

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Desarrollo de álabes para aerogeneradores Savonius,
empleando materiales compuestos (*)**

Por Ing. Sara Oris Montenegro

Directores

**Dr. Lucio Ponzoni
Mg. Nicolás Daverio**

**(*) Tesis para optar por el título de Magister en Ciencia y Tecnología de
Materiales**

República Argentina

2022

AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Dr. Lucio Ponzoni y Mg. Nicolás Daverio, y al Mg. Manuel Moreno, por haber puesto todo su conocimiento y experiencia en guiarme en la realización de este trabajo tan amplio e interdisciplinario. Al Ing. Sebastian Otero que nos abrió las puertas del laboratorio del proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS) del Centro Atómico Constituyentes, por su buena predisposición, acompañamiento, entusiasmo y gran entendimiento de todos los procesos realizados. A Esp. Ricardo Montero del área de microscopía, agradecerle por su paciencia, su tiempo y buena predisposición. Al Ing. Matias Szarko del Centro Atómico Ezeiza, por abrirnos las puertas para realizar los ensayos de DSC, brindarnos su tiempo y por su buena predisposición. Al Ing. Esteban Maita y al Mg. Sebastián Percossi, por su colaboración en los tratamientos térmicos de muestras para el ensayo DSC. A la División de Materiales Avanzados en general, que siempre nos abrió las puertas para trabajar en lo que necesitábamos y a agradecerles enormemente a sus integrantes que nos brindaron todos sus conocimientos. A la División de Fractura, que nos ayudó con el rolado de la chapa. Al grupo de investigación AeroMat y al Laboratorio Perfil Alar, por su acompañamiento en todo el proceso, por abrirnos sus puertas para llevar a cabo este trabajo y por brindarnos todos sus conocimientos.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica, la Universidad Nacional de General San Martín y al Instituto de Tecnología “Profesor Jorge A. Sábato” por haberme otorgado la beca que me permitió continuar mi formación académica.

A mis compañeros y compañeras de maestría por todos los gratos momentos compartidos durante todo este tiempo, en especial a la Ing. Julieta Ganiele por su acompañamiento en el proceso de realización de este trabajo.

A mi familia y amigos, en especial, a mis padres Juana y Felipe, mis hermanas Angélica y Julieta, y a mi compañero Mariano, por su apoyo incondicional durante estos 3 años, los cuales me motivaron continuamente a seguir y cumplir el objetivo.

Finalmente, un agradecimiento muy especial al Ing. Daniel Arcone de la División de Materiales Avanzados, no sólo por su inmensa colaboración con los cálculos del ensayo DSC y en las simulaciones de materiales, sino también por sus consejos y ponerse a disposición siempre que lo necesitamos.

RESUMEN

Argentina está comprometida con la implementación del Acuerdo de París y el cumplimiento colectivo del objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde nuestro país no excederá la emisión neta de 359 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) en el año 2030, aplicable a todos los sectores de la economía. Para lo cual, en el año 2030, la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables se habrá incrementado significativamente y se contará con mayor infraestructura para la generación distribuida. En este contexto, la generación de energía eléctrica a pequeña escala a través de energías renovables cumple un papel importante.

Los aerogeneradores de baja potencia se construyen con diversos materiales. Sin embargo, los materiales compuestos se han convertido en actores centrales principalmente como elemento aligerador de estructuras de los álabes.

El presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). En este contexto, se determinaron los coeficientes estáticos de torque del aerogenerador mediante simulaciones CFD en Flow Simulation®, y se realizaron simulaciones FEM con materiales en Ansys Composite PrepPost. A su vez, se realizó la selección y cálculo de materiales para la construcción de los álabes, la fabricación de los mismos, el diseño del ensamble para vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, y la caracterización térmica, química y mecánica del laminado y sus materiales constituyentes, incluyendo la observación mediante microscopía óptica y determinación de la viscosidad.

Palabras claves: aerogeneradores de baja potencia, Savonius, CFD, FEM, álabes, materiales compuestos, técnicas de caracterización, laminación manual.

ABSTRACT

Argentina is committed to the implementation of the Paris Agreement and to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) collective goal, where our country will not exceed a net equivalent emission of 359 million tons of carbon dioxide equivalent (MtCO_{2e}) in 2030, applicable to all sectors of the economy. By 2030, electricity power generation from renewable sources will have increased significantly and more infrastructure for distributed generation will be in place. In this context, small-scale power generation from renewable energies therefore plays an important role.

Small wind turbines are constructed from a variety of materials. However, composite materials have become central players mainly as a lightening element of blade structures.

This work was organized around the development of a composite material using hand lay-up technique, with the goal of manufacturing the semicircular blades of a low powered (less than 1 kW) Savonius wind turbine. In this context, the static torque coefficients of the wind turbine were determined by CFD simulations in Flow Simulation®, and FEM simulations were performed with materials in Ansys Composite PrepPost. Also the selection and calculation of materials for the construction of the blades, their fabrication, the design of the assembly to link the different structural components of the device, and the thermal, chemical and mechanical characterization of the laminate and its constituent materials were performed, including the observation by optical microscopy and determination of the viscosity.

Keys words: small wind turbines, Savonius, CFD, FEM, blades, composite materials, characterization techniques, hand lay-up.

PRESENTACIONES EN CONGRESOS

15° ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA 2020. Buenos Aires. Póster **Análisis numérico de los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius**. Autores: Sara O. Montenegro; Paula Nicoletti; María Julieta Ganiele; Lucio M. E. Ponzoni; Andrea Villanueva; Sergio Lingeri; Luciana Quinteros.

III JORNADAS INTERNACIONALES Y V NACIONALES DE AMBIENTE 2021. Buenos Aires. Póster **Estudio del torque en un microaerogenerador de eje vertical Savonius**. Autores: Sara O. Montenegro; Paula Nicoletti; María Julieta Ganiele; Lucio M. E. Ponzoni; Andrea Villanueva; Sergio Lingeri; Luciana Quinteros.

PUBLICACIONES

Montenegro, S., Nicoletti, P., Villanueva, A., Ganiele, J., Lingeri, S., Quinteros, L., Anello, D., Melo, M., & Ponzoni, L. (2021). **Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical mediante Solidworks Flow Simulation para hallar los coeficientes estáticos de torque**. INNOVA UNTREF, 1(8).

ÍNDICE

Introducción.....	1
1 Fundamentos teóricos.....	2
1.1 Aerogeneradores Savonius.....	2
1.1.1 Funcionamiento.....	2
1.1.2 Coeficiente de potencia	3
1.1.3 Parámetros característicos	4
1.1.4 Diseño de un aerogenerador Savonius	4
1.1.4.1 Efecto de tapas colocadas en los extremos.....	5
1.1.4.2 Relación de aspecto.....	5
1.1.4.3 Relación de superposición.....	6
1.1.4.4 Efecto del número de álabes.....	6
1.1.4.5 Interferencia del eje.....	6
1.2 Materiales compuestos	6
1.2.1 Materiales de los álabes.....	6
1.2.1.1 Resina epoxi	7
1.2.1.2 Fibra de vidrio	8
1.2.1.3 Top Coat.....	9
1.2.2 Tendencias en el uso de materiales compuestos.....	10
1.2.3 Técnicas de fabricación	11
1.2.3.1 Laminación manual	11
2 Metodología	13
2.1 Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius	13
2.2 Simulaciones de materiales	17
2.3 Selección y cálculo de materiales.....	21
2.3.1 Resina.....	22
2.3.2 Fibra	23
2.3.3 Top coat.....	24
2.3.4 Materiales a utilizar	24
2.4 Fabricación de los álabes.....	26
2.4.1 Preparación de la matriz de laminación	26
2.4.2 Corte del tejido	26
2.4.3 Laminación álabe 1	26
2.4.4 Laminación álabe 2	29
2.4.5 Terminación superficial.....	29

