

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica

Diseño Estructural de Aspas de un Aerogenerador

Nicolás Alderete
Gregorio Cabral

Tutor: Ing. Pablo A. Bucello

Abstract

La utilización de materiales compuestos para la fabricación de aspas de turbinas eólicas constituye una tendencia actual y validada por un amplio conjunto de estudios y experiencia en servicio. Sin embargo, la escasa transferencia y aplicación de estos conocimientos a la fabricación de turbinas pequeñas y de baja potencia sumada al carácter artesanal de los procesos de manufactura con materiales compuestos resulta, en muchos casos, en diseños ineficientes y sobredimensionados. En un mercado competitivo, con exigencias cada vez mayores, la necesaria optimización de diseños no siempre se abre camino en pequeñas y medianas empresas.

Este trabajo se centra en la búsqueda de un esquema de laminado eficiente en material compuesto para las aspas de un generador eólico comercial de baja potencia, denominado Costa I, diseñado y comercializado por la empresa ALP Group S.A. En una primera instancia, se procede a la caracterización geométrica y material del diseño actualmente fabricado seguida del modelado por elementos finitos y por la validación experimental de éste. En una segunda instancia, se procede a la búsqueda de un nuevo laminado con el objetivo de obtener un diseño superior al actual integrando objetivos que hacen al proceso de manufactura y a las características en servicio del aspa. Finalmente, obtenido un laminado que cumple los requerimientos propuestos, se centra la atención en el proceso de manufactura actual para explorar y sugerir la implementación de un proceso alternativo de laminación con resultados que se suponen serán superiores al actual.

Tabla de Contenidos

1.	Introducción.....	10
1.1.	Energía Eólica	10
1.2.	Comportamiento Mecánico	10
1.3.	Materiales Compuestos.....	11
1.3.1.	Material de Refuerzo	12
1.3.2.	Fibras	12
1.3.3.	Matriz o Fase Primaria	14
1.3.4.	Comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos	14
1.3.5.	Láminas Unidireccionales	17
1.3.6.	Refuerzos aleatorios.....	19
1.3.7.	Laminados	20
1.3.8.	Notación de laminados.....	21
1.3.9.	Descomposición de Tensiones.....	21
1.3.10.	Criterios de Falla.....	22
1.3.11.	Criterio de Tensiones Máximas.....	22
1.3.12.	Criterio de Tsai-Wu.....	23
1.4.	ALP Group S.A.....	24
1.4.1.	Materiales utilizados y proceso de fabricación	25
2.	Definición de los objetivos del proyecto	28
2.1.	Proceso de Manufactura.....	28
2.2.	Peso	28
2.3.	Deflexión máxima.....	29
2.4.	Resistencia	30
2.5.	Frecuencias naturales.....	31
2.6.	Restricciones ligadas al uso de materiales compuestos.....	34
2.7.	Resumen de objetivos.....	35
3.	Modelado de la pala actual.....	36
3.1.	Modelo Físico	36
3.1.1.	Medición del Peso.....	36
3.1.2.	Medición de la posición del centro de masa.....	37
3.1.3.	Caracterización e identificación de elementos.....	37
3.1.4.	Subdivisión de la pala	38
	39
3.1.5.	Medición de Espesores.....	39
3.1.6.	Densidades de los materiales	42
3.1.7.	Ensayo de deflexión estática.....	42
3.2.	Modelo de Elementos Finitos de la pala actual.....	44
3.2.1.	Software e implementación.....	44
3.2.2.	Modelado del Ensayo de Deflexión Estática	45
3.2.2.1.	Condiciones de borde.....	45
3.2.2.2.	Aplicación de cargas	46

3.2.2.3.	Resultados y ajuste.....	46
3.3.	Simulación de cargas aerodinámicas con modelo actual ajustado	47
3.3.1.	Cargas en condiciones de operación.....	47
3.3.1.1.	Calculo de las cargas aerodinámicas.....	47
3.3.1.2.	Incorporación de las cargas aerodinámicas al modelo estructural	48
3.3.2.	Condiciones de borde	52
3.3.3.	Resultados	53
3.3.4.	Frecuencias de resonancia.....	55
3.3.4.1.	Condiciones de borde.....	55
3.3.4.2.	Resultados	55
4.	Solución propuesta.....	56
4.1.	Esquema de partida con limitaciones de fabricación	56
4.1.1.	Ajustes para verificar frecuencia	60
4.1.2.	Laminado definitivo propuesto	63
4.2.	Proceso de Manufactura.....	66
4.2.1.	Moldeo por Infusión	66
4.2.2.	Análisis comparativo de costos.....	68
5.	Conclusiones	70
6.	Referencias	72
7.	Anexos	74

Índice de Figuras

Figura 1. Perfil alar y fuerzas aerodinámicas típicas	11
Figura 2. Cubo elemental de tensiones.....	15
Figura 3. Comportamiento mecánico de los diferentes materiales frente a sollicitaciones similares	17
Figura 4. Esquema tradicional de laminado unidireccional	18
Figura 5. Esquema típico de laminado.....	20
Figura 6. Sistemas de coordenadas en materiales laminados.....	21
Figura 7. Descomposición de tensiones en laminados unidireccionales.....	22
Figura 8. Vistas de la pala.....	26
Figura 9. Nomenclatura utilizada para las distintas partes de la pala.....	27
Figura 10. Distancia entre aspas y torre	29
Figura 11. Perfil de generación del Costa-I en función de la velocidad del viento	30
Figura 12. WindShear	31
Figura 13. Efecto de Apantallamiento o Tower Shadow	32
Figura 14. Esquema de la torre.....	33
Figura 15. (a) Modelo de elementos finitos de la torre. (b) Primer, (c) segundo y (d) tercer modo de vibración del modelo simplificado de la torre.....	34
Figura 16. Pesaje de dos ejemplares de aspa	37
Figura 17. Esquema del procedimiento de medición de la ubicación del centro de masa.....	37
Figura 18. Interior de las palas	38
Figura 19. Subdivisión de la pala en secciones, lado Extrados	38
Figura 20. Subdivisión de la pala en secciones, lado Extrados, modelo en CAD.....	39
Figura 21. Subdivisión de cada sección de la pala	39
Figura 22. Gráfico de espesores en extrados según secciones.....	40
Figura 23. Gráfico de espesores intrados según secciones	40
Figura 24. Vista de corte de sección 3, extrados. Notar la varilla de resina en el centro de la sección, recubierta con resina para asegurar su posición (zona resaltada).....	41
Figura 25. Vista de corte de sección 3, intrados. Notar la falta de uniformidad en el espesor y la presencia de fibra sin impregnar en el extremo derecho (zona resaltada).	41
Figura 26. Vista de corte, sección 2. Notar el núcleo de laminado de madera de abedul, como refuerzo en la zona próxima a la raíz y la falta de contacto entre esta y la superficie de la pala (zonas resaltada).....	41
Figura 27. Configuración del ensayo de deflexión.....	42
Figura 28. Configuración del ensayo de deflexión	43
Figura 29. Diagrama para cálculo de deflexiones.....	43
Figura 30. Gráfico de deflexiones medidas y calculadas en función de las cargas	44
Figura 31. Modelado de la varilla de resina.....	45
Figura 32. Detalle del modelado de la varilla de resina con elementos viga	45
Figura 33. Esquema de la superficie de sujeción de la pala	46
Figura 34. Cargas en el extremo de la pala para el modelado de ensayo de deflexión.....	46
Figura 35. Vista de la distribución de la componente de presión de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala	48

Figura 36. Vista de la distribución de la componente de presión de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala.....	49
Figura 37. Vista de la distribución de la componente de corte x de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala.....	49
Figura 38. Vista de la distribución de la componente de corte x de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala.....	50
Figura 39. Vista de la distribución de la componente de corte y de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala.....	50
Figura 40. Vista de la distribución de la componente de corte xy de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala.....	51
Figura 41. Vista de la distribución de la componente de corte z de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala.....	51
Figura 42. Vista de la distribución de la componente de corte z de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala.....	52
Figura 43. Condiciones de borde.....	52
Figura 44. Desplazamientos ante cargas nominales.....	53
Figura 45. Deformaciones ante cargas nominales.....	53
Figura 46. Tensiones principales máximas de tracción en el modelo del diseño actual.....	54
Figura 47. Tensiones principales máximas de compresión en el modelo del diseño actual.....	54
Figura 48. Modos de vibración del modelo del diseño actual de la pala.....	55
Figura 49. Distribución del Laminado 1.0 PET.....	57
Figura 50. Tensiones en la dirección x en la lámina de mayor sollicitación del <i>Laminado 1.0 PET</i>	59
Figura 51. Modos de vibración de la pala con el <i>Laminado 1.0 PET</i>	60
Figura 52. Distribución de deformación en X en la lámina más deformada en el primer modo de vibración de la pala con el <i>Laminado 1.0 PET</i>	60
Figura 53. Modos de vibración de la pala con el <i>Laminado 2.0 PET</i>	61
Figura 54. Distribución del <i>Laminado 3.0 PET</i>	61
Figura 55. Distribución del <i>Laminado 4.0 PET</i>	62
Figura 56. Distribución del <i>Laminado 5.0 PET</i>	62
Figura 57. Distribución del <i>Laminado 6.0 PET</i>	63
Figura 58. Modos de vibración de la pala con el <i>Laminado 6.0 PET</i>	64
Figura 59. Esquema de operación del proceso de Modelado por Infusión.....	67

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras de mayor aplicación [3]	13
Tabla 2. Tabla de especificaciones del generador Costa-I doméstico	24
Tabla 3. Características geométricas de la pala	26
Tabla 4. Resultados de mediciones de peso	36
Tabla 5. Resultados de mediciones de la ubicación del centro de masa.....	37
Tabla 6. Espesores de secciones del lado extrados de una pala típica	39
Tabla 7. Espesores de secciones de lado intrados de una pala típica.....	40
Tabla 8. Resultados de mediciones indirectas de densidades de materiales encontrados en el modelo actual de la pala	42
Tabla 9. Resultados de las mediciones en ensayo de deflexión estática	43
Tabla 10. Comparación entre resultados medidos y calculados por FEM	46
Tabla 11. Comparación entre deflexiones medidas y calculadas por FEM.....	47
Tabla 12. Frecuencias de vibración del modelo del diseño actual de la pala.....	55
Tabla 13. Propiedades mecánicas de poliéster reforzado con fibra de vidrio unidireccional.....	56
Tabla 14. Esquemas de laminado utilizados.....	58
Tabla 15. Tensiones máximas y factores de seguridad calculados para la lámina más comprometida del <i>Laminado 1.0 PET</i>	59
Tabla 16. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 1.0 PET</i>	59
Tabla 17. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 2.0 PET</i>	61
Tabla 18. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 3.0 PET</i>	61
Tabla 19. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 4.0 PET</i>	62
Tabla 20. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 4.0 PET</i>	62
Tabla 21. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 6.0 PET</i>	63
Tabla 22. Frecuencias de vibración de la pala con el <i>Laminado 6.0 PET</i>	64
Tabla 23. Tensiones máximas y factores de seguridad calculados para la Lámina 8 del <i>Laminado 6.0 PP</i>	64
Tabla 24. Comparación de las principales variables de interés entre diseño estructural actual y propuesto para el Costa-I	70

Abreviaciones

kW: Kilowatts

MW: Megawatts

CFD: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)

CSM: Continuous Strand Mat

f_{safe} : Frecuencia segura del primer modo de vibración del aspa

f_{shadow} : Frecuencia del primer modo de vibración de la torre

ROM: Rule of Mixtures (Regla de las Mezclas)

V_f : Fracción de fibra

V_m : Fracción de matriz

ρ_f : Densidad de las fibras

ρ_m : Densidad de la matriz

ρ_T : Densidad del compuesto

E_f : Módulo de Elasticidad de las Fibras

E_m : Módulo de Elasticidad de la Matriz

G_f : Modulo Cortante de las Fibras

G_m : Modulo Cortante de la Matriz

ν_f : Coeficiente de Poisson de las Fibras

ν_m : Coeficiente de Poisson de la Matriz

Δ : Parámetro adimensional de interacción tensión-cortante para laminados CSM

E_1 : Módulo de Elasticidad Longitudinal de la lámina

E_2 : Módulo de Elasticidad Transversal de la lámina

E_3 : Módulo de Elasticidad Transversal de la lámina

G_{12} : Módulo de Elasticidad Interlaminar de la lámina

G_{23} : Modulo Cortante Transversal de la lámina

ν_{ij} : Coeficiente de Poisson de la lámina

F_{1t} : Resistencia a la tracción longitudinal de la lámina

F_{2t} : Resistencia a la tracción transversal de la lámina

F_{1c} : Resistencia a la compresión longitudinal de la lámina

F_{2c} : Resistencia a la compresión transversal de la lámina

F_4 : Resistencia al corte transversal de la lámina

F_5 : Resistencia al corte transversal de la lámina

F_6 : Resistencia al corte interlaminar del laminado

RTM: Resin Transfer Molding (Moldeo por Transferencia de Resina)

LRTM: Light Resin Transfer Molding (Moldeo por Transferencia de Resina Ligero-por vacío-)

$M_{anteraiz}$: Masa de la pala sin considerar la raíz.

M_{total} : Masa total de la pala

PPP: Polipropileno

n_{nom} : Velocidad angular nominal del generador

rpm: revoluciones por minuto

t_{ply} : espesor de una lámina

FS: factor de seguridad

1. Introducción

1.1. Energía Eólica

La utilización de molinos de viento se remonta a más de 1000 años con el surgimiento de los primeros molinos para la agricultura en el siglo VII. El empleo de éstos para la generación de electricidad comienza recién a fines del siglo XIX con el primer generador de 12 kW construido por Brush en los Estados Unidos. El advenimiento de los combustibles fósiles, sin embargo, confinó a la energía eólica a meros molinos de viento para pequeñas instalaciones de generación, bombeo y recarga de baterías en instalaciones rurales remotas.

La creciente preocupación por la problemática ambiental sumada a los altos costos de los combustibles fósiles y la creciente demanda energética a nivel mundial renovó el interés por la explotación de las llamadas *energías alternativas*, dentro de las cuales la energía eólica constituye uno de los más prolíficos exponentes. A las causas anteriores cabe agregarle el advenimiento y masificación de los llamados Materiales Compuestos Avanzados que permiten la fabricación y aplicación de materiales a medida con excelentes propiedades en lo que respecta a la rigidez y resistencia específica, integridad estructural y alta performance a la fatiga. Como resultado, en las últimas décadas dos grandes áreas guían el diseño de aerogeneradores: la eficiencia energética y la optimización de laminados en materiales compuestos. Dentro de estas dos áreas, particular énfasis ha sido puesto en la fabricación de aerogeneradores de gran potencia que operan en las llamadas granjas de viento entregando cientos de kW o MW a la red eléctrica. En contraste, las turbinas de poca envergadura y capacidad de generación no han recibido tanta atención. Estas unidades más pequeñas generalmente no suministran energía a la red sino que suelen ser utilizadas individualmente o formando parte de un pequeño sistema de potencia en áreas remotas. La falta de investigación y, más importante aún, la falla en la transferencia de resultados abocados a estas instalaciones hace que muchas veces los diseños resultantes sean poco eficientes tanto desde el punto de vista aerodinámico como estructural cuando son comparados con las instalaciones de mayor potencia, lo cual abre un abanico de oportunidades para el desarrollo y mejoramiento de estos equipos [1].

1.2. Comportamiento Mecánico

En una turbina eólica se lleva a cabo la conversión de energía eólica en energía mecánica. En ella, las aspas capturan energía del viento desarrollando fuerzas de sustentación y arrastre que resultan en la generación de un momento mecánico en el eje de la turbina que, al estar conectado con un generador eléctrico, transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

Las fuerzas de sustentación y arrastre conforman las fuerzas aerodinámicas que junto con la fuerza centrífuga, propias de un cuerpo con masa y en rotación, generan las sollicitaciones que debe soportar un aspa en funcionamiento.

La Figura 1 muestra un perfil alar genérico, donde se observan las fuerzas aerodinámicas de sustentación L y de arrastre D . La relación entre estas fuerzas y la velocidad de corriente libre del viento V y velocidad de rotación Ω , está dada en función de parámetros geométricos como el ángulo de ataque α , el ángulo de actitud θ y la distancia del elemento de pala al eje de rotación r [2].

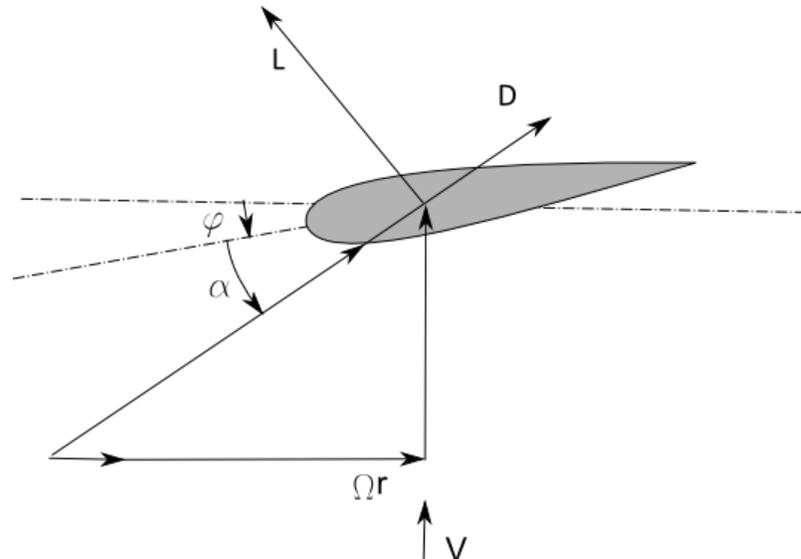


Figura 1. Perfil alar y fuerzas aerodinámicas típicas

Si se considera la variación de estas cargas a lo largo de toda la longitud de la pala y la variación de estas cargas a lo largo de una sección, se obtiene un campo de presiones y esfuerzos de corte que actúan en dirección normal a la superficie considerada en cada punto. Este campo de presiones suele calcularse mediante simulaciones de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) que junto con las cargas centrífugas por unidad de volumen constituyen las cargas estáticas que se tienen en cuenta para el diseño estructural de la pala.

1.3. Materiales Compuestos

Los materiales compuestos son materiales que resultan de la combinación, a escala macroscópica, de dos o más componentes que pueden o no ser del mismo material. Si bien la combinación de materiales no es algo novedoso, es esta perspectiva macroscópica la que los distingue frente a otras combinaciones de materiales más usuales, a escala microscópica, como se observa, por ejemplo, en las aleaciones metálicas. La principal ventaja de los materiales compuestos es que, bien diseñados, pueden aprovechar al máximo las propiedades características de cada uno de sus componentes.

Las propiedades que pueden verse beneficiadas por la utilización de materiales compuestos son, entre otras:

- Rigidez
- Resistencia Mecánica
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Peso
- Resistencia a la Fatiga
- Conductividad Térmica

Sin lugar a dudas, es la habilidad de diseñar materiales “a medida” con excelentes propiedades específicas lo que ha generado que los materiales compuestos se vuelvan materiales de uso corriente en industrias exigentes como la aeroespacial, armamentos, eólica, náutica, etc.

Los componentes que forman un material compuesto se clasifican usualmente en dos categorías principales:

- Material de refuerzo o fase secundaria
- Matriz o fase primaria

Si bien ambas fases suelen estar dotadas de características disímiles, es la interacción resultante entre ellas la que otorga a los materiales compuestos su versatilidad y utilidad en sus campos de aplicación [3].

1.3.1. Material de Refuerzo

El material de refuerzo cumple la función, como bien indica su nombre, de reforzar a la fase primaria o matriz del compuesto. Existe una variedad de refuerzos ampliamente usados en la industria, entre los que se encuentran:

- Refuerzo de fibras
- Refuerzo de material particulado
- Refuerzo en hojuelas

Si bien todos encuentran aplicación, la mayor atención se centra en los materiales compuestos fibrosos ya que son éstos los que permiten obtener las mejores propiedades en aplicaciones de alta exigencia mecánica [3].

1.3.2. Fibras

Las fibras son filamentos de material de refuerzo que poseen mayor resistencia y rigidez que el mismo material no fibrado debido a la menor cantidad de defectos por unidad de masa y a la orientación preferencial de los cristales que la forman, que le otorgan un marcado carácter ortotrópico. Consecuentemente, las propiedades geométricas de las fibras juegan un papel fundamental tanto en la evaluación de las propiedades de éstas como en la evaluación de las propiedades resultantes de su interacción con la matriz.

Las fibras están caracterizadas geoméricamente por dos parámetros fundamentales: la elevada razón entre la longitud y su diámetro y el valor del diámetro en estado quasi-cristalino. Dos de las propiedades más explotadas actualmente de las fibras, y razón principal de su extendido uso en aplicaciones críticas, son la resistencia y la rigidez específicas que presentan. Estas propiedades, cuando son comparadas con otros materiales usuales de ingeniería, revelan el potencial en la utilización de materiales en forma de fibras, como se observa en la Tabla 1.

Fibra	Peso Específico (γ) [kN/m ³]	Resistencia a la Tracción (S) [Gpa]	Resistencia a la Tracción Específica (S/ γ) [km]	Rigidez (E) [Gpa]	Rigidez Específica (E/ γ) [Mm]
Aluminio	26.3	0.6	24.0	73.0	2.8
Titanio	46.1	1.9	41.0	115.0	2.5
Acero	76.6	4.1	54.0	207.0	2.7
Vidrio Tipo E	25.0	3.4	136.0	72.0	2.9
Vidrio Tipo S	24.4	4.8	197.0	86.0	3.5
Carbono	13.8	1.7	123.0	190.0	14.0
Berilio	18.2	1.7	93.0	300.0	16.0
Boro	25.2	3.4	137.0	400.0	16.0
Grafito	13.8	1.7	123.0	250.0	18.0

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras de mayor aplicación [3]

Las fibras se comercializan, principalmente, en dos formas:

- Continua
- Discontinua

Las fibras continuas son largas y ofrecen un camino libre de discontinuidades que hace a la transferencia y capacidad de carga de éstas. Por el contrario, las fibras discontinuas o *Chopped* son de longitudes cortas y suelen utilizarse en materiales compuestos de baja sollicitación mecánica ya que no hacen el mejor uso de la capacidad direccional en la toma de carga de los materiales compuestos.

La orientación de las fibras es otro parámetro crucial en el comportamiento del material compuesto. Existen tres casos fundamentales de direccionamiento de las fibras [4]:

- Fibrados Unidireccionales
- Fibrados Planos
- Fibrados al azar

Por último, los materiales más utilizados como refuerzo en materiales compuestos, y más precisamente en forma de fibras son:

- Fibras de Vidrio tipo E¹ (vidrio de aluminio-borosilicato con menos de 1% peso/peso de óxidos alcalinos)
- Fibras de Vidrio tipo S (vidrio de aluminio-silicatos sin CaO pero con alto contenido de MgO, con alta resistencia a la tracción)
- Fibras de Carbono
- Fibras de Boro
- Fibras de Aramiditas (Kevlar)
- Fibras metálicas

¹Existen otros tipos de fibras de vidrio entre las cuales se encuentran las de tipo A, D, C, R y E-CR de aplicación más reducida y específica.

