concreto reforzado, como ya se explicó este es un

material compuesto particulado, pero también es fibroso debido a las largas barras de metal.

4.2. MECÁNICA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Debido a que el material trabajado en este proyecto es un compuesto de tipo laminar, la teoría acerca de la mecánica se concentrará en este tipo, sin embargo, no se debe generalizar en la teoría mostrada a continuación para las demás clases de compuestos.

4.2.1. MECÁNICA DE LOS COMPUESTOS LAMINARES

La teoría clásica de laminados permite analizar laminados no isométricos con láminas orientadas en forma arbitraria que pueden conllevar a combinaciones complejas de deformaciones por esfuerzos de tracción, flexión y torsión, sin embargo, en esta teoría cada lámina se asume en un estado de esfuerzos planos y los esfuerzos interlaminares se desprecian.

Para esta teoría se asumen ciertas condiciones:

- La placa consiste de láminas ortotrópicas unidas con su eje principal orientado en dirección arbitraria respecto al plano xy .
- El espesor " t " de la placa es mucho más pequeño que su longitud a lo largo de los bordes a y b .
- Los desplazamientos u , v y w son pequeños comparados con el espesor.
- Las deformaciones en el plano ε_x , ε_y y γ_{xy} son pequeñas comparadas con la unidad.

- Las deformaciones por esfuerzos cortantes trasversales γ_{xy} y γ_{yz} se desprecian.
- Los desplazamientos tangenciales u y v son funciones lineales de la coordenada z .
- La deformación normal transversal ε_z es despreciable.
- Cada lámina obedece la ley de Hooke.
- El espesor t de la placa es constante.
- Los esfuerzos de corte trasversales se desvanecen en las superficies de la placa.

De la asunción 5 y 6 se define la hipótesis de deformación de Kirchhoff que dice que las normales a la superficie del medio permanecen derechas y normales durante la deformación. Según las asunciones 6 y 7, los desplazamientos se pueden expresar como:

$$\begin{aligned}
 u &= u^0(x, y) + zF_1(x, y) \\
 v &= v^0(x, y) + zF_2(x, y) \\
 w &= w^0(x, y) = w(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Donde u^0 y v^0 son desplazamientos tangenciales de la superficie media a lo largo del eje x y y .

Utilizando la Asunción 5 y la ecuación 10 encontramos que:

$$\begin{aligned}\gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = F_1(x, y) + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = F_2(x, y) + \frac{\partial w}{\partial y} = 0\end{aligned}\tag{14}$$

$$F_1(x, y) = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad F_2(x, y) = -\frac{\partial w}{\partial y}\tag{15}$$

Sustituyendo 10 en 12 se tiene que:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \epsilon_x^0 + z\kappa_x \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \epsilon_y^0 + z\kappa_y \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy}\end{aligned}\tag{16}$$

Donde las deformaciones en la superficie media son:

$$\epsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x}, \quad \epsilon_y^0 = \frac{\partial v^0}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x}\tag{17}$$

De forma que las relaciones esfuerzo-deformación en lámina se pueden definir como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 + z\kappa_x \\ \epsilon_y^0 + z\kappa_y \\ \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Donde k se refiere a la k -ésima lamina y Q_{ij} son las componentes de la transformada de la matriz de rigidez de la lámina.

5. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método del elemento finito o F.E.A (Finite Element Analysis) es una técnica numérica que se utiliza para solucionar ecuaciones diferenciales parciales.

En muchos casos, en el ejercicio de la ingeniería, se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones de un continuo elástico. Los casos particulares de carga de dicho continuo son infinitos, de forma que para poder hacer una aproximación mediante el método del elemento finito se recurre a los supuestos siguientes:

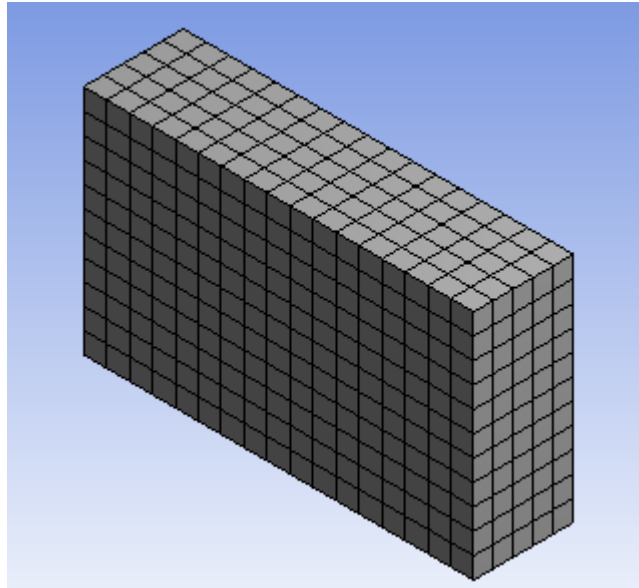
- El continuo (sólido) se divide, mediante líneas o volúmenes imaginarios, en un número de “elementos finitos”.
- Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos denominados nodos que se sitúan en sus contornos. Los desplazamientos de dichos nodos son las incógnitas fundamentales del problema.
- Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.

- Las funciones de desplazamiento definen el estado de deformación dentro de cada elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las deformaciones iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y, por consiguiente, también en sus contornos.
- Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.

La forma adecuada de cada elemento depende de las condiciones del problema, además, la cantidad de nodos por elemento es variable y en general a mayor cantidad de nodos más precisos los resultados. El conjunto total de divisiones que conforman a los “elementos finitos” que a su vez conforman el continuo se conoce como malla y su refinamiento también es fundamental en la exactitud de la solución. No todas las mallas de un mismo tipo de elemento para un problema específico son iguales ya que el tamaño del “elemento finito” puede cambiarse, generando cada vez mallas diferentes. En general, entre más pequeños los elementos, mejores serán los resultados, es decir, más cercanos estarán a la solución real¹⁹.

¹⁹ZIENKIEWIKS, O.C. TAYLOR, R.L. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. Madrid : McGraw-Hill, 1999. ISBN 84-481-0178-2.

Figura 9. Malla de un Sólido



5.1. MÉTODO GALERKIN

Para ilustrar un poco el funcionamiento del método se realizara un ejemplo con la distribución de temperatura en un depósito de calor la cual está regida por la siguiente ecuación diferencial:

$$\nabla * (-k\nabla T) = g(T, X) \text{ en } \Omega \quad (19)$$

Donde ∇ es la divergencia, k es la conductividad térmica, T es la temperatura del depósito en un punto determinado, g representa una fuente de calor que varía según la temperatura del depósito y la posición espacial que se expresa como $X = X(x, y, z)$ y Ω es el dominio de la función. El siguiente paso es multiplicar ambos lados de la ecuación por la función de prueba φ e integrar en el dominio:

$$\int \nabla * (-k\nabla T)\varphi dV = \int g\varphi dV \text{ en } \Omega \quad (20)$$

Se supone que la función de prueba y la solución T pertenecen a espacios de Hilbert, estos son espacios matemáticos de infinitas dimensiones con funciones de propiedades específicas que se pueden manipular como vectores ordinarios. Así pues, el método de los elementos finitos es una forma sistemática de transformar estas funciones de dimensiones infinitas en funciones finitas y por último en vectores ordinarios.

En el llamado método Galerkin se asume que la solución T pertenece al mismo espacio de Hilbert que las funciones de prueba. Utilizando la integración por partes se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\int k\nabla T * \nabla\varphi dV + \int (-k\nabla T) * \mathbf{n}\varphi dS = \int g\varphi dV \text{ en } \Omega \quad (21)$$

El método Galerkin permite la discretización las ecuaciones del modelo matemático para obtener las ecuaciones del método numérico. La discretización implica buscar una solución aproximada de T en un subespacio de Hilbert finito de forma que $T \approx Th$ esto implica que la solución aproximada puede ser expresada como una combinación lineal de funciones base Ψ_i que pertenecen al subespacio:

$$Th(X) = \sum_i T_i \Psi_i(X) \quad (22)$$

Luego la forma discretizada de cada función Ψ_j se vuelve:

$$\begin{aligned} \sum_i T_i \int k \nabla \Psi_i * \nabla \Psi_j dV + \sum_i \int (-k T_i \nabla \Psi_i) * \mathbf{n} \Psi_j dS \\ = \int g \left(\sum_i \Psi_i T_i \right) \Psi_i dV \end{aligned} \quad (23)$$

Las incógnitas son los coeficientes T_i en la aproximación de la función $T(X)$. Una vez que el sistema está discretizado y se imponen las condiciones de frontera se obtiene un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\mathbf{A} * \mathbf{T}_h = \mathbf{b} \quad (24)$$

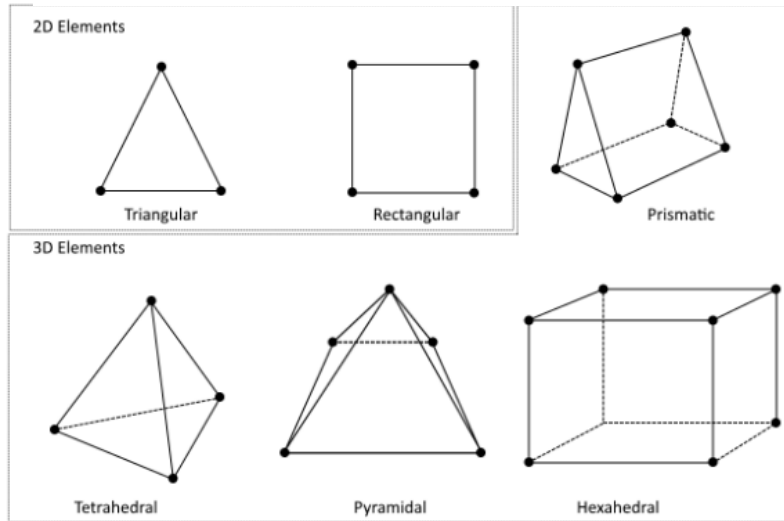
Donde \mathbf{T}_h es el vector de incógnitas, \mathbf{A} es una matriz $n \times n$ que contiene los coeficientes T_i de cada ecuación, \mathbf{b} es un vector de dimensión 1 a n^{20} .

5.2. TIPOS DE ELEMENTOS

²⁰ 21.COMSOL. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.] <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.

Los elementos más comunes para la resolución de problemas de dos y tres dimensiones se muestran a continuación:

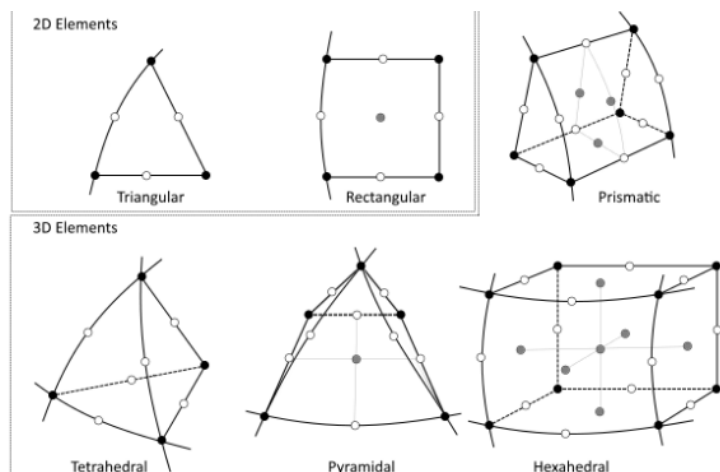
Figura 10. Tipos de elementos 2D y 3D



Fuente: COMSOL. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.] <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.

Para la solución más aproximada o de problemas más complejos se utilizan elementos cuadráticos de la forma:

Figura 11. Tipos de elementos cuadráticos 2d y 3d



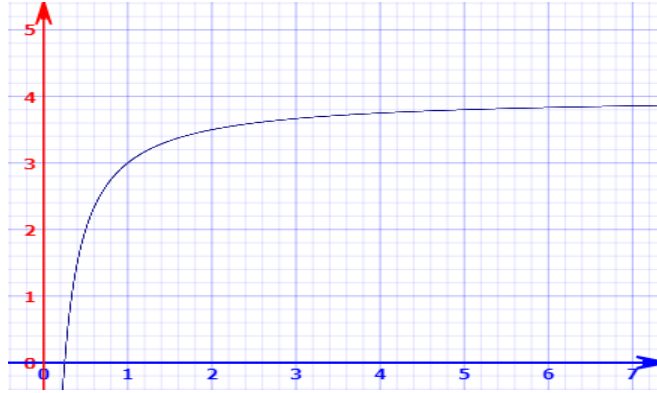
Fuente: COMSOL. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.]
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.

La diferencia entre la solución numérica de las ecuaciones y la solución exacta depende de la calidad de la malla y de que los elementos utilizados para resolver cada problema específico sean los correctos.

Para conocer que tan acertada es una malla respecto a otra se utiliza un método denominado convergencia de malla. Idealmente entre más fina la malla (entre más pequeños y numerosos los elementos) mayor será su aproximación a la solución real, sin embargo, una cantidad muy grande de elementos puede traer consecuencias negativas, la más común de estas es la cantidad de tiempo que toma cada simulación si no se tiene la capacidad computacional. El método de convergencia de malla es simplemente comparar la solución del problema arrojada por diferentes mallas cada vez más finas de forma que se llegue a un comportamiento asintótico en los valores de la solución, así se puede asumir que una vez se observa este comportamiento la solución ha llegado a convergencia y los valores obtenidos son suficientemente cercanos a la solución real que no sería

necesaria una siguiente simulación con una malla más fina debido a que los valores de la solución no cambiaran significativamente.

Figura 12. Comportamiento asintótico de una curva



Fuente: MATH is FUN. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.] <https://www.mathsisfun.com/data/grapher-equation.html>.