2.4.5.1	Aplicación de sistema top coat en la superficie cóncava de los álabes	31
2.4.5.2	Aplicación de sistema top coat en la superficie convexa de los álabes	31
2.5	Ensamble del aerogenerador	32
2.5.1	Diseño del ensamble.....	32
2.5.1.1	Material de impresión.....	36
2.6	Técnicas experimentales	36
2.6.1	Viscosidad	37
2.6.2	Ensayo de tracción	37
2.6.2.1	Introducción	37
2.6.2.2	Fabricación de probetas.....	37
2.6.2.3	Procedimiento del ensayo.....	38
2.6.2.4	Validación de resultados	39
2.6.3	Microscopía óptica	40
2.6.3.1	Equipo utilizado	40
2.6.3.2	Preparación de muestras.....	40
2.6.3.3	Análisis con software de imágenes	40
2.6.4	FT-IR.....	42
2.6.4.1	Introducción	42
2.6.4.2	Equipo utilizado	42
2.6.4.3	Muestras analizadas.....	42
2.6.4.4	Análisis de espectros	43
2.6.5	DSC	43
2.6.5.1	Introducción	43
2.6.5.2	Equipo utilizado	44
2.6.5.3	Preparación de muestras.....	44
2.6.5.4	Análisis de termogramas	44
2.6.5.5	Importancia de la Tg y el curado en los álabes de los aerogeneradores.....	47
3	Resultados	49
3.1	Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius	49
3.2	Simulaciones de materiales	52
3.2.1	Simulaciones con presiones.....	52
3.2.2	Simulaciones según reglamento CIRSOC.....	53
3.2.2.1	Aerogenerador Savonius a escala.....	53
3.2.2.2	Aerogenerador Savonius a fabricar	54
3.3	Fabricación de los álabes.....	55
3.3.1	Laminación álabe 1	55

3.3.2	Laminación álabes 2	56
3.3.3	Terminación superficial.....	57
3.4	Ensamble del aerogenerador	58
3.5	Técnicas experimentales	61
3.5.1	Viscosidad	61
3.5.2	Ensayo de tracción	62
3.5.2.1	Probetas impregnadas.....	62
3.5.2.2	Probetas con falta de impregnación.....	63
3.5.2.3	Probetas de tamaño reducido con tratamiento térmico de post curado	64
3.5.2.4	Comparación entre probetas	65
3.5.3	Observaciones mediante microscopía óptica.....	66
3.5.4	FT-IR.....	67
3.5.5	DSC	70
4	Discusión.....	73
4.1	Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius	73
4.2	Simulaciones de materiales	75
4.3	Fabricación de los álabes.....	75
4.3.1	Laminación.....	75
4.3.2	Terminación superficial.....	76
4.4	Ensamble del aerogenerador	76
4.5	Técnicas experimentales	76
4.5.1	Viscosidad	76
4.5.2	Ensayo de tracción	77
4.5.3	Observaciones mediante microscopía óptica.....	77
4.5.4	FT-IR.....	78
4.5.4.1	Caracterización de la resina epoxi y endurecedor	78
4.5.4.2	Caracterización del top coat y su catalizador	80
4.5.4.3	Caracterización sistema epoxi	82
4.5.4.4	Caracterización del PLA	82
4.5.5	DSC	83
5	Conclusiones	85
5.1	Simulaciones de un aerogenerador Savonius	85
5.2	Fabricación de los álabes.....	85
5.3	Ensamble del aerogenerador	85
5.4	Técnicas experimentales	86
6	Trabajos futuros.....	87

6.1	Simulaciones de un aerogenerador Savonius	87
6.2	Fabricación de los álabes.....	87
6.3	Ensamble del aerogenerador	87
6.4	Técnicas experimentales	87
7	Referencias.....	88
8	Anexo	97

Introducción

Respecto al sector energético para el año 2030, Argentina tiene previsto implementar políticas, acciones y medidas para impulsar una transición energética justa que garantice el abastecimiento asequible de energía, de bajas emisiones, confiable y sostenible, acompañando el crecimiento económico y poblacional e incorporando el uso responsable de la energía a través de la promoción de la eficiencia energética. La matriz energética al 2030 deberá ser más inclusiva, dinámica, estable, federal, soberana y sostenible, basada en el significativo potencial de la energía eólica, solar, hidroeléctrica y de las bioenergías, así como en el desarrollo de la energía nuclear, y de otros vectores energéticos tales como el hidrógeno, que tendrán un rol clave en la transición energética. Concretamente, Argentina está comprometida con la implementación del Acuerdo de París y el cumplimiento colectivo del objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde nuestro país no excederá la emisión neta de 359 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) en el año 2030, aplicable a todos los sectores de la economía. Para lo cual, en el año 2030, la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables se habrá incrementado significativamente y se contará con mayor infraestructura para la generación distribuida (1). El Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, creado por Ley N° 27.424, establece el marco regulatorio para que todos los ciudadanos conectados a la red eléctrica puedan generar energía para su autoconsumo en hogares, PyMEs, grandes industrias, comercios, producción agrícola, entes públicos y organismos oficiales, entre otros. El excedente de energía generada podrá ser inyectado a la red, recibiendo una compensación por ello. Los Usuarios-Generadores podrán, asimismo, acceder a una serie de beneficios promocionales (2). En este contexto, la generación de energía eléctrica a pequeña escala a través de energías renovables cumple un papel importante.

Los aerogeneradores de baja potencia se construyen con diversos materiales. Sin embargo, los materiales compuestos se han convertido en actores centrales principalmente como elemento aligerador de estructuras de los álabes desde la década de 1990. Generalmente las resinas y refuerzos utilizados para álabes de grandes aerogeneradores también son aptos para pequeños (3).

Los álabes además de los efectos de carga estructural, también pueden estar sometidos a rayos, impactos físicos y condiciones dañinas de erosión de la superficie (4). Debido a ello, dentro de los materiales compuestos, se destaca el uso de polímeros reforzados con fibras para fabricarlos, ya que son materiales ligeros, rígidos y resistentes a la intemperie. Asimismo, los álabes de material compuesto mejoran el rendimiento aerodinámico del aerogenerador significativamente (5). Por esta razón, el presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). Con este desarrollo se plantea adquirir experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores, el desarrollo de la idoneidad y capacidades del Laboratorio Perfil Alar y la División de Materiales Avanzados, y la puesta a punto del equipamiento utilizado.

1 Fundamentos teóricos

1.1 Aerogeneradores Savonius

1.1.1 Funcionamiento

Un aerogenerador Savonius es un dispositivo de eje vertical que opera esencialmente debido a la fuerza de arrastre que genera el viento sobre sus álabes. Sin embargo, la fuerza de sustentación –en menor medida– también contribuye a la potencia mecánica transmitida al eje (6). Cuando el viento entra en contacto con los álabes estos experimentan fuerzas de arrastre debido a la diferencia de presión entre las superficies cóncavas y convexas. Estas fuerzas generan una componente normal de arrastre (F_n), que actúa perpendicular a superficie del álab, y una componente tangencial de arrastre (F_t), que actúa a lo largo de la dirección tangencial del álab (7). En la Figura 1.1., se pueden observar los coeficientes de arrastre normales y tangenciales, que se calculan a partir de F_n y F_t a partir de las ecuaciones 1 y 2.

$$C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 d} \quad (1)$$

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 d} \quad (2)$$

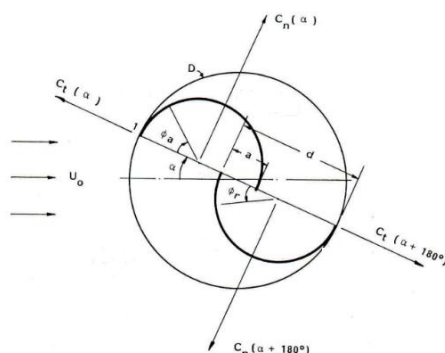


Figura 1.1.Fuerzas de arrastre actuantes en los álabes de un aerogenerador Savonius (7).