1.3.3. Matriz o Fase Primaria

La matriz es el elemento que une los refuerzos de manera que éstos puedan conformar un elemento estructural capaz de tomar cargas. En otras palabras, sin la matriz las formidables propiedades de las fibras serían de escasa utilidad.

Las funciones de la matriz son [4]:

- Soportar los elementos de refuerzo, cualquiera sea su forma
- Proteger a los elementos de refuerzo
- Asegurar una eficiente transferencia de carga hacia las fibras (tomadores de carga primarios)

Los materiales que componen las matrices pueden inscribirse en cualquiera de las familias de materiales conocidas dando lugar a los siguientes materiales compuestos:

- Compuestos de Matriz Polimérica (Termorígida o Termoplástica)
- Compuestos de Matriz Cerámica
- Compuestos de Matriz Metálica

1.3.4. Comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos

El comportamiento y la respuesta de los materiales compuestos frente a sollicitaciones mecánicas difieren, en muchas ocasiones, de lo esperado en la utilización de materiales de ingeniería más comunes como son los metales.

Para entender el comportamiento de éstos, es necesario asimilar los conceptos de homogeneidad, heterogeneidad, isotropía, ortotropía y anisotropía.

Un sistema material es homogéneo cuando posee propiedades uniformes en toda su extensión espacial. Contrariamente, un material heterogéneo es aquel que no posee uniformidad en sus propiedades, o lo que es lo mismo, sus propiedades varían según el lugar donde se las observe.

Los materiales elásticos lineales son caracterizados por constantes elásticas que son parámetros físicamente medibles que definen el comportamiento elástico de los sólidos deformables.

En elasticidad la relación entre las deformaciones ε y las tensiones σ se da por el tensor constitutivo de cuarto orden C_{ijkl} que está caracterizado por 81 constantes elásticas. Dicha relación se expresa mediante la siguiente ecuación tensorial [3]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Donde σ_{ij} representa el tensor de segundo orden de tensiones en las direcciones (x,y,z) o (1,2,3) en un cubo elemental de material como se muestra en la Figura 2 y ε_{kl} representa el tensor de segundo orden de deformaciones respectivamente.

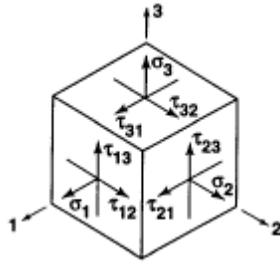


Figura 2. Cubo elemental de tensiones

El tensor constitutivo posee características de simetría debido a tres consideraciones de simetría. La primera, basada en la simetría del tensor de tensiones:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \rightarrow C_{ijkl} = C_{jikl}$$

La segunda, basada en la energía potencial del sistema según las siguientes ecuaciones:

$$C_{ijkl} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \epsilon_{kl}}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}}$$

$$C_{ijkl} = \frac{\partial^2 U}{\partial \epsilon_{ij} \partial \epsilon_{kl}} = \frac{\partial^2 U}{\partial \epsilon_{kl} \partial \epsilon_{ij}}$$

De donde resulta la segunda condición de simetría a partir de la igualdad de las derivadas parciales cruzadas anteriores:

$$C_{ijkl} = C_{klij}$$

Combinando la primera y segunda condición de simetría se obtiene la tercera condición, que establece:

$$C_{ijkl} = C_{ijlk}$$

De esta manera, se reduce la cantidad de constantes independientes del tensor constitutivo a solamente 21.

Para facilitar el manejo y la operación con estas magnitudes, es común utilizar la Notación de Ingeniería o de Voigt que reduce las expresiones anteriores a las siguientes relaciones matriciales:

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

La matriz anterior caracteriza a los materiales que no poseen planos de simetría, también llamados materiales anisotrópicos.

La presencia de dos planos de simetría material ortogonales entre sí determina la existencia de simetría respecto de un tercer plano también ortogonal. Dicha característica, hace que la matriz constitutiva esté caracterizada por solo 9 constantes independientes y tome la forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

Cabe destacar que, a diferencia de los materiales anisotrópicos, no existe interacción entre las deformaciones de corte y las tensiones normales así como tampoco existen interacciones entre deformaciones normales y tensiones de corte.

La presencia de un plano, en un punto de un material, en el cual todas las propiedades mecánicas sean iguales caracteriza a los materiales transversalmente isotrópicos que constituyen un caso particular de los materiales ortotrópicos descritos anteriormente. Dadas estas condiciones, la matriz constitutiva contiene solo 5 constantes independientes y toma la forma (considerando el plano formado por las direcciones 1-2, x-y y el plano de simetría):

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

Si en cambio existen infinitos planos de simetría material en un punto dado, el material se denomina isotrópico y queda caracterizado por solos dos constantes elásticas independientes: el módulo de elasticidad longitudinal E que mide la resistencia a la deformación elástica de un material y el coeficiente de Poisson ν que expresa la razón entre la deformación transversal y longitudinal. La matriz constitutiva para estos materiales toma la forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 & \\ & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & \\ & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

En consecuencia, la respuesta frente a las sollicitaciones varía según el tipo de material considerado. En la Figura 3 se muestran las respuestas típicas para materiales isotrópicos, ortotrópicos y anisotrópicos cuando son sollicitados bajo una misma carga axial. Se puede ver que el modo de deformación es distinto.

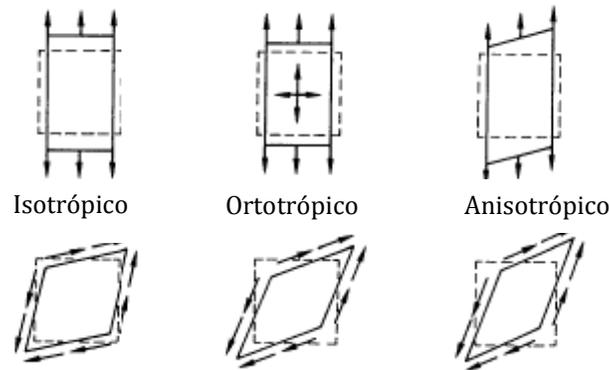


Figura 3. Comportamiento mecánico de los diferentes materiales frente a sollicitaciones similares

Los materiales compuestos se inscriben dentro de la categoría de materiales ortotrópicos y pueden, bajo ciertas condiciones de laminación, comportarse isotrópicamente o cuasi-isotrópicamente.

El cálculo de las propiedades mecánicas de un material compuesto parte del estudio de la unidad fundamental de todo diseño con estos materiales que es la *lámina*. Una lámina es un arreglo plano o curvo (como una cáscara) de fibras unidireccionales o tejidas embebidas en una matriz de soporte. Las láminas constituyen los bloques de construcción de los laminados que son un apilamiento de láminas y que conforman elementos estructurales de aplicación real.

1.3.5. Láminas Unidireccionales

Las láminas unidireccionales poseen refuerzos de fibra larga en una dirección determinada, insertos en una matriz de cierto material.

Las láminas de este tipo poseen características transversalmente isotrópicas lo cual implica la existencia de dos planos de simetría material en vez de tres como se espera de un material

ortotrópico. La caracterización de estos materiales requiere cuatro constantes elásticas únicamente.

Si se considera el laminado elemental de la Figura 4, se observa que las direcciones 2 y 3 son las que presentan iguales propiedades, mientras que la dirección de las fibras es la que presenta diferencias. La observación de la simetría en las direcciones antes mencionadas permite sacar conclusiones respecto de las propiedades *out of plane* o fuera del plano de la lámina.

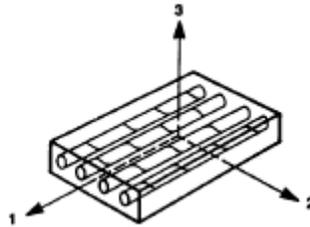


Figura 4. Esquema tradicional de laminado unidireccional

La caracterización de una lámina unidireccional basada en las hipótesis de Kirchhoff para placas y de Kirchhoff-Love [1] para cáscaras requiere el conocimiento de cuatro constantes elásticas: Módulo Elástico en la dirección $1E_1$, Módulo Elástico en la dirección $2E_2$, Coeficiente de Poisson ν_{12} y Módulo Cortante G_{12} .

El cálculo de dichas propiedades puede realizarse adoptando un enfoque basado en la Microestructura de las láminas, dentro de las cuales uno de los modelos más simples y de amplia aceptación es el llamado Regla de las Mezclas, o *ROM* por sus siglas en inglés. Según la regla de las mezclas, las propiedades de una lámina unidireccional quedan determinadas por el porcentaje en volumen del material compuesto ocupado por el material de la matriz V_m y por el porcentaje en volumen del compuesto ocupado por la fibra V_f , calculados de la siguiente manera:

$$V_m = \frac{\text{Volumen de matriz}}{\text{Volumen de fibra} + \text{Volumen de matriz}}$$

$$V_f = \frac{\text{Volumen de fibra}}{\text{Volumen de fibra} + \text{Volumen de matriz}} = 1 - V_m$$

De esta forma, las propiedades físicas y mecánicas de la lámina se pueden calcular según las expresiones siguientes [5]:

$$\rho_T = V_f \rho_f + V_m \rho_m$$

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_{12_f} + V_m \nu_{12_m}$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m}$$

La simetría presentada por las láminas unidireccionales permite establecer las siguientes relaciones entre las constantes elásticas faltantes:

$$E_2 = E_3$$

$$G_{12} = G_{13}$$

$$\nu_{31} = \nu_{23}$$

1.3.6. Refuerzos aleatorios

Los refuerzos aleatorios no poseen direcciones privilegiadas por lo que pueden considerarse como materiales isotrópicos o cuasi-isotrópicos. De esta manera, estos materiales quedan caracterizados mediante dos constantes elásticas: el módulo elástico longitudinal E y el coeficiente de Poisson ν_{12} , que son calculados a partir de una fracción de fibra inicialmente conocida y adaptando la regla de las mezclas a la situación particular que estos laminados suponen. Las fórmulas para calcular dichas constantes son [6]:

$$E = \frac{E_1^2 + 4E_1 G_{12} \Delta + 2E_1 E_2 + 8\nu_{12} E_2 G_{12} \Delta - 4\nu_{12}^2 E_2^2 + 4E_2 G_{12} \Delta + E_2^2}{\Delta(3E_1 + 2\nu_{12} E_2 + 3E_2 + 4G_{12} \Delta)}$$

$$G = \frac{E_1 - 2\nu_{12} E_2 + E_2 + 4G_{12} \Delta}{8\Delta}$$

$$\nu = \frac{E_1 + 6\nu_{12} E_2 + E_2 - 4G_{12} \Delta}{3E_1 + 2\nu_{12} E_2 + 3E_2 + 4G_{12} \Delta}$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12} \nu_{21}$$

Se puede comprobar que las expresiones anteriores mantienen la conocida relación entre el módulo de elasticidad y el módulo de elasticidad en cortante de los materiales isotrópicos:

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

Asimismo, las fórmulas anteriores suelen ser aproximadas mediante las siguientes relaciones [6]:

$$E = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2$$

$$G = \frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{4}E_2$$

La resistencia a la tracción de este tipo de compuestos viene dada por la siguiente correlación empírica [6]:

$$F_{csm,t} = \begin{cases} \frac{4}{\pi} F_6 (1 + \ln \alpha) & \alpha > 1 \\ \frac{4}{\pi} F_6 \alpha & \alpha \leq 1 \end{cases}$$

Donde α es un parámetro que combina la resistencia a la tracción longitudinal (F_{1t}), transversal (F_{2t}) y al corte (F_6) para el compuesto laminado unidireccionalmente con el mismo porcentaje en volumen de fibra V_f que el laminado continuo (CSM) según la siguiente expresión [6]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{F_{1t}F_{2t}}{F_6^2}}$$

1.3.7. Laminados

Un laminado se define como dos o más láminas adheridas con el fin de obtener un elemento estructural integral. En un laminado, las distintas láminas quedan orientadas respecto de un cierto eje de coordenadas global para producir un elemento capaz de soportar cargas en múltiples direcciones. La rigidez y la resistencia de estos elementos resultan de la interacción de las propiedades de las láminas que los componen.

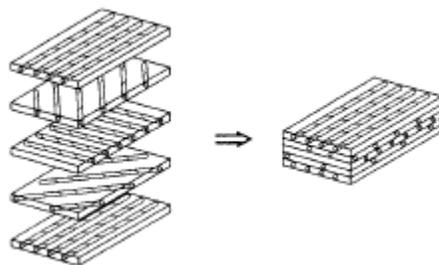


Figura 5. Esquema típico de laminado

El comportamiento de los laminados frente a distintas sollicitaciones es explicada a través de la Teoría Clásica de Laminados que hace uso de ciertas hipótesis sobre la deformación para obtener las relaciones de esfuerzo-deformación que caracterizan la respuesta de los laminados. Un resultado importante de dicha teoría es que la utilización de láminas ortotrópicas para la conformación de laminados puede conllevar al desarrollo de efectos de interacción en extensión-flexión, flexión-torsión, corte-extensión, poco usuales en materiales comunes de ingeniería. Dichos

efectos si no son previstos pueden acarrear resultados indeseables. Por otra parte, cabe mencionar que el empleo de laminados simétricos anula los efectos de apareamiento antedichos.

1.3.8. Notación de laminados

Para identificar las láminas que forman los laminados y la secuencia de apilamiento, se utiliza una notación ampliamente difundida con las siguientes consideraciones [3]:

- Laminados regulares (láminas de igual espesor) quedan identificados mediante el listado de las capas y sus respectivas orientaciones. Ejemplo: $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$
- Laminados irregulares (láminas de espesores variables) quedan identificadas mediante el listado de las capas, sus respectivas orientaciones y sus espesores en notación subindicial. Ejemplo: $[0^\circ_t, 15^\circ_t, 30^\circ_{2t}, 45^\circ_{3t}, 90^\circ_t]$, donde t es un parámetro de espesor previamente definido.
- Laminados simétricos quedan identificados mediante el empleo de una s subindicial al finalizar la porción de laminado que se repite. Ejemplo: $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ]$ es equivalente a $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]_s$.

1.3.9. Descomposición de Tensiones

En ocasiones las direcciones principales de ortotropía no coinciden con las direcciones geométricas globales en las que se resuelven los problemas. Por ejemplo, si se considera un cilindro de pared delgada, como el que se muestra en la Figura 6, reforzado con fibra a 45° se pueden observar dos sistemas de coordenadas típicos: el primero, más afín a la geometría del problema (x, y, z) y el segundo, que sigue la orientación del material de refuerzo (x', y', z') .

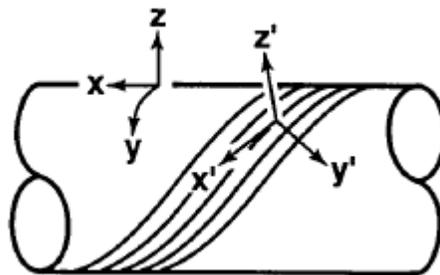


Figura 6. Sistemas de coordenadas en materiales laminados

Esta discrepancia hace necesaria una transformación de tensiones desde las coordenadas globales a las coordenadas materiales o locales, para la correcta interpretación de estas y la consecuente implementación de criterios de falla. Dicha transformación, representada en la Figura 7, viene expresada en forma matricial de la siguiente manera para problemas planos:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

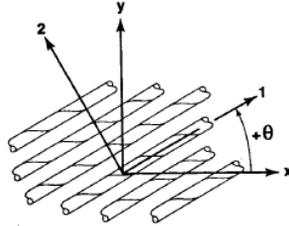


Figura 7. Descomposición de tensiones en laminados unidireccionales

1.3.10. Criterios de Falla

Las características particulares de los materiales compuestos hacen que los criterios de falla de uso común en materiales isotrópicos como el Criterio de Von Mises no puedan ser utilizados para predecir correctamente la falla en el material. Si bien existe una multiplicidad de criterios de falla a continuación se describen los dos utilizados en este trabajo.

1.3.11. Criterio de Tensiones Máximas

El criterio de tensiones máximas establece que para que el laminado no falle, las tensiones máximas en cada dirección espacial deben ser menores a las respectivas resistencias. De lo contrario sucederá la fractura del material. Matemáticamente, el criterio requiere [3]:

$$\begin{array}{lll} \sigma_{1t} < F_{1t} & |\sigma_{1c}| < F_{1c} & \\ \sigma_{2t} < F_{2t} & |\sigma_{2c}| < F_{2c} & \\ |\tau_{12}| < F_6 & |\tau_{23}| < F_4 & |\tau_{31}| < F_5 \end{array}$$

Donde F_{1t} y F_{1c} son las resistencias a la tracción y a la compresión respectivamente en dirección longitudinal (dirección de las fibras), F_{2t} y F_{2c} son las resistencias a la tracción y a la compresión respectivamente en la dirección transversal de la lámina. Los valores F_6 , F_4 y F_5 son las resistencias al corte en las direcciones 12, 23 y 31 respectivamente, como se ve en la Figura 4.

Para cuantificar la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos, se define el factor de seguridad FS :

$$FS = \frac{F_{ij}}{\tau_{ij}}$$

Se conviene en un valor mínimo de FS que asegure la integridad de la estructura, estimado en función de las imprecisiones en los valores asignados a las propiedades de los materiales, a las cargas y las condiciones de borde con las que se modela, entre otras cosas.

1.3.12. Criterio de Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu considera un estado general de tensiones y no a cada componente de tensión individualmente como lo hace el criterio de Tensiones Máximas. A diferencia de otros criterios de falla, éste tiene en cuenta los distintos comportamientos en tracción y compresión de los materiales compuestos. Si bien es un criterio más minucioso que el anterior, la utilización de este criterio suele estar acompañada del de Tensiones Máximas para poder identificar el modo de falla más probable y guiar al diseñador en la optimización del laminado.

Matemáticamente, el criterio de Tsai-Wu expresa que un estado general de tensiones produce falla en el material cuando [6]:

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\tau_{12}^2 + f_{44}\tau_{23}^2 + f_{55}\tau_{31}^2 \geq 1$$

Donde las constantes son funciones de la resistencia mecánica en direcciones distintas:

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \quad f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}}$$

$$f_{66} = \frac{1}{F_6} \quad f_{44} = \frac{1}{F_4} \quad f_{55} = \frac{1}{F_5}$$

La mayoría de los software de elementos finitos disponibles comercialmente ofrecen calcular el criterio de Tsai-Wu para las simulaciones de materiales compuestos haciendo uso de un índice de falla que es una reformulación de la expresión completa del criterio mostrada anteriormente y que se calcula como [6]:

$$R = \frac{1}{a}(-b + \sqrt{b^2 + a})$$

Donde:

$$a = f_1\sigma_1^2 + f_2\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\tau_{12}^2 + f_{44}\tau_{23}^2 + f_{55}\tau_{31}^2$$

$$b = \frac{1}{2}(F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2)$$

Para valores del índice de falla R mayores o iguales a uno, el material presentaría falla de acuerdo al criterio de Tsai-Wu, mientras que para valores menores a la unidad este estaría dentro del rango seguro de aplicación.

1.4. ALP Group S.A.

ALP Group S.A. es una empresa joven, fundada por ex alumnos del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) dedicada al diseño de equipos para generación de energía renovable eólica y solar de pequeña escala que basa sus diseños en tres pilares fundamentales:

1. Generación de ahorros energéticos
2. Mejoramiento en la calidad de vida de sus usuarios
3. Capacitación a clientes y usuarios para maximizar el desarrollo en zonas remotas del país

Actualmente (Abr. 2014) ALP cuenta con más de 40 aerogeneradores instalados a lo largo del país, principalmente en la Provincia de Buenos Aires y en la Patagonia y ha comenzado a extender su oferta de generadores eléctricos al campo de la energía solar.

El producto insignia de ALP y objeto de estudio de este trabajo es el Generador Costa-I de uso doméstico e ideado para uso en zonas rurales. Este generador entrega una potencia nominal de 1000 Watts, a partir de un generador de inducción trifásico de jaula de ardilla de velocidad constante de rotación de 300rpm.

Para el Costa-I se adopta la configuración con rotor horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine por sus siglas en inglés) en versión *Upwind*, según el cual el plano de rotación de las aspas se encuentra delante de la torre. Utiliza tres aspas idénticas separadas 120° obtenidas a partir del escalamiento y rotación de un único perfil alar Althaus AH 93-W-145 [7].

Las características más relevantes del Generador Eólico Costa-I se resumen en las especificaciones técnicas que muestra la Tabla 2, extraída del catálogo de la empresa [8].

Datos de Diseño	
Potencia Nominal en Salida	1000 W
Tipo de Salida	Monofásica 220 V-50 Hz
Velocidad de arranque	4 m/s
Velocidad de viento nominal	12 m/s
Rango de temperatura de servicio	-25°C a +50°C
Rotor	
Numero de aspas	3
Diámetro	2.8-3.3 m
Velocidad	300 rpm
Material de las aspas	Fibra de vidrio y resina poliéster
Generador	
Tipo de generador	Inducción trifásica
Tensión del generador	380 V
Frecuencia del generador	50 Hz
Sistema de seguridad	
Regulación de potencia	Sistema de Furl/Autoprotección mecánica
Sistema de freno	Freno de seguridad mecánico
Torre	
Altura	Variable (9 a 13m)
Tipo	Torre con caños galvanizados de 3" y 4mm de pared
Montaje	Torre con riendas y anclajes correspondientes
Peso	
Generador sin torre	72 kg

Tabla 2. Tabla de especificaciones del generador Costa-I doméstico

1.4.1. Materiales utilizados y proceso de fabricación

En la actualidad ALP elige para sus aspas diseños en materiales compuestos de matriz termorígida de Poliéster y refuerzos de fibra de vidrio tipo E corta en configuración CSM. Si bien la configuración CSM permite reducir el peso de los componentes respecto de los de una estructura metálica con las mismas prestaciones mecánicas, no hace uso extensivo de todo el potencial que los materiales compuestos pueden ofrecer en una aplicación como esta, como sí lo hacen los laminados unidireccionales.

Las palas son fabricadas por laminación manual o Hand Lay-Up² que, si bien es un método económico y razonablemente fiable, otorga un escaso control sobre propiedades importantes del compuesto.

A pesar de que la empresa no ha reportado problemas estructurales significativos en sus palas, se ha puesto poca atención en el diseño inteligente lo cual ha resultado, muchas veces, en soluciones ineficaces para parchar situaciones específicas tanto previas a la salida del producto como con el producto ya instalado.