6. SIMULACIÓN PRELIMINAR

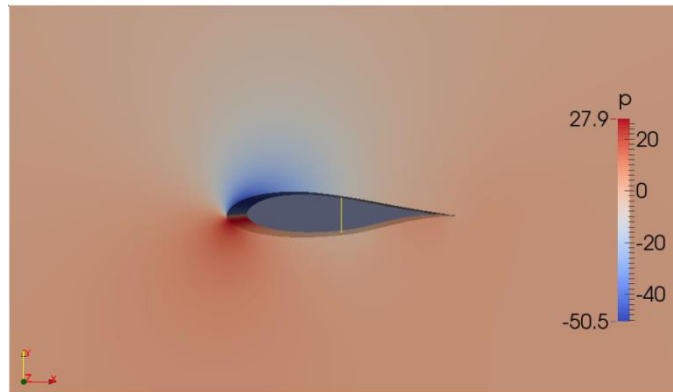
Diversos estudios han sido enfocados hacia el análisis del comportamiento mecánico de los álabes de aerogeneradores de eje vertical, como los realizados por Liu y Xiao ²¹ en su investigación, que muestran la relación de la rigidez de los álabes respecto a la eficiencia energética obtenida, de modo que se debe optar por álabes suficientemente rígidos. A demás se conoce que las contribuciones aerodinámicas a las cargas de los álabes de VAWTs son influyentes en el comportamiento mecánico tal como lo muestra Raciti²² en su investigación con el método de elementos finitos y dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), por lo cual se prioriza el estudio a cargas aerodinámicas generadas por condiciones de viento de regiones específicas, tal que se fomente el desarrollo de estas tecnologías en países emergentes como lo es Colombia.

Figura 13. Distribución de presiones en perfil DU06W200

²¹LIU, Wendi; XIAO, Qing. Investigation on Darrieus type straight blade vertical axis wind turbine with flexible blade. *Ocean Engineering*, 2015, vol. 110, p. 339-356.

²²CASTELLI, Marco Raciti, et al. Numerical evaluation of aerodynamic and inertial contributions to Darrieus wind turbine blade deformation. *Renewable Energy*, 2013, vol. 51, p. 101-112.

Gracias a los estudios realizados por García, Jaramillo y Chacón²³ en la falla



Cortesía: GARCÍA RODRÍGUEZ, L. Análisis Aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD . Bucaramanga: UIS, 2014.

geográfica del cañón de Chicamocha (Colombia) se proporcionaron alternativas de perfiles para ser usados en dicha zona, especificando así la selección de la data que junto con los parámetros de diseño suministrados por el estudio realizado por Islam, Fartaj y Carrievau²⁴ conforman la geometría del aerogenerador que se muestra en esta simulación.

Se pensó en utilizar como materia prima constituyente de los álabes de aerogeneradores un material compuesto de origen natural desarrollado a partir de la palma del corozo, comúnmente conocida como palma de lata, el cual ha sido estudiado y caracterizado por Chávez, García y Pertuz²⁵ con el fin de ser integrado a aplicaciones ingenieriles y de nuevas tecnologías, motivos suficientes para plantear un modelo que sirva de estudio para la disposición y el dimensionamiento de los álabes que utilicen este nuevo material.

Figura 14. Tallo Palma de Lata

²³GARCIA RODRIGUEZ, L. Análisis Aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD . Bucaramanga: UIS, 2014.

²⁴ISLAM, Mazharul; FARTAJ, Amir; CARRIVEAU, Rupp. Analysis of the design parameters related to a fixed-pitch straight-bladed vertical axis wind turbine. Wind Engineering, 2008, vol. 32, no 5, p. 491-507.

²⁵ CHÁVEZ. Op. Cit., p.14.

Figura 15. Esfuerzo-Deformación real de la palma de lata



Cortesía: CHÁVEZ D, GARCÍA F, PERTUZ A. Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la pala de lata. Bucaramanga: UIS, 2016.

Cortesía: CHÁVEZ D, GARCÍA F, PERTUZ A. Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la pala de lata. Bucaramanga: UIS, 2016.

Esta primera simulación se llevó a cabo para verificar el correcto comportamiento y viabilidad del estudio, se realizaron simplificaciones al modelo del álabe y se extrapolaron propiedades del material como se mostrará posteriormente en este capítulo.

Para la simulación se utilizó el programa ANSYS²⁶, el cual permite realizar el modelo en tres dimensiones del álabe, incorporar las propiedades del material y trabajar con el compuesto seleccionado para el estudio.

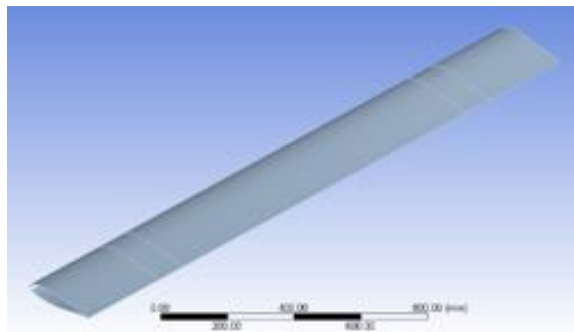
²⁶ANSYS. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.] <https://www.ansys.com/>.

6.1. EL MODELO

El modelo 3D simulado fue el de un álabe recto de turbina eólica de eje vertical, el perfil seleccionado y las presiones del viento a las que está sometido el modelo y la longitud de cuerda trabajada de 0.25 m fueron tomadas de García²⁷, el cual llega a la conclusión que el mejor perfil a utilizar en esta ubicación geográfica es el DU06W200, el perfil de presiones se observa en la Figura 21.

En el estudio de Fartaj²⁸, se hace una recomendación acerca de la relación de aspecto del álabe, se expresa que dicha relación debe ser mayor a 7.5, por lo tanto, se ha optado por trabajar con una relación de 8:1, así la longitud del álabe es de 2 m.

Figura 16. Modelo del álabe utilizado

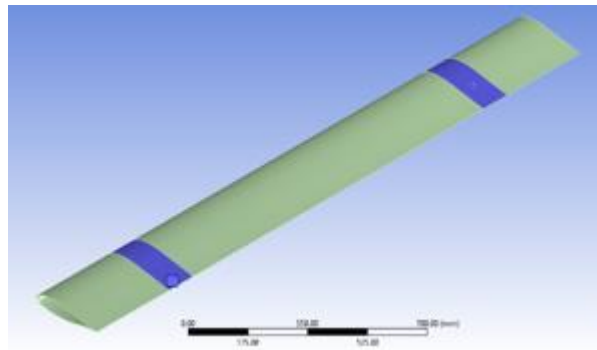


Para el análisis realizado, la fuerza sobre la mayor parte de los elementos de contorno es la generada debido a la presión que ejerce el viento sobre el álabe al interactuar con este, en ciertos otros existe la condición de no desplazamiento o empotramiento debido a que junto a estos se encuentra el brazo que une al álabe con el eje principal del aerogenerador.

²⁷ GARCIA. Op. cit., p. 41.

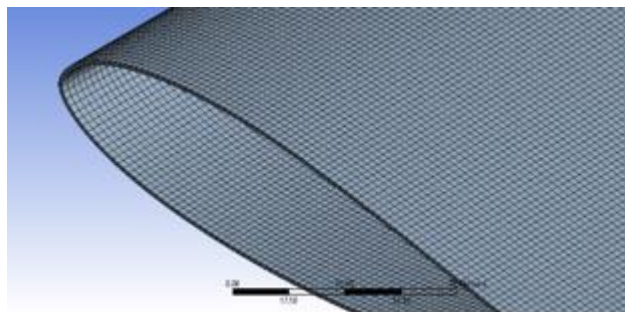
²⁸ FARTAJ. Op. cit., p.41.

Figura 17. Secciones fijas del álabe



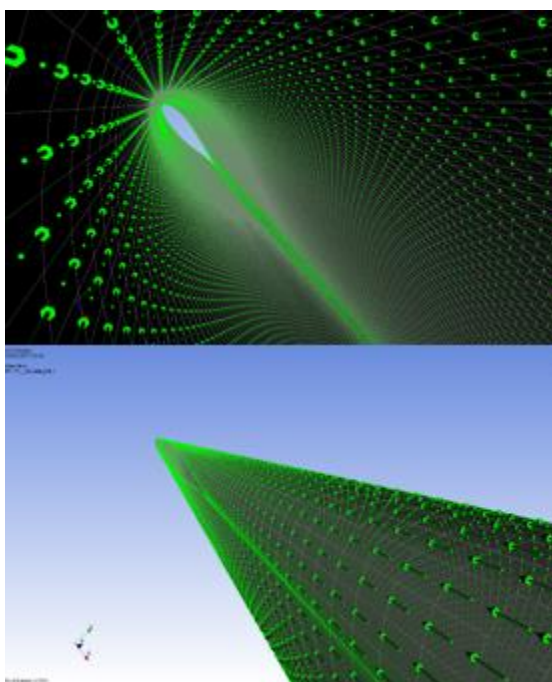
El mallado se realizó en el álabe empezando con una malla burda que se fue refinando para tomar en cuenta el aspecto de convergencia de malla.

Figura 18. Mallado del modelo del álabe



La dirección principal del material fue longitudinal y la disposición de cada fibra fue de 0° respecto a la dirección principal, esto para tener en cuenta que la alta rigidez del material impide que las fibras se orienten siguiendo la forma del perfil.

Figura 19. Dirección principal de las fibras



6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA DE LATA

La palma de lata se ha usado principalmente como material de construcción, aplicándose en cubiertas de techos y desempeñando el papel de refuerzo para muros en las casas de zonas aledañas a los ríos en algunas regiones tropicales de Colombia, cabe destacar que en la actualidad es aplicada también en mallas de refuerzo para losetas y bebederos como lo muestran Gil, Prada y Rey²⁹ en su trabajo acerca de la caracterización de dicho material.

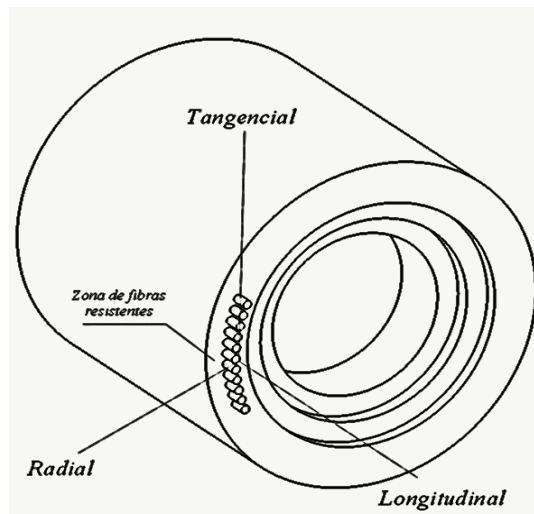
De esta palma cuya apariencia y estructura interna es similar a la del bambú, es posible obtener un material compuesto laminado³⁰ que al ser usado en aplicaciones de ingeniería, se considera que se comporta de forma ortotrópica, como lo hacen comúnmente los diferentes tipos de madera, esto hace que sea

²⁹ PRADA. Op. cit., p. 14.

³⁰ CHÁVEZ. Op. Cit., p.14.

necesario determinar sus propiedades mecánicas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, siendo esta última la dirección principal en la que se encuentran dispuestas las fibras, y las otras dos restantes correspondiendo a las direcciones debidas a los anillos de crecimiento de la planta que forman una geometría cilíndrica tal como lo muestra la Figura 28.

Figura 20. Direcciones principales de las fibras de la palma



Las propiedades mecánicas en la dirección principal (de las fibras) de la palma han sido obtenidas en el trabajo de Chávez³¹ bajo normas ASTM³², algunas de estas son mostradas en la tabla 1.

³¹ CHÁVEZ. Op. Cit., p.14.

³² American Society for Testing Materials [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <https://www.astm.org>

Tabla 1. Propiedades en la dirección de las fibras calculadas

Propiedad	Constituyente
Módulo de Young	22.7 [GPa]
Esfuerzo Último	247 [MPa]
Deformación Unitaria	0.06 [mm/mm]
Esfuerzo de Fluencia Aparente	140 [MPa]
Deformación a la Fluencia	0.01 [mm/mm]
Dureza [HV]	26.5

Fuente: CHÁVEZ D, GARCÍA F, PERTUZ A. Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la pala de lata. Bucaramanga: UIS, 2016.

Debido a que al realizar las simulaciones necesarias se debe ingresar las propiedades del material en las 3 direcciones principales, se opta por hacer una estimación de estas verificando las relaciones entre las propiedades principales de materiales similares al de estudio en esta investigación.

Se debe tener en cuenta que en esta simulación se realizó la simplificación de utilizar el material de la palma de lata en toda la geometría del álabe sin adhesivo.

Con los datos presentados y con las relaciones entre los coeficientes de Poisson de maderas comunes encontrados también en el Handbook de maderas³³, se podrán estimar las propiedades importantes para el material tal como se muestra en la Tabla 2.

³³AGRICULTURE, UNITED STATES DEPARTMENT OF. Wood Handbook- Wood as an Engineering Material. s.l.: USDA, 1999.

Cabe aclarar que los esfuerzos y deformaciones últimos y de fluencia aparente han sido calculados en la dirección longitudinal de las fibras, con lo cual se valorará la resistencia de la palma de lata en dicha dirección.

Tabla 2. Propiedades estimadas en la dirección de las fibras

Propiedad	Dirección	Magnitud
Módulo de Young	E_L	22.7 [GPa]
	E_T	1.3 [GPa]
	E_R	2.3 [GPa]
Módulo de Cortante	G_{LR}	2.02 [GPa]
	G_{LT}	1.51 [GPa]
	G_{RT}	0.017[GPa]
Relación de Poisson	μ_{LR}	0.37
	μ_{LT}	0.46
	μ_{RT}	0.703

6.3. RESULTADOS DE LA PRIMERA SIMULACIÓN

Los resultados mostrados a continuación corresponden al análisis preliminar del problema, en el cual se usa un modelo simplificado que presenta una sola lámina de 1.5 [mm] de espesor, con apoyos fijos con geometría de complejidad reducida. El análisis de los resultados obtenidos se centra en el comportamiento mecánico que se da en la dirección de las fibras.

Tras realizar la simulación se obtienen valores de desplazamientos totales alcanzando un máximo que se encuentra en la parte inferior central, este resultado tiene sentido, pues en esta parte del perfil las presiones son positivas y moderadas como ya se mostró en la Figura 21, además, el soporte se simuló sobre la parte superior del álabe, dejando la parte inferior alejada del mismo.