Éste, rota a lo largo de posiciones angulares Θ (ángulos de rotor), por lo que los álabes exhiben distintos contornos de flujo cambiando cíclicamente el coeficiente de arrastre y sustentación. Así, el torque producido por un aerogenerador Savonius a una velocidad angular constante, varía cíclicamente a lo largo de la rotación del dispositivo (6), como se observa en la Figura 1.2.

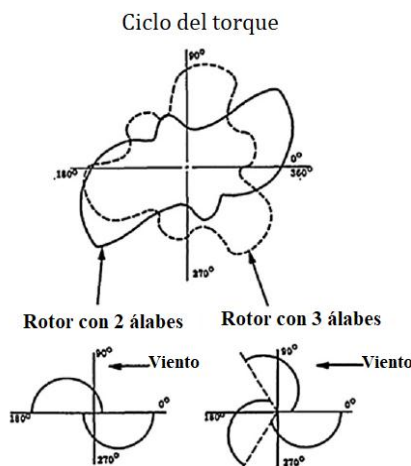


Figura 1.2. Ciclo de torque de un aerogenerador Savonius (6).

Para visualizar los contornos de flujo de forma sencilla, en la Figura 1.3 se observan fotografías del experimento de Fujisawa & Shirai (8), donde se somete a este tipo de aerogeneradores a un campo de flujo mientras el dispositivo se encuentra estático.

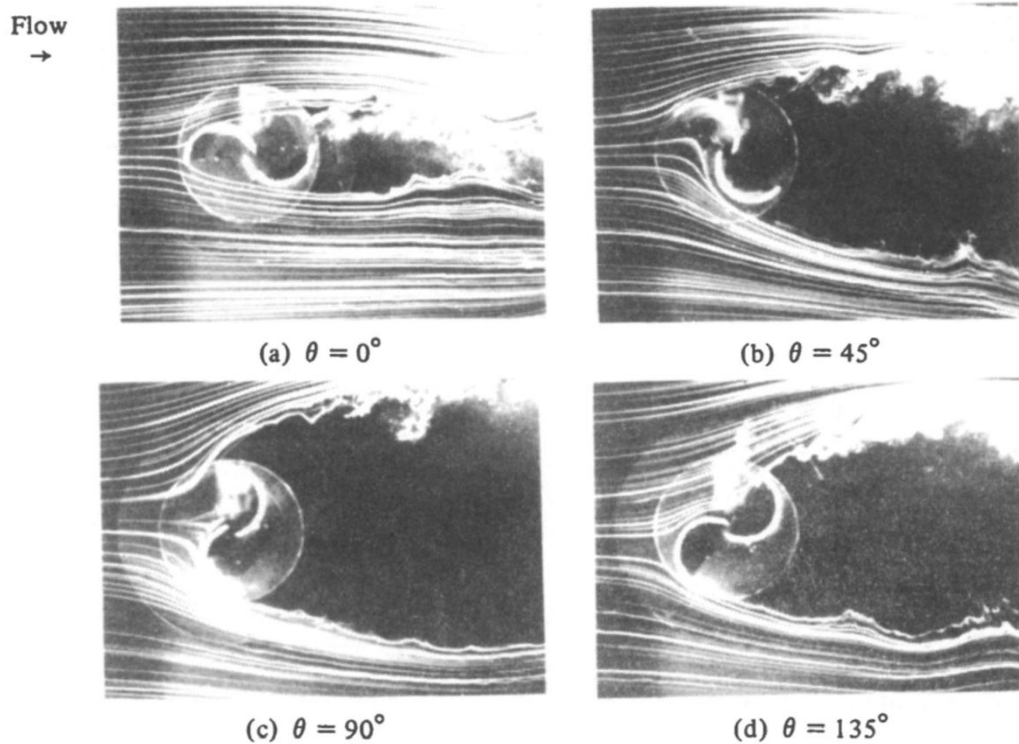


Figura 1.3. Campo de flujo alrededor de un aerogenerador Savonius sin rotación (8).

En la Figura 1.3 se observa que para ángulos pequeños de rotor ($\Theta = 0^\circ - 90^\circ$), los puntos de remanso¹ se ubican en el álabe de avance. A medida que el ángulo aumenta de 0° a 135° , el punto de remanso se mueve hacia el álabe de retroceso. Además, se observa que el ancho de la estela varía considerablemente con el ángulo del rotor. El ancho de la estela es menor en $\Theta = 0^\circ$ y es mayor en $\Theta = 90^\circ$. Finalmente, se observa el desprendimiento de la capa límite y el desarrollo de vórtices (8).

1.1.2 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia (C_p) es utilizado para evaluar su desempeño, y representa la fracción de potencia extraída del total disponible en la corriente libre de flujo de aire. Este coeficiente se obtiene adimensionalizando la potencia del dispositivo por la potencia que proporciona el flujo de aire a través del área proyectada del dispositivo en la dirección del flujo (6), como se observa en la Figura 1.4.

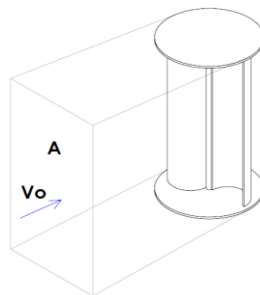


Figura 1.4. Área proyectada en la dirección del flujo.

¹ Las máximas presiones en la superficie del perfil marcan la posición del punto de remanso, en el que la velocidad es nula. La posición del mismo depende de la dirección relativa del flujo al incidir sobre cada álabe (110).

El cumplimiento de la ecuación de conservación de masa hace que no toda esa potencia disponible en el flujo de aire pueda aprovecharse. Además de las características del viento, la potencia aprovechable depende de las características de funcionamiento del dispositivo, las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia eléctrica del generador. Por eso, se define que el coeficiente de potencia de un aerogenerador (C_p), nunca puede alcanzar el 100%. El valor máximo fue determinado por Betz en el año 1927 a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento. En la ecuación 3 se observa el límite de Betz.

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} \quad (3)$$

Por lo tanto, como máximo, sólo puede extraerse el 59.25% de la energía cinética que contiene una masa de aire en movimiento (9), tal como observa en la Figura 1.5.

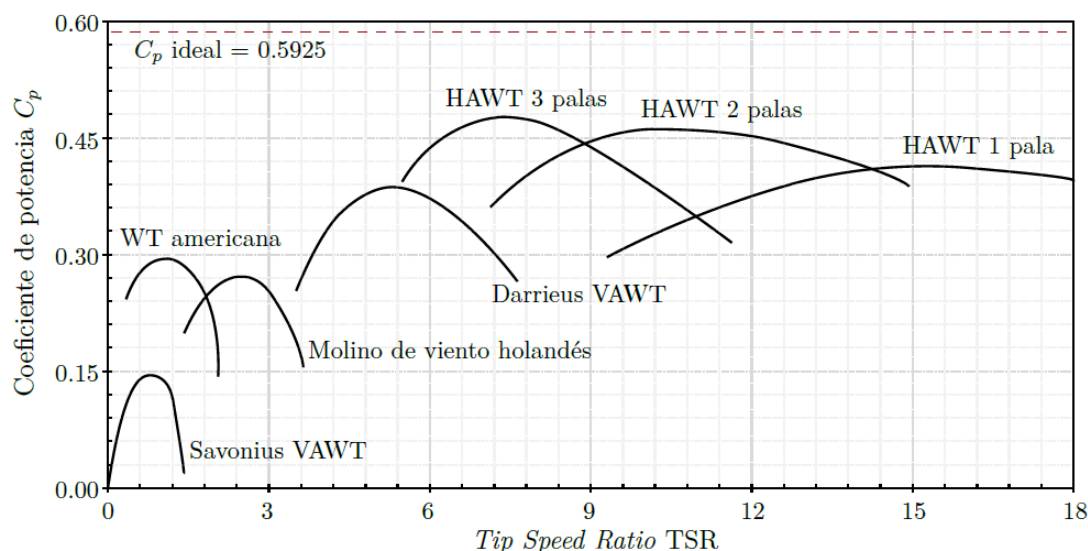


Figura 1.5. Curvas características de C_p en función de TSR^2 (10).