Uno de los mayores problemas que reporta la empresa en la actualidad es la imposibilidad de asegurar uniformidad en las palas resultantes de producción, específicamente en lo que hace al peso y al balanceo dinámico del conjunto. Esto trae como consecuencia la utilización de tiempo y recursos valiosos para paliar estas situaciones. Dichos problemas son ocasionados por la utilización de Hand Lay-Up como proceso de manufactura, que acarrea una fuerte componente artesanal y altamente dependiente de la destreza de quien lo practica. Si bien el proceso de fabricación seleccionado es de bajo costo, muchas veces los costos resultantes producto de los problemas antedichos terminan superando el de un proceso que pueda asegurar una mayor uniformidad tanto en las propiedades físicas como en las propiedades en servicio.

El éxito reciente de la empresa trae aparejado la necesidad constante de ofrecer productos competitivos, lo cual obliga a la búsqueda de soluciones inteligentes y eficaces para mantener la confianza de los clientes y para aprovechar nuevas oportunidades de negocio.

²Proceso de manufactura explicado en la Sección 5.10

1.4.2. Geometría de las palas del generador Costa-I

Las palas del generador Costa-I están construidas a partir del escalamiento y rotación de un perfil único Althaus de denominación AH 93-W-145 de uso difundido en generación eólica de pequeña escala. En la Figura 8 se pueden apreciar distintas vistas de la pala.



Figura 8. Vistas de la pala

La longitud total de la pala es de 1.65 m, estando solo los últimos 1.35 m cubiertos por el perfil antes mencionado. El resto de la pala está constituido por la raíz que es el elemento que une las palas al rotor.

Las dimensiones características de los perfiles alares utilizados en la pala, relevadas desde la punta cada 100 mm se muestran en la Tabla 3 [7].

Sección	Distancia a la punta [mm]	Cuerda [mm]	Ángulo de sección θ [deg]	Radio [mm]
0 (Punta)	0	78.476	2.112	1650
1	100	85.811	2.756	1550
2	200	94.243	3.286	1450
3	300	100.791	3.741	1350
4	400	108.464	4.118	1250
5	500	116.308	4.474	1150
6	600	124.192	4.786	1050
7	700	131.599	5.041	950
8	800	138.264	5.209	850
9	900	143.917	5.294	750
10	1000	148.267	5.291	650
11	1100	150.964	5.183	550
12	1200	151.139	4.995	450
13	1300	148.780	4.788	350

Tabla 3. Características geométricas de la pala

La Figura 9 muestra otra vista de la pala, donde a su vez se indica el nombre de las distintas partes de ésta, a las que se hace referencia a lo largo del presente informe. A su vez, se indica qué representa la *Longitud Disponible*, que corresponde a la longitud de la pala sin la raíz.

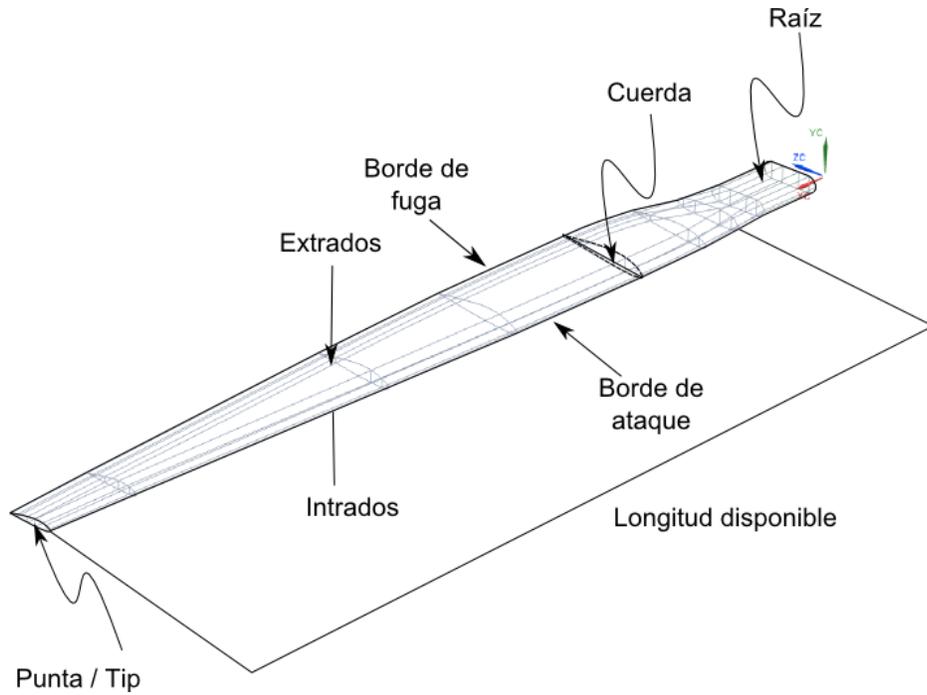


Figura 9. Nomenclatura utilizada para las distintas partes de la pala

2. Definición de los objetivos del proyecto

A partir de entrevistas con los representantes de la empresa ALP Group S.A., se establecieron los requisitos de diseño de la pala que definieron el objetivo del proyecto. En términos generales, el objetivo fue proporcionarle a la empresa el diseño de una pala que aproveche las bondades de los materiales compuestos de manera más eficiente que el diseño actual (Abr. 2014), pudiéndose fabricar con la tecnología disponible, asegurando la repetibilidad del proceso y la mayor uniformidad posible en la producción.

2.1. Proceso de Manufactura

El principal problema reportado por los representantes de la empresa ALP respecto a las palas fue la necesidad de realizar un proceso de balanceado dinámico del rotor con las tres palas previo a la instalación de cada torre debido a la gran dispersión en la distribución de la masa en cada pala. Se identificaron dos causas principales de esta problemática. En primer lugar, la falta de una hoja de laminación que indicara precisamente la cantidad de matriz y de refuerzo a colocar en cada lugar, y en segundo lugar, al poco control sobre la cantidad y la distribución del material de matriz que se aplicaba, lo cual responde a las características del proceso de Hand Lay-Up.

De esta manera, el primer objetivo de diseño del proyecto fue la especificación precisa de un esquema de laminado junto con un proceso estandarizado de producción que fuera fácilmente repetible, de manera de obtener la menor dispersión posible en la salida de producción.

2.2. Peso

El primer aspecto de diseño considerado fue el peso de la pala, el cual toma gran relevancia a medida que aumenta el tamaño de las turbinas [9]. En este caso, el peso que se utilizó como referencia corresponde a la región definida en la Sección 1.4.2 como *Longitud Disponible*, y equivale a $M_{\text{anteraiz}}=2.10\text{kg}$. A la hora de considerar redefinir esta propiedad se pensó en las repercusiones que tendría una variación del peso tanto en la fabricación, como en el transporte, en la instalación y en el funcionamiento del generador.

Por un lado, durante el proceso de fabricación, una variación en el peso de la pala estaría relacionado únicamente con la variación de la cantidad de materiales empleados y por lo tanto, con el costo total de materias primas. Durante el transporte y la instalación el peso de las palas no es un inconveniente, teniendo en cuenta que el peso de las 3 palas que componen a cada generador representa un 9% del peso total de éste y sus componentes sin considerar el peso de la torre, lo que las hace fácilmente manipulables por una sola persona.

Es así que la empresa no reportó la necesidad de disminuir el valor de esta variable en relación a estos motivos, al menos en la proporción que se consideraba factible, la cual en su momento se supuso un 10% del peso, teniendo en cuenta que las palas ya eran fabricadas en materiales compuestos.

Por otro lado, durante el funcionamiento, la masa de las palas ejerce influencia en dos de las cargas que debe soportar la estructura, ambas distribuidas en el volumen. Una de ellas es el peso que actúa en la dirección de la aceleración de la gravedad y la otra es la fuerza centrífuga que actúa en dirección radial saliente respecto del eje de rotación de las palas. La deformación producida por la fuerza del peso se considera despreciable respecto a las producidas por las otras cargas debido a la geometría y las dimensiones de la pala. La deformación producida por la fuerza centrífuga no es relevante debido a que la velocidad angular nominal $n_{nom} = 300\text{rpm}$, lo que provoca que esta fuerza no sea de mayor influencia y que una disminución en el peso, en el porcentaje mencionado, no sea significativa. Sin embargo, las redistribuciones de masa que se realizaron por cuestiones de ajuste de la frecuencia natural de vibración de la pala, redujeron el valor de esta fuerza. De todas maneras, las cargas centrífugas son consideradas en las simulaciones estructurales de la pala.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones acerca del peso, se decidió que éste no variara más de un 5% respecto del valor actual de $M_{anteraiz} = 2.10\text{kg}$, aprovechando su redistribución para mejorar otros aspectos del diseño estructural de la pala.

2.3. Deflexión máxima

Los representantes de la empresa ALP Group S.A. reportaron que durante el funcionamiento, la pala muestra una deflexión notable en la dirección del eje de rotación del generador y en sentido contrario al viento que incide sobre la torre.

El valor de esta deflexión máxima no fue la principal preocupación, ya que la alteración que provoca en la aerodinámica de la pala no impide que la turbina siga generando la potencia nominal. Además, la distancia mínima d_{min} del extremo de la pala a los otros componentes del generador, representada en la Figura 10, es suficiente como para evitar el contacto indeseado entre estos cuando la pala se encuentra en la condición de máxima deflexión, para la velocidad máxima del viento antes de que el mecanismo de protección comience a retraer el generador para frenarlo.

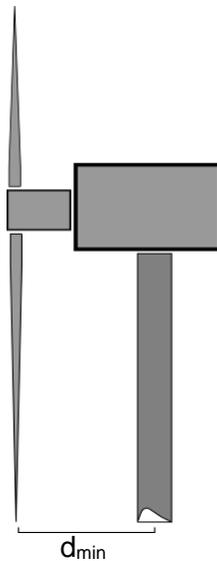


Figura 10. Distancia entre aspas y torre

De esta forma es que la disminución de la deflexión máxima fue producto de la rigidización de la pala para cumplir con otros objetivos, pero no se planteó como un objetivo prioritario de

diseño. Era suficiente que la deflexión del diseño propuesto no supere el valor de deflexión del diseño actual.

2.4. Resistencia

La empresa no indicó la ocurrencia de roturas de palas durante el funcionamiento normal del generador. El diseño actual de la pala se encuentra sobredimensionado en este sentido. Para el diseño propuesto, sin embargo, se planteó establecer un criterio de falla de los más difundidos para el diseño con materiales compuestos, que permitiera establecer cuantitativamente un factor de seguridad a utilizar, teniendo en cuenta la imprecisión en el valor de las propiedades de cada uno de los materiales con los que se fabricaban las palas y la interacción entre ellos. Para diseñar se optó por utilizar el criterio de tensiones máximas, descrito en la Sección 1.3.11, con un factor de seguridad $FS=2.5$. A su vez, en el diseño final se verificó que la estructura satisficiera el criterio de Tsai-Wu, descrito en la Sección 1.3.12.

El análisis fue realizado en la condición más exigente de operación (ver Sección 3.3.1), la cual se verifica para una velocidad de viento de 9 m/s, entregando una potencia cercana a los 1000 W, como se observa en la Figura 11.

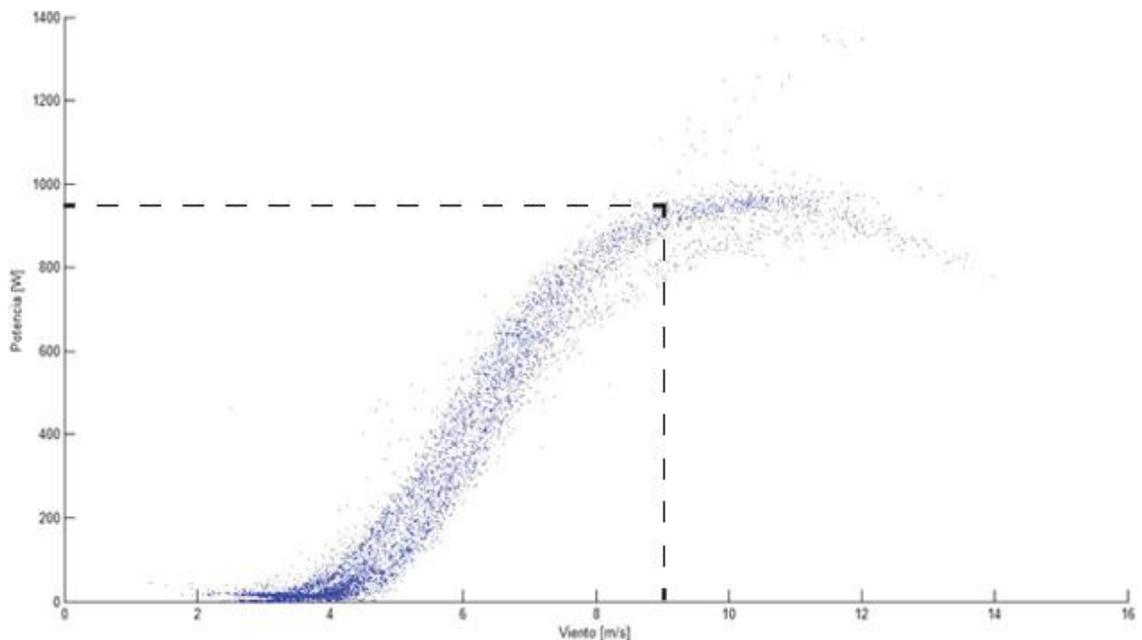


Figura 11. Perfil de generación del Costa-I en función de la velocidad del viento

Esto permitió generar una redistribución del material en la pala, teniendo en cuenta los límites de resistencia en cada punto, de manera tal que la integridad estructural de la pala no se viera comprometida.

2.5. Frecuencias naturales

Para minimizar la amplitud de las oscilaciones resultantes de la aplicación de cargas cíclicas que puedan inducir falla por fatiga, se buscó diseñar la pala de manera que minimice la operación en condiciones de resonancia.

En una pala de generador eólico, las excitaciones periódicas pueden provenir de distintas fuentes. Un subconjunto de estas está relacionado con el hecho de que el rotor de la turbina gira a velocidad angular constante, por lo que cualquier asimetría cíclica en las condiciones de carga se convierte en una excitación a la frecuencia correspondiente a la velocidad angular nominal $n_{nom}=300rpm$ [10].

El desbalance en la distribución de masa entre las tres palas que conforman a un rotor, producido por ejemplo, por un ineficiente control de la cantidad de material de matriz en el proceso de fabricación, es una de las fuentes de vibraciones.

Por otro lado, aún a pesar de alcanzar la uniformidad en la producción de palas, en todas las HAWT como la Costa-I, el movimiento angular del rotor traduce cualquier variación espacial en el viento atravesado por la pala en cada vuelta, en una excitación cíclica. Debido a que el eje del rotor se encuentra a 13m del suelo y la distancia desde el centro de este eje a la punta de la pala es de 1.650 m, esta sección de la pala oscila entre una altura mínima de 11.350m y una altura máxima de 14.65 m respecto del piso. La relación entre la diferencia de alturas y la altura del centro del rotor hace suponer que las variaciones en la carga del viento en función de la altura o *WindShear*, debida a los efectos de capa límites impuestos por el suelo son despreciables. Este fenómeno se ilustra en la Figura 12.

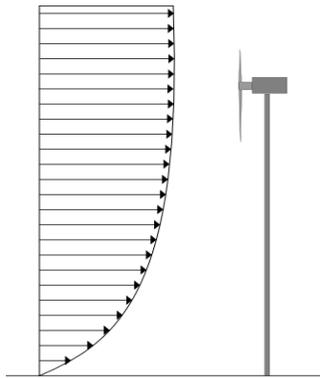


Figura 12. WindShear

A su vez, la torre del generador provoca una alteración en el flujo de viento que lo atraviesa conocida como *Tower Shadow*, por donde pasa la pala en la parte inferior de cada rotación, provocando una variación cíclica en las fuerzas aerodinámicas sobre la pala.

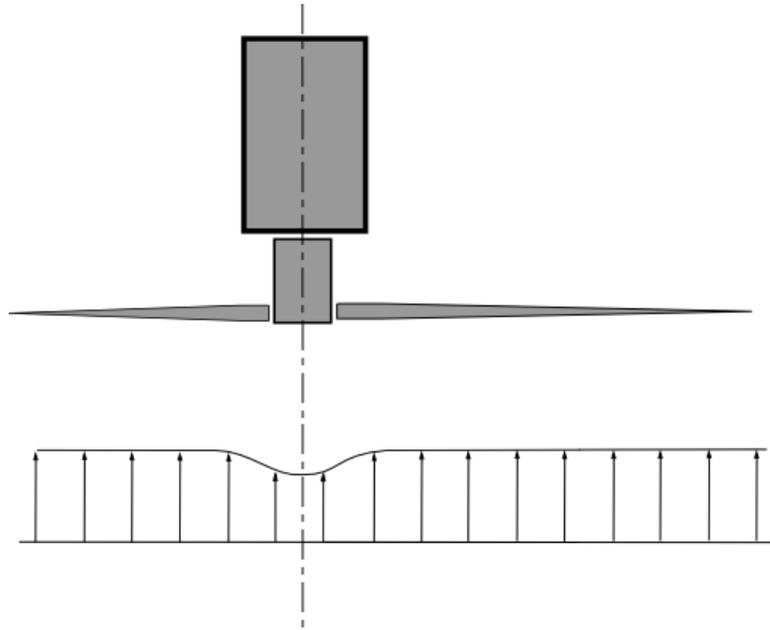


Figura 13. Efecto de Apantallamiento o Tower Shadow

Dado que la velocidad nominal del generador Costa-I es de $w=300\text{rpm}$, la frecuencia de este conjunto de fuerzas de excitación es:

$$f_{shadow} = \frac{n_{nom}}{60\text{ s}/\text{min}} = \frac{300\text{ rev}/\text{min}}{60\text{ s}/\text{min}} = 5\text{Hz}$$

El otro conjunto de excitaciones son las relacionadas a las vibraciones de la torre, ya que en caso de que la torre entre en resonancia al ser excitada por vibraciones debidas, por ejemplo, al desprendimiento de vórtices, las palas estarían recibiendo una excitación en la frecuencia de esas vibraciones, transmitida a través de los cojinetes que soportan al rotor y lo conectan con la torre.

Con el propósito de estimar la frecuencia a la que actuarían estas excitaciones se realizó el análisis de respuesta modal de un modelo simplificado de la torre con el generador mediante elementos finitos. Un esquema de la torre se muestra en la Figura 13. Allí se puede ver que la primera serie de tensores se une a la torre a los 6 m de altura, la segunda a los 11m y que a 2m de esta última serie se encuentra el eje del rotor. En una simplificación de la estructura, por un lado, se considera que la torre está empotrada en la base, es decir, que esa sección de la torre no puede girar ni desplazarse. Luego, para modelar la rigidez estructural que le aportan los tensores a la torre, se considera que los puntos en los que estos se unen a la estructura están fijos, es decir, que esas secciones pueden girar pero no desplazarse. Por último, se concentra toda la masa del generador y las palas en un punto en el extremo libre de la torre. De esta manera, el modelo resultante consistió en una viga de 13 m de largo con la sección del caño de la torre, empotrada en la base y fijada en dos secciones a 6 y 11 m de altura y con una masa puntual de 78kg conectada en el extremo superior y como se muestra en la Figura 15a.

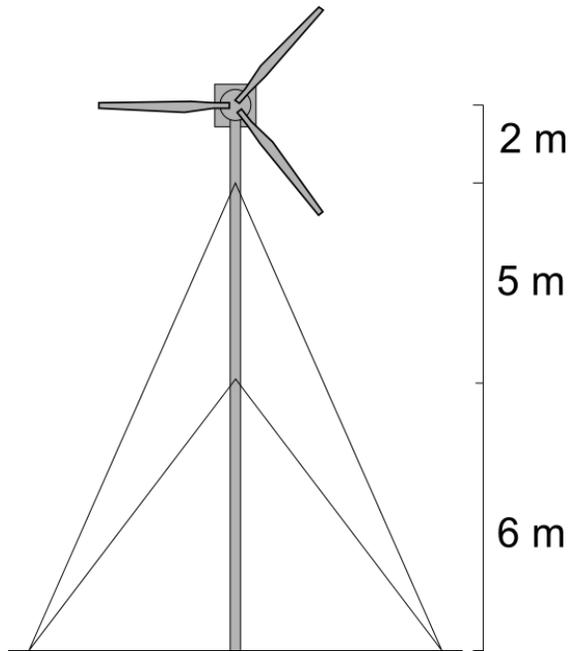


Figura 14. Esquema de la torre

Utilizando el software NX NASTRAN v8.0 para obtener las frecuencias naturales de vibración se estimó que los primeros modos se producen a $f_{\text{torre1}} = 2.705 \text{ Hz}$, $f_{\text{torre2}} = 11.24 \text{ Hz}$ y $f_{\text{torre3}} = 17.00 \text{ Hz}$. Estos son todos modos de deflexión y se muestran en la Figura 15 (b), (c) y (d).

Se consideró que rigidizando la pala y distribuyendo su masa de manera tal que su primer modo de vibración fuera lo suficientemente mayor que f_{torre1} y f_{shadow} , y suficientemente menor que f_{torre2} , la pala quedaría protegida contra las principales excitaciones cíclicas presentes en un aerogenerador de este tipo.