Figura 21. Desplazamientos totales

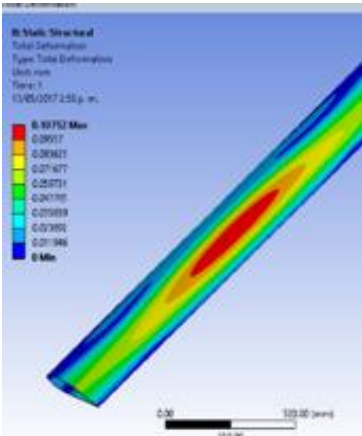


Figura 22. Esfuerzos en la dirección principal (longitudinal)

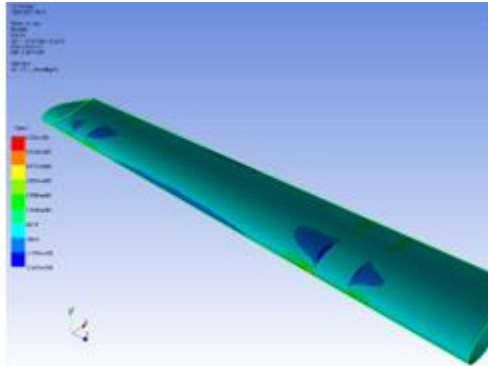
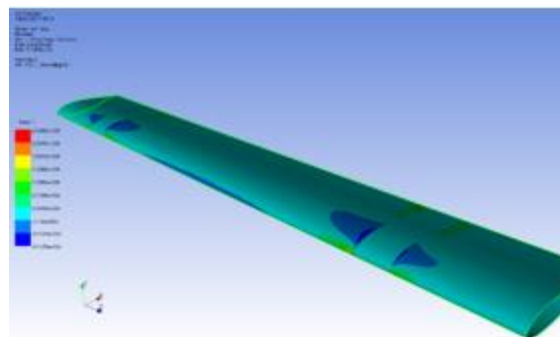


Figura 23. Deformación unitaria en dirección principal



Los resultados obtenidos de Desplazamientos totales, deformación unitaria, y esfuerzo en la dirección principal se muestran en la siguiente tabla

Tabla 3. Valores de deformación unitaria, desplazamientos totales y esfuerzo en dirección principal

Deformación Unitaria	Desplazamientos Totales [mm]	Esfuerzo [Pa]
----------------------	------------------------------	---------------

	[mm/mm]		
Mínimo	-9.7478e-6	0	-2.370e5
Máximo	2.6305e-5	0.10752	6555e5

La malla se seleccionó mediante la iteración de simulaciones, se utilizaron varias mallas, cada una más fina que la anterior hasta ver que los resultados tenían un comportamiento asintótico, de forma que el número de elemento utilizado fue 179,118.

Tabla 4. Variación de los desplazamientos totales y deformación unitaria respecto al número de elementos

Número de Elementos	Desplazamientos totales [mm]	Deformación Unitaria [mm/mm]
19360	0.107251	1.65e-5
29250	0.106617	1.90e-5
72320	0.107044	2.26e-5
179118	0.107660	2.63e-5

Como primera medida se debe observar que al hacer uso del material de palma de lata con espesor de 1.5 [mm] se confirma que en la dirección principal de las fibras y con las cargas aerodinámicas impuestas, no se presentará ruptura o deformaciones que puedan significar fallo de la integridad estructural del álabe.

Tal como se esperaba, la región que presenta mayores deformaciones corresponde a la zona central del álabe, siendo esta la zona más larga no apoyada, este comportamiento también es debido a que la distribución de presiones es uniforme a lo largo del álabe. Además, se puede verificar que el sector que muestra valores máximos de esfuerzos es el de las superficies con cargas de mayor magnitud, como lo son el borde de ataque y el borde de salida del viento en el álabe.

Es importante tener presente que los resultados obtenidos muestran el comportamiento de una sola lámina de palma de lata, es por eso que el siguiente paso podrá ser el estudio del comportamiento de este material con varias láminas y con diferentes ángulos de las fibras, lo cual permitirá vislumbrar de manera más certera el uso de este material en aplicaciones ingenieriles.

7. SIMULACIÓN CON RIGIDIZADOR INTERNO

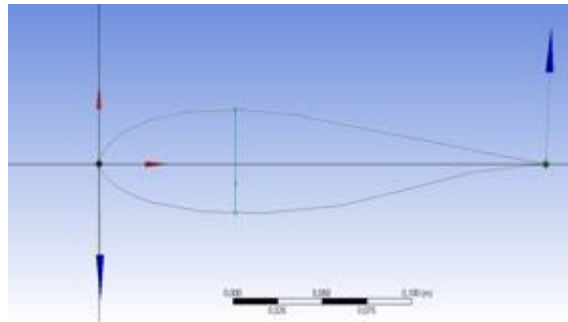
Luego de realizar la simulación preliminar se realizó una simulación en la que se utilizan varias capas de palma de lata añadiendo un rigidizador interno a la estructura del álabe para observar cómo influye esto en su comportamiento.

En este trabajo se realizaron cuatro modelos de álabe para verificar su comportamiento y comparar entre sí.

7.1. PROCEDIMIENTO

Para esta simulación nuevamente se utiliza un perfil DU06W200, se crea el modelo 3D importando las coordenadas de los puntos y luego realizando un extrusión, posteriormente se procede a posicionar el refuerzo interno del álabe, su locación está en función de la longitud de cuerda, que para esta simulación es de 25 cm, dicha función es una fracción de la longitud, donde 0 es el punto frontal del álabe, 0.5 es el punto medio y 1 es el punto posterior, Figura 33, lo cual permite que sea un parámetro modificable al realizar simulaciones en andanada.

Figura 24. Perfil del álabe. línea vertical interna indica la posición del refuerzo



Una vez realizado esto, se continuó con importar las presiones sobre el perfil generadas por el viento, Figura 21, y la definición de los soportes del álabe con los cuales está adherido al eje central de la turbina eólica, dichos soportes se simulan como un empotramiento, y por esta razón las condiciones del viento no aplican en ellos.

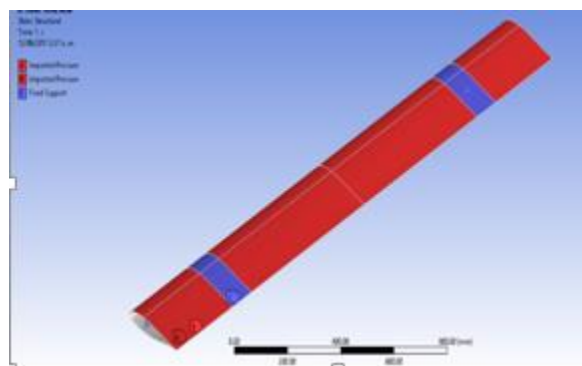
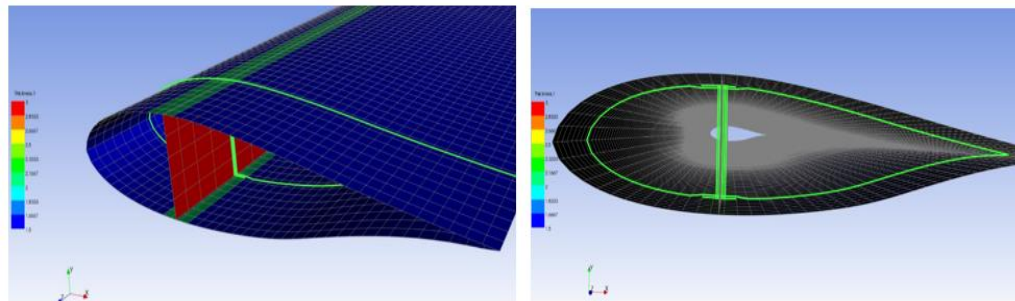


Figura 25. Cargas y condiciones de contorno impuestas

El mallado de la superficie se realiza con valores entre 26330 y 27840 elementos (dependiendo de la posición de la costilla) tipo SHELL 181 el cual es efectivo para modelar estructura de pared delgada, este además da buenos resultados en la deformación y al mismo tiempo consume pocos recursos computacionales debido a que posee 4 nodos por elemento, aun así, posee 6 grados de libertad.

Al realizar el modelo se procede a aplicar las láminas del material, para las caras externas, el laminado se realiza en dirección normal a la superficie, para el refuerzo, se colocan laminas a ambos lados de la geometría base que se encuentra dentro, además, la junta entre el rigidizador y las paredes del álabe se realiza en forma de “T” adhiriendo mediante una capa de material, Figura 36.

Figura 26. Malla, refuerzo interno y láminas de material agregadas (líneas verdes)



Con el fin de confirmar el modelo computacional se realiza en primera instancia el análisis del álabes con un material de construcción común, la fibra de vidrio unidireccional con matriz de epoxi posee un comportamiento anisótropo, de tal manera que en la dirección principal se trabaja con las propiedades de la fibra y en las direcciones restantes el modelo se rige por las propiedades del epoxi, en la Tabla 5 se muestran las características elástico-lineales del compuesto de fibra de vidrio, siendo E el módulo de elasticidad, ν el coeficiente de Poisson y G el módulo de cortante. El material se trabaja como anisótropo, en el modelo 3D ANSYS permite agregar capas de material con las propiedades en cada dirección preestablecidas de tal forma que el proceso de simulación es igual que para la Palma de Lata pero cambiando únicamente las propiedades del compuesto.

Tabla 5. Propiedades de fibra de Vidrio-Epoxy

Propiedad	Constituyente	Valor
EI	Fibra	450 [GPa]
Et	Matriz	100 [GPa]
ν	Fibra	0.4
ν	Matriz	0.3
G	Fibra	3.846 [GPa]
G	Matriz	50 [GPa]

7.2. RESULTADOS

Las simulaciones realizadas fueron de cuatro álabes, dos de palma de lata y dos de fibra-epoxy. A su vez, de los dos álabes hechos con palma uno lleva rigidizador y el otro no, igualmente se hizo con los dos de fibra-epoxy quedando de la siguiente manera:

- Álabes de palma

- Álabe de palma con refuerzo
- Álabe de fibra-epoxy
- Álabe de fibra-epoxy con refuerzo

7.2.1. ÁLABES CON FIBRA DE VIDRIO-EPOXY

Al variar la posición del rigidizador para este modelo, se encontró que debido a que las cargas impuestas por el aire son relativamente bajas respecto a la resistencia del material, el rigidizador no incluye reducción significativa de las deformaciones, aun así, este reduce apreciablemente los esfuerzos totales impuestos en el álabe.

Los valores obtenidos de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en dirección de la fibra al posicionar la costilla a 0.5 veces la longitud de cuerda del álabe (justo en el medio) junto con los valores obtenidos sin costilla se aprecian en la Tabla 6, hay que recalcar que los valores mostrados son en la dirección de la fibra. De acá se puede apreciar la reducción porcentual de desplazamientos de 7.6% por el posicionamiento de dicha costilla y el esfuerzo se reduce 12.06%.

Tabla 6. Valores para álabe de fibra-epoxy con y sin rigidizador a 0.5 de la longitud de cuerda

Álabe	Desplazamiento máximo [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación unitaria máxima [mm/mm]
Sin costilla	0.0313	0.406	1.65e-6
Con costilla	0.0289	0.357	7.01e-6

7.2.2. ÁLABES CON PALMA DE LATA

De la misma manera, con la palma de lata se obtienen los valores apreciados en la tabla 7, la posición de la costilla al igual que en los álabes de fibra-epoxy (0.5 longitud de cuerda). Se puede observar que los valores de desplazamiento disminuyen al igual que la deformación unitaria, el esfuerzo máximo incrementa debido a la configuración geométrica del rigidizador.

Tabla 7. Valores para el álabe de palma con costilla a 0.5 y sin ella

Álabe	Desplazamiento máximo [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación unitaria máxima [mm/mm]
Sin costilla	0.1072	0.406	1.65e-5
Con costilla	0.097	0.482	4.99e-6

7.2.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA POSICIÓN DEL RIGIDIZADOR

En aras de realizar la reducción de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones es necesario variar la posición relativa del rigidizador, siendo esta dada respecto a la longitud de la cuerda del perfil.

Como comparación, la Tabla 8 muestra la variación de los desplazamientos máximos totales obtenidos tanto con la Palma de Lata como con la fibra de vidrio, además, se puede apreciar dicho comportamiento en la Figura 37.

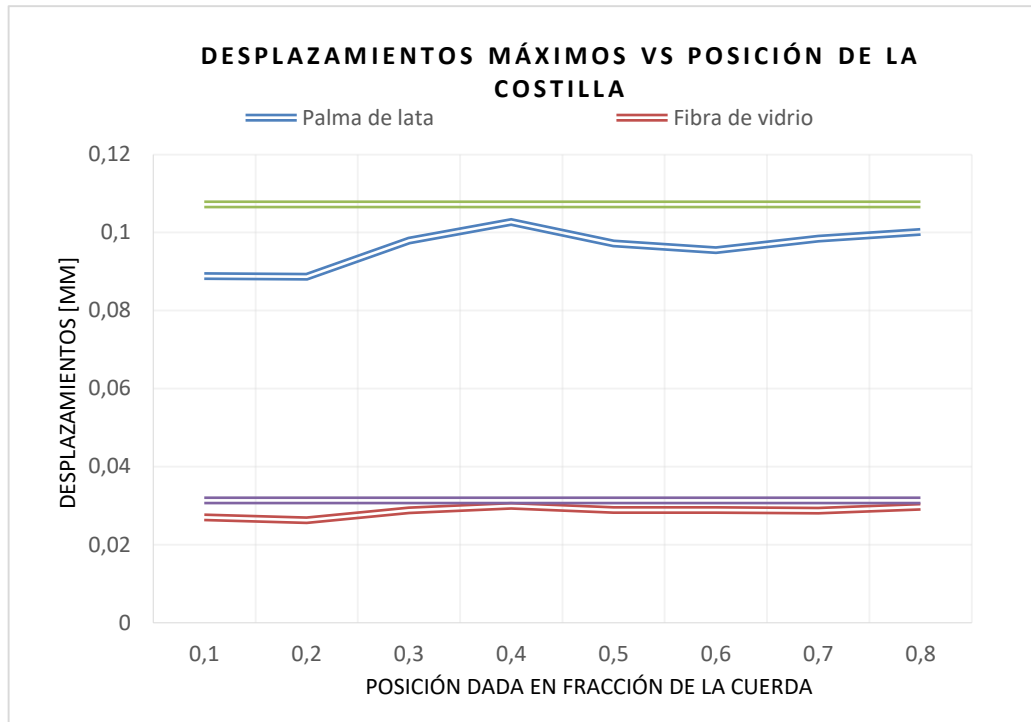
Tabla 8. Variación de los desplazamientos máximos en función de la posición del

Fracción de la cuerda	Posición desde la nariz del álabe [cm]	Desplazamientos Máximos con Palma de Lata [mm]	Desplazamientos Máximos con Fibra de vidrio [mm]
0.1	2.5	0.088857025	0.026972007
0.2	5	0.088648638	0.02624821
0.3	7.5	0.097970647	0.028838181
0.4	10	0.102685703	0.029952163
0.5	12.5	0.097174421	0.028908742
0.6	15	0.095478188	0.028868033
0.7	17.5	0.098442679	0.028714629
0.8	20	0.100154629	0.029673898

rigidizador

Cabe resaltar que los rigidizadores cumplen su función y mantienen siempre el valor de los desplazamientos por debajo del valor obtenido de las pruebas del álabe sin dicho elemento, este comportamiento es provechoso y se da tanto en el material sintético como en la Palma de Lata. De este comportamiento también sobresale que siendo 0.2 la fracción de la cuerda en la que se posiciona el rigidizador, a 5 [cm] de la nariz del álabe, se encuentra un valor mínimo de desplazamientos totales en las pruebas realizadas en esta investigación.