1.1.3 Parámetros característicos

Los parámetros característicos de un aerogenerador Savonius (Coeficiente de potencia, de torque, y de torque estático), se investigan a través de túneles de viento, y/o mediante la aplicación de métodos numéricos que resuelven las ecuaciones de conservación del flujo (6) utilizando distintos softwares como ANSYS Fluent® (11), Flow Simulation® (12), Star-CCM+® (13) y CFdesign® (14), entre otros. La predicción teórica de éstos es difícil debido a la complejidad del flujo de aire alrededor del dispositivo, y la mutua interferencia que generan los álabes (6).

1.1.4 Diseño de un aerogenerador Savonius

En la Figura 1.6 se observan algunas configuraciones posibles de aerogeneradores Savonius. Cada cambio en la forma del dispositivo, implica un cambio en la curva de potencia (6).

² Relaciona la velocidad en la punta del álabes (V_t) y la velocidad del viento (U_0). $TSR = \frac{V_t}{U_0}$

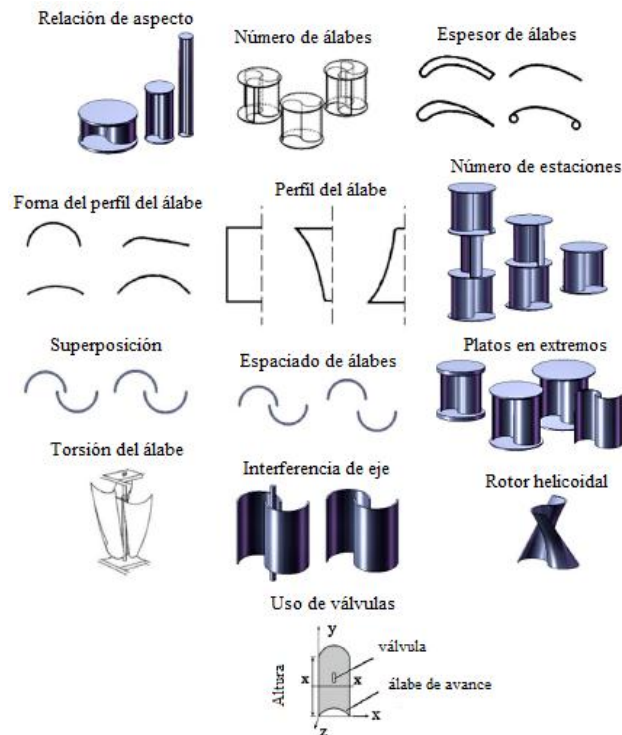


Figura 1.6. Posibles configuraciones (6).

1.1.4.1 Efecto de tapas colocadas en los extremos

Las investigaciones de diversos autores (15; 16; 17), muestran que las tapas finales mejoran el rendimiento aerodinámico y la eficiencia del dispositivo, por lo tanto, los coeficientes de potencia obtenidos son más altos. Esto sucede debido a que previenen el escape de aire desde la superficie cóncava de los álabes hacia el flujo externo, manteniendo la diferencia de presión entre la superficie cóncava y convexa en niveles satisfactorios a lo largo de la altura del dispositivo (6). Además, las tapas finales también tienen un propósito estructural (18). El valor óptimo para el diámetro de las tapas finales es alrededor de un 10% más que el diámetro que forman los álabes (15).

1.1.4.2 Relación de aspecto

Se define como la altura de los álabes dividida el diámetro que forman los álabes (6), tal como se observa en la Figura 1.7.

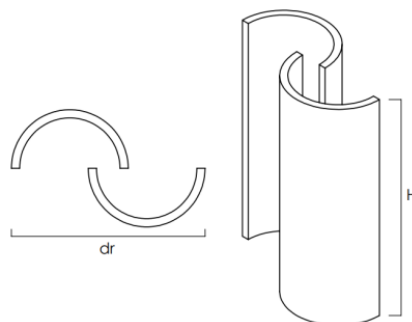


Figura 1.7. Relación de aspecto.

Algunos investigadores (17; 19), dedujeron que hay un aumento en el coeficiente de potencia con el aumento de la relación de aspecto. Sin embargo, valores cercanos a 2 dan buenos resultados (20; 17; 21).

1.1.4.3 Relación de superposición

Se define como la relación entre la distancia entre álabes (e) y el diámetro de los álabes (d), tal como se observa en la Figura 1.8. Si el rotor contiene un eje, entonces es necesario tener en cuenta el diámetro del eje (a), y la relación de superposición se calcula como se observa en la ecuación 4, donde “ a ” es el diámetro del eje (16).

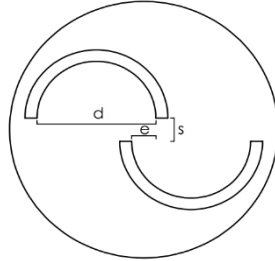


Figura 1.8. Relación de superposición y espaciado.

$$\beta = \frac{(e-a)}{d} \quad (4)$$

En cuanto al valor de la relación de superposición de los álabes, no hay un consenso. Algunos autores enuncian que debe ser entre un 10-15% del diámetro del álabes, y otros, entre el 20-30% del diámetro del álabes. Los mejores resultados para un aerogenerador Savonius con álabes semicirculares, se obtienen con un espaciado nulo ($s=0$), ya que para grandes valores de éste el aire no se concentra en la superficie cóncava del álabes de retroceso, por lo que se reduce la potencia del aerogenerador (6).

1.1.4.4 Efecto del número de álabes

Según diversos autores (15; 21; 16), un aerogenerador Savonius con dos álabes proporciona una mayor eficiencia y un coeficiente de potencia más alto que uno con tres, debido a que, cuando el número de álabes aumenta, genera un efecto cascada en el cual cada álabes afecta el desempeño del siguiente (6).

1.1.4.5 Interferencia del eje

Un eje pasante interfiere en el flujo que atraviesa el espaciado entre los álabes, lo que produce una reducción en la eficiencia. Sin embargo, puede ser utilizado como un accesorio que provee rigidez adicional a la estructura. En este caso, se puede aplicar un incremento en el espaciado y superposición entre los álabes, con el objetivo de compensar el efecto de bloqueo que genera el eje (6).

1.2 Materiales compuestos

1.2.1 Materiales de los álabes

Los álabes son el componente más importante de un aerogenerador, tanto en términos de rendimiento como de costo (4; 23). El material que se emplea para realizarlos es un factor importante en el diseño ya que afecta la potencia extraída por el dispositivo.

Los álabes de Savonius semicirculares de baja potencia, se realizan con materiales como aluminio, PVC (24) y acrílicos (25), entre otros.

Sin embargo, desde la década de 1990, los compuestos reforzados con fibra se han utilizado cada vez más para fabricar álabes de aerogeneradores (26), ya que son materiales ligeros, rígidos y resistentes a la intemperie. Los álabes además de los efectos de carga estructural, también pueden estar sometidos a

rayos, impactos físicos y condiciones dañinas de erosión de la superficie (4). Asimismo, los álabes de material compuesto mejoran el rendimiento aerodinámico del aerogenerador significativamente (5).

Los materiales compuestos más utilizados son sistemas epoxis reforzados con fibras de vidrio, y en segundo lugar, sistemas epoxis reforzados con fibra de carbono. Los compuestos con fibra de vidrio son más baratos que los de fibra de carbono (26). Generalmente las resinas y refuerzos utilizados para álabes de grandes aerogeneradores también son aptos para los pequeños (3).