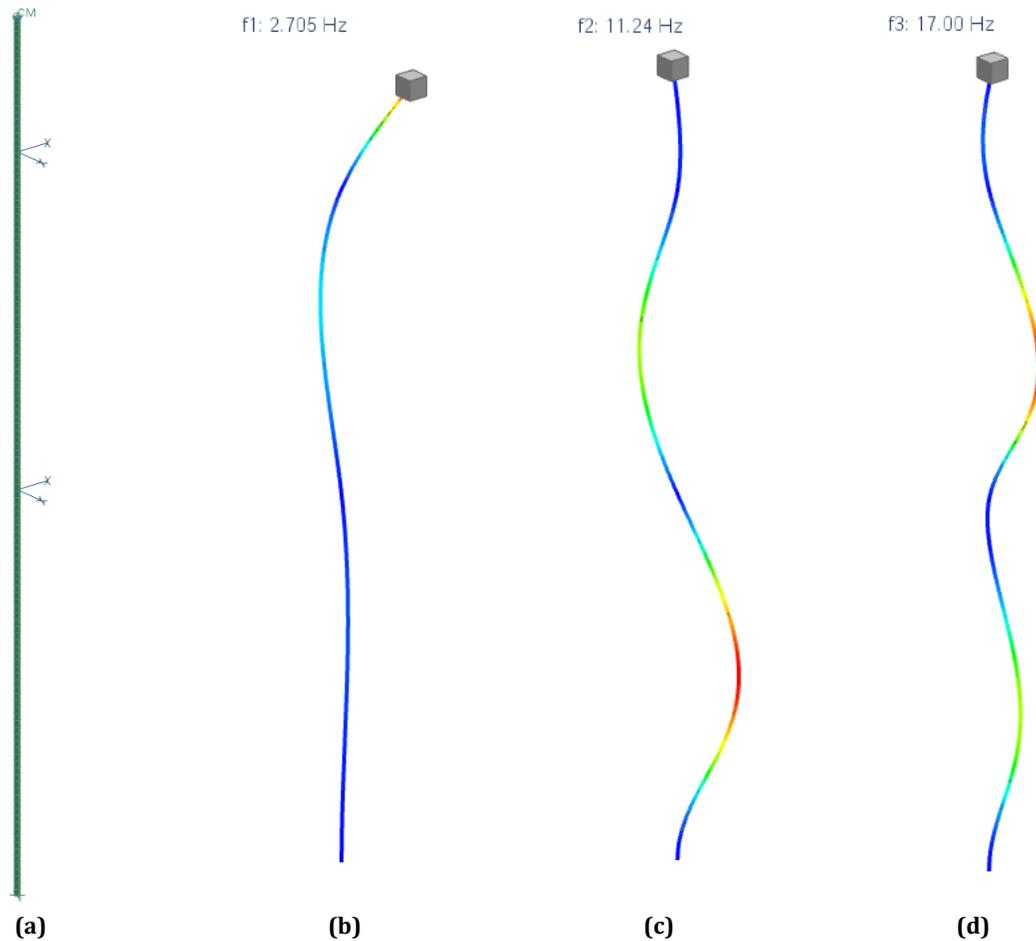


Figura 15. (a) Modelo de elementos finitos de la torre. (b) Primer, (c) segundo y (d) tercer modo de vibración del modelo simplificado de la torre

Para determinar la frecuencia del primer modo de la pala f_{safe} que garantiza el apartamiento seguro de la torre se utilizó la siguiente relación [11]:

$$\sqrt{2} \max(f_{torre1}, f_{shadow}) \leq f_{safe} \leq \frac{f_{torre2}}{\sqrt{2}}$$

$$\sqrt{2} \max(2.705 \text{ Hz}, 5 \text{ Hz}) \leq f_{safe} \leq \frac{11.24 \text{ Hz}}{\sqrt{2}}$$

$$7.071 \text{ Hz} \leq f_{safe} \leq 7.949 \text{ Hz}$$

De esta forma se decidió que el primer modo de vibración f_{safe} de la pala a diseñar debía encontrarse dentro del rango de frecuencias que va entre 7.1 Hz y 7.9 Hz.

2.6. Restricciones ligadas al uso de materiales compuestos

El diseño con materiales compuestos permite, como ya fue mencionado, obtener altos valores de rigidez y de resistencia en piezas de muy bajo peso. Para lograr esto, sin embargo, es necesario que las fibras o materiales de refuerzo sean los que tomen la carga, ya que son ellos lo

que le aportan a la pieza los valores altos en estas propiedades. Es por eso que se desea conocer las direcciones en las que las tensiones son máximas en cada zona de la pala, de manera de reforzar sólo en esas direcciones y así hacer un diseño eficiente, sin añadir material redundante. No obstante, se debe verificar que el proceso de fabricación a implementar permita tener ese control sobre el refuerzo. En este sentido, los métodos de fabricación de Hand Lay-up y RTM, mencionados en la Sección 4.3 permiten una gran libertad a la hora de posicionar estos refuerzos, en superficies tan chicas como sea necesario y en direcciones tan específicas como el instrumento utilizado para medir ángulos lo permita. De todas formas, existen restricciones intrínsecas de la materia prima, como los espesores mínimos de cada capa de fibra orientada, la necesidad de mantener esquemas balanceados de laminado para evitar efectos de acoplamiento, mencionados en la Sección 1.3.7, y cubrir todas las direcciones con al menos una mínima cantidad de refuerzo [12].

Estas restricciones se especifican en la Sección 4.1 y fueron tenidas en cuenta a la hora de sugerir el diseño ya que éste debe ser capaz de ser fabricado.

2.7. Resumen de objetivos

Resumiendo lo explicado en esta sección, el objetivo del proyecto fue determinar un diseño para la pala que satisficiera los siguientes requerimientos respetando las limitaciones de fabricación:

- 1- Uniformidad de las unidades producidas.
- 2- Incremento de peso menor al 5% respecto de $M_{anteraiz}=2.10\text{kg}$
- 3- Verificación de los criterios de Tensiones Máximas con un factor de seguridad $FS=2.5$ y de Tsai-Wu.
- 4- Frecuencia del primer modo de vibración en el rango de frecuencias entre 7.1 Hz y 7.9 Hz .

3. Modelado de la pala actual

3.1. Modelo Físico

El modelado por elementos finitos de la pala actual del generador Costa-I requiere validación experimental, por lo que se realizaron distintas mediciones y pruebas de carga de manera de contar con suficientes datos para obtener una representación de la realidad y dar mayor sustento al trabajo de rediseño posterior.

Las siguientes variables fueron medidas:

- Peso
- Posición del centro de masa
- Espesores
- Densidades de los materiales

Adicionalmente, se realizó un ensayo a varios niveles de carga para medir la deflexión estática y contrastar con el modelo computacional elaborado.

3.1.1. Medición del Peso

En la primer etapa de la caracterización del diseño actual se realizó el pesaje de dos palas actuales del Costa-I proporcionadas por la empresa ALP Group S.A.

Las palas fueron pesadas utilizando una balanza marca Systel modelo Cromo 30 con precisión de 0.1 Kg, como se muestra en la Figura 16 y los pesos obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Se pesó la estructura de la pala sin la raíz, es decir, la zona definida por la *Longitud Disponible*, indicada en la Figura 9.

Medición	Peso Medido [Kg]
1	2.1 ± 0.1
2	2.11 ± 0.1

Tabla 4. Resultados de mediciones de peso



Figura 16. Pesaje de dos ejemplares de aspa

3.1.2. Medición de la posición del centro de masa

Se midió la ubicación aproximada del centro de masa en la dirección radial medida desde la punta de la pala, como se indica en la Figura 17. Para ello, se empleó una hoja de *cutter* como fulcro de apoyo y se procedió a su traslación a lo largo de la longitud de la pala hasta lograr el equilibrio estático de ésta.

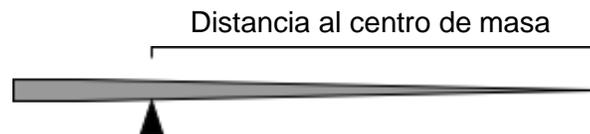


Figura 17. Esquema del procedimiento de medición de la ubicación del centro de masa

Los valores obtenidos de dichas mediciones se resumen en la Tabla 5.

Medición	Distancia al Centro de Masa [mm]
1	862 ± 1
2	863 ± 1

Tabla 5. Resultados de mediciones de la ubicación del centro de masa

3.1.3. Caracterización e identificación de elementos

Se procedió a la identificación de los componentes internos de la pala. Se observó, como lo muestra la Figura 18, que la pala está constituida por los siguientes elementos:

- Material Compuesto: Matriz Polipropileno-Refuerzo de Fibra de Vidrio tipo E (1)
- Restos de pegamento infiltrados al interior de la pala (2)
- Varilla de sección triangular de resina sin refuerzo (3)
- Núcleo de madera laminada de abedul (birch plywood) (4)

- Fibra de vidrio sin impregnar (5)



Figura 18. Interior de las palas

3.1.4. Subdivisión de la pala

La falta de uniformidad característica del proceso de manufactura utilizado para la producción de las aspas resulta en una gran variedad de espesores en todas las dimensiones. Para ajustar el modelo computacional con la realidad, se procedió a subdividir a la pala en secciones características de modo de facilitar las mediciones y la transferencia de información al modelo simulado.

En primer lugar, se distinguen dos superficies de la pala: la superficie de *extrados* y la superficie de *intrados*, indicadas en la Figura 9.

En segundo lugar, la pala fue subdividida en 6 secciones desde la raíz hasta la punta como lo muestran la Figura 19 y la Figura 20, y a su vez cada sección fue identificada según su ubicación respecto de los bordes de ataque y fuga de la pala siguiendo la siguiente secuencia: Ataque, Centro-Ataque, Centro, Centro-Fuga y Fuga, como lo muestra la Figura 21.

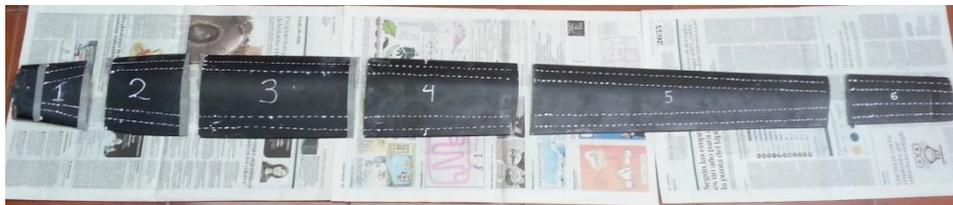


Figura 19. Subdivisión de la pala en secciones, lado Extrados

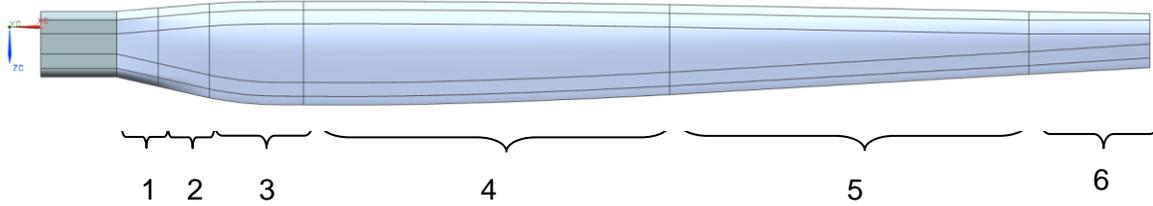


Figura 20. Subdivisión de la pala en secciones, lado Extrados, modelo en CAD

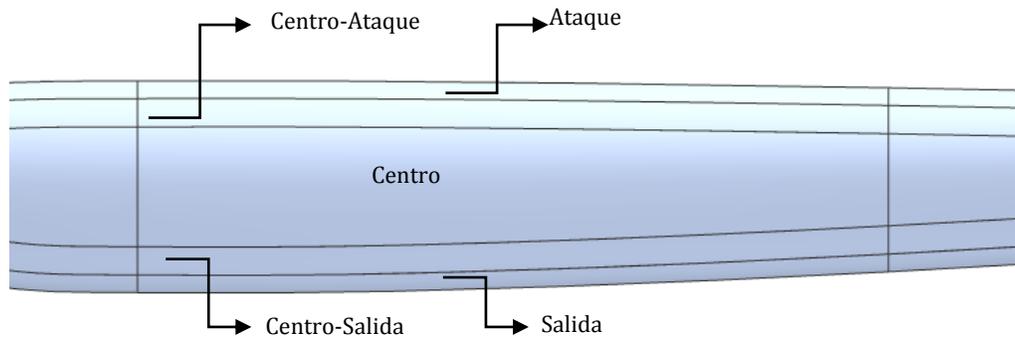


Figura 21. Subdivisión de cada sección de la pala

De esta manera, cada zona de la pala fue identificada según la siguiente nomenclatura:

[Intrados/Extrados_Ataque/Centro-Ataque/Centro/Centro-Fuga/Fuga_Número de Sección]

3.1.5. Medición de Espesores

Teniendo en cuenta el criterio de subdivisión e identificación mencionado anteriormente, se procedió a cortar la pala en cada una de las secciones, realizando una única medición en cada sección con el objetivo de obtener una distribución aproximada de espesores. Para la medición se empleó un calibre con precisión de 0.05 mm.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6, la Tabla 7, Figura 22 y Figura 23.

Medición de espesores - Extrados - Pala Típica [mm]						
Sección	1	2	3	4	5	6
Ataque	3.5	3.4	3.9	3.0	2.9	5.1
Centro Ataque	2.2	3.4	4.3	4.4	2.4	6.9
Centro	3.2	3.0	3.0	3.5	3.0	8.0
Centro Salida	3.8	3.5	4.6	4.1	3.9	5.0
Salida	4.0	2.7	3.3	2.4	2.9	2.4

Tabla 6. Espesores de secciones del lado extrados de una pala típica

Medición de espesores - Intrados - Pala Típica [mm]						
Sección	1	2	3	4	5	6
Ataque	1.8	1.5	2.0	2.0	1.6	2.5
Centro Ataque	2.0	1.9	3.0	2.0	2.0	2.8
Centro	2.9	3.3	3.4	3.2	2.4	3.0
Centro Salida	2.7	3.2	3.0	2.5	2.0	1.8
Salida	2.0	2.2	2.4	2.2	1.7	2.2

Tabla 7. Espesores de secciones de lado intrados de una pala típica

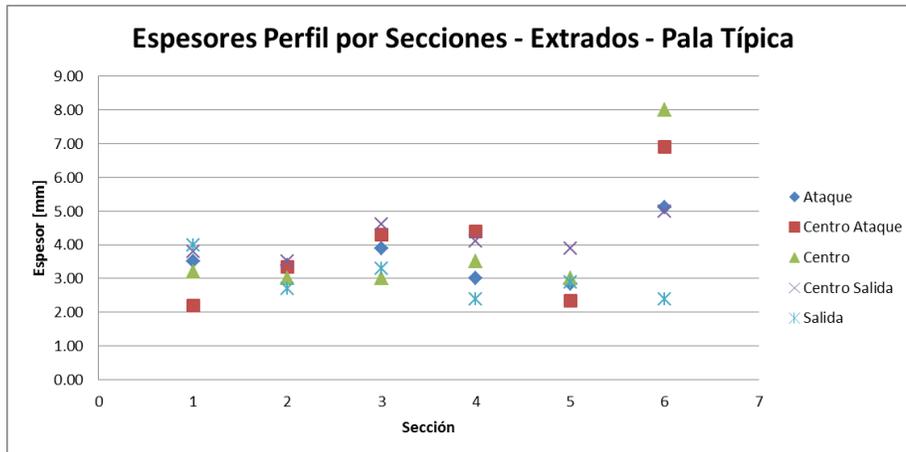


Figura 22. Gráfico de espesores en extrados según secciones

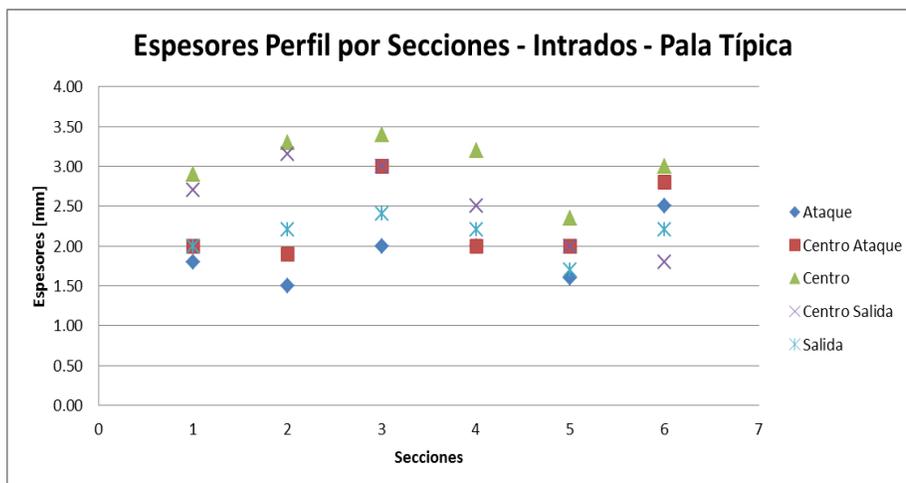


Figura 23. Gráfico de espesores intrados según secciones

Las mediciones arrojaron una considerable dispersión en los espesores obtenidos siendo ésta más alta en la sección 6 para el lado de extrados y en la sección 2 para el lado de intrados. Dicha dispersión es adjudicable a la dificultad para controlar la cantidad de resina inherente al proceso de Hand Lay-Up. La Figura 24, la Figura 25 y la Figura 26 muestran secciones de las que se midieron los espesores. En ellos se aprecia la calidad del laminado y se observa el laminado de madera y el recubrimiento de resina.

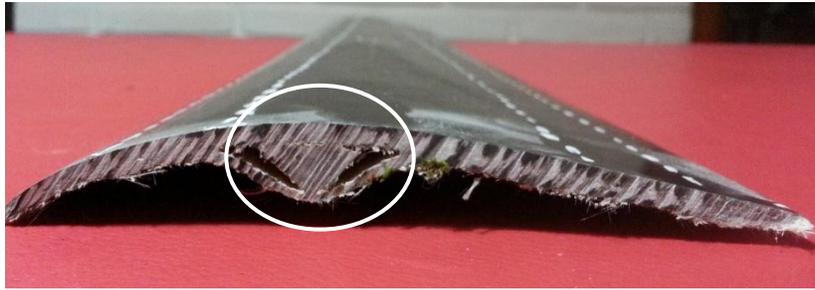


Figura 24. Vista de corte de sección 3, extradados. Notar la varilla de resina en el centro de la sección, recubierta con resina para asegurar su posición (zona resaltada).

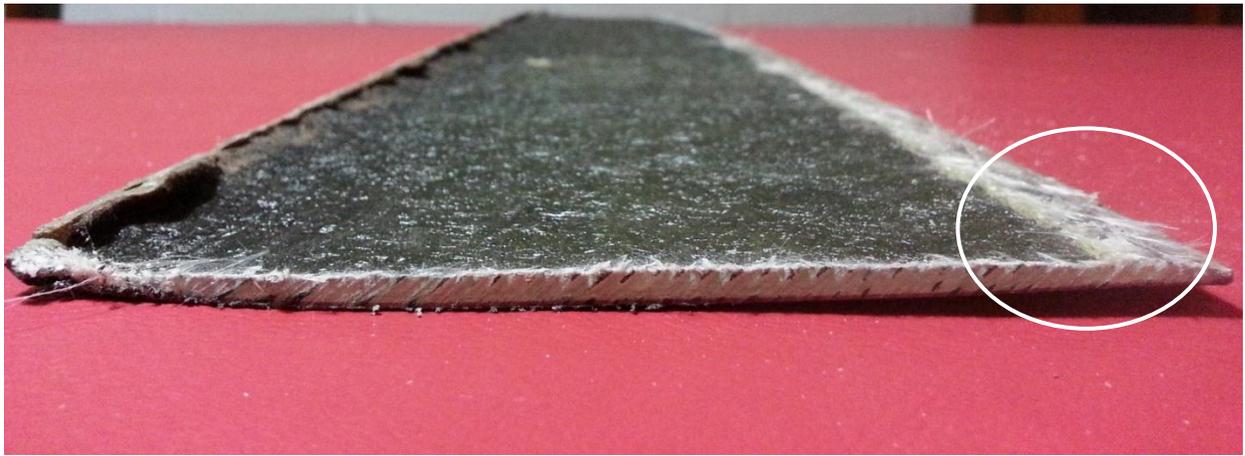


Figura 25. Vista de corte de sección 3, intrados. Notar la falta de uniformidad en el espesor y la presencia de fibra sin impregnar en el extremo derecho (zona resaltada).

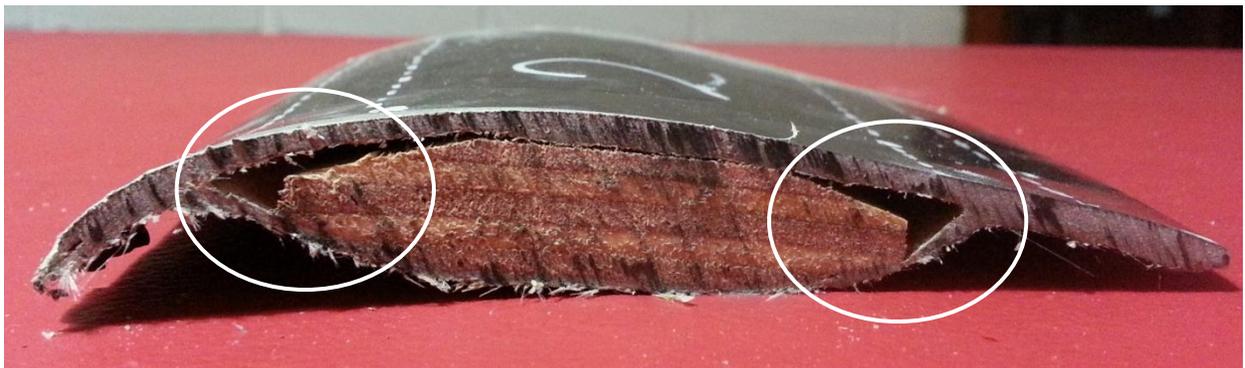


Figura 26. Vista de corte, sección 2. Notar el núcleo de laminado de madera de abedul, como refuerzo en la zona próxima a la raíz y la falta de contacto entre esta y la superficie de la pala (zonas resaltadas).

3.1.6. Densidades de los materiales

Se procedió a la medición de las densidades de los materiales constituyentes de las palas. En primer lugar, se midió la densidad del núcleo de madera utilizado en la raíz y en los comienzos de la sección 1 de la pala. En segunda instancia, se calculó la densidad del material compuesto de matriz Polipropileno y refuerzo de Fibra de Vidrio tipo E.

El cálculo de la densidad se obtuvo indirectamente por el pesaje previo de las piezas y la posterior medición del volumen desplazado por estas al ser sumergidas en agua. Los valores obtenidos de dichos cálculos se indican en la Tabla 8.

Material	Densidad Calculada [Kg/m ³]
Refuerzo Laminado de Madera	570.0
Material Compuesto de Palas	1700.0

Tabla 8. Resultados de mediciones indirectas de densidades de materiales encontrados en el modelo actual de la pala

Utilizando el valor de densidad calculado y la regla de las mezclas, se obtiene una fracción de fibra en volumen de $V_f = 40\%$.

3.1.7. Ensayo de deflexión estática

Finalizada la caracterización geométrica y material del modelo actual de las palas fabricadas por ALP Group S.A., se procedió a la caracterización de la respuesta de éstas frente a cargas de flexión laterales.

Para ello, se fijó la pala con una morsa, como se muestra en la Figura 27, y se empleó un sistema de polea para la aplicación de una carga distribuida en el borde de la pala en sentido lateral, de manera de independizarse de la influencia de la fuerza peso en las mediciones. La carga aplicada viene dada por un determinado volumen de agua suspendido de una cuerda montada sobre la polea antes mencionada, tal como se representa en la Figura 28. Para obtener precisión en las medidas, se montó un láser en la punta de la pala que marca la deflexión d_2 sobre una superficie normal al eje longitudinal de la pala.