Figura 27. Variación de los desplazamientos totales en los cuatro álabes



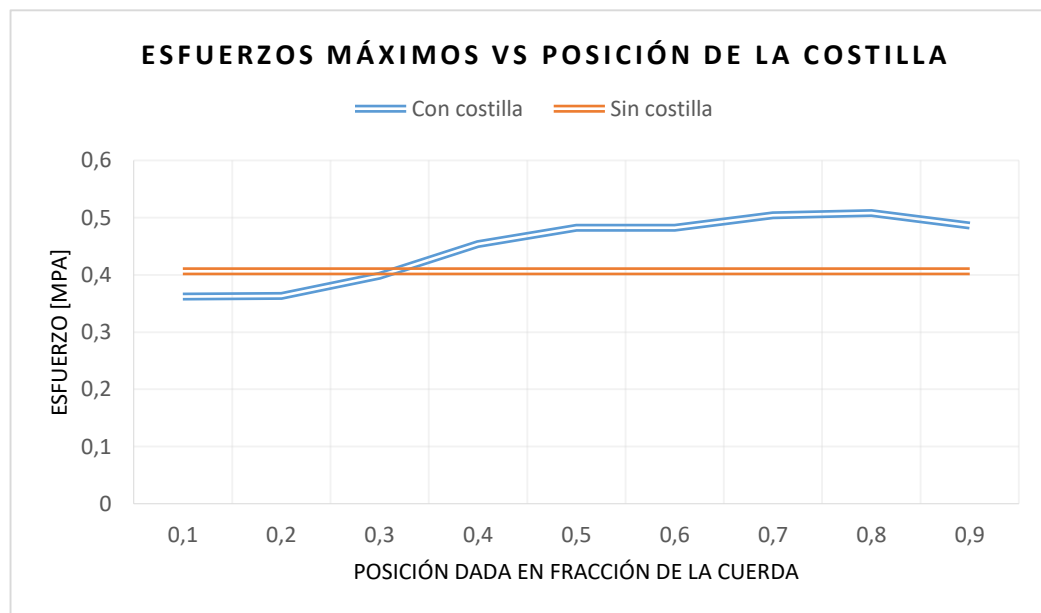
Para la palma de lata se utilizó el parámetro de la posición del rigidizador y se realizaron simulaciones en las posiciones de 0.1 a 0.9 longitud de cuerda tratando de observar el comportamiento dependiendo de la posición del refuerzo, los resultados obtenidos fueron:

Tabla 9. Variación de los esfuerzos normales máximos en función de la posición del rigidizador

Fracción de la cuerda	Posición desde la nariz del álabo [cm]	Esfuerzos máximos [MPa]
0.1	2.5	0.362352266
0.2	5	0.363451672
0.3	7.5	0.398538461
0.4	10	0.453863301
0.5	12.5	0.482297686
0.6	15	0.482407418
0.7	17.5	0.50396784
0.8	20	0.508053588
0.9	22.5	0.486075918

Graficando los resultados de la Tabla 9 se puede observar más claramente un comportamiento interesante en el álabo de palma de lata.

Figura 28. Gráfico de la variación de los esfuerzos normales máximos en función



7.3. CONCLUSIONES ÁLABE CON RIGIDIZADOR

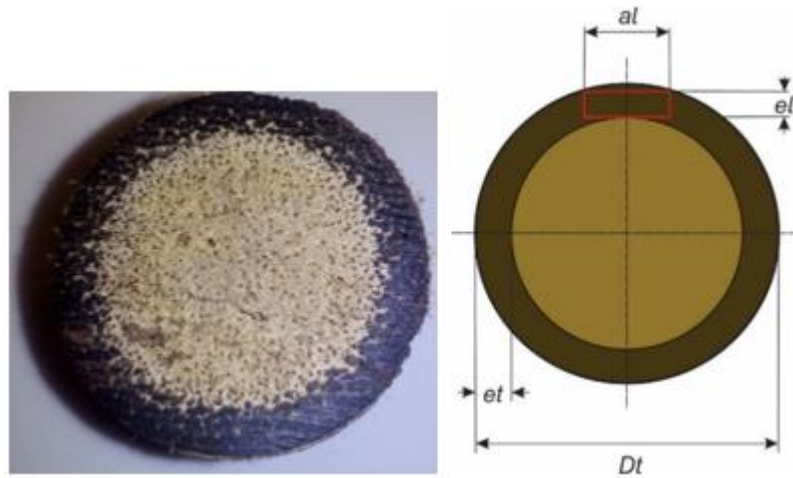
Los resultados de deformaciones y esfuerzos de los cuatro álabes simulados (dos de palma y dos de fibra de vidrio) muestran claramente que los refuerzos internos, tanto en la palma como en la fibra, tienen un efecto notable. Al observar el comportamiento de los dos álabes con refuerzo respecto a sus análogos sin los mismos se puede ver que sí se presenta una reducción general de esfuerzos y deformaciones con excepciones en algunos puntos, estas últimas conllevan a darse cuenta que la posición del refuerzo también es importante ya que no es útil en todos los puntos, de hecho, para la palma de lata, entre más alejado esté del frente del álabe mayores serán los esfuerzos soportados llegando incluso al punto de rebasar los esfuerzos del mismo cuando no posee rigidizador. Por otro lado, al acercarse más a la parte anterior, los esfuerzos disminuyen junto con las deformaciones, las cuales experimentan un pico en 0.4 de longitud de cuerda, pero continúan su descenso al acercarse a 0.2.

De los datos obtenidos se puede concluir que los refuerzos internos en un álabe de palma de lata son una forma correcta de reducir los esfuerzos y deformaciones producidas por las solicitaciones siempre y cuando se tomen en cuenta sus posiciones, estas no se deben pasar por alto o se podría incurrir en el error de aumentar las solicitaciones en vez de disminuirlas.

8. CARACTERIZACIÓN DE LA PALMA DE LATA

La palma de lata se caracteriza por presentar tamaños de tallos entre 2.5 y 4 centímetros de diámetro y alturas de entre 3 y 8 metros, las propiedades mecánicas más adecuadas son encontradas en la parte externa del tallo y de un color oscuro como se muestra en la Figura 39, el espesor depende de la edad de la palma y puede llegar hasta los 3 milímetros.

Figura 29. Sección transversal del tallo de la palma de lata



Para la construcción de las probetas y para utilizar esta palma como material constitutivo de elementos de máquinas tales como álabes de turbinas, es necesario obtener el material en forma de laminillas, las cuales se consiguen de la zona oscura del tallo anteriormente descrita, por lo tanto, su geometría estará limitada por las dimensiones del tallo, en la figura 39 se muestra las medidas principales del tallo y de las laminillas, D_t : se refiere al diámetro externo del tallo, et : es el espesor de la región de fibras resistentes, al : es el ancho de la laminilla y et : espesor de laminilla. Al trabajar con la palma se encontró que el espesor máximo obtenido es de 2 milímetros y el ancho máximo es de 2 centímetros, observándose que ambos no pueden estar presentes en la misma laminilla.

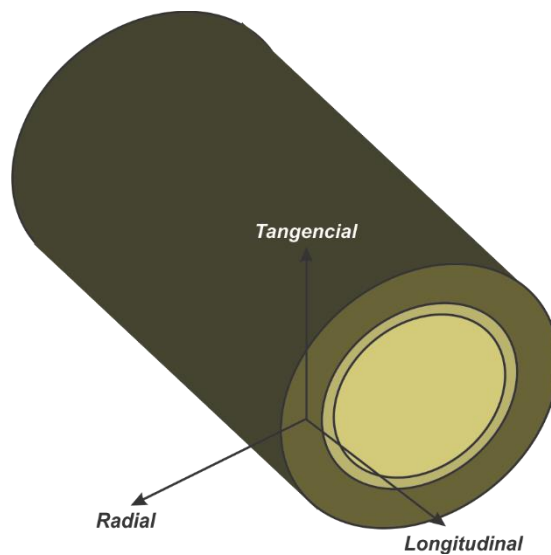
8.1. ANISOTROPÍA DE LA PALMA DE LATA

Los materiales ortótropos son una clase especial de materiales anisótropos en los cuales se encuentra 3 planos de simetría, haciendo que se encuentren diferencias

en las propiedades en las direcciones de un sistema de coordenadas ortogonal, comúnmente para las maderas comunes y en este caso también para la palma estas direcciones están definidas por los ejes Longitudinal, Tangencial y Radial que se definen a su vez por las capas de crecimiento del tallo como se muestra en la Figura 40.

Para definir la matriz de elasticidad de un material anisótropo es necesario conocer las 36 constantes las cuales permiten definir la ley de Hooke tridimensional, en el caso de los materiales ortótropos debido a la simetría anteriormente mencionada, se reducen a 12 las constantes necesarias para definir el problema elástico.

Figura 30. Direcciones principales en la palma



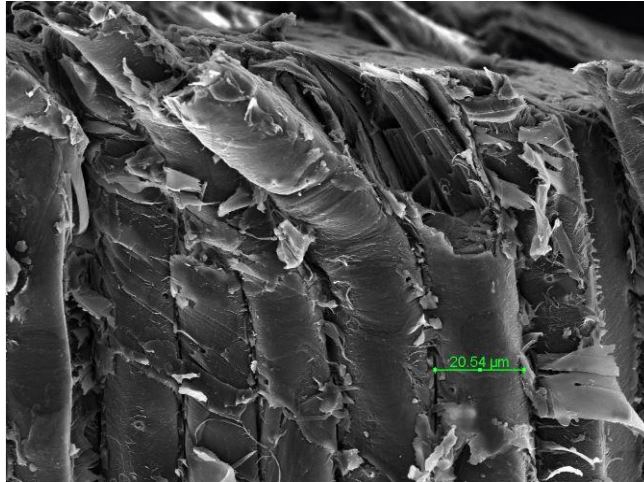
En la sección 2.2 se habló de la matriz de flexibilidad que es la inversa de la matriz de rigidez para un material cualquiera. Ahora bien, para el caso de la matriz de

flexibilidad las constantes de la diagonal principal son los inversos de los módulos de elasticidad y módulos de cortante del material y los términos restantes son los negativos de los coeficientes de Poisson divididos por los módulos de elasticidad correspondientes.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Únicamente 9 de estas 12 constantes son independientes, esto debido a que la matriz de flexibilidad es simétrica respecto de su diagonal principal haciendo que $S_{12} = S_{21}$, $S_{13} = S_{31}$ y $S_{23} = S_{32}$.

Figura 31. Fotografía MEB de la Palma de Lata



*Cortesía: MSc. Alberto Pertuz. Profesor adjunto
Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad
Industrial de Santander*

En la figura 41 se distingue la similitud que hay entre la estructura de la palma de lata y la de los compuestos de fibra de vidrio, por ello se prevé que la palma de lata puede presentar un eje de simetría que suele encontrarse en los compuestos sintéticos, estos materiales presentan una isotropía transversal, en el caso de la palma de lata esto indicaría que las propiedades en las direcciones radial y tangencial son iguales.

Para un material con isotropía transversal únicamente son necesarias las constantes S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{23} , S_{66} de modo que la ecuación 25 podría reescribirse como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

A demás de esto se cumple la dependencia del cuarto término de la diagonal principal tal que:

$$S_{44} = 2 * (S_{22} - S_{23}) \quad (27)$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$G_{RT} = \frac{E_T}{2*(1+\nu_{RT})} \quad (28)$$

Finalmente, para definir totalmente las propiedades elásticas de la palma se necesitará encontrar los módulos elásticos E_L y E_T , el coeficiente de Poisson ν_{LT} , el módulo de cortante G_{LT} y alguno de las propiedades en el plano RT, ya sea el coeficiente de Poisson ν_{RT} o el módulo de cortante G_{TR} .

8.2. MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN

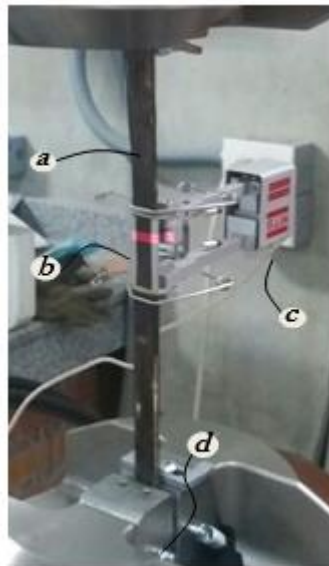
Utilizando como guía la norma ASTM D3039³⁴ para materiales compuestos y entendiendo que la madera es un material compuesto conformado por fibras de celulosa y una matriz de hemicelulosa y lignina (Winandy³⁵ y Brandt³⁶), y adicionalmente teniendo en cuenta la norma se realizaron las pruebas de tracción para obtener los módulos de Young en las 3 direcciones principales, el ensayo en la dirección radial se hace con el fin de verificar la ortotropía de la Palma. Para los ensayos se utilizó una máquina MTS Bionix Tabletop Modelo 370.02 con una celda de carga con capacidad de 25 kN y un desplazamiento de ± 57 [mm].

³⁴ American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2000.