En el presente trabajo sólo se contemplará el uso de sistemas epoxi y fibras de vidrio, por ser los materiales más utilizados en la fabricación de álabes de aerogeneradores, y con menor costo en el caso de la fibra de vidrio.

1.2.1.1 Resina epoxi

Entre los diversos polímeros termoestables utilizados, las resinas epoxi son conocidas por su alta resistencia, durabilidad, excelente resistencia a productos químicos, disolventes y, en general, alto rendimiento a temperaturas elevadas. También ofrecen una excelente adhesión a una amplia variedad de fibras, rellenos y otros materiales, razón por la cual se utilizan como adhesivos en muchas aplicaciones estructurales. Durante el proceso de curado exhiben una contracción baja (en el rango de 1–5%), y no producen volátiles. Sus principales desventajas son sus costos relativamente altos y sus largos tiempos de curado (27).

La matriz epoxi es producida por la reacción química entre un pre-polímero epoxi de bajo peso molecular y un agente de curado, comúnmente llamado endurecedor. El agente de curado no actúa como un catalizador, sino que su función es la de co-reaccionar y unir las moléculas de epoxi. Las cantidades del pre-polímero epoxi y el agente de curado se pesan con precisión, y se mezclan hasta generar una composición homogénea. La cantidad de agente de curado no influye la tasa de reacción del proceso de curado, pero tiene un efecto sobre las propiedades del sistema curado. Otros ingredientes que pueden mezclarse con el líquido de partida son, flexibilizantes para mejorar la resistencia al impacto del sistema curado, rellenos para reducir el costo y la contracción durante el proceso de curado, pigmentos para la coloración, aceleradores para aumentar la tasa de reacción y reducir el tiempo de gel, y diluyentes para reducir la viscosidad (necesario para un buen flujo de resina y humectación de la fibra). Sin embargo, la adición de diluyentes puede reducir las propiedades mecánicas y la temperatura de transición vítrea, por lo que su cantidad debe ser determinada en función de la aplicación que se está considerando (27).

La resina epoxi contiene varios anillos epoxis reactivos en su molécula, y cada uno contiene un átomo de oxígeno y dos átomos de carbono, tal como se observa en la Figura 1.9. El agente de curado rompe los anillos epoxi e inicia el proceso de curado. A medida que la reacción química continúa, un número creciente de moléculas epoxi se entrecruzan, formando una estructura de red 3D y transformando la mezcla de resina líquida de baja viscosidad en una matriz sólida. A medida que esta transformación tiene lugar aumenta la viscosidad, la cual finalmente llega a ser tan alta que el material se comporta como un sólido (27).

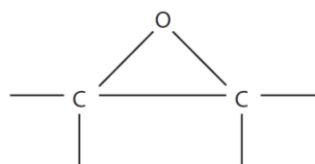


Figura 1.9. Anillo epoxi.

Las estructuras moleculares de las resinas epoxi varían de diferentes maneras, según el número y ubicación de los grupos epoxi (funcionalidad de la resina), y la presencia de grupos aromáticos en la molécula. Entre ellos, el número y ubicación de los grupos epoxi es uno de los factores que determina la densidad de entrecruzamiento (número de enlaces cruzados por unidad de peso molecular del

sistema curado). Otros factores que influyen en ésta son, la reactividad del agente de curado (depende del número de átomos de hidrógeno activos en la molécula del agente de curado), y las condiciones de reacción (temperatura y el tiempo de curado). Cuanta más alta sea la densidad de entrecruzamiento, mayor es la temperatura de distorsión térmica, la temperatura de transición vítrea, dureza, módulo y fragilidad del sistema epoxi³. La estabilidad térmica y la resistencia química también aumentan con el aumento de la densidad de entrecruzamiento, pero son mejores si las moléculas de epoxi contienen grupos aromáticos. El diglicidil éter de bisfenol-A (DGEBA), es la resina epoxi más utilizada en la mayoría de los materiales compuestos y aplicaciones de adhesivos (27).

Existen diversos agentes de curado disponibles, y su composición química influye en la velocidad de reacción, aumento de la viscosidad, tipos de enlaces formados, el grado de entrecruzamiento logrado y, en última instancia, las propiedades del sistema curado. La selección del agente de curado adecuado es importante, ya que influye en la vida útil⁴, el tiempo de gel⁵, el ciclo de curado y, por lo tanto, en la velocidad de proceso de manufactura. Es importante señalar que la cantidad no estequiométrica del agente de curado en la mezcla y la mezcla inadecuada, son a menudo las causas fundamentales de un proceso de curado inadecuado del sistema epoxi (27).

1.2.1.2 Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio tipo E son las menos costosas de todas las fibras disponibles comercialmente, y son las que se utilizan con mayor frecuencia como refuerzos en materiales compuestos poliméricos. Como puede verse en la Tabla 1, su módulo no es tan alto como el de las fibras de carbono o aramida, pero su límite de tracción es cercano a las fibras T-300 y aramida. Las fibras de vidrio tipo S tienen un módulo ligeramente más alto, así como límite de tracción, pero son más caras. Cabe señalar que la resistencia de las fibras de vidrio se ve afectada por la abrasión, la absorción de humedad y, a menudo, es mucho menor que las de las fibras de vidrio recién fabricadas (27).

Fibra	Diámetro del filamento (µm)	Densidad (gr/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Tensión de rotura (MPa)	Elongación a la rotura (%)
Vidrio tipo E	10	2.54	72.4	3450	4.8
Vidrio tipo S	10	2.49	86.9	4300	5
T-300 (Carbono PAN ⁶)	7	1.76	230	3650	1.5
AS-4 (Carbono PAN)	7.1	1.79	231	4410	1.7
IM-7 (Carbono PAN)	5.2	1.78	276	5516	1.9
M-55J (Carbono PAN)	-	1.91	540	4020	0.8
PI20 (Carbono brea)	-	2.16	823	2200	0.3
Kevlar 49 (Aramida)	11.9	1.45	131	3620	2.8

Tabla 1. Propiedades de fibras utilizadas como refuerzos en materiales compuestos poliméricos (27).

Las fibras de vidrio tienen una baja conductividad térmica y eléctrica, por lo que son muy buenas aislantes. Sin embargo, al cortarlas con instrumentos son duras y abrasivas. Asimismo, durante la fabricación de hebras de fibra de vidrio, los filamentos son recubiertos con una mezcla de productos químicos, llamado *sizing*. Estos productos químicos son una mezcla de lubricantes (evitan la abrasión entre los filamentos), antiestáticos (reducen la electricidad estática entre los filamentos), y aglutinantes (empaquetan los filamentos en una hebra y promueven la adhesión entre los filamentos y la matriz polimérica) (27).

³ Cuando se menciona sistema epoxi, se hace referencia a la mezcla entre la resina y su respectivo endurecedor.

⁴ Vida útil (*pot life*): tiempo que tarda en duplicarse o cuadruplicarse la viscosidad inicial de una mezcla. El tiempo comienza a medirse desde el momento en que se mezcla el producto, y se mide a temperatura ambiente (140).

⁵ Tiempo de gel (*gel time*): tiempo donde el material pasa desde un estado de líquido viscoso a un estado de gel elástico de forma irreversible. Éste, marca el inicio de la aparición del retículo (punto de gel). El punto de gel es crítico en la manipulación de los materiales termoesestables, ya que a partir de este estado el material deja de fluir y no puede ser procesado (78). No hay una prueba de control de calidad estándar y debe determinarse experimentalmente en cada aplicación, si es necesario (140).

⁶ Poliacrilonitrilo (PAN).

Las fibras de vidrio están disponibles en una variedad de longitudes y formas, como fibras continuas individuales, *rovings* (fibras continuas paralelas), fibras continuas cortadas o *rovings* con fibras cortadas con largos entre 5-50 mm, tejidos y *mats* no tejidos (26). En la Figura 1.10, se observan algunas de las formas de comercialización de la fibra de vidrio.