Figura 27. Configuración del ensayo de deflexión

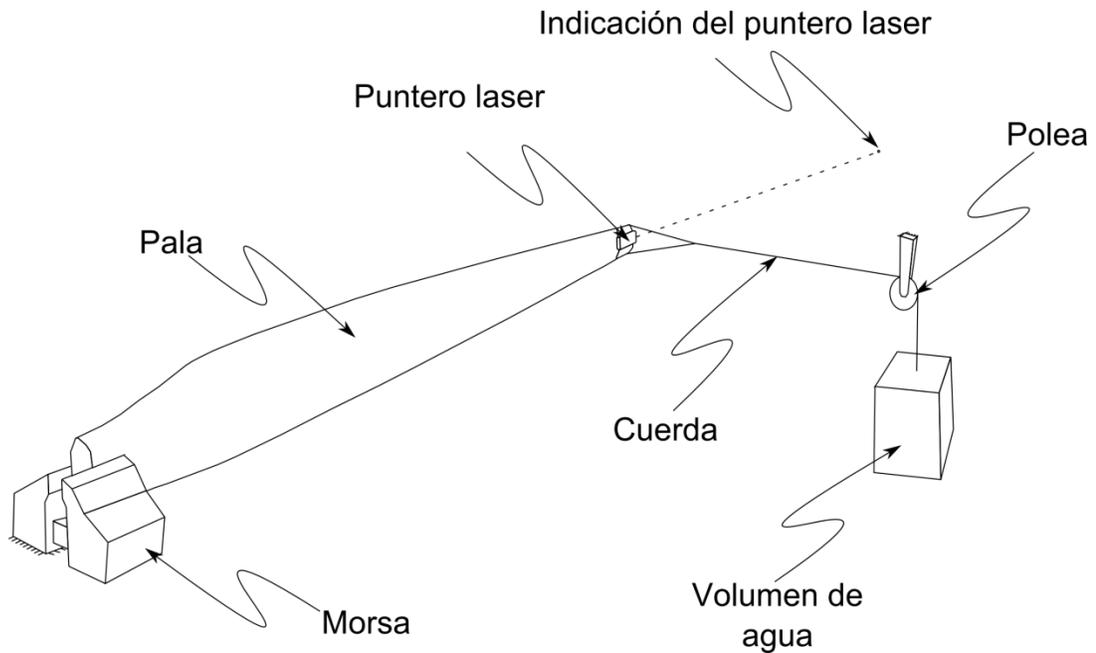


Figura 28. Configuración del ensayo de deflexión

Mediante simples cálculos trigonométricos utilizando el diagrama mostrado en la Figura 29 se obtuvo la deflexión d_1 en la punta de la pala. Las otras dimensiones indicadas son la deflexión medida en la pared d_2 , la longitud de la pala L_1 , la distancia entre punta de la pala y la pared L_2 y el ángulo subtendido entre L_1 y d_1-d_2 :

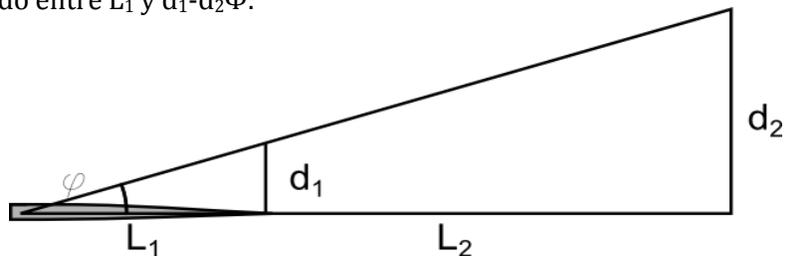


Figura 29. Diagrama para cálculo de deflexiones.

Se realizaron cinco mediciones en total cuyas condiciones y resultados se resumen en la Tabla 9 y en la Figura 30. Cabe destacar que durante las mediciones, no se observaron efectos de torsión.

Medición	Volumen de H ₂ O [cm ³]	Fuerza Aplicada [Kgf]	Deflexión en pared [mm]	Distancia Punta-Pared [mm]	Longitud Pala [mm]	Ángulo [grad]	Deflexión Punta [mm]
1	1000.0	1.0	107.1	1200.0	1400.0	2.4	57.7
2	800.0	0.8	84.8			1.9	45.7
3	600.0	0.6	63.6			1.4	34.3
4	400.0	0.4	40.2			0.9	21.6
5	200.0	0.2	20.2			0.4	10.9

Tabla 9. Resultados de las mediciones en ensayo de deflexión estática

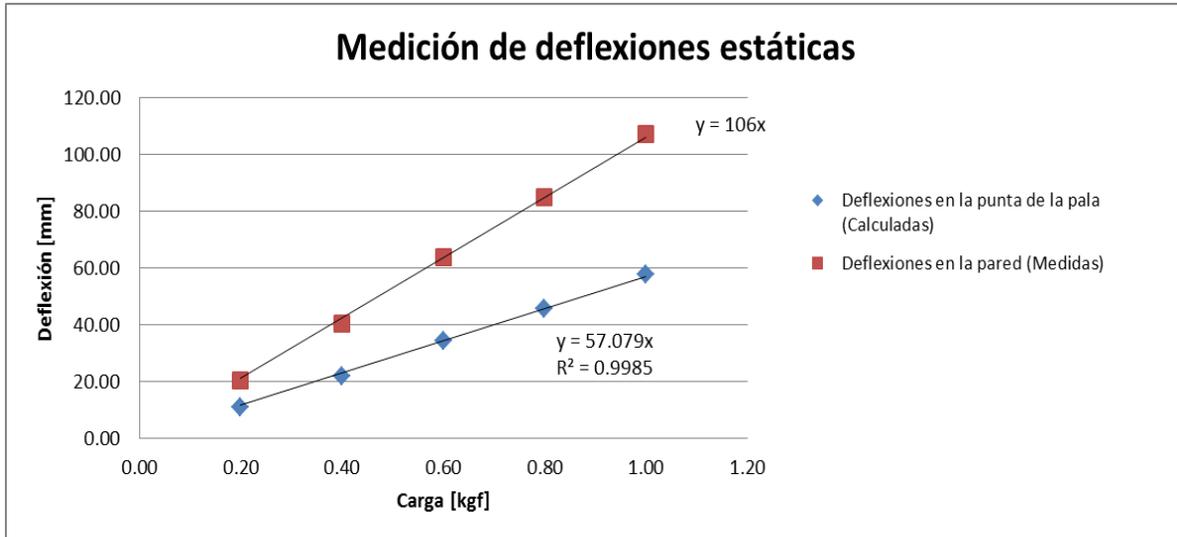


Figura 30. Gráfico de deflexiones medidas y calculadas en función de las cargas

De los resultados obtenidos en las mediciones se observa, como era de esperarse, un comportamiento lineal.

3.2. Modelo de Elementos Finitos de la pala actual

3.2.1. Software e implementación

Para las simulaciones por elementos finitos de la pala actual y para el rediseño propuesto en las secciones subsiguientes se empleó el software NX NASTRAN v8.0.

La pala fue mallada utilizando elementos cáscara de cuatro nodos. La malla fue construida de manera tal que siguiera la subdivisión de la pala propuesta anteriormente en la Sección 3.1.4, lo cual permite tener un mayor control sobre las características geométricas y el tipo de laminado a aplicar en laminados específicos posteriores.

La varilla de refuerzo de resina poliéster fue modelada con elementos viga de sección circular de 2.5mm de diámetro, mostrados en color amarillo en la Figura 31 y en la Figura 32. El contacto entre la varilla y la pala fue modelado utilizando *Rigid Links* entre los nodos de los elementos cáscara de cuatro nodos de la superficie extrados y los nodos de la viga.

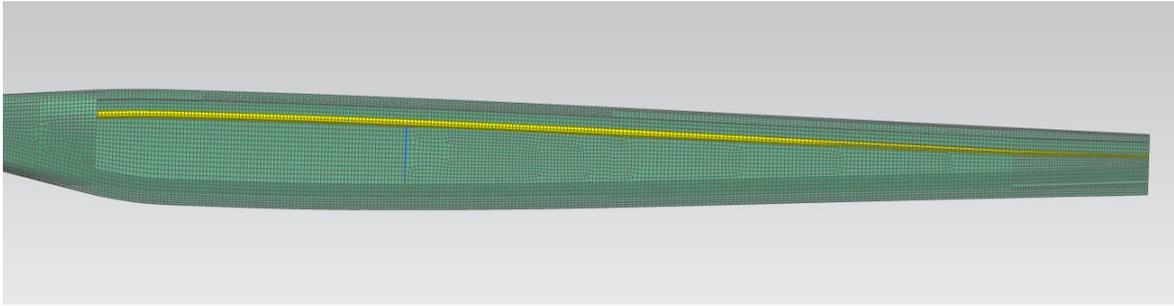


Figura 31. Modelado de la varilla de resina

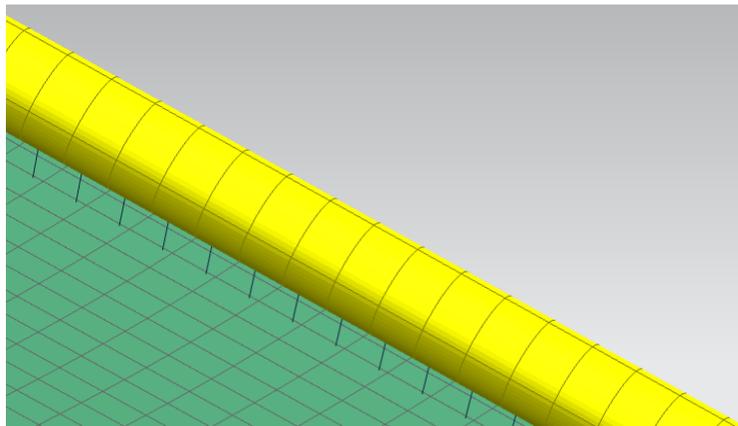


Figura 32. Detalle del modelado de la varilla de resina con elementos viga

El núcleo de madera que presenta la pala en la sección última de la raíz y primeras partes de la Sección 1 fue modelado como un *core* o lámina núcleo dentro del Laminado correspondiente a dichas secciones. Se utilizó un espesor de 13 mm, que fue el medido en la pala seccionada.

Las propiedades de los materiales fueron calculadas según la regla de las mezclas para una fracción de fibra de 40% en volumen y las rigideces fueron calculadas utilizando la aproximación isotrópica para laminados CSM, tratados en la Sección 1.3.6.

3.2.2. Modelado del Ensayo de Deflexión Estática

3.2.2.1. Condiciones de borde

En el ensayo de deflexión estática se sujetó la Sección 1 de la pala con una morsa. Las dimensiones de las mordazas de agarre se observan en la Figura 33.



Figura 33. Esquema de la superficie de sujeción de la pala

En el modelo de elementos finitos, se fijaron las traslaciones en las tres direcciones de los nodos correspondientes a la sección cubierta por los agarres de la morsa.

3.2.2.2. Aplicación de cargas

En el ensayo, las cargas fueron ejercidas por una soga en contacto con la última sección de la superficie extrados de la pala. Dichas cargas fueron modeladas como una carga distribuida a lo largo de las curvas dicha sección, como se muestra en la Figura 34.

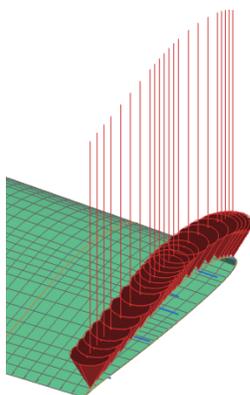


Figura 34. Cargas en el extremo de la pala para el modelado de ensayo de deflexión

3.2.2.3. Resultados y ajuste

Los resultados obtenidos del modelado en elementos finitos se dividen en dos partes. En primer lugar, cargadas las propiedades geométricas y materiales de la pala se procedió a calcular la masa y la ubicación del centro de masas de la pala y en segundo lugar se resolvieron los cinco casos de carga estática descritos en la Sección 3.1.7 para validar y ajustar la rigidez del modelo frente a los resultados obtenidos experimentalmente.

Las propiedades obtenidas por simulación y comparadas con las propiedades reales se resumen en la Tabla 10.

Propiedad	Valores Medidos	Valores Calculados	Error Relativo Porcentual (ε%)
Peso [Kg]	2.1 ± 0.1	2.06	1.90
Distancia Centro de Masa - Punta [cm]	86.2 ± 0.1	84.51	1.96

Tabla 10. Comparación entre resultados medidos y calculados por FEM

Las deflexiones obtenidas a través de la simulación de elementos finitos, comparadas con aquellas obtenidas experimentalmente se resumen en la Tabla 11.

Caso de Carga	Carga [kgf]	Deflexión Punta Medida [mm]	Deflexión Punta Calculada [mm]	Error Relativo Porcentual (ε%)
1	1	57.67	51.22	11.18
2	0.8	45.66	40.98	10.25
3	0.6	34.25	30.73	10.27
4	0.4	21.64	20.49	5.31
5	0.2	10.86	10.25	5.62

Tabla 11. Comparación entre deflexiones medidas y calculadas por FEM

La correspondencia entre los valores medidos y calculados del peso y del centro de masa permitió verificar que la fracción de fibra V_f es del 40% en volumen.

Con respecto a la rigidez, el valor resultante de la aplicación de las ecuaciones características de la Micromecánica de materiales compuestos, debió ser ajustado de manera de obtener la deflexión medida experimentalmente. Esto se debe a que las ecuaciones utilizadas para el cálculo del laminado isotrópico de CSM se basan en hipótesis de homogeneidad, tamaño y distribución de las fibras en el laminado que no se cumplen en la pala ensayada [3].

3.3. Simulación de cargas aerodinámicas con modelo actual ajustado

Concluido el análisis por elementos finitos y el ajuste de propiedades físicas y mecánicas del modelo actual de la pala, se procedió a modelar la respuesta de la estructura frente a las cargas de viento a la que se ve sometida en régimen de funcionamiento.

3.3.1. Cargas en condiciones de operación

Como carga máxima a soportar por las palas se utilizó la superposición de las cargas aerodinámicas producidas por el viento con las cargas de la fuerza centrífuga.

Las cargas aerodinámicas son las correspondientes al funcionamiento con un viento a 9 m/s y el rotor girando a 300 rpm. A partir de esta velocidad de viento, el generador tiene un sistema que rebate el rotor para evitar que éste se acelere dañando tanto los sistemas mecánicos como los electrónicos. Por esta razón, se la consideró como la velocidad crítica a soportar por la estructura de las palas, asumiendo que el sistema de control nunca permitirá que la estructura sea expuesta a vientos de velocidades mayores que incidan directamente sobre su superficie.

3.3.1.1. Cálculo de las cargas aerodinámicas

El mapa de las cargas distribuidas sobre la pala fue calculado en un proyecto anterior [7], llevado a cabo en el Fachgebiet Strömungsmaschinen (FSM) que es el instituto de máquinas de fluidos del instituto tecnológico de Karlsruhe (KIT), en el marco de un convenio entre el ITBA y KIT para promover el trabajo conjunto.

El proyecto consistió en un análisis CFD utilizando las herramientas CFX y ICEM CFD del software comercial ANSYS v14, junto con un software in-house de KIT llamado SPARC.

Para este análisis se utilizaron mallas estructuradas, con mayor refinamiento en las zonas de capa límite, para asegurar la correcta captura de los fenómenos físicos en las cercanías de la superficie de la pala.

El modelo consideró un tercio de la turbina, por lo que se despreciaron los efectos de apantallamiento de la torre así como los posibles efectos del piso en el perfil de velocidades del viento que alcanza la turbina.

Se utilizaron condiciones de borde periódicas a los lados del alabe, “far-field” en el inlet como en la zona exterior, “pressure outlet” en el outlet, y simetría en eje de rotación.

Con respecto al modelo de turbulencia utilizado, se empleó el modelo de una ecuación de Spalart-Allmaras.

3.3.1.2. Incorporación de las cargas aerodinámicas al modelo estructural

El mapa de cargas proveniente del análisis CFD, fue provisto en forma de presión y componentes de corte en función de las coordenadas de una serie de puntos sobre la superficie de la pala. Las cargas fueron incorporadas al modelo estructural en el software NX NASTRAN v8.

La distribución de las cargas resultantes de las condiciones de flujo mencionadas, se representan en las Figuras 35-42. Las componentes de presión de las cargas se muestran en las Figuras 35 y 36 y las componentes de tensiones de corte se muestran en las Figuras 37-42. En estas figuras, las palas están orientadas de manera que el eje del rotor es paralelo al eje y .

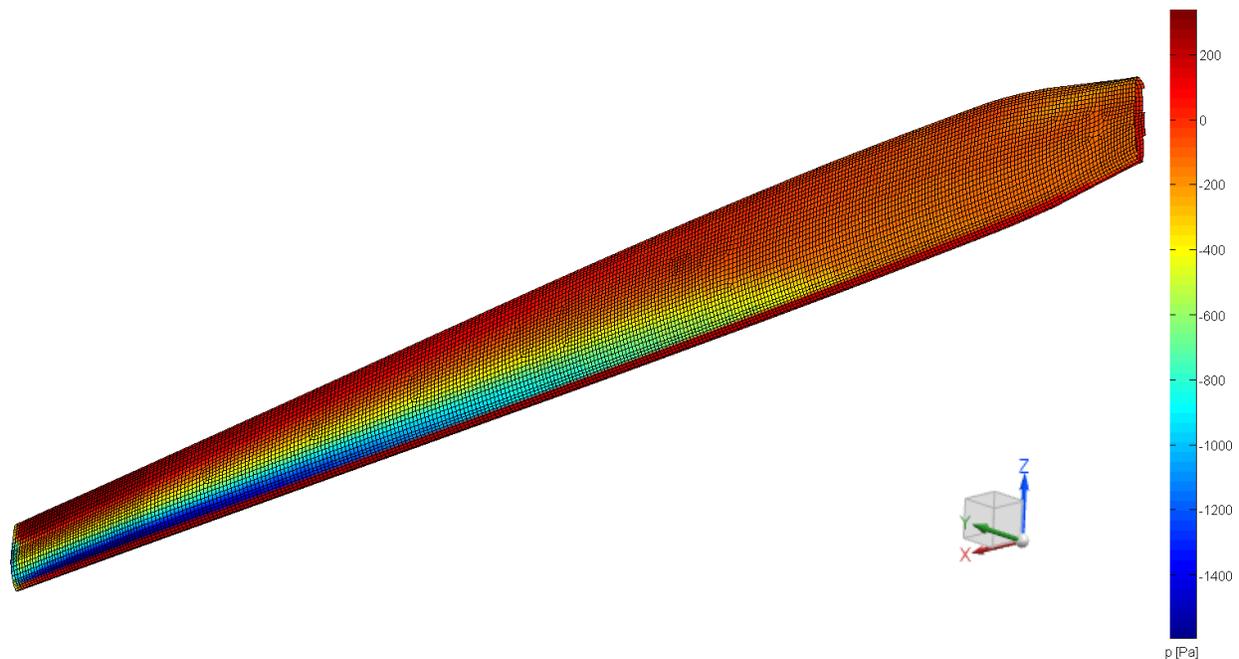


Figura 35. Vista de la distribución de la componente de presión de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala

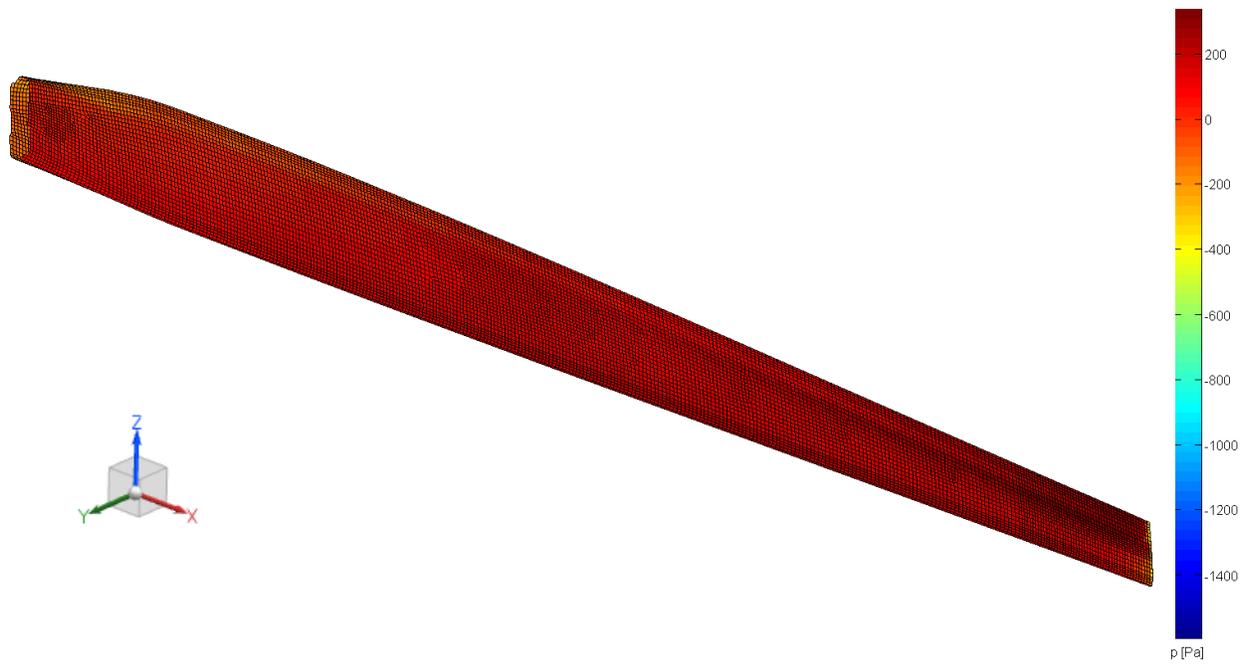


Figura 36. Vista de la distribución de la componente de presión de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala

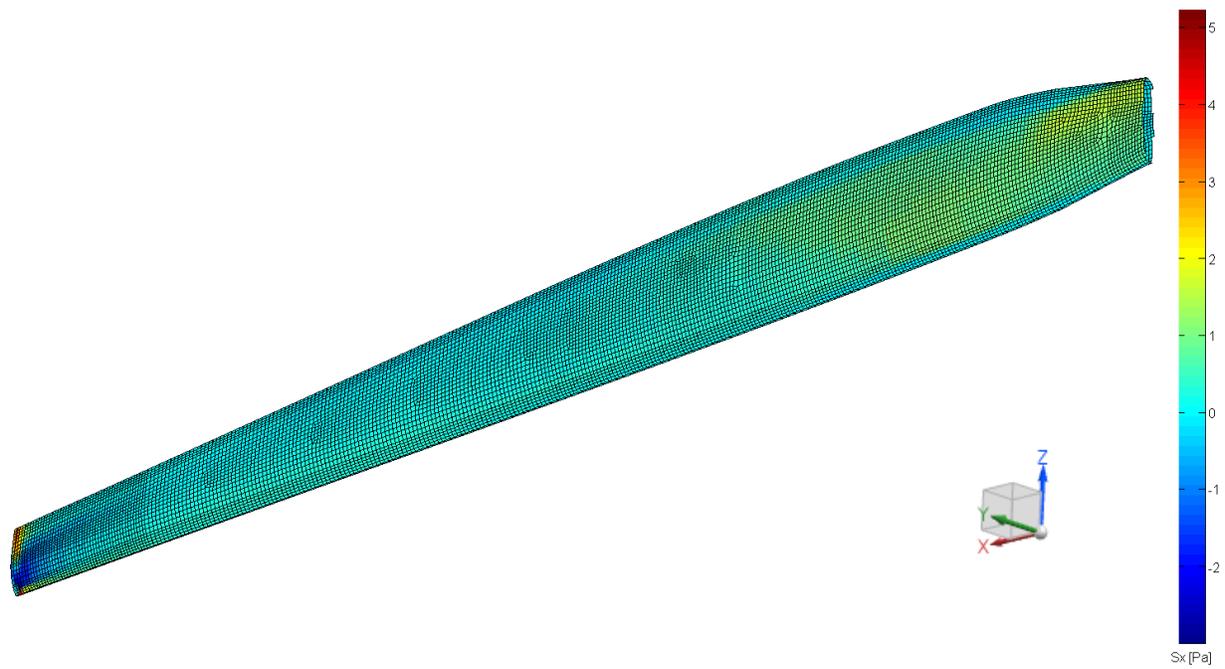


Figura 37. Vista de la distribución de la componente de corte x de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala

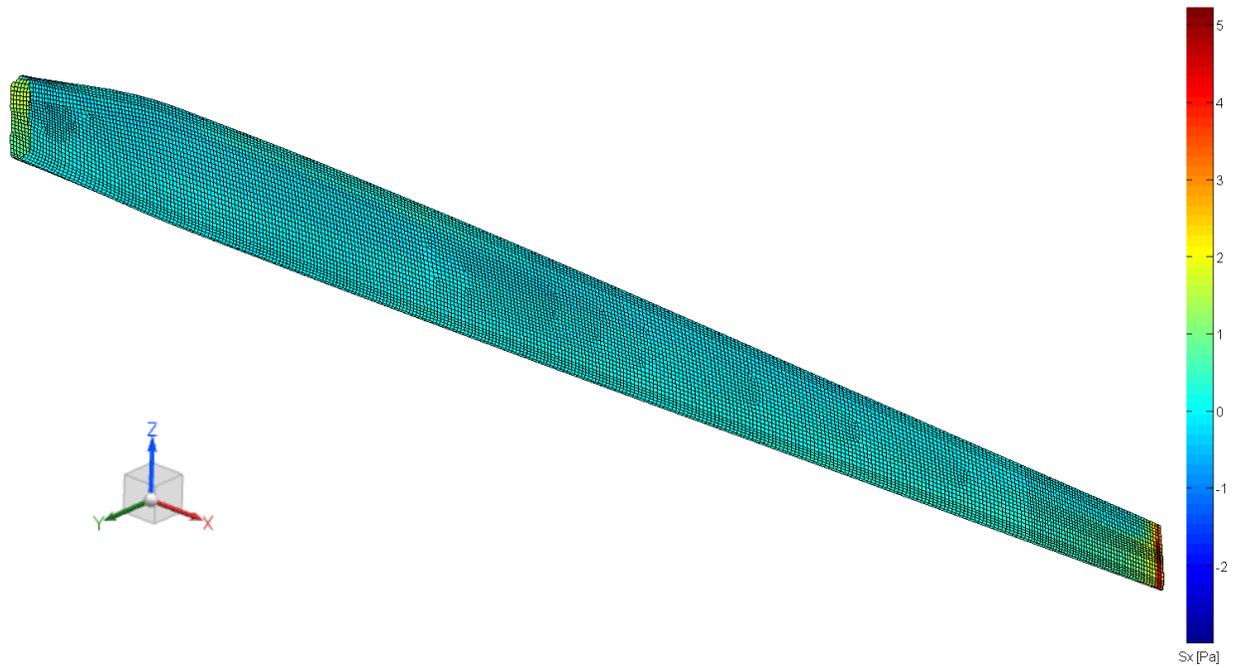


Figura 38. Vista de la distribución de la componente de corte x de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala

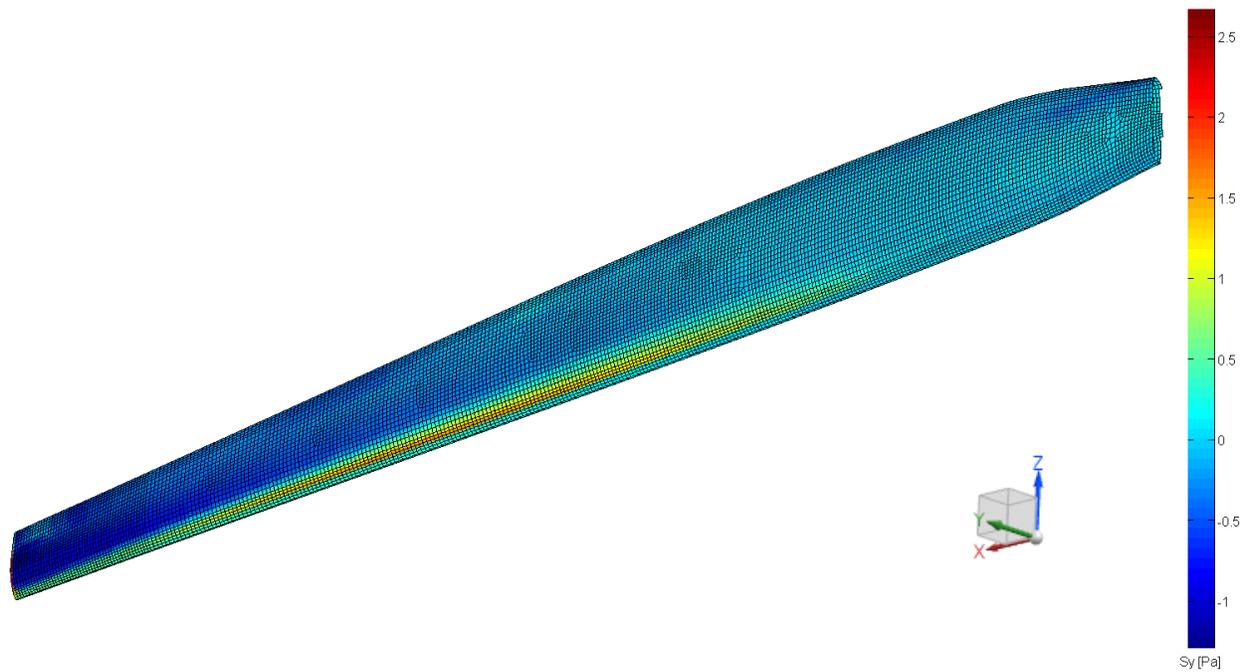


Figura 39. Vista de la distribución de la componente de corte y de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala

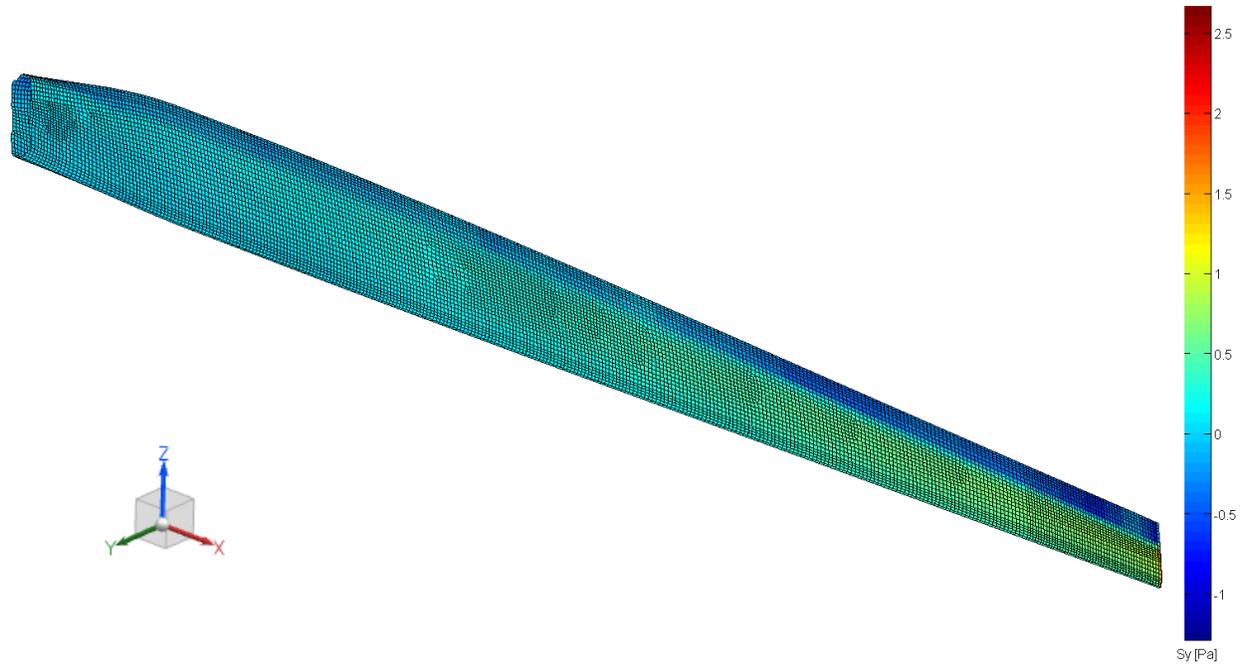


Figura 40. Vista de la distribución de la componente de corte y de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala

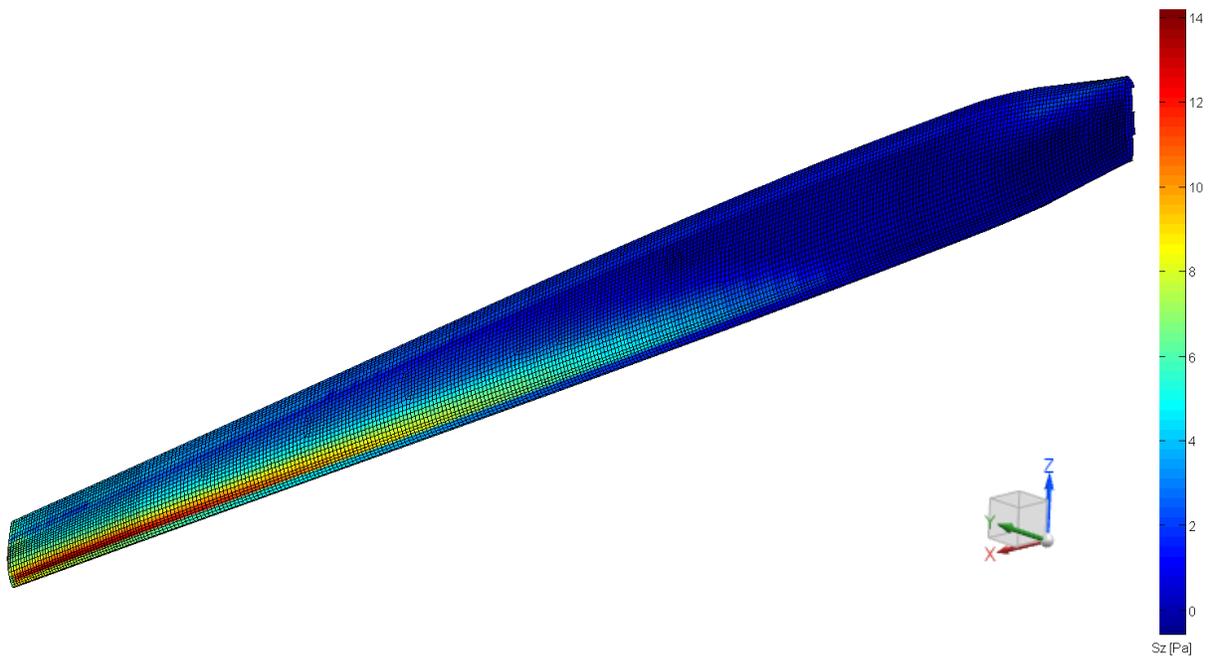


Figura 41. Vista de la distribución de la componente de corte z de las cargas aerodinámicas sobre la superficie extrados de la pala

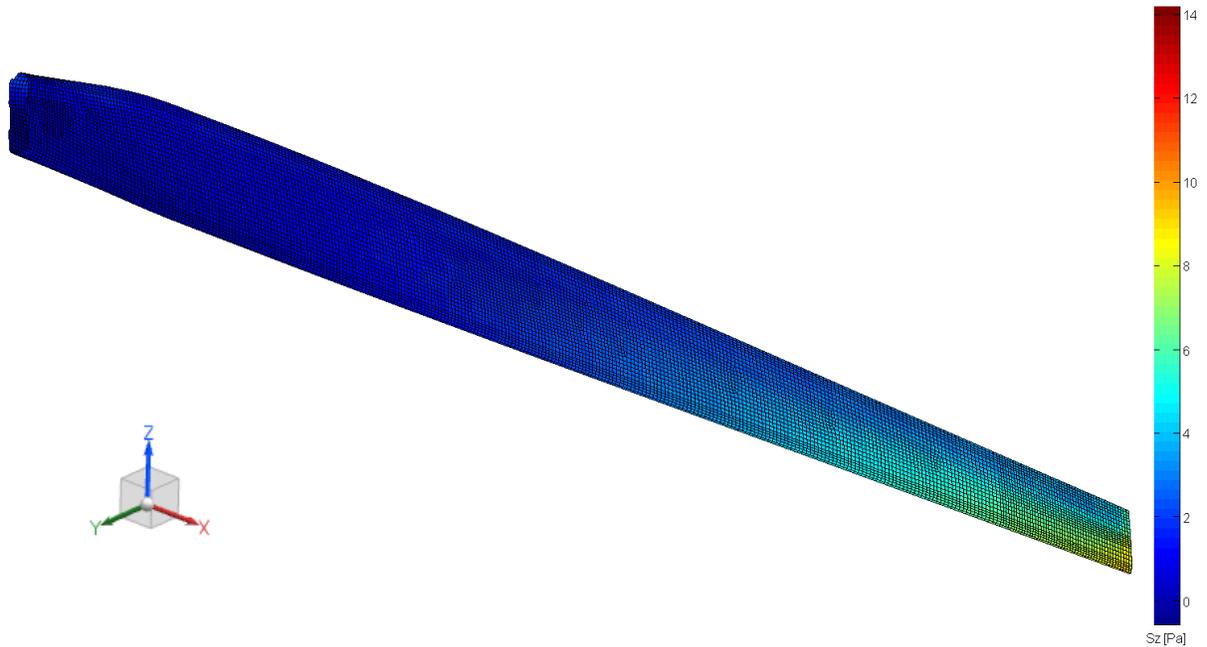


Figura 42. Vista de la distribución de la componente de corte z de las cargas aerodinámicas sobre la superficie intrados de la pala

3.3.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde utilizadas en el caso de cargas de viento, buscaron aproximar la sujeción de las palas al rotor, que en la estructura real consiste en un apriete en sándwich de la raíz, entre una placa metálica y el cubo del rotor, utilizando cuatro bulones pasantes por la raíz para ajustar. Como no se modela en detalle la estructura de la raíz de la pala, se optó por fijar el desplazamiento de los nodos en la superficie de la raíz que entra en contacto con la placa metálica y con el cubo de la estructura. Los nodos en esa superficie se unieron con *Rigid Links* a un nodo con todos sus grados de libertad fijos, situado en el eje de rotación de la pala, de manera de poder calcular el valor del momento generado sobre este eje como referencia. Estas condiciones de borde se pueden ver en la Figura 43.

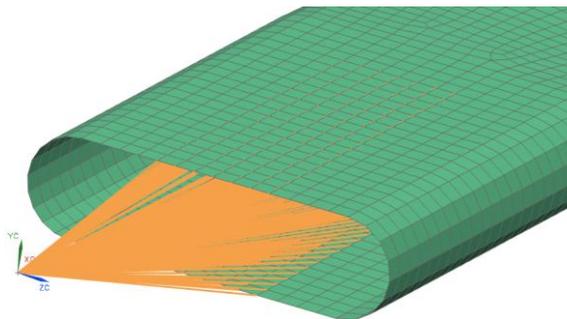


Figura 43. Condiciones de borde

3.3.3. Resultados

Resolviendo el caso de cargas aerodinámicas y centrífugas se obtuvieron los desplazamientos de la estructura, mostrados en la Figura 44, y las deformaciones, mostradas en la Figura 45.

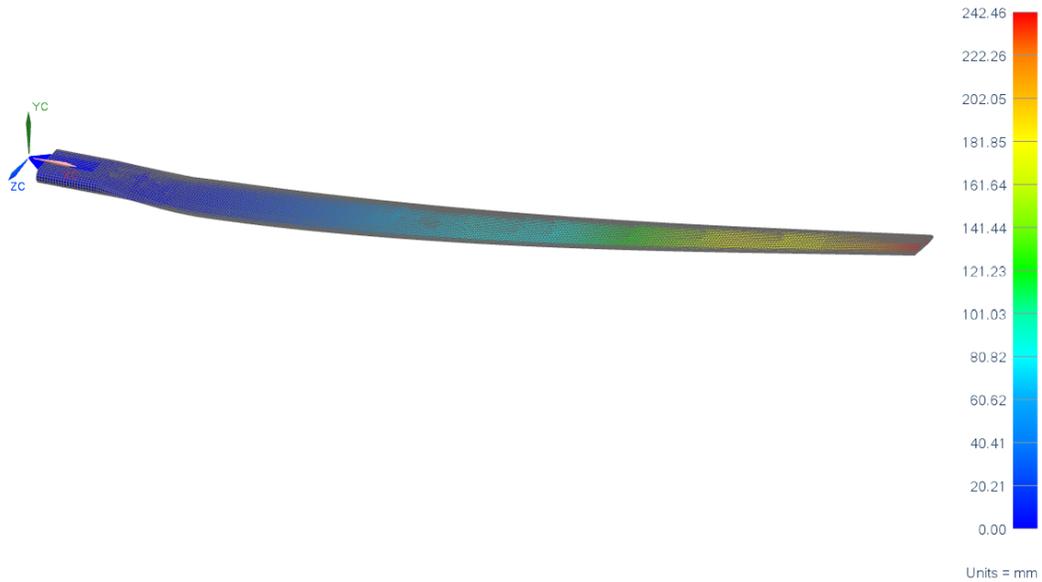


Figura 44. Desplazamientos ante cargas nominales



Figura 45. Deformaciones ante cargas nominales

Se puede ver que la estructura responde con una deflexión máxima de 242 mm (consistente con lo reportado por los representantes de la empresa ALP Group S.A.). Sin embargo, las deformaciones son pequeñas y por ende, como se muestra en las Figuras 46 y 47, la estructura

muestra muy bajos niveles de tensiones máximas, comparados con la tensión máxima admisible calculada para la aproximación isotrópica de laminados CSM $\sigma_{adm} = 84.84$ MPa.

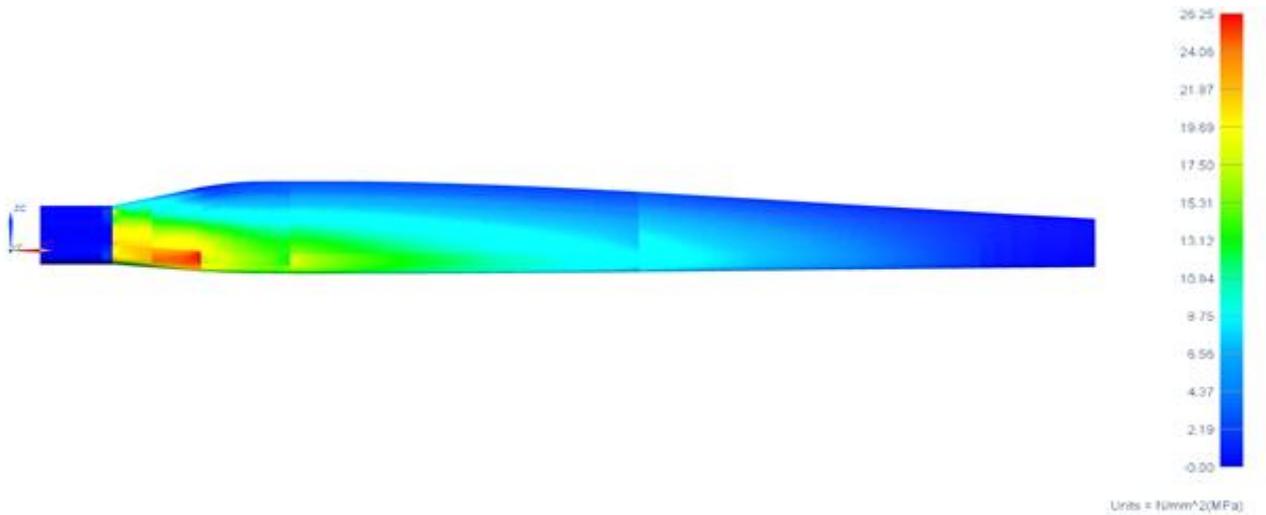


Figura 46. Tensiones principales máximas de tracción en el modelo del diseño actual

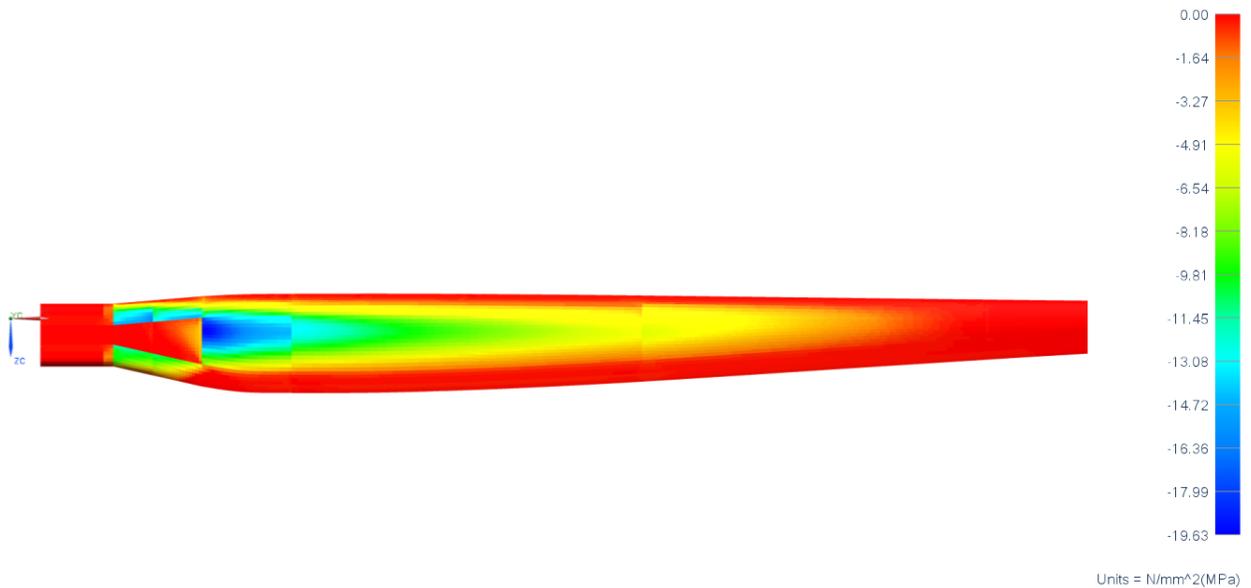


Figura 47. Tensiones principales máximas de compresión en el modelo del diseño actual

Cabe mencionar que la discontinuidad en el campo de tensiones presentado en la Figura 47 se debe a la presencia de la madera en la zona de la raíz, la cual aporta una mayor rigidez que el material circundante.