³⁵ WINANDY J, ROWELL R. The Chemistry of Wood Strength. U.S Department of Agriculture ,Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53705. ISBN 9780841207967

³⁶ BRANDT, Agnieszka, et al. Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. Green chemistry, 2013, vol. 15, no 3, p. 550-583.

Figura 32. Montaje para pruebas en dirección longitudinal



- a) *Probeta*
- b) *Medición por extensómetro Laser*
- c) *Extensómetro*
- d) *Mordazas de la Máquina.*

En la Figura 43 se muestra una probeta utilizada en los ensayos de tracción longitudinales, para dicho ensayo se usaron 3 probetas de geometrías similares las cuales no se llevaron hasta la ruptura total, aun así, se apreció rompimiento de algunas fibras. Con este ensayo se pudo determinar el módulo de elasticidad del material y los límites de esfuerzo y deformación del material. Conjuntamente, se determinó el módulo de Poisson en base de la norma de materiales compuestos ASTM E 132-04³⁷ por medio de las mediciones de los extensómetros mostrados en la misma figura.

³⁷ American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature. 2004

Figura 33. Montaje para pruebas en la dirección tangencial



- a) *Probeta*
- b) *Adhesivo Epóxico*
- c) *Sujeciones de la probeta*
- d) *Mordazas de la Máquina.*

Para las pruebas de tracción de las direcciones restantes cuyos montajes se observan en la figura 44 y 45, se hizo necesario diseñar elementos adicionales

Figura 34. Montaje para pruebas en dirección radial.

- a) *Probeta y Adhesivo Epoxico.*
- b) *Sujeciones de la Probeta*
- c) *Mordazas de la maquina*



para sostener las laminillas a la máquina con base en la norma ASTM D1037³⁸.

Además, se incluyó un adhesivo epóxico de alta resistencia y rigidez para unir la palma a los artefactos de sujeción.

Se realizaron también pruebas para determinar las propiedades de cortante de la

Figura 35. Montaje para pruebas de cortante



- a) *Probeta*
- b) *Sujeciones de la probeta*
- c) *Laser para Alineación de Ejes y de Entallas*
- d) *Sujeción a la Máquina*

palma con base en la norma ASTM D7078³⁹, de nuevo, debido a las reducidas dimensiones de las probetas de palma, se hace necesario disminuir la escala de estas respecto a las sugeridas por la norma.

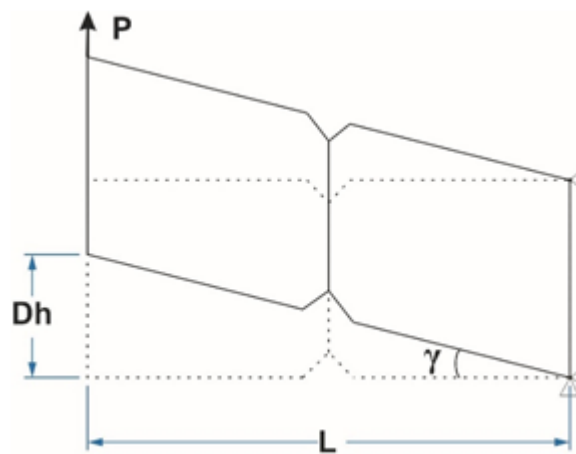
³⁸ American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base and Particle Panel Materials. 1999.

³⁹ American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method. 2005

Para poder realizar estos ensayos fue necesario adicionar a la máquina un par de suplementos ubicados en ambas mordazas tal como se aprecia en la figura 45, se hicieron en total 6 pruebas de cortante, de las cuales 3 fueron hechos tratando de cortar la fibra de la palma de forma perpendicular y las otras 3 haciendo el corte paralelo a las fibras, con el fin de determinar los coeficientes G_{LT} y G_{TR} respectivamente. Adicionalmente se utilizó el láser con el fin de alinear los ejes de la máquina con las entallas de las probetas.

Debido a que en la prueba se miden los desplazamientos que se dan a lo largo del eje de aplicación de la fuerza, se hace necesario transformar dichos desplazamientos para obtener las deformaciones angulares, para ello se relacionan los parámetros con la ecuación 29, siendo D_h los desplazamientos medidos en la prueba, L La longitud libre de la probeta y γ el ángulo de deformación, tal y como se muestra en la figura 47.

Figura 36. Geometría de las probetas de cortante



$$\tan(\gamma) = D_h/L \quad (29)$$

Para ángulos pequeños:

$$\tan(\gamma) \cong \gamma \quad (30)$$

Por lo cual la ecuación 29 quedaría:

$$\gamma = D_h/L \quad (31)$$

8.3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

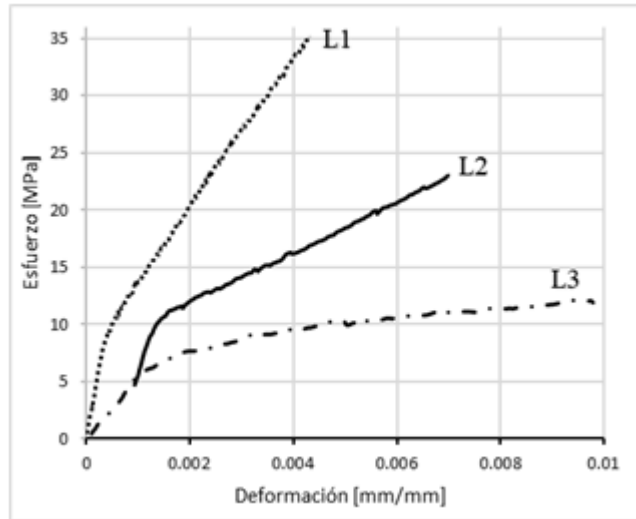
8.3.1. TRACCIÓN LONGITUDINAL

La figura 48 muestra la gráfica esfuerzo – deformación para la probeta longitudinal de las 3 pruebas realizadas, en primera medida se observa que en la zona de inicio entre valores de esfuerzo de 6 y 11 [MPa] se presenta una zona con una pendiente pronunciada, seguido de esto se advierte la reducción de la pendiente, según trabajos anteriores⁴⁰ se ha podido distinguir que esta reducción de pendiente es causa del rompimiento de la primera fibra, y se presume que esta fibra pertenece a la región externa del tallo, debido en esta zona la palma presenta mayor dureza y fibras de menor tamaño.

Ha de aclararse que las 3 curvas nombradas como L1, L2 y L3 representan probetas obtenidas de diferentes tallos de palma, de las cuales también fueron obtenidas las probetas para los ensayos en las direcciones restantes.

⁴⁰ CHÁVEZ. Op. Cit., p.14.

Figura 37. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección longitudinal.



El módulo de elasticidad promedio entre las 3 pruebas para la zona de alta rigidez es de 13.15 [GPa], se observa una diferencia notable respecto al trabajo de Chávez y García⁴¹, que puede deberse a el uso de tallos de palmas más jóvenes y con menor porcentaje de fibras de alta dureza, se denota también que el espécimen nombrado como L1 posee módulo de elasticidad similares al estudio mencionado, aun así, se marca una clara diferencia en el esfuerzo de cambio de pendiente respecto a los ensayos mencionados, siendo este esfuerzo promediado con de las 3 probetas con un valor de 8.18 [MPa] correspondiendo con una deformación de 9.22×10^{-4} [mm/mm], a diferencia de los 140 [MPa] con 9×10^{-4} [mm/mm], esto evidencia nuevamente la diferencia de pendientes de los ensayos.

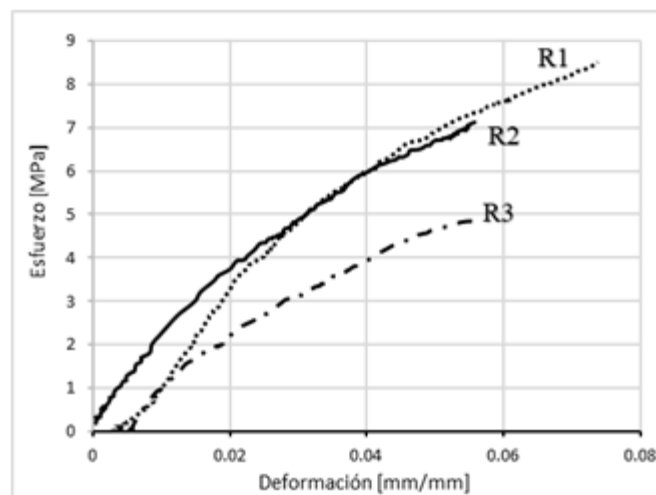
⁴¹ CHÁVEZ. Op. Cit., p.14.

8.3.2. TRACCIÓN RADIAL

La figura 49 muestra la gráfica esfuerzo–deformación para las probetas en dirección radial de las 3 pruebas realizadas nombradas como R1, R2 y R3, se encontró que el valor módulo de elasticidad promedio es de 0.121 [Gpa], con esto se evidencia una clara diferencia entre el módulo en dirección longitudinal y radial, siendo cerca de 110 veces menor entre las 2 direcciones. Se presume que el valor obtenido puede incluir errores debidos a la dificultad de realizar la unión entre la probeta de palma y el dispositivo de fijación. Puesto que en este ensayo y en el realizado en la dirección tangencial se pretende realizar una separación biológica de la matriz de la palma, se espera que para ambos ensayos los esfuerzos hallados sean de valor similar, a pesar de eso como se mostrará en la siguiente sección, se encontró una gran diferencia en los resultados de los 2 ensayos.

En esta prueba se aprecia también que el esfuerzo promedio máximo en la dirección radial es de 6.84 [MPa] con una deformación de 0.062 [mm/mm].

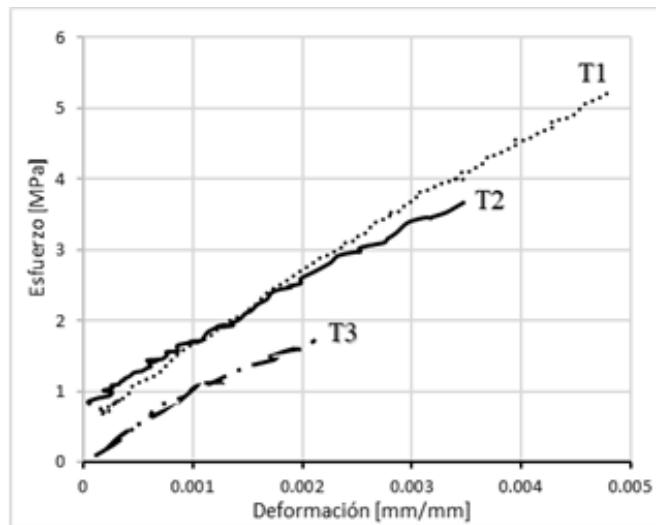
Figura 38. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección radial



8.3.3. TRACCIÓN TANGENCIAL

La figura 50 muestra la gráfica esfuerzo – deformación para las probetas en dirección tangencial, para las 3 pruebas realizadas diferenciadas por T1, T2 y T3. El módulo de elasticidad en esta dirección es de 0.832 [GPa], siendo este 15.8 veces más pequeño que el módulo en la dirección longitudinal, se percibe que los resultados obtenidos para esta dirección difieren respecto al módulo de elasticidad radial siendo 6.88 veces mayor, debido a esto no se podría decir la Palma de Lata presenta isotropía transversal, a pesar de esto se debe tener en cuenta que el método de prueba de la dirección radial presenta errores no evidenciados en los ensayos tangenciales, de tal manera que se asume que el módulo en dirección tangencial rige el comportamiento de la matriz natural de la Palma de Lata.

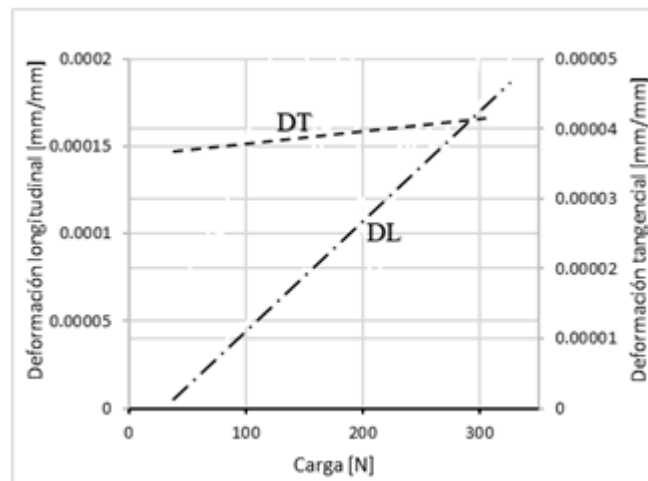
Figura 39. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas en dirección tangencial



8.3.4. COEFICIENTE DE POISSON

Se realiza un ensayo de Poisson según la norma ASTM E132-04⁴² utilizando un extensómetro convencional MTS para medir la deformación longitudinal y un extensómetro laser MTS. Para obtener la deformación tangencial. Únicamente se pudo realizar la prueba para hallar el valor del Módulo de Poisson Longitudinal-Tangencial con carga longitudinal debido a que el limitado espesor de las láminas impide medir las deformaciones en otras direcciones.

Figura 40. Gráfica de deformaciones longitudinales y tangenciales variando respecto a la aplicación de la carga



La ecuación 32 que es la relación de las pendientes de las curvas deformación longitudinal-Carga y Deformación Tangencial-Carga determinan el módulo de Poisson, estas se grafican en la figura 51 en la cual se denota como DT la medida en dirección Tangencial y como DL la obtenida en dirección longitudinal.

⁴² ASTM. op.cit.,p.79.

$$\nu_{LT} = \frac{\frac{d\varepsilon_t}{dP}}{\frac{d\varepsilon_l}{dP}} \quad (32)$$

El valor obtenido del módulo de Poisson es de aproximadamente 0.35, el cual es comparable con los valores obtenidos en el trabajo de Schniewind⁴³, este valor está dentro del rango para Poisson que se observa en Lempriere⁴⁴ siendo mayor que cero y cumpliendo que:

$$\nu_{LT} < \sqrt{\left(\frac{E_l}{E_t}\right)} = 3.98 \quad (33)$$

El coeficiente de Poisson restante ν_{TR} es obtenido con el módulo de cortante en la misma dirección y el módulo de elasticidad en dirección tangencial como se observa más adelante.