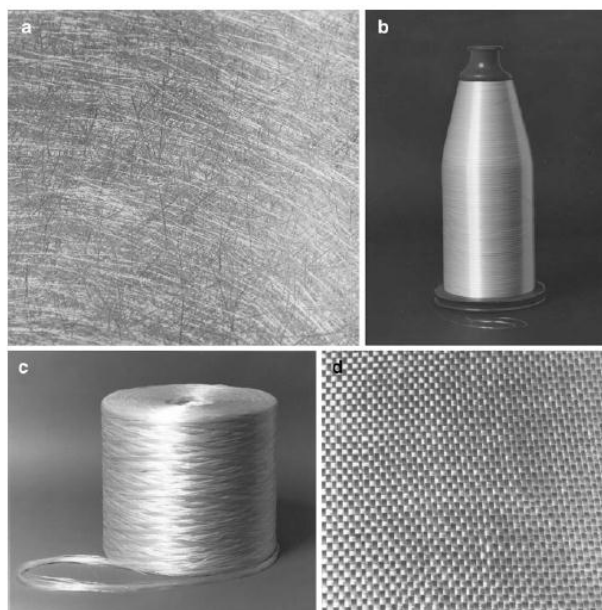


Figura 1.10. Fibra de vidrio a) *mat*, b) hilo continuo, c) *roving* y d) tejido (26).

1.2.1.3 Top Coat

Las funciones principales de los *gel coats* son, la protección de la superficie de la pieza fabricada y la apariencia estética. Sin embargo, otras funcionalidades pueden estar disponibles según la combinación de éstos con diferentes aditivos. Existen diferencias entre las funciones de los *gel coats* y los *top coats*. Durante la fabricación de los materiales compuestos, los *gel coats* se colocan en la superficie del molde en estado líquido antes del proceso de laminación. Por el contrario, los *top coats* se aplican directamente sobre la superficie de la pieza de material compuesto una vez curada. Esta capa no necesita un proceso de curado por separado, ya que el entrecruzamiento tiene lugar en condiciones atmosféricas (28).

Aunque hay que diferenciar *gel coats* y *top coats*, su composición es similar. Pueden ser resinas poliéster insaturadas, resinas epoxi, resinas viniléster, etc. Junto a estas resinas, los sistemas *gel coats* a menudo contienen diluyentes reactivos (para ajustar la viscosidad), y aditivos o rellenos (para mejorar propiedades existentes o proporcionar nuevas) (28).

En la fabricación de álabes de aerogeneradores, deben tenerse en cuenta diversas consideraciones al seleccionar una tecnología de protección: cuestiones aerodinámicas, desafíos ambientales, los materiales y tecnologías disponibles, entre otros. Sin embargo, al decidir qué consideración favorecer, es importante determinar las condiciones a las que estará expuesta el álabes, es decir, cambios de temperaturas, exposición UV, ataque químico, esfuerzos mecánicos, erosión, heces de pájaros, etc. La protección de la superficie es necesaria porque en el material compuesto siempre existen defectos que aparecen por las contracciones, el proceso de curado, el tratamiento práctico y otras circunstancias. El recubrimiento también puede tener defectos, en función de cómo se aplique la capa. Finalmente, otra característica importante de los recubrimientos de los álabes es el color. El color blanco los hace más visibles respecto al tráfico aéreo, y con este color se pueden apreciar fácilmente los cambios por degradación (3).

En la Tabla 2, se presentan las ventajas y desventajas de los polímeros utilizados como *gel coats* y *top coats*.

Material	Ventajas	Desventajas
Poliésteres instaurados	- Bajo costo - Pueden curar a temperatura ambiente	- Baja resistencia química (depende de la formulación) - Tiempos largos para completar el curado - Dificultad en el control del proceso de curado
Epoxis	- Buena resistencia química - Se puede obtener una superficie resistente	- El curado debe llevarse a cabo a elevada temperatura - Tiempo largo de curado
Acrilatos	- Tiempo corto de curado - Curan a temperatura ambiente - Resistentes a radiación UV	- Pueden introducir fragilidad en la superficie - Baja resistencia química - Necesitan energía para curar, por ejemplo, proveniente de radiación IR o UV
Poliuretanos	- Tiempo corto de curado - Pueden curar a temperatura ambiente - Proporcionan una superficie dura, que puede otorgar buena resistencia al desgaste debido a la absorción de partículas por la superficie	- Superficies duras

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los polímeros utilizados como *gel coats* y *top coats* (3).

Algunos de los problemas más comunes que se producen luego de aplicar los *gel coats*, se observan en la Figura 1.11.

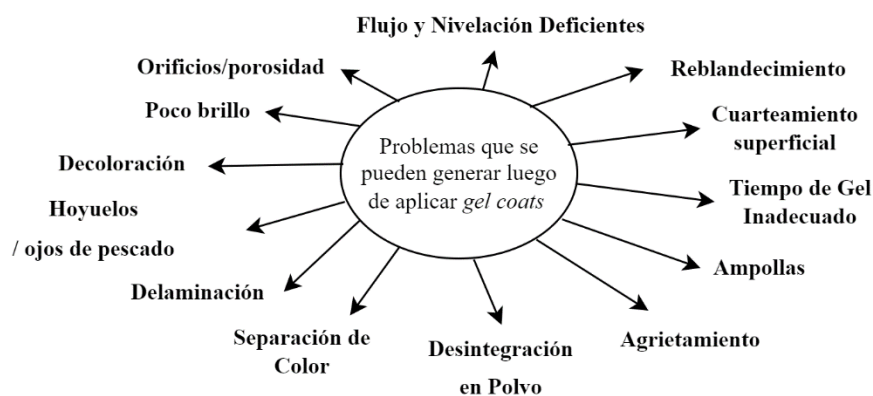


Figura 1.11. Problemas que se puede generar luego de la aplicación de *gel coats* (29).

1.2.2 Tendencias en el uso de materiales compuestos

En los últimos años, la investigación sobre materiales compuestos a base de bambú y otros *Green composites*, se muestra prometedora para fabricar álabes de todos los tamaños con menor impacto ambiental (3).

La búsqueda de fabricar *Green composites* no sólo se centra en las fibras (bambú, lino, algodón, etc.), sino también en las resinas termoestables procedentes de recursos naturales renovables. Estas bioresinas son una alternativa tecnológica emergente, sostenible y con menor impacto ambiental frente a las resinas termostables sintéticas derivadas del petróleo (epoxis, poliésteres, fenólicas, etc.) (30).

Además de los *Green composites*, también se está avanzando en el desarrollo de técnicas de reciclaje de materiales compuestos convencionales de los álabes, debido a que muchos aerogeneradores de los primeros mercados han llegado al final de su vida útil. BloombergNEF estima que alrededor de 4 GW de proyectos alcanzaron 20 años de vida útil sólo en el año 2020 en todo el mundo, y eso aumentará a casi 40 GW para 2030 (31).

Según BloombergNEF, no existe todavía una forma comercialmente viable de reciclar completamente los materiales compuestos de los álabes. Sin embargo, Vestas anunció recientemente que faltan tres años para comercializar una tecnología para ello (31). La iniciativa CETEC (*Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites*), de la que participan industrias, institutos y universidades, propone dentro de tres años, presentar una nueva tecnología que implique la circularidad de los compuestos termoestables utilizados para fabricar álabes. Los aerogeneradores son reciclables en un 85-90 por ciento, donde el material de los álabes constituye el porcentaje restante que no se puede reciclar debido a la naturaleza de los compuestos termoestables (32).