3.3.4. Frecuencias de resonancia

3.3.4.1. Condiciones de borde

Para analizar los modos y frecuencias de vibración del modelo actual de la pala se utilizaron las mismas condiciones de borde que para el caso de cargas aerodinámica y centrífuga, aproximando la sujeción de la raíz al cubo del rotor.

3.3.4.2. Resultados

Utilizando el software NX NASTRAN v8.0 con las condiciones de borde mencionadas, se obtuvieron las frecuencias naturales de vibración del modelo actual de la pala. La Figura 48 y la Tabla 12 muestran los modos de deformaciones de las primeras 3 frecuencias.

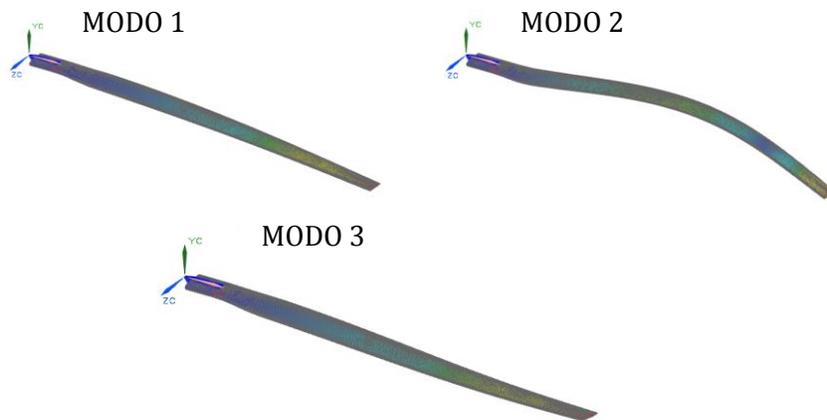


Figura 48. Modos de vibración del modelo del diseño actual de la pala

Modo	Frecuencia [Hz]
1	3.48
2	15.73
3	18.45

Tabla 12. Frecuencias de vibración del modelo del diseño actual de la pala

Debido que la frecuencia del primer modo resultó ser menor a la frecuencia mínima $f_{safe_min}=7.1\text{Hz}$ del intervalo de frecuencias considerada segura para evitar la posible operación en resonancia, sería esperable la ocurrencia de falla por vibraciones inducidas. Sin embargo, los representantes de la empresa ALP Group S.A. desconocen incidentes relacionados con estas circunstancias. Esta observación puede ser explicada a través de diferentes suposiciones. En primer lugar, que la excitación armónica no ocurra cercana a los modos naturales de la estructura. En segundo lugar, la falla por este tipo de cargas suele estar asociada al proceso de fatiga de material para lo cual se requiere un cierto período de tiempo para observar la falla, el cual se supone que no ha sido alcanzado. A pesar de esto, para el diseño propuesto se tomaron las consideraciones correspondientes, aportando rigidez en las zonas donde se requiera para evitar problemas relacionados con vibraciones, tal como fue mencionado en los objetivos de diseño.

4. Solución propuesta

4.1. Esquema de partida con limitaciones de fabricación

El diseño actual cuenta con refuerzos en forma de CSM, lo que le atribuye al material moderada rigidez y resistencia en todas las direcciones. Este tipo de refuerzo, sin embargo, no permite privilegiar el refuerzo en una dirección específica. Por este motivo es que se decidió proponer la utilización de refuerzos unidireccionales de fibra larga, ya que de las deformaciones bajo cargas nominales de funcionamiento se observa que es la dirección longitudinal en la pala la que toma las mayores cargas. Dichos refuerzos, aplicados en esa dirección y solo en las zonas que lo requirieran, podría ser suficiente para cumplir con los objetivos de diseño establecidos.

En primera instancia se optó por efectuar los cálculos manteniendo el material actualmente utilizado para la matriz. Es así que se estableció que el material compuesto a utilizar sería resina poliéster reforzada con 40% en volumen de fibra de vidrio de tipo E, cuyas propiedades mecánicas son las indicadas en la Tabla 13 [13], calculadas utilizando la regla de las mezclas explicada en la Sección 1.3.5.

Propiedades Mecánicas del Compuesto Poliester Isoftálico - Fibra de Vidrio E (40%)	Valores
E_1 [Gpa]	31.00
E_2 [Gpa]	5.50
E_3 [Gpa]	5.50
G_{12} [Gpa]	2.26
ν_{12}	0.31
Densidad [g/cm ³]	1.80
Resistencia a la tracción Longitudinal - F_{1t} [Mpa]	1477.30
Resistencia a la tracción transversal - F_{2t} [Mpa]	59.09
Resistencia a la compresión longitudinal - F_{1c} [Mpa]	241.53
Resistencia a la compresión transversal - F_{2c} [Mpa]	90.48
Resistencia al corte transversal - F_4 [Mpa]	75.90
Resistencia al corte interlaminar - F_6 [Mpa]	75.90
Desalineamiento medio de las fibras [deg]	3.53
Coficiente de Tsai-Wu (f_{12})	-2.29E-07

Tabla 13. Propiedades mecánicas de poliéster reforzado con fibra de vidrio unidireccional

Para definir el esquema de laminado objetivo se optó por partir de un laminado que fuera el más básico y factible de fabricar, para luego proceder a reforzarlo donde fuera necesario. Es así que, como punto de partida, se consideraron una serie de "reglas de libro", que junto con las limitaciones de manufactura establecieron un esquema de laminado inicial. Las reglas de libro consideradas son las siguientes [10]:

- Utilización de laminados simétricos para evitar la aparición de fenómenos de apareamiento entre los distintos modos de deformación.
- Orientación de las láminas externas en la dirección con mayor prioridad de refuerzo. Esta condición asegura mayor resistencia en las fibras donde se desarrollan las mayores tensiones resultantes de la flexión de la pala. Por otra parte, las fibras externas son las más expuestas a la degradación ambiental y a eventuales impactos, por lo que es importante contar con un refuerzo robusto en esa área.
- Minimización de las variaciones de 90° en la orientación de fibras de láminas consecutivas dentro de un laminado con el fin de evitar discontinuidades agudas en las propiedades mecánicas del material final que puedan significar una ineficiente transferencia y toma de carga por parte del laminado.
- Espesor mínimo de cada lámina es $t_{ply}=0.4$ mm (criterio práctico de fabricación).

Estas son reglas generales que aseguran un mínimo de refuerzo en todas las direcciones, evitan el apareamiento entre distintos modos de deformación, como fue explicado previamente, y tienen en cuenta los estándares de fabricación.

De esta manera, como laminado inicial se estableció un laminado cuasi-isotrópico, denominado Laminado Base en la Tabla 14, distribuido uniformemente en toda la pala. Se hizo esto para, posteriormente, aumentar el espesor de las láminas orientadas en las direcciones a reforzar.

Teniendo en cuenta que el diseño de la raíz no formaba parte de los objetivos del proyecto, se utilizó el mismo laminado cuasi-isotrópico pero con el triple de espesor en cada lámina del Laminado Base, de manera que aportara la rigidez que la pala real presenta en esa sección, sin tenerlas en cuenta en el posterior proceso de optimización.

La Figura 49 muestra la distribución de espesores y orientaciones del laminado de partida *Laminado 1.0 PET*. Los colores en esta figura y en las próximas figuras que representen las distintas distribuciones de laminados, hacen referencia a los esquemas indicados en la Tabla 14.



Figura 49. Distribución del Laminado 1.0 PET

Resolviendo el caso de carga con las condiciones de borde descritas en la Sección 3.3.2, se obtiene la deformación con la que responde el diseño de partida a las cargas nominales del funcionamiento del generador. La Tabla 15 muestra las tensiones máximas resultantes en cada dirección para la lámina más comprometida, junto con los factores de seguridad calculados a partir de los criterios de falla considerados.

Denominación	Código de Colores para Laminados	Secuencia de Apilamiento [t=4mm]	Esquema de Laminado			
			Thickness	Angle	Ply	
Laminado ++		$[0_{3t}, 45_t, 90_t, -45_t]_s$	1.200 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 1.200	0.0 45.0 90.0 -45.0 -45.0 90.0 45.0 0.0	8 7 6 5 4 3 2 1	
Laminado +		$[0_{2t}, 45_t, 90_t, -45_t]_s$	0.800 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.800	0.0 45.0 90.0 -45.0 -45.0 90.0 45.0 0.0	8 7 6 5 4 3 2 1	
Laminado Base		$[0_t, +45_t, 90_t, -45_t]_s$	0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400	0.0 45.0 90.0 -45.0 -45.0 90.0 45.0 0.0	8 7 6 5 4 3 2 1	
Laminado Raíz		$[0_{3t}, 45_{3t}, 90_{3t}, -45_{3t}]_s$	1.200 1.200 1.200 1.200 1.200 1.200 1.200 1.200	0.0 45.0 90.0 -45.0 -45.0 90.0 45.0 0.0	11 10 9 8 4 3 2 1	
Laminado -		$[0_t, 45_t, 90_t, -45_t, 90_t, 45_t, 0_t]_s$	0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400 0.400	0.0 45.0 90.0 -45.0 90.0 45.0 0.0	7 6 6 4 3 2 1	
Laminado --		$[0_t, 60_t, 120_t]_s$	0.400 0.400 0.400 0.400 0.400	0.0 60.0 120.0 120.0 60.0 0.0	6 6 4 3 2 1	

Tabla 14. Esquemas de laminado utilizados

Resumen de Tensiones - Lámina de Mayor Solicitación						
Tensión	Valores Máximos	Criterio de Tensiones Máximas			Criterio de Tsai-Wu	
		FS	Comentario	R	Comentario	
σ_{1t}	66.66	F_{1t}/σ_x	21.00	OK (>2.5)	0.125	OK (<1)
σ_{2t}	8.98	F_{2t}/σ_y	6.68	OK (>2.5)		
σ_{1c}	59.01	F_{1c}/σ_x	4.83	OK (>2.5)		
τ_{12}	5.45	F_6/τ_{zx}	13.93	OK (>2.5)		
τ_{23}	2.30	F_5/τ_{yz}	33.00	OK (>2.5)		

Tabla 15. Tensiones máximas y factores de seguridad calculados para la lámina más comprometida del *Laminado 1.0 PET*

La Figura 50 muestra la distribución de tensiones en ambos lados intrados y extrados, dejando en evidencia las zonas a reforzar en posteriores diseños.

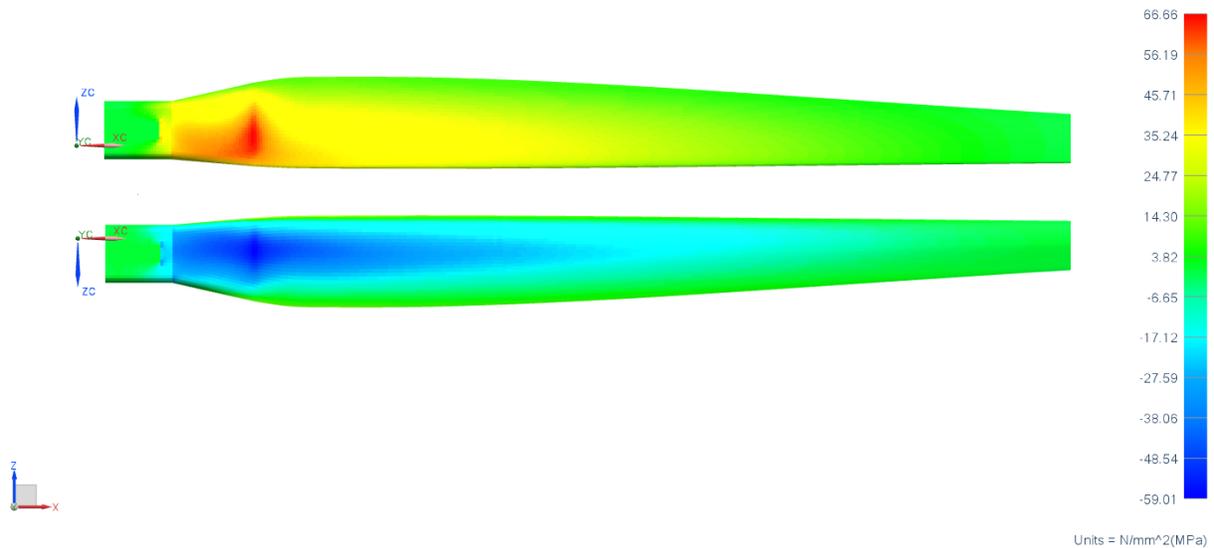


Figura 50. Tensiones en la dirección x en la lámina de mayor sollicitación del *Laminado 1.0 PET*

Por otro lado, se calculan las frecuencias de resonancia de este diseño de la misma manera que se hizo con el diseño actual en la Sección 3.3.4. Los primeros tres modos de vibración junto con sus respectivas frecuencias se muestran en la Tabla 16 y en la Figura 51.

Modo	Frecuencia [Hz]
1	4.95
2	23.27
3	26.16

Tabla 16. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 1.0 PET*

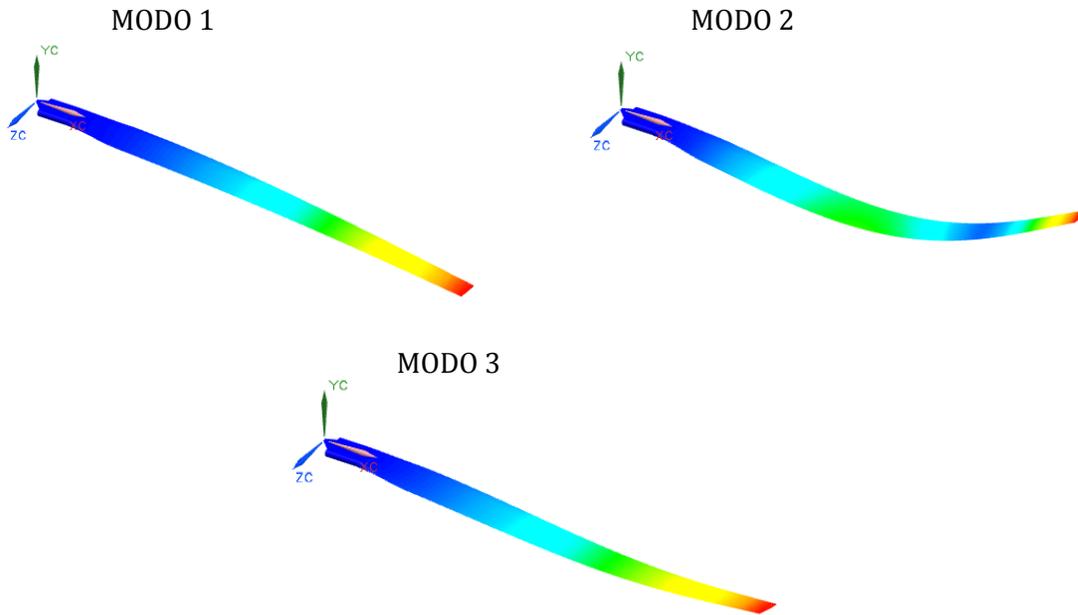


Figura 51. Modos de vibración de la pala con el *Laminado 1.0 PET*

Se observa que de acuerdo a los objetivos planteados en la Sección 2, la única característica del diseño a mejorar fue la frecuencia del primer modo, que debía ser incrementada hasta una frecuencia entre el rango de frecuencias seguras ubicado entre 7.1 y 7.9 Hz.

4.1.1. Ajustes para verificar frecuencia

Con el objetivo de incrementar la frecuencia natural del sistema hasta el rango seguro, se procedió a incrementar los espesores en las áreas cercanas a la raíz, donde ocurren las mayores deformaciones, como se observa en la Figura 52 adoptando un esquema de laminado como el presentado en la Figura 53.

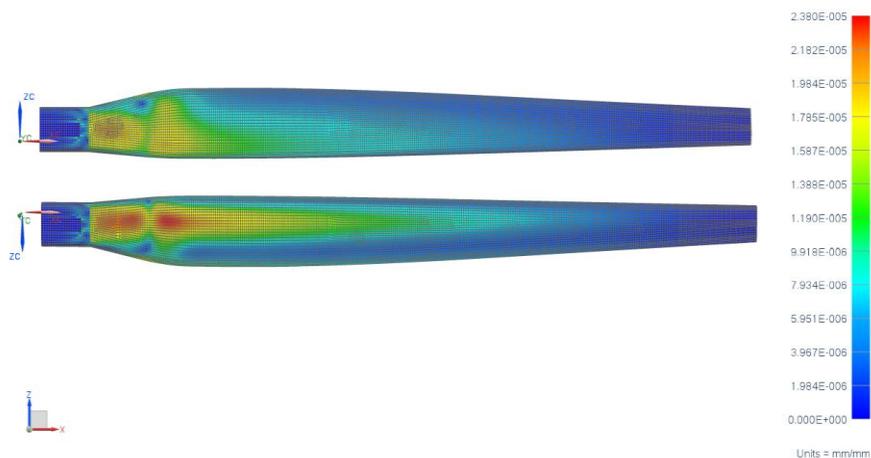


Figura 52. Distribución de deformación en X en la lámina más deformada en el primer modo de vibración de la pala con el *Laminado 1.0 PET*

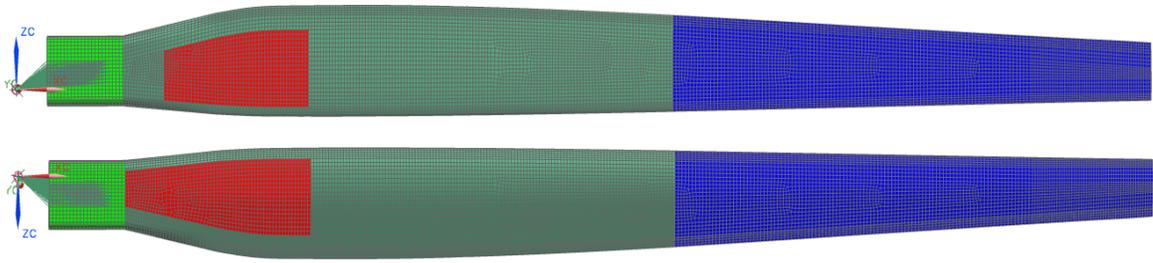


Figura 53. Modos de vibración de la pala con el *Laminado 2.0 PET*

Utilizando el software NX NASTRAN v8.0 para calcular las frecuencias naturales del diseño con el esquema de *Laminado 2.0 PET*, se obtuvieron los primeros tres modos mostrados cuyas frecuencias se detallan en Tabla 17.

Modo	Frecuencia [Hz]
1	5.68
2	29.16
3	34.53

Tabla 17. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 2.0 PET*

Se observa que la frecuencia del primer modo debe ser incrementada nuevamente de manera de estar en el rango seguro. Siguiendo la metodología descrita en párrafos anteriores, se propone el esquema de laminado *Laminado 3.0 PET* mostrado en la Figura 54 a continuación:

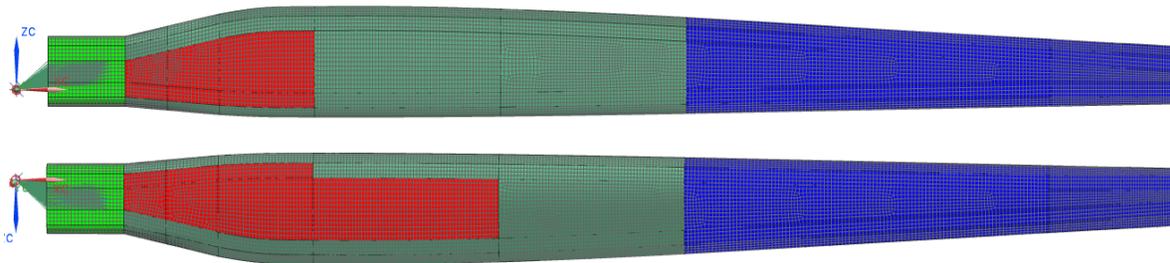


Figura 54. Distribución del *Laminado 3.0 PET*

Las frecuencias naturales de este segundo diseño de ajuste de frecuencia son las indicadas en la Tabla 18.

Modo	Frecuencia [Hz]
1	5.89
2	24.92
3	28.96

Tabla 18. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 3.0 PET*

Siguiendo la metodología descrita en párrafos anteriores, se propone el esquema de laminado *Laminado 4.0 PET* mostrado en la Figura 55 a continuación:

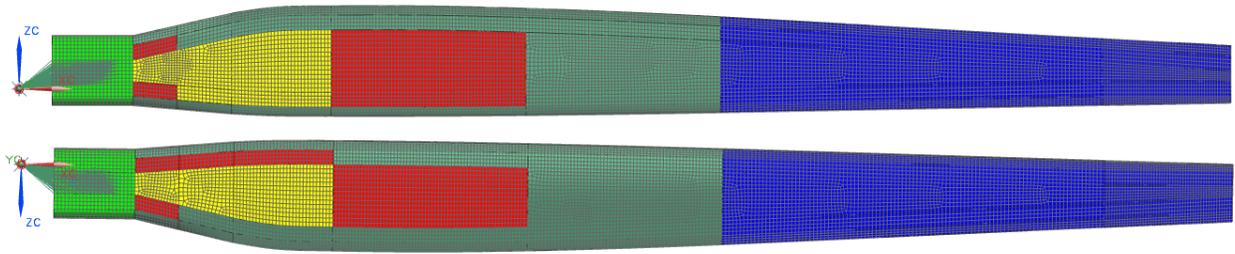


Figura 55. Distribución del *Laminado 4.0 PET*

Las frecuencias naturales de este segundo diseño de ajuste de frecuencia son las indicadas en la Tabla 19:

Modo	Frecuencia [Hz]
1	6.32
2	25.16
3	30.08

Tabla 19. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 4.0 PET*

De esta manera se definió el esquema *Laminado 5.0 PET*, descrito en la sección siguiente.

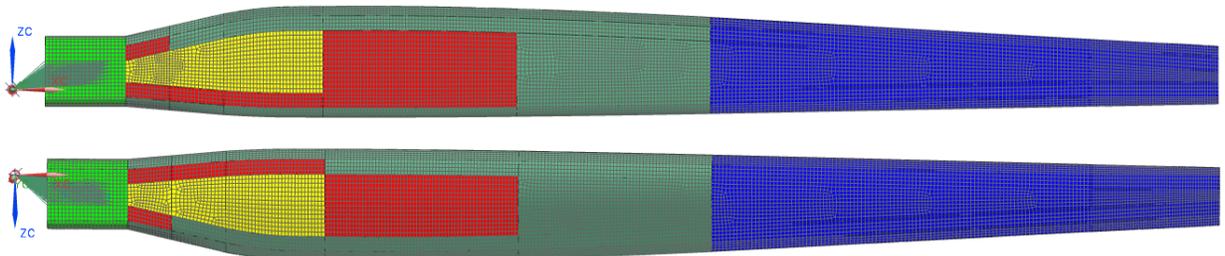


Figura 56. Distribución del *Laminado 5.0 PET*

Las frecuencias naturales de este segundo diseño de ajuste de frecuencia son las indicadas en la Tabla 20:

Modo	Frecuencia [Hz]
1	6.61
2	24.28
3	31.42

Tabla 20. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 4.0 PET*

Cabe destacar que para este laminado, la masa M_{anteraiz} es de 2.21 kg, la cual se excede en un 5% del peso lo cual va en contra de los objetivos planteados en la Sección 2.