8.3.5. MÓDULOS DE CORTANTE

Como se muestra en la figura 52, el ensayo de corte perpendicular a las fibras presenta un comportamiento similar a la referencia que se muestra en la norma ASTM D7078⁴⁵, se observa que la probeta que presenta una mayor rigidez torsional, la cual se nombró como Glt1, es también la que presentó mayores valores en el módulo de elasticidad, los valores del módulo de corte para Glt1, Glt2 y Glt3 hallados fueron de 0.477 [GPa], 0.303 [GPa] y 0.212 [GPa]

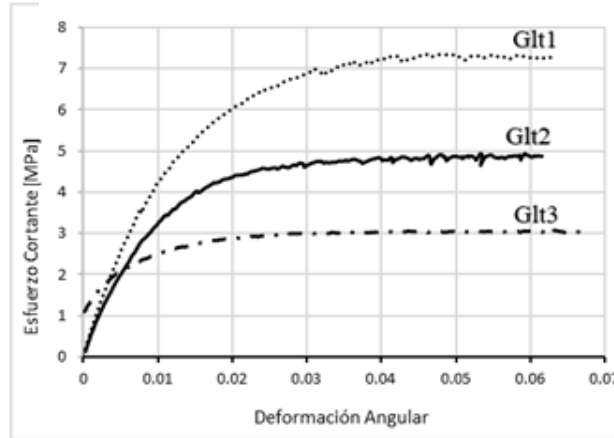
⁴³ SCHNIEWIND, Arno P.; BARRETT, J. D. Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. Wood Science and Technology, 1972, vol. 6, no 1, p. 43-57

⁴⁴ LEMPRIERE, B. M. Poisson's ratio in orthotropic materials. AIAA J, 1968, vol. 6, no 11, p. 2226-2227

⁴⁵ ASTM. op.cit.,p.81.

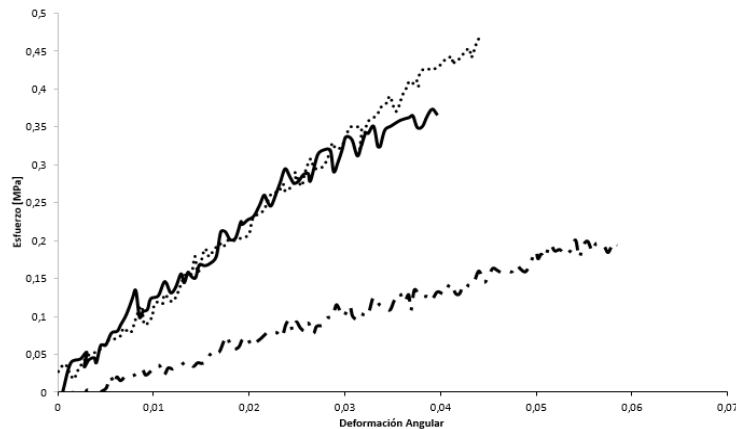
respectivamente, con lo que se obtiene un módulo promedio de 0.331 [GPa]. Se advierte también que se presenta una similitud entre los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad y el módulo de cortante.

Figura 41. Gráfica esfuerzo cortante-deformación angular cortando la fibra



El valor promedio para las 3 pruebas en el que los esfuerzos empiezan a hacerse constantes es de 4.79 [MPa] que corresponde a una deformación angular promedio de 0.024. Se presentan la falla en dirección paralela a la fibra de la palma a pesar de que la carga sea aplicada perpendicular, esto puede deberse a la simetría que presenta el esfuerzo cortante que al ser inducido un corte en la

Figura 42. Gráfica esfuerzo cortante-deformación angular cortando paralelo a la fibra



dirección lt.

En la figura 53 se observa el comportamiento de la palma al someterse a esfuerzo cortante paralelo a la fibra (τ_{RT}). El comportamiento de dos de los especímenes es muy similar mientras que el tercero se aleja un poco, promediando los módulos hallados en cada probeta se obtiene el valor en esta dirección, obteniéndose un módulo de cortante de 7.92 [MPa], este valor presenta errores debido a que al calcular el coeficiente de Poisson en la dirección RT con la ecuación 28, se obtiene un valor incoherente, por ello los resultados de esta prueba no son tomados en consideración.

Tabla 10. Comparación de las propiedades del PSB y la Palma de Lata.

	E_L [MPa]	E_T [MPa]	U_{LT}	G_{LT}
PSB	10296	3066	0.31	1361
Palma de Lata	13150	860	0.35	331

Para verificar los resultados obtenidos en los ensayos se realiza la comparación de las propiedades con las encontradas para Maderas similares, en Huang⁴⁶ se hace el estudio de un compuesto de bambú de fibras paralelas con isotropía transversal denominado PSB (parallel strand bamboo), sirviendo como referencia principal debido a la similitud con la Palma de Lata.

Se observa que tanto el módulo de elasticidad longitudinal como el coeficiente de Poisson de la palma de lata es mayor que el del PSB, pero el módulo de elasticidad en dirección transversal a las fibras y el módulo de cortante presentan un valor mucho más reducido, significando esto que a pesar de que las fibras de la palma tienen una mayor rigidez, su matriz es más flexible respecto al compuesto de bambú.

⁴⁶HUANG, Dongsheng, et al. Experimental study on stress–strain relationships and failure mechanisms of parallel strand bamboo made from phyllostachys. Construction and Building Materials, 2015, vol. 77, p. 130-138.

8.3.6. PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SIMULACIÓN

Para realizar la simulación del álabe y verificar los criterios de falla (los cuales serán descritos en capítulos posteriores) es necesario asumir ciertas propiedades que no han sido estudiadas en este trabajo, la siguiente tabla presenta las propiedades finales utilizadas, aquellas no ensayadas se encontraron mediante el análisis de fuentes bibliográficas y se han denotado con un símbolo de suma al final.

Para encontrar las propiedades faltantes se utilizaron diferentes artículos. La forma de encontrar estas propiedades fue mediante promedio o comparación de proporciones. En primera instancia, la densidad de la palma, el esfuerzo y deformación máximos en compresión longitudinal ($\sigma_{c L Max}$ y $\varepsilon_{c L Max}$) se tomaron de la del trabajo de Prada⁴⁷ para el tallo de palma de lata seco y completo. El coeficiente de Poisson en dirección RT fue tomado como el promedio de esta propiedad para las maderas duras presentadas en el Handbook⁴⁸ de maderas, con este y con el módulo de Young tangencial hallado se determinó el valor de módulo de cortante RT por medio de la ecuación 28. Con el artículo de Huang⁴⁹ se comparan las proporciones entre el esfuerzo cortante máximo tanto en dirección LT como en RT para el PSB, se obtiene que $\tau_{LT Max}$ es 44.3% menor que $\tau_{RT Max}$, esta proporción se usa para obtener el valor del esfuerzo cortante máximo RT para la palma y por medio de la ley de Hooke mostrada en la ecuación 26 se obtiene $\gamma_{RT Max}$, Finalmente para determinar $\sigma_{c T Max}$ y $\varepsilon_{c T Max}$, nuevamente se procede a obtener el porcentaje de diferencia para estas propiedades en

⁴⁷ PRADA. Op. cit., p. 14.

⁴⁸ HANDBOOK. Op. cit., p.58.

⁴⁹ HUANG. Op. cit.,p. 90.

direcciones longitudinal y tangencial para obtener con esto una aproximación a estos límites en la Palma de Lata.

Tabla 11. Propiedades encontradas y utilizadas para la simulación

Propiedad	Magnitud
$\rho+$	540 [Kg/m ³]
E_L	13150 [MPa]
E_T	832 [MPa]
E_R	832 [MPa]
$\sigma_{L Max}$	8.085 [MPa]
$\sigma_{T Max}$	3.554 [MPa]
$\varepsilon_{L Max}$	0.0009176
$\varepsilon_{T Max}$	0.003475
$G_{RT}+$	244.17 [MPa]
G_{LT}	331 [MPa]
$\tau_{RT Max}+$	0.7496 [MPa]
$\tau_{LT Max}$	4.8272 [MPa]
$\gamma_{RT Max}+$	0.00307
$\gamma_{LT Max}$	0.0541
$u_{RT}+$	0.7032
u_{LT}	0.35
$\sigma_{c L Max}+$	44 [MPa]
$\sigma_{c T Max}+$	15.537 [MPa]
$\varepsilon_{c L Max}+$	0.0103
$\varepsilon_{c T Max}+$	0.01716

9. CRITERIOS DE FALLA

Para los materiales compuestos existen diferentes criterios de falla, debido a que son diferentes de los materiales homogéneos, de los últimos se puede conocer su comportamiento solo con realizar pruebas en su dirección principal y debido a esto se sabe efectivamente cuando fallan. Los compuestos son más complejos y generalmente presentan comportamientos independientes en sus direcciones lo cual hace difícil saber cuándo están fallando. Por este motivo se han realizado modelos matemáticos a lo largo de los años que intentan predecir la falla de un compuesto mediante la evaluación de diferentes criterios según el modelo. Entre los más comunes están:

- Criterio de esfuerzo y deformación máxima
- Criterio Tsai-Hill
- Criterio Tsai-WU
- Criterio Hashin

Una breve descripción de los criterios será presentada a continuación.

9.1. CRITERIO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN MÁXIMA

En este criterio no se considera interacción alguna entre diferentes componentes de esfuerzo, la falla ocurre cuando el esfuerzo en cualquier dirección sobrepasa el valor máximo permitido por el compuesto en dicha dirección. De la misma manera la deformación máxima evalúa cuando el material alcanza su deformación límite en cualquier dirección de forma que la falla en este punto ya habrá ocurrido.

9.2. CRITERIO TSAI-HILL

Es un criterio formulado refiriéndose a la energía de distorsión y por lo tanto es un criterio interactivo que toma en cuenta los esfuerzos cortantes interplanares el criterio de falla se describe por la ecuación

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^t}\right)^2 \geq 1 \quad (34)$$

Donde los parámetros de falla X y Y dependen del cuadrante del plano coordenado y representan los esfuerzos máximos de tracción o compresión en su dirección respectiva, S representa esfuerzo cortante máximo en dirección longitudinal.

9.3. CRITERIO TSAI-WU

El criterio Tsai-Wu se obtuvo de forma experimental y no de la teoría, la condición de falla es

$$A_{11}\sigma_{11}^2 + 2A_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + A_{22}\sigma_{22}^2 + A_{66}\tau_{12}^2 + B_1\sigma_{11} + B_2\sigma_{22} \geq 1 \quad (35)$$

Donde

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{X^T X^C}, \\ A_{12} &= -\frac{1}{2\sqrt{X^T X^C Y^T Y^C}}, \\ A_{22} &= \frac{1}{Y^T Y^C}, \\ A_{66} &= \frac{1}{S^t S^t}, \\ B_1 &= \frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C}, \\ B_2 &= \frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C}. \end{aligned} \quad (36)$$

9.4. CRITERIO HASHIN

El criterio de Hashin es un combinación de cuatro condiciones para distinguir entre falla de matriz o de fibra. El criterio se da a partir de

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1. \quad (37)$$

Que define la falla de la matriz por esfuerzo de compresión.

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (38)$$

Define la falla de la matriz por tensión

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (39)$$

Define la falla de la fibra por tensión

$$-\frac{\sigma_{11}}{X^C} \geq 1 \quad (40)$$

Es la falla de la fibra debido a compresión. La anterior descripción de los criterios de falla fue tomada del trabajo publicado por Nali y Carrera⁵⁰.

10. SIMULACIÓN DEL ÁLABE CON PROPIEDADES DE LA PALMA

Para la simulación final se realizó el modelo del álabes con un par de soportes sólidos que se unen al rigidizador interno, el perfil aerodinámico y su longitud de

⁵⁰ NALI, Pietro; CARRERA, Erasmo. A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no 2, p. 280-289

cuerda son las mismas que se han trabajado en capítulos anteriores (DU06W200 y 25cm).

El compuesto utilizado fue un laminado de Palma de Lata y PVA (polyvinyl alcohol)⁵¹, el cual se eligió como adherente porque es de origen natural y soluble en agua así que se puede remover con un proceso relativamente sencillo. El coeficiente de Poisson fue tomado de Chen⁵².

Tabla 11. Propiedades

del adhesivo PVA

Propiedad	Magnitud
σ_{Max}	0.3485 [MPa]
ρ	1190 [Kg/m ³]
E	490.411 [MPa]
ν	0.4498

Fuente: Chan, K.S.; Senin, H. y Naimah, I. STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYVINYL ALCOHOL (PVA) THIN FILM. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 1136. 366 (2009).

10.1. PROCEDIMIENTO DE LA SIMULACIÓN CON LAS PROPIEDADES DE LA PALMA

La simulación se realiza con un compuesto tipo sándwich en el que se tiene una capa de palma de 1 [mm] seguida por una de PVA de 0.3 [mm] y luego otra de

⁵¹ Chan, K.S.; Senin, H. y Naimah, I. STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYVINYL ALCOHOL (PVA) THIN FILM. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 1136. 366 (2009).

⁵² Chen, F., Kang, D. J., & Park, J. H. (2013). New measurement method of Poisson's ratio of PVA hydrogels using an optical flow analysis for a digital imaging system. Measurement Science and Technology, 24(5), 055602

palma de 1 [mm], el álabe se constituye a partir de este compuesto laminar y se le somete a las cargas. Primeramente se simuló un álabe con la cantidad mínima de compuesto para observar su comportamiento y revisar que todo esté en orden. La malla utilizada fue burda para acortar el tiempo de preparación y simulación.