1.2.3 Técnicas de fabricación

Las técnicas de fabricación generalmente dependen de la necesidad de cantidad de álabes (3). Los álabes del aerogenerador se pueden fabricar manualmente, pero estos procesos están restringidos a álabes de aerogeneradores de baja potencia. Los procesos manuales son menos costosos pero el control de calidad es cuestionable. La variabilidad del contenido de resina puede causar problemas de impregnación. El uso de preimpregnados ayuda a evitar este problema, pero se debe aplicar calor y presión para la consolidación, lo que aumenta los costos (26). Otro método que se puede utilizar para la fabricación de álabes en lotes pequeños es infusión por vacío ya que tiene una configuración de bajo costo, pero requiere de mano de obra calificada (3).

En el presente trabajo, se utilizará la técnica de laminación manual con la cual se fabrican álabes de aerogeneradores de baja potencia (4; 33; 34).

1.2.3.1 Laminación manual

En la técnica laminación manual, las fibras se colocan sobre o dentro de un molde, y se humedecen con resina líquida. Las fibras pueden ser de cualquier material (a menudo aramida, carbono o vidrio) y pueden estar disponibles en diferentes formas. El curado del material ocurre generalmente a temperatura ambiente y sin presión de consolidación aplicada al molde. El herramental de este proceso es bastante básico. Los pinceles con frecuencia se utilizan para distribuir la resina uniformemente sobre las fibras, y los rodillos se emplean para extraer el aire que queda atrapado en el refuerzo y mejoran la impregnación. Además, se utilizan recipientes para la preparación de la resina, espátulas y utensilios de limpieza, entre otros (35). En la Figura 1.12 se observa un esquema del proceso de laminación manual, y en la Tabla 3 se detallan las ventajas y desventajas de este proceso.

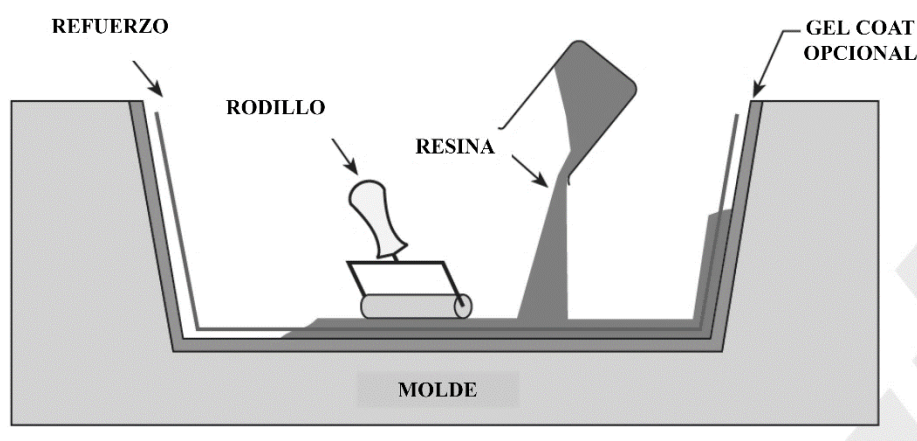


Figura 1.12. Esquema del proceso de laminación manual (36).

Ventajas	Desventajas
- Mucha experiencia ya que este proceso ha sido ampliamente utilizado durante años. - Existe capacitación estandarizada. - Plazos de entrega cortos para la producción de componentes. - Costos mínimos de equipos y herramientas. - Materiales relativamente baratos. - Amplia variedad de proveedores y tipos de materiales. - Versatilidad en la forma, el tamaño y configuración del laminado. - Los cambios de diseño se pueden efectuar fácilmente. - Costo competitivo para artículos individuales.	- Legislación, reglamentación y códigos voluntarios sobre salud y seguridad. - Costos de extracción y tratamiento de COV's. - Alto contenido de mano de obra. - La calidad y la variabilidad del producto dependen de la experiencia del operador (especialmente en la mezcla resina). - Bajas tasas de producción debido a los tiempos de curado de resinas a temperatura ambiente. - Las resinas deben ser de baja viscosidad (bajo peso molecular) por lo que son más volátiles, y esto compromete las propiedades térmicas y mecánicas. - Inconsistencia dimensional. - Alta contracción y exotermia potencial en áreas ricas en resina, especialmente para componentes gruesos. - En superficies verticales puede requerir la adición de agentes tixotrópicos. - Sólo una superficie se encuentra moldeada (la que está en contacto con el molde). - Alto contenido de poros. - Fracción volumétrica de fibra baja que reduce las propiedades mecánicas. - Altos niveles de residuos.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del proceso de laminación manual (35).

Para mejorar la consolidación del laminado, se puede aplicar presión a las capas extrayendo el exceso de resina y el aire incluido. Esto se logra cubriendo el laminado (colocado sobre un molde cubierto con agente desmoldante) con una bolsa de vacío y cinta de sellado, manta de absorción, film perforado y una capa de *peel ply*. El el aire debajo de la bolsa se extrae mediante una válvula y bomba de vacío (35). En la Figura 1.13 se observa un esquema de realización de vacío sobre el laminado.

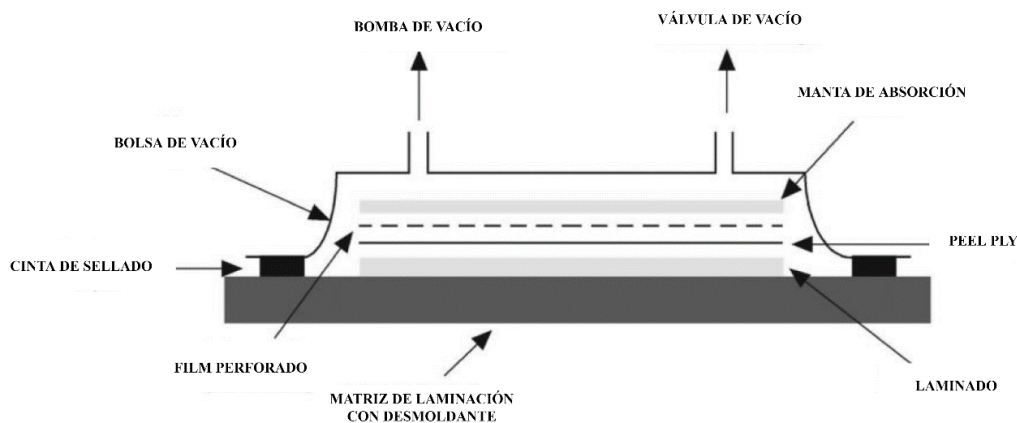


Figura 1.13. Esquema de realización de vacío sobre el laminado (35).

El *peel ply*, es una capa despegable que permite el libre paso de aire, volátiles y exceso de resina durante el proceso. A menudo se adhiere a la superficie de la pieza laminada, pero se debe quitar luego del curado para proporcionar una superficie que se pueda unir o pintar. El agente desmoldante evita que la pieza curada se pegue a la superficie del molde y ayuda a que se desprenda fácilmente. La manta de absorción absorber el exceso de resina y proporciona los medios para aplicar vacío, ayudando en la eliminación de aire y volátiles de todo el conjunto. El film perforado evita el exceso de resina, permitiendo el paso de aire y volátiles hacia la manta de absorción, y previene que la manta de absorción se pegue a la parte curada. La bolsa de vacío cubre el laminado para crear una contención flexible y, la cinta de sellado, sella la bolsa en la periferia (27).

2 Metodología

El presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). Se seleccionó esta geometría debido a su facilidad de construcción y como punto de partida para incorporar experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores.

En este contexto, se determinaron los coeficientes estáticos de torque del aerogenerador mediante simulaciones CFD en Flow Simulation®, se realizaron simulaciones FEM con materiales en Ansys Composite PrepPost, se realizó la selección y cálculo de materiales para la construcción de los álabes, se fabricaron los álabes, se realizó el diseño y fabricación del ensamble para vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, y se realizó la caracterización térmica, química y mecánica del laminado y sus materiales constituyentes, incluyendo la observación mediante microscopía óptica y determinación de la viscosidad.

En la Figura 2.1 se observan las etapas mencionadas a modo esquemático.