Luego de la serie de incrementos localizados de espesor a partir del feedback provisto por las simulaciones mostradas anteriormente, que indicaban las zonas más deformadas, se concluyó que no era posible continuar modificando el laminado para aumentar, en la medida necesaria, las frecuencias naturales de vibración de la pala manteniendo en valores deseados parámetros de interés como el peso. A raíz de esto, se decidió re-diseñar con una fracción de fibra mayor para aumentar la rigidez y continuar incrementando la frecuencia más allá de los 6.61Hz sin exceder excesivamente el peso deseado.

Las propiedades del compuesto con un porcentaje de fibra de $V_f=50\%$ se resumen en la Tabla 21:

Propiedades Mecánicas del Compuesto Poliester Isoftálico - Fibra de Vidrio E (50%)	Valores
E_1 [Gpa]	37.90
E_2 [Gpa]	11.30
E_3 [Gpa]	11.30
G_{12} [Gpa]	3.30
ν_{12}	0.30
Densidad [g/cm ³]	1.85
Resistencia a la tracción Longitudinal - F_{1t} [Mpa]	903.00
Resistencia a la tracción transversal - F_{2t} [Mpa]	40.00
Resistencia a la compresión longitudinal - F_{1c} [Mpa]	357.00
Resistencia a la compresión transversal - F_{2c} [Mpa]	68.00
Resistencia al corte transversal - F_4 [Mpa]	76.00
Resistencia al corte interlaminar - F_6 [Mpa]	40.00
Desalineamiento medio de las fibras [deg]	3.53
Coficiente de Tsai-Wu (f_{12})	-6.13E-07

Tabla 21. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 6.0 PET*

4.1.2. Laminado definitivo propuesto

El esquema de laminado para el denominado *Laminado 6.0* está detallado en la Figura 57 con la distribución de espesores descritos en la Tabla 14.

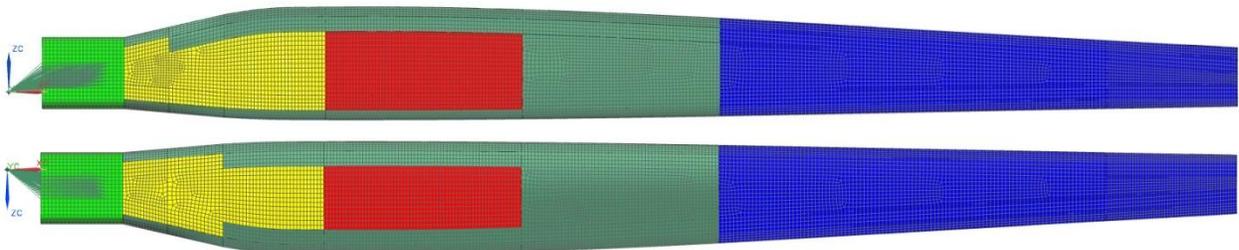


Figura 57. Distribución del *Laminado 6.0 PET*

La Figura 58 muestra los primeros 3 modos de vibración del diseño definitivo.

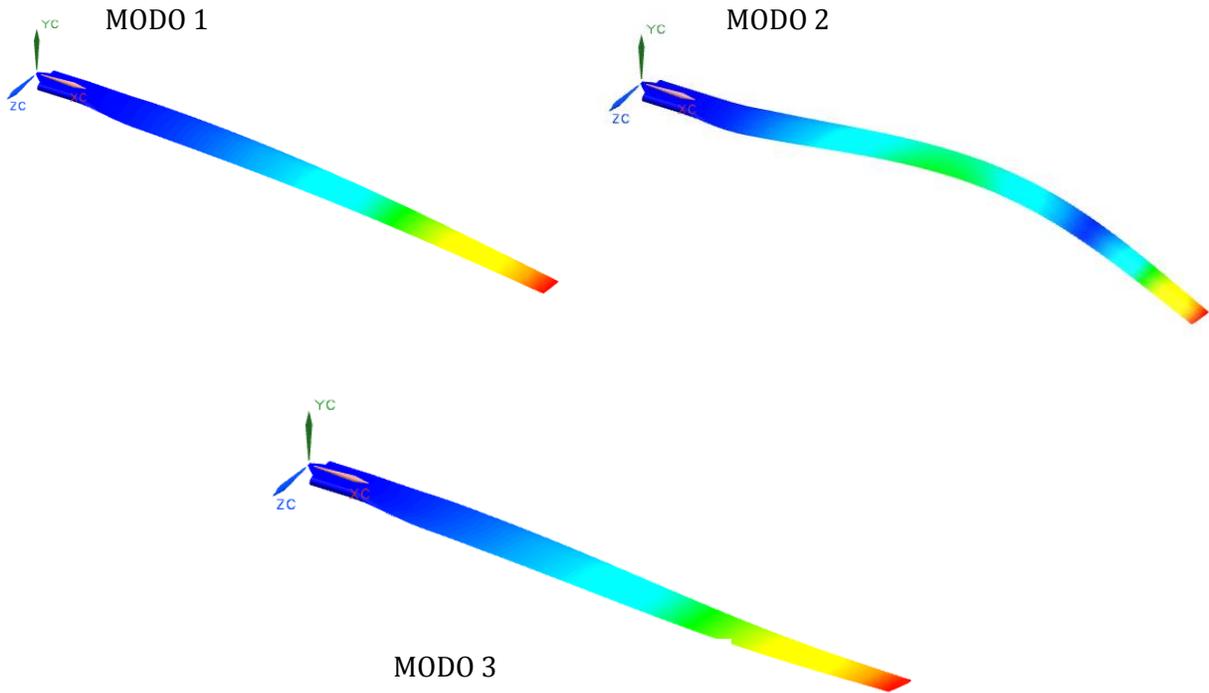


Figura 58. Modos de vibración de la pala con el *Laminado 6.0 PET*

Modo	Frecuencia [Hz]
1	7.29
2	29.16
3	34.53

Tabla 22. Frecuencias de vibración de la pala con el *Laminado 6.0 PET*

Se realizó el análisis de la respuesta de este diseño ante el caso de carga nominal, obteniendo las tensiones máximas y factores de seguridad, de los cuales en la Tabla 23 se muestran los correspondientes a la lámina más solicitada.

Resumen de Tensiones - Lámina de Mayor Solicitación						
Tensión	Valores Máximos	Criterio de Tensiones Máximas			Criterio de Tsai-Wu	
			FS	Comentario	R	Comentario
σ_{1t}	30.39	F_{1t}/σ_x	29.71	OK (>2.5)	0.11	OK (<1)
σ_{2t}	8.76	F_{2t}/σ_y	4.57	OK (>2.5)		
σ_{1c}	36.74	F_{1c}/σ_x	9.72	OK (>2.5)		
τ_{12}	3.69	F_6/τ_{zx}	10.84	OK (>2.5)		
τ_{23}	1.50	F_5/τ_{yz}	50.53	OK (>2.5)		

Tabla 23. Tensiones máximas y factores de seguridad calculados para la Lámina 8 del *Laminado 6.0 PP*

El peso del modelo definitivo sin contar la raíz es de $M_{\text{anteraiz}} = 2.06$ kg. Este diseño cumplió con todos los objetivos planteados en la Sección 2. En la Sección Anexos se presentan los planos de laminado.

4.2. Proceso de Manufactura

En la actualidad existe una multiplicidad de procesos de manufactura para el trabajo con materiales compuestos. Algunos de ellos implican escasa tecnología y mucha labor manual mientras que otros incorporan herramental más sofisticado tanto para el proceso en sí como para el monitoreo y control de éste. No obstante, todos los procesos involucran el posicionamiento y mantenimiento del refuerzo durante las etapas de impregnación y curado y la impulsión de resina al sistema [4].

Como se mencionó anteriormente la empresa ALP Group S.A. fabrica sus palas mediante el método de laminación manual o Hand Lay-Up. Este método consiste en la colocación manual de la fibra de refuerzo en el molde abierto, la aplicación manual de la resina reticulable, el curado de la resina y la extracción de la pieza final. El proceso comienza con el tratamiento superficial del molde con un agente desmoldante para prevenir la adhesión. Luego se coloca la primer capa denominada *Gelcoat*, que es una capa de aproximadamente 0.4mm de espesor que le da el acabado superficial a la pieza, sobre las que se ubican las fibras de refuerzo. A continuación, la resina reticulable es mezclada con un iniciador y un catalizador, utilizados para controlar el comienzo y duración del proceso de curado, y mediante la utilización de rodillos y pinceles se aplica y distribuye la resina sobre el material de refuerzo, evacuando el aire atrapado entre las fibras. Finalmente, se extrae la pieza luego de que haya curado por el tiempo determinado a temperatura ambiente [14].

Si bien el método de Hand Lay-Up es económico y demanda pocos recursos, resulta muchas veces en un producto ineficiente. La disposición de las fibras y la impregnación de estas por parte de un operario le otorga una característica artesanal al proceso que en ocasiones trae como consecuencia malas tolerancias dimensionales debido al escaso control en la cantidad de fibra y resina utilizadas, tiempo empleado, condiciones ambientales de trabajo, etc. Dichos aspectos negativos se ven magnificados cuando el tipo de fibra utilizado es corta y no se encuentra en la forma de una tela no tejida o *mat*, es decir individualmente, ya que el control sobre la orientación y la fracción a disponer es sumamente bajo. De hecho, como se mencionó y quedó reflejado en la Sección 3, las palas diseñadas por ALP Group S.A. presentan las típicas consecuencias de dichos problemas: falta de uniformidad en espesores, sectores con fibra sin impregnar, sectores con mayor cantidad de fibra dispersa que otros, etc.

En este trabajo, se propuso utilizar laminados unidireccionales en contraposición con los CSM utilizados por ALP Group S.A. por los motivos descriptos en la Sección 4.1. Para garantizar la correcta implementación de este tipo de laminados se sugiere la utilización de un proceso de manufactura diferente al actualmente utilizado, el cual asegura un mayor control tanto sobre el proceso, como sobre las propiedades finales del material y finalmente del elemento estructural. El proceso de manufactura recomendado es el de Moldeo Ligero de Transferencia de Resina (LRTM, por sus siglas en inglés), el cual se detalla en la sección siguiente.

4.2.1. Moldeo por Infusión

El Moldeo por Transferencia de Resina (RTM) es un proceso a molde rígido cerrado. Comienza con la distribución de la fibra de refuerzo en la mitad del molde conformando una *preforma*. El molde luego se cierra colocando la otra mitad y se inyecta la resina utilizando un

gradiente de presión positivo desde el contenedor de resina a través de los distintos puntos de ingreso al molde y hacia los puntos de ventilación. La resina fluye sin alterar la orientación de la preforma, pero reemplazando el aire atrapado en ésta, el cual que se evacua hacia los puntos de ventilación. Cuando la resina alcanza los puntos de ventilación, la preforma ya está completamente impregnada y se considera que comienza la fase de curado, el cual puede ser realizado a temperatura controlada. Una vez finalizado, se extrae la pieza terminada del molde.

Este proceso ofrece a los productos fabricados por este método amplias ventajas frente a aquellos realizados mediante métodos más artesanales como el ya descrito Hand Lay-Up. Entre ellas se encuentran [14] [15]:

- Mayor control en la cantidad de resina y fibra
- Mejores tolerancias dimensionales
- Excelentes acabados superficiales
- Uniformidad en la producción
- Mayor control sobre variables intrínsecas del proceso (tiempo, presión de curado, temperatura, condiciones ambientales)
- Excelente para volúmenes de producción medios a altos
- Mayor independencia de la *expertise* de la mano de obra encargada

Sin embargo, la rigurosidad con la que se lleva a cabo el proceso es mayor, por lo que se requiere un preciso control de las variables operativas, principalmente la presión y la temperatura.

El método propuesto para la fabricación de las aspas es una variante del proceso RTM es el proceso de Moldeo por Infusión o Moldeo Ligero por Transferencia de Resina (LRTM). A diferencia del primero, el proceso de Moldeo por Infusión emplea solo una mitad de molde sólido, cerrando la cavidad con una "bolsa" plástica. A su vez, el gradiente de presión para impulsar la resina a través del molde es menor, es decir, se trabaja con bajas presiones de aproximadamente 1 bar, y se obtiene aplicando vacío en los puntos de ventilación. En la Figura 59, se muestra un esquema del proceso.

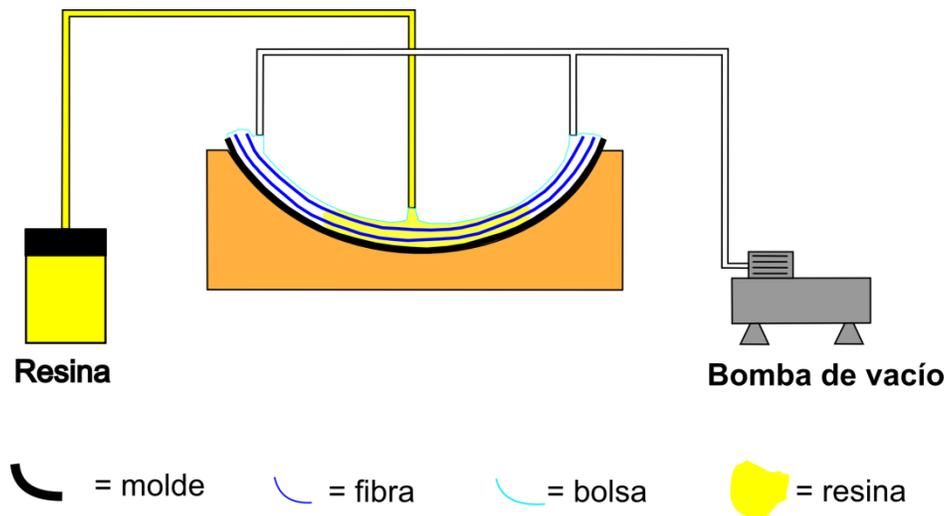


Figura 59. Esquema de operación del proceso de Modelado por Infusión

A continuación se resumen las etapas involucradas en la fabricación de las palas, como una primera aproximación al diseño del proceso, ya que la complejidad de una especificación detallada amerita un proyecto de investigación independiente.

1. Fabricación del molde³.
2. Aplicación de agente lubricante al molde para facilitar la etapa de desmolde.
3. Aplicación y distribución manual de *Gelcoat*.
4. Colocación manual de los tejidos unidireccionales de fibras según la orientación y secuencia de apilamiento indicada en los planos.
5. Aplicación de tejidos *peelplies* y films de respiración *bleeders* cubriendo a las fibras. Dichos elementos son importantes para favorecer la eliminación de gases especialmente volátiles de contenido orgánico durante la práctica de vacío y durante las etapas posteriores de curado.
6. Colocación de elemento de retención para evitar el desborde de resina durante la entrada de esta al molde.
7. Colocación de boquillas para entrada de resina.
8. Aplicación de una *bolsa de vacío* cuidadosamente sellada alrededor de los bordes del molde.
9. Generación de vacío y curado a temperatura ambiente de la pieza.
10. Remoción de herramental y desmolde de la pieza.

4.2.2. Análisis comparativo de costos

Existen tres variables fundamentales en el análisis de costos en la producción de plásticos reforzados: materia prima, herramental y mano de obra.

Las diferencias de costos en lo que respecta a la materia prima entre los procesos de Hand Lay-Up y LRTM, en una primera aproximación, son despreciables ya que los materiales y cantidades empleadas (resina y fibra de vidrio) son los mismos.

Por otro lado, tanto para la evaluación de los costos de herramental como de mano de obra, se debe conocer aproximadamente el volumen de producción. En el caso del herramental, se puede asumir que los moldes no introducen diferencias de costos porque es posible utilizar los mismos para ambos procesos, pero la necesidad de invertir en una bomba de vacío y en el sistema de circulación de resina provoca que cada pieza fabricada por LRTM sea mucho más costosa cuando el volumen de producción es pequeño. En el caso de la mano de obra, el costo no varía en función del volumen de producción por Hand Lay-Up, pero sí lo hace en la fabricación mediante LRTM, disminuyendo a medida que aumenta la cantidad de piezas producidas, ya que un operario puede realizar simultáneamente varias operaciones al no todas exigir su supervisión permanente. Es por eso que el proceso LRTM se recomienda no sólo cuando la precisión dimensional y la repetibilidad

³Un método para fabricar el molde consiste utilizar una fresa CNC para generar un prototipo de la pala en un material como *Corian*. Luego realizar un laminado manual de un gran espesor con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio sobre una de las superficies del prototipo, Intrados o Extradados, previa lubricación de ésta con un agente desmoldante. De esta manera, después de curada la resina, se obtiene un molde de material compuesto con rigidez suficiente para ser utilizado en el proceso de Moldeo por Infusión de una de las superficies de la pala. Luego se debería repetir el procedimiento de laminado para la otra superficie de la pala

así lo requieren, si no también cuando el volumen de producción se encuentra entre 100 y 1500 piezas por año⁴ [19].

⁴ A modo de ejemplo cualitativo de los costos de los dos métodos de fabricación, se presenta el caso de la fabricación de compuertas navales de 24" x 36" con un núcleo de 1/2". Dicho análisis reveló que cuando se producen entre 100 y 2000 piezas anuales, el costo de producción unitario por Hand Lay-Up permanece prácticamente constante. Por el contrario, el costo unitario por LRTM es un 10-15% más bajo para un volumen inicial de producción de 100 piezas. Si el volumen de producción aumenta a 2000 piezas, las diferencias alcanzan hasta un 38% en el costo unitario.

5. Conclusiones

La utilización de laminados unidireccionales presenta grandes ventajas frente a laminados cuasi isotrópicos de menores prestaciones mecánicas. La posibilidad de diseñar y emplear los materiales casi a medida ofrece una herramienta poderosa a la hora de diseñar piezas mecánicas exigentes y livianas al mismo tiempo.

La caracterización exhaustiva de la geometría y de las propiedades encontradas en los diseños actuales de aspas permitió la creación de un modelo computacional que fue validado por sencillos ensayos de deflexión estática, sentando un precedente para la comparación futura con nuevos diseños exploratorios.

Las ventajas de los laminados direccionales, en oposición a los cuasi-isotrópicos, condujeron prontamente a resultados aceptables desde el punto de vista de la resistencia mecánica. Sin embargo, el requerimiento de una determinada frecuencia natural demandó una mayor cantidad de iteraciones y una importante modificación en cuanto a la composición del compuesto utilizado se refiere. En la Tabla 24 se comparan los principales valores de interés entre el diseño estructural actual del Costa-I y el diseño propuesto denominado Laminado 2.0 PET que cumple con los objetivos propuestos inicialmente.

	Diseño Actual Costa-I	Diseño Propuesto Costa-I
Material	Resina Poliester+Fibra de Vidrio	Resina Poliester+Fibra de Vidrio
Tipo de laminado	Cuasi-Isotrópico (CSM)	Direccional
Volumen de fibra (V_f)	40%	50%
Masa (M_{anteraiz}) [kg]	2.10	2.06
Deflexión Máxima (en condiciones operativas) [mm]	242	68
1 ^{er} Frecuencia Natural [Hz]	3.48	7.29
Factor de seguridad mínimo (FS_{min})	3.35	4.56

Tabla 24. Comparación de las principales variables de interés entre diseño estructural actual y propuesto para el Costa-I

La Tabla 24 deja de manifiesto las ventajas, en términos de prestaciones, de implementar un laminado direccional a las cuales se agregan los beneficios que implica un esquema bien definido de distribución de espesores.

La validación y ajuste de los modelos de elementos finitos realizados en este trabajo por medio de ensayos se consideran etapas fundamentales para un trabajo posterior sobre el tema.

Las ventajas mencionadas de los laminados unidireccionales deben ser acompañadas por un proceso de manufactura acorde para aprovechar al máximo el potencial de éstos. El proceso de laminación manual, si bien sencillo y de bajo costo, no permite un control estrecho del material utilizado ni tampoco de las tolerancias dimensionales, lo cual conlleva un costo en tiempo y recursos adicionales no deseados. Se postula que la implementación de un proceso de Infusión de Resina por Vacío, o LRTM, permitirá superar las barreras impuestas por el proceso actual permitiendo ahorros significativos y prestaciones superiores.

La exploración de este método de laminación, tanto en el campo empírico a través de la fabricación de prototipos como a través del modelado computacional queda para trabajos futuros sobre el tema.

6. Referencias

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2001.
- [2] Frank M. White, *Mecánica de Fluidos*, Mc Graw Hill, Madrid, España, 2008.
- [3] Robert M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, Philadelphia, USA.
- [4] Mikell P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Mc Graw Hill, México D.F., 2007.
- [5] George H. Staab, *Laminar Composites*, Butterworth Heinemann, Maine, USA, 1999.
- [6] Ever J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*, XXXX, Virginia, USA, 2010
- [7] Eduardo Barbier, *Informe de Práctica Laboral*, ITBA, Buenos Aires, Argentina, 2012.
- [8] ALP Group S.A., *Catálogo ALP Group Energías Renovables*, 2011, Buenos Aires, Argentina
- [9] N. Buckney, A. Pirrera, S. D. Green, P.M. Weaver, *Structural efficiency of a wind turbine blade*, Thin Walled Structures, Elsevier, 28 March 2013
- [10] L.R. McKittrick, D.S. Cairns, J. Mandell, D.C. Combs, D.A. Rabern and R.D. Van Luchene, *Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 2001.
- [11] P.A. Tipler, G.Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*, Editorial Reverté S.A., Barcelona, España, 2005.
- [12] J.S. Rao, K. Sheelavant and B. Bombale, *Concept optimal design of composite fan blades*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Vancouver, Canada, 2001.
- [13] UPM, *Handbook of finnish plywood*, Finland, 2013.
- [14] M.I.T., *Material properties handbook*, Massachusetts, USA, 2008.
- [15] S. Laurenzi and M. Marchetti, *Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications*, InTech, 2012
- [16] *Guide to Resin Infusion*, Easy Composites U.K., United Kingdom, 2013.
- [17] S.P. Martinez, *Representación normalizada de piezas de material compuesto*, Visual GraphicsGroup, 2012.

[18] Office of Aviation Research, *Guidelines for the Development of Process Specifications, Instructions, and Controls for the fabrications of Fiber-Reinforced Polymer Composites*, US Department of Transportation, Washington, March 2003.

[19] B. Lacovara, *Considering Resin Transfer Molding? Here is what you need to know...*, Composites Fabricators Association, Virginia, 1995.

7. Anexos