Figura 43. Orden de apilamiento de las capas de material y sus propiedades

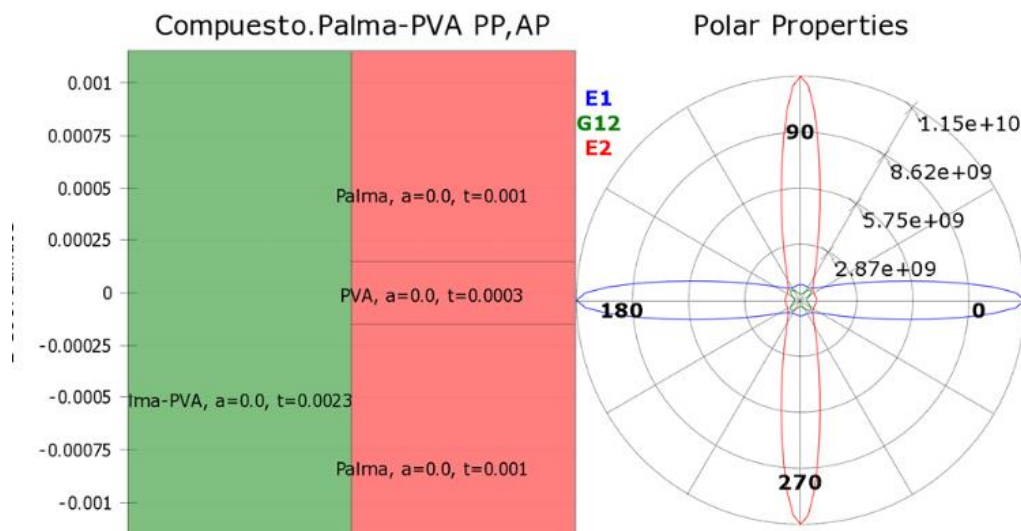
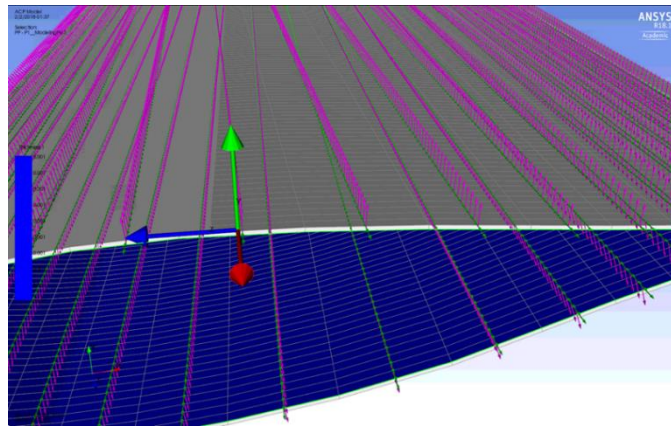


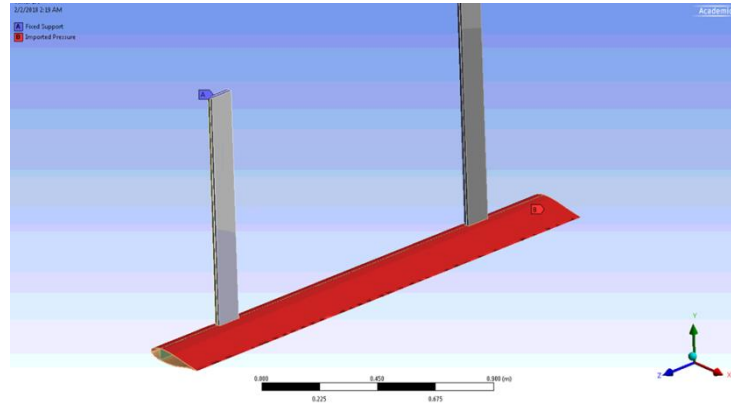
Figura 44. Dirección principal de la palma, malla y dirección de apilamiento



El tipo de elemento utilizado es el SHELL 181 el cual posee 6 grados de libertad (tres traslaciones y tres rotaciones) es recomendado para analizar estructuras tipo cascaron de grosor delgado a moderado, también se puede usar en aplicaciones tipo capa para modelar materiales compuestos de tipo cascaron o sándwich.

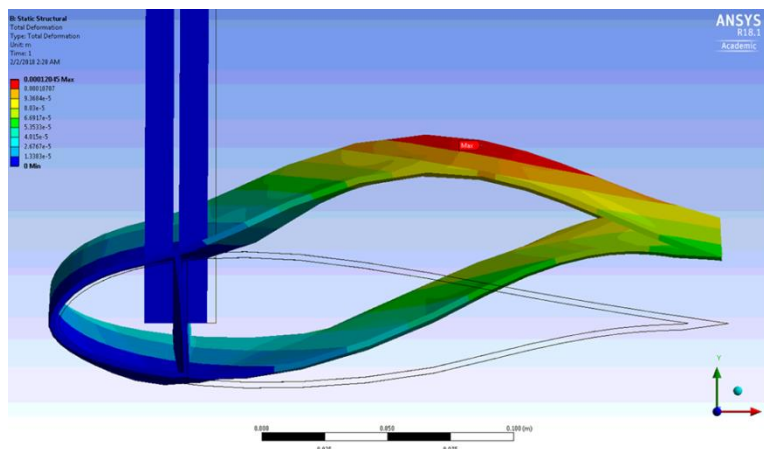
Los soportes sólidos utilizados son para someter al álabe a esfuerzos un poco más reales ya que en funcionamiento lleva soportes unidos al refuerzo central, sin embargo, esto aún es una simplificación ya que los soportes en realidad deben ir de borde al viento y deben tener forma de un perfil aerodinámico que produzca baja sustentación cuando produce poco arrastre con el fin de no entorpecer el funcionamiento de la turbina.

Figura 45. Soportes del álabe y aplicación de las cargas aerodinámicas



En el módulo estructural de ANSYS se analizan brevemente las deformaciones producidas por las cargas. Se puede observar una deformación hacia arriba lo cual tiene sentido debido a las cargas impuestas como se muestra en las figuras 57 y 58.

Figura 46. Desplazamientos totales del álabe vista lateral



Una vez realizado esto se procede con la parametrización del número de elementos y el desplazamiento total máximo, entre otras cantidades. Al ejecutar 10 ciclos contando el ya realizado se llega a una convergencia como se puede ver en la figura 60.

Figura 49. Resultados de la independencia de malla

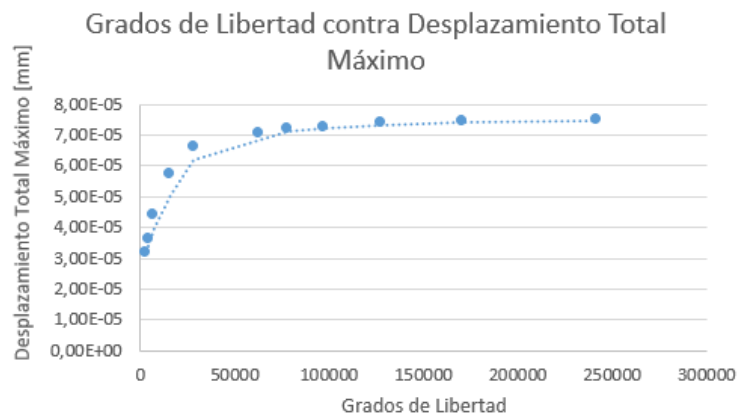


Figura 50. Desplazamientos totales del álabe con malla fina

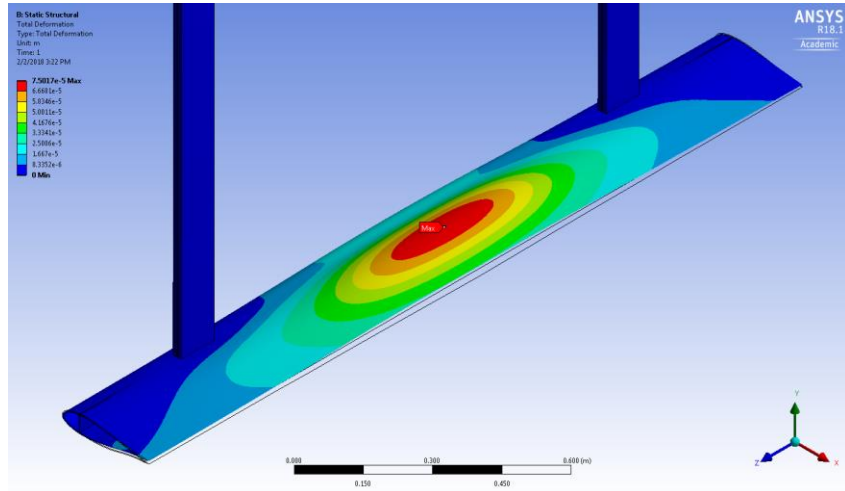
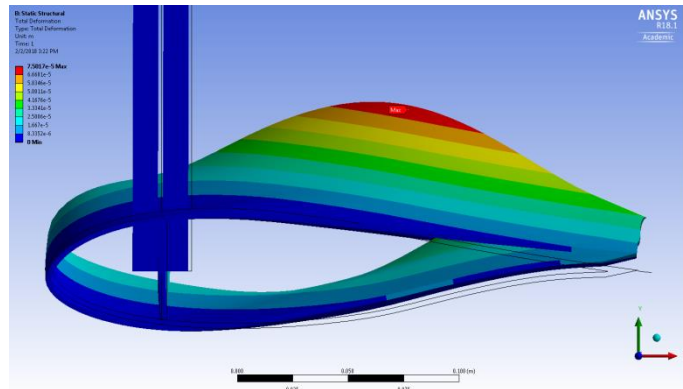


Figura 51. Desplazamientos totales del álabe con malla fina vista lateral



Con la relativa certeza que proporciona la independencia de malla se procede a realizar la simulación con 40360 elementos. Debido a la forma en la que fue estructurado el modelo se debe procesar el álabe y el rigidizador por separado, aun así, la influencia de uno en el otro sigue presente. Respecto a los soportes, se mallaron de forma burda y se utilizó un material rígido comparado con la palma (Acero Estructural) para influir de la menor manera posible a los resultados que son de interés.

11. RESULTADOS

11.1. ÁLABE DE PALMA CON UNA SOLA CAPA DE MATERIAL

En el procesamiento de datos del módulo ACP (post) de ANSYS se procede a verificar mediante los criterios de esfuerzo y deformación máxima, Tsai-Hill y Hashin debido a su simplicidad.

ANSYS utiliza el termino Factor de Reserva Inverso para referirse a los resultados de criterios de falla y está dado por

$$FRI = \frac{\text{Carga Máxima}}{\text{Resistencia Máxima}} \quad (41)$$

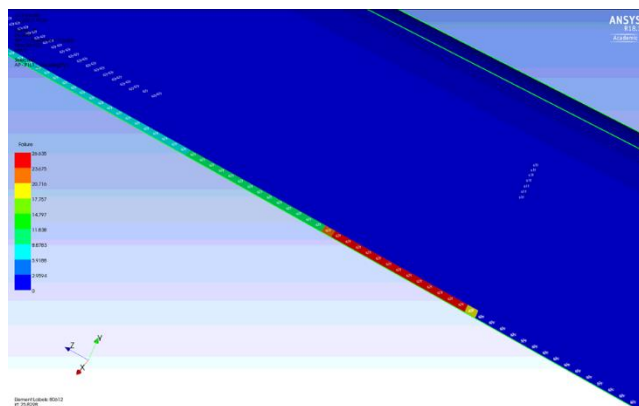
Los resultados muestran que en cada uno de estos criterios el álabe falla.

Tabla 12. Valores de FRI

para el álabe

Criterio	FRI
σ_{Max}	26.635
ϵ_{Max}	26.272
Tsai-Hill	26.277
Hashin	26.635

Figura 52. Falla de la capa interna de palma por criterio de esfuerzo máximo



11.2. RIGIDIZADOR CON UNA SOLA CAPA DE MATERIAL

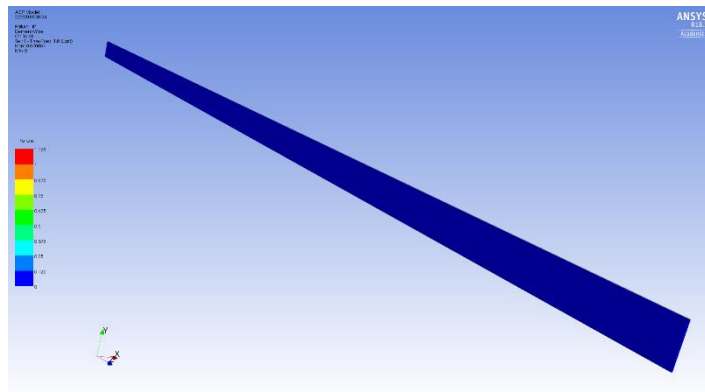
El análisis del refuerzo interno arroja como resultado que el rigidizador soporta sin problemas las cargas impuestas sobre él en los cuatro criterios de falla evaluados. Estos resultados sugieren que para las próximas simulaciones es factible dejar el rigidizador tal como está.

Tabla 13. Valores de FRI

para rigidizador

Criterio	FRI
σ_{Max}	0.07
ε_{Max}	0.075
Tsai-Hill	0.0706
Hashin	0.07

Figura 53. Criterio Tsai-Hill del rigidizador



11.3. ÁLABE REFORZADO CON MÁS CAPAS

Ya que el álabe anterior presentó falla se procede a agregar una lámina de pegante y una de palma de más en la parte interna en los bordes de entrada y salida del álabe y someterlo a cargas nuevamente

Figura 54. Configuración reforzada con más capas del álabe

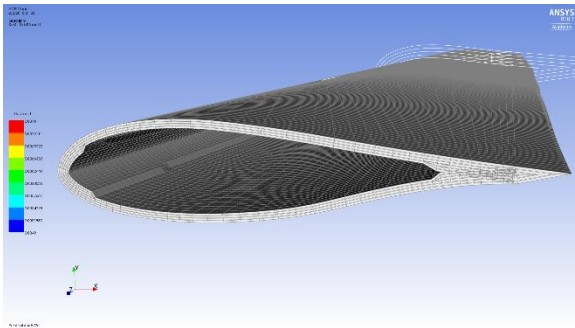
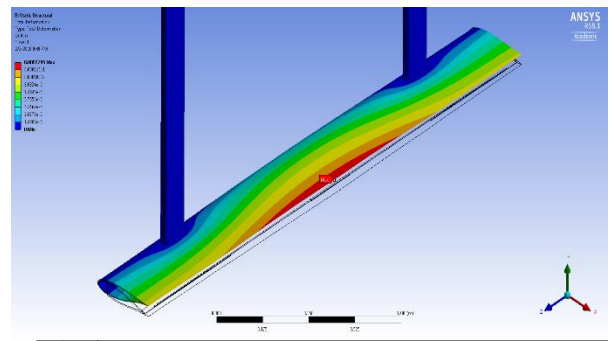


Figura 55. Desplazamientos totales del álabe reforzado con más capas



Luego de solucionar se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 13

Tabla 14. Valores FRI

para álabe reforzado

Criterio	FRI
σ_{Max}	0.028729
ϵ_{Max}	0.015344
Tsai-Hill	0.016802
Hashin	0.015383

Figura 56. Criterio deformación máxima para álabe reforzado

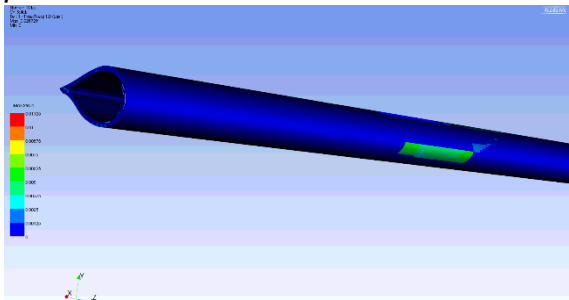
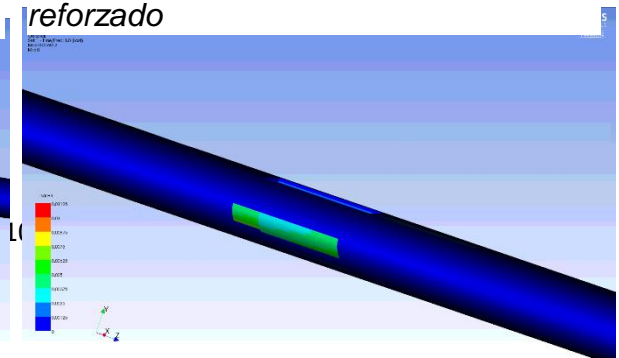
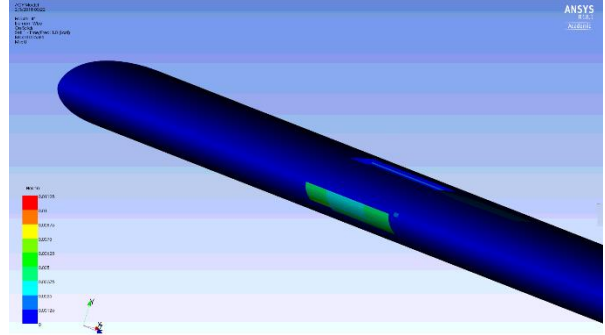


Figura 57. Criterio tsai-hill para álabe reforzado

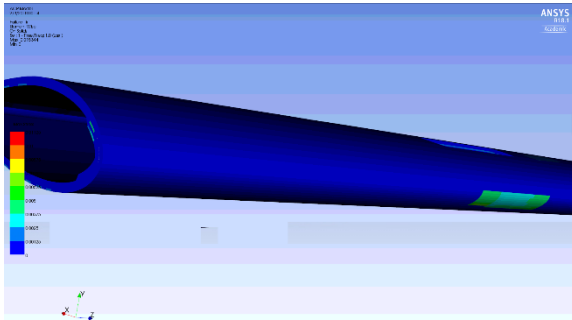




Al comparar con la bibliografía nos damos cuenta que el trabajo realizado arroja resultados similares en cuanto a deformaciones y esfuerzos. Como se muestra en Wang⁵³, la deformación incrementa hasta un máximo en el álabe a medida que se aleja del soporte, en Raciti⁵⁴ se observa el borde de salida se levanta al deformarse. En cuanto a los esfuerzos se observa en Liu⁵⁵ se describe como el

Figura 58. Criterio esfuerzo máximo para álabe reforzado

Figura 59. Criterio hashin para álabe reforzado



esfuerzo máximo se presenta en la zona donde se encuentran los soportes del álabe, de la misma manera que los resultados finales de este trabajo indican que el álabe no falla en estas condiciones y que sus puntos críticos están en el borde de entrada justo delante de los soportes.

⁵³ WANG, Lin, et al. Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm. *Composite Structures*, 2016, vol. 153, p. 123-138.

⁵⁴ RACITI. Op. cit., p.47.

⁵⁵ LIU. Op. cit., p.47.

12. CONCLUSIONES

La palma de lata presenta propiedades mecánicas que la hacen recomendable para su utilización en álabes de aerogeneradores de eje vertical de tamaño pequeño a moderado, adicionando la ganancia inherente debido a la baja densidad de la Palma. A pesar de que las fibras de la palma son resistentes a la tracción, la matriz de lignina es poco resistente a esfuerzos normales, lo cual dificulta su aplicación directa en turbinas de gran tamaño o alta potencia debido a las altas cargas inerciales.

La caracterización mecánica anisótropa de la palma de lata contribuye con el estudio de la aplicación de esta palma a piezas y componentes de ingeniería, resaltándose que las propiedades encontradas muestran concordancia con los resultados encontrados en la literatura.

El álabe estudiado inicialmente no soporta las cargas impuestas, sin embargo, al ser reforzado con más capas deja de presentar fallos y exhibe puntos críticos solamente en la sección cercana a los soportes.

El rigidizador interno en el álabe ayuda a redistribuir los esfuerzos y las deformaciones, obteniéndose siempre una reducción en los desplazamientos totales, pero, hay que apreciar que estos elementos deben posicionarse de forma adecuada, ya que se podría incurrir en concentración de esfuerzos.

El adhesivo funcionó de manera adecuada ya que en las simulaciones realizadas no falla a diferencia de la palma que si lo hace en ciertas capas. Este adhesivo gracias a sus propiedades presenta la flexibilidad necesaria para soportar las deformaciones a las que se somete el álabe, sin embargo, se debe tener en cuenta que para la simulación de compuesto laminar se supone que no hay deslizamiento ni desprendimiento en la interfaz.

Se han cumplido los objetivos propuestos al principio de este trabajo el cual ha arrojado resultados alentadores para el avance en tecnología de materiales y energías limpias que ayuden a preservar el medio ambiente para mejorar la calidad de vida humana y conservar la diversidad biológica y la salud de los ecosistemas que a veces olvidamos que hacen parte del mundo en el que vivimos.

13. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Para el estudio realizado se utilizó un material compuesto de palma de lata y PVA asumiendo que se pueda poner en forma de capas a lo largo del perfil aerodinámico elegido. En realidad, la palma de lata permite obtener láminas de corteza de ancho reducido, que de utilizarse deberían ir una al lado de la otra para cubrir toda el área superficial.

Se debe tener en cuenta que las cargas utilizadas fueron solo aerodinámicas, las cargas inerciales no fueron aplicadas en este estudio.

En estudios posteriores se recomienda aplicar cargas inerciales en turbinas eólicas pequeñas ya que dichas solicitaciones son altas y la palma de lata es frágil en las direcciones ortogonales a la fibra.

Para estudios posteriores es recomendable tener en cuenta la dificultad de la realización de los ensayos de tracción en dirección radial, los ensayos de cortante radial-tangencial. También se hace necesario la caracterización del pegante con láminas de palma de lata en aras de obtener resultados más cercanos a la realidad.

Se recomiendan estudios en los cuales se obtengan formas de adquirir solamente las fibras de la palma de forma que se pueda trabajar con ellas y un aglomerante formando un compuesto fibroso para mejorar las propiedades respecto al laminar utilizado en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. GONZÁLEZ-ESTRADA, Octavio Andrés; LEAL, Joaquin; REYES-HERRERA, Juan David. Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. *Revista UIS Ingenierías*, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 105-116, jun. 2016. ISSN 2145-8456
2. SENE, Tarcísio S., et al. Glass fiber hybrid composites molded by RTM using a dispersion of carbon nanotubes/clay in epoxy. *Materials Research*, 2013, vol. 16, no 5, p. 1128-1133.
3. GIBSON, Ronald. *PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS*. Boca Raton : Taylor & Francis, 2012. 978-1-4398-5006-0 SURESH, G.; JAYAKUMARI, L. S. Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks. *Polímeros*, 2015, vol. 25, no 1, p. 49-57.

4. SURESH, G.; JAYAKUMARI, L. S. Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks. *Polímeros*, 2015, vol. 25, no 1, p. 49-57.
5. GALIMANY, Eve; RAMÓN, Montserrat; DELGADO, Maximino. First evidence of fiberglass ingestion by a marine invertebrate (*Mytilus galloprovincialis* L.) in a NW Mediterranean estuary. *Marine pollution bulletin*, 2009, vol. 58, no 9, p. 1334-1338
6. BEAUSON, Justine; BRØNDSTED, Povl. Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. En *MARE-WINT*. Springer, Cham, 2016. p. 421-432.
7. Wind Europe. Discussion paper on managing composite blade waste [En línea] [Citado el: 29 de 01 de 2018.] <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf>.
8. MISHNAEVSKY JR, Leon, et al. Small wind turbines with timber blades for developing countries: Materials choice, development, installation and experiences. *Renewable Energy*, 2011, vol. 36, no 8, p. 2128-2138.
9. HO, Mei-po, et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no 8, p. 3549-3562.
10. Plotkin M., & Famolare L. Sustainable harvest and marketing of rain forest products. *Island Press*. 1992. ISBN 978-1559631686
11. OSORIO, Coralia; CARRIAZO, José G.; ALMANZA, Ovidio. Antioxidant activity of corozo (*Bactris guineensis*) fruit by electron paramagnetic resonance (EPR)

spectroscopy. *European Food Research and Technology*, 2011, vol. 233, no 1, p. 103-108.

12. PRADA GARZON, R. G.; GIL GONZALES, REY. SOTO A. *Análisis y Caracterización de las Propiedades Fisiscas y Mecánicas de la Palma de Lata*. Bucaramanga : UIS, 2008.
13. CHÁVEZ D, GARCIA F, PERTUZ A. *Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la pala de lata*. Bucaramanga : UIS, 2016.
14. Unidad de Planeacion Minero Energetica. INFORME SECTORIAL SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA EN COLOMBIA. [En línea]
<http://www.siel.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=L9AASwJjMz8=>.
15. J, MANWELL y MACGOWAN, J Y REGERS, A. *Wind Energy Explained*. Washington : WILLEY, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1
16. Green Mechanic. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <http://www.green-mechanic.com/2013/03/vertical-axis-wind-turbine-parts.html> .
17. Mechanical Engineering Laboratory. [En línea] [Citado el: 2018 de 01 de 22.] <http://lim.ii.udc.es/docencia/din-sismec/circuitos.pdf>.
18. JONES, Robert. *MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS*. Philadelphia : Taylor & Francis, Inc, 1999. ISBN 978-1560327127

19. Rafic Younes, Ali Hallal, Farouk Fardoun and Fadi Hajj Chehade. *Composites And Their Properties*. 2012. ISBN 978-953-51-0711-8.
20. ZIENKIEWIKS, O.C. TAYLOR, R.L. *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS*. Madrid : McGraw-Hill, 1999. ISBN 84-481-0178-2.
21. COMSOL. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.]
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.
22. LIU, Wendi; XIAO, Qing. Investigation on Darrieus type straight blade vertical axis wind turbine with flexible blade. *Ocean Engineering*, 2015, vol. 110, p. 339-356.
23. CASTELLI, Marco Raciti, et al. Numerical evaluation of aerodynamic and inertial contributions to Darrieus wind turbine blade deformation. *Renewable Energy*, 2013, vol. 51, p. 101-112.
24. GARCIA RODRIGUEZ, L. *Análisis Aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD*. Bucaramanga : UIS, 2014.
25. ISLAM, Mazharul; FARTAJ, Amir; CARRIVEAU, Rupp. Analysis of the design parameters related to a fixed-pitch straight-bladed vertical axis wind turbine. *Wind Engineering*, 2008, vol. 32, no 5, p. 491-507.
26. ANSYS. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.] <https://www.ansys.com/>.

27. AGRICULTURE, UNITED STATES DEPARTMENT OF. *Wood Handbook- Wood as an Engineering Material*. s.l. : USDA, 1999.
28. WINANDY J, ROWELL R. The Chemistry of Wood Strength. *U.S Department of Agriculture* ,Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53705.
ISBN 9780841207967
29. BRANDT, Agnieszka, et al. Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green chemistry*, 2013, vol. 15, no 3, p. 550-583.
30. How Stuff Works. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.htm>.
31. *Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines*. DYACHUK, Eduard. UPPSALA UNIVERSITET : s.n., 2015. ISBN 978-91-554-9307-3.
32. Zweben, C. *Composite Materials. Mechanical Engineers' Handbook*. s.l. : Jhon Wiley & Sons, Inc., 2015. ISBN 978-0471719854
33. Arquigrafico. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <https://arquigrafico.com/el-vidrio-laminado-excelente-opcion-como-vidrio-de-seguridad/>.
34. Pixabay. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <https://pixabay.com/en/wall-concrete-stone-concrete-wall-3075140/>
35. TARINGA. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<https://www.taringa.net/posts/imagenes/19997021/Te-gusta-el-Metal-Entra-al-toque.html>.

36. jdz. pixabay. [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.]
<https://pixabay.com/en/firewood-background-stake-trunks-3101276/>.
37. MATH is FUN. [En línea] [Citado el: 23 de 01 de 2018.]
<https://www.mathsisfun.com/data/grapher-equation.html>.
38. BRØNDSTED, Povl; NIJSSEN, Rogier PL (ed.). *Advances in wind turbine blade design and materials*. Elsevier, 2013.
39. Chan, K.S.; Senin, H. y Naimah, I. STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYVINYL ALCOHOL (PVA) THIN FILM. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 1136. 366 (2009).
40. NALI, Pietro; CARRERA, Erasmo. A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no 2, p. 280-289
41. SCHNIEWIND, Arno P.; BARRETT, J. D. Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. *Wood Science and Technology*, 1972, vol. 6, no 1, p. 43-5
42. LEMPRIERE, B. M. Poisson's ratio in orthotropic materials. *AIAA J*, 1968, vol. 6, no 11, p. 2226-2227
43. Chen, F., Kang, D. J., & Park, J. H. (2013). New measurement method of Poisson's ratio of PVA hydrogels using an optical flow analysis for a digital imaging system. *Measurement Science and Technology*, 24(5), 055602
44. HUANG, Dongsheng, et al. Experimental study on stress–strain relationships and failure mechanisms of parallel strand bamboo made from phyllostachys. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 77, p. 130-138.

45. WANG, Lin, et al. Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm. *Composite Structures*, 2016, vol. 153, p. 123-138.
46. American Society for Testing Materials [En línea] [Citado el: 22 de 01 de 2018.] <https://www.astm.org>
47. American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2000.
48. American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature. 2004
49. American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method. 2005
50. American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base and Particle Panel Materials. 1999.