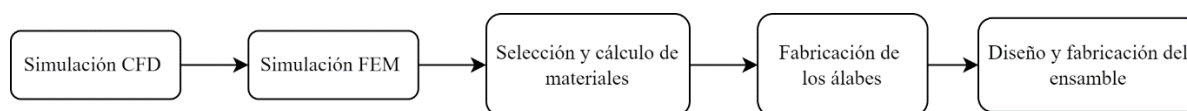


Figura 2.1. Etapas desarrolladas en la metodología⁷.

2.1 Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius

Debido a cómo se desarrolla el flujo de aire alrededor del dispositivo y la mutua interferencia que generan los álabes (6), es complejo realizar simulaciones dinámicas con este tipo de aerogeneradores. Por ello se propuso determinar el coeficiente estático de torque, para lo cual se pueden realizar simulaciones estáticas. Este coeficiente determina la capacidad de arranque automático del aerogenerador Savonius, y es una de las consideraciones importantes al evaluar su rendimiento ya que un dispositivo con excelente capacidad de arranque automático puede comenzar a girar a un número de Reynolds relativamente bajo. El arranque automático, implica que el dispositivo puede iniciar la rotación sin ninguna fuerza de activación adicional o externa (37).

Para estudiar el rendimiento estático de los aerogeneradores Savonius, se puede adoptar un enfoque numérico, donde el coeficiente estático de torque debe evaluarse a diferentes ángulos de rotor (θ). El ángulo del rotor se define como el ángulo entre el álabe del aerogenerador y la dirección del flujo de aire que se aproxima, y el coeficiente estático de torque (C_θ), es el par ejercido sobre los álabes mientras se mantiene estacionario. Los valores negativos o cercanos a cero implican una capacidad de arranque automático muy pobre (37), mientras que los positivos indican que el rotor puede iniciar en esa posición angular (38).

A continuación, se presenta la metodología para hallar los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius mediante Flow Simulation®, para evaluar la capacidad de arranque automático del dispositivo, y verificar la capacidad de simulación de SolidWorks®.

Para hallar los coeficientes estáticos de torque, primero se dibujó en SolidWorks® uno de los modelos de aerogeneradores Savonius ensayados experimentalmente por Kamoji et.al. (39). Con el diseño de la Figura 2.2, se realizaron las simulaciones. En la Tabla 4, se detallan los parámetros de diseño del modelo.

⁷ La caracterización térmica, química y mecánica, la observación mediante microscopía óptica y determinación de la viscosidad, es transversal a las etapas de fabricación de los álabes, diseño y fabricación del ensamble.

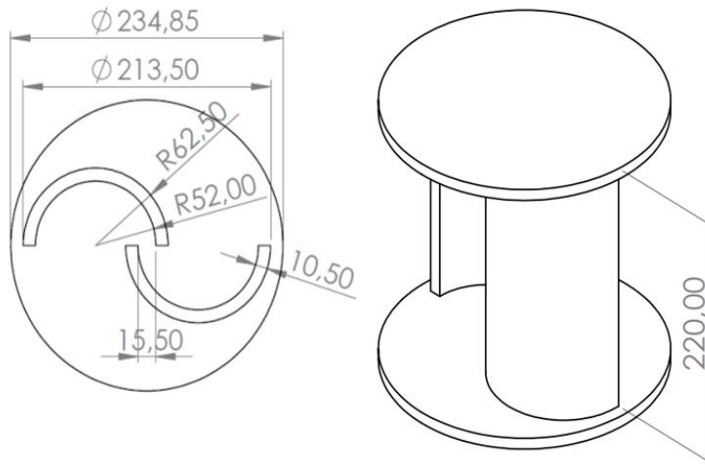


Figura 2.2. Savonius de álabes semicirculares.

Parámetro	Valor
Diámetro del rotor (D)	213,5 mm
Altura (H)	220 mm
Radio interior del alabe (R_{int})	52 mm
Radio exterior del alabe (R_{ext})	62,5 mm
Espesor del álabe (t)	10,5 mm
Distancia entre álabes (a)	15,5 mm
Relación de superposición = $\frac{a}{2(R_{ext}-t)}$	0,15
Relación de aspecto = $\frac{H}{D}$	1,03
Diámetro de la tapa (D_0) = $1,1 \cdot D$	234,85 mm
Espesor de la tapa	10 mm

Tabla 4. Parámetros de diseño del modelo utilizado.

Las simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés), se realizaron mediante Flow Simulation®, donde se fijaron como objetivos 68 puntos de presión total⁸ promedio ubicados cada 10° ($10^\circ < \Phi_{avance} < 170^\circ$, $190^\circ < \Phi_{retroceso} < 350^\circ$) a lo largo de la sección media del dispositivo, es decir, 34 puntos por cada álabe. En la Figura 2.3 se observa Φ_{avance} , $\Phi_{retroceso}$ y Θ ; y en la Figura 2.4 dónde se colocaron los objetivos puntuales de presión total promedio en las simulaciones.

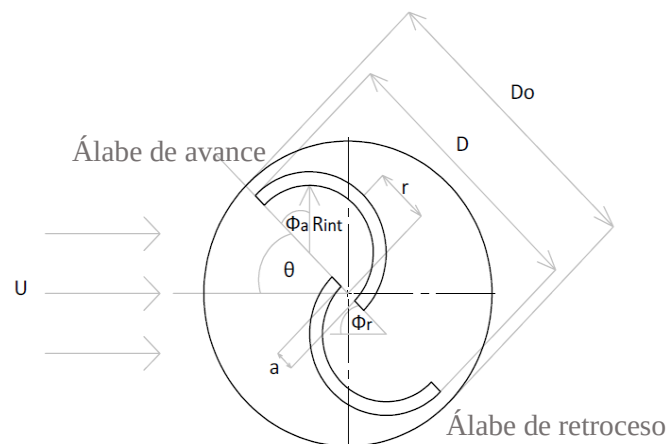


Figura 2.3. Savonius con álabes semicirculares.

⁸ Presión total = presión dinámica + presión estática. La presión dinámica es cero, por lo que la presión total es igual a la presión estática.

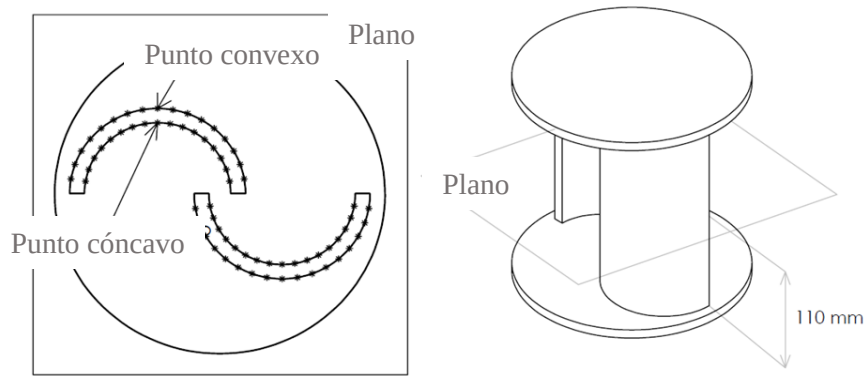


Figura 2.4. Objetivos dispuestos cada 10° a lo largo de la sección media.

Se realizaron 12 simulaciones, variando el ángulo de rotor cada 15° ($0^\circ < \Theta < 165^\circ$). Cada análisis CFD se realizó de manera estática utilizando flujo externo, presión atmosférica (101325 Pa), 30°C y número de Reynolds de 120000 ($U = 8.98$ m/s), con el objetivo de igualar las condiciones experimentales establecidas por Kamoji et.al. El dominio computacional en 3D, se observa en la Figura 2.5. El mallado rectangular se refinó en la superficie de los álabes, lo cual aumenta el número de nodos en las zonas cercanas a la superficie sólida y permite tener mejores aproximaciones de la capa límite (zona donde se presentan los mayores gradientes de presión y velocidad) (40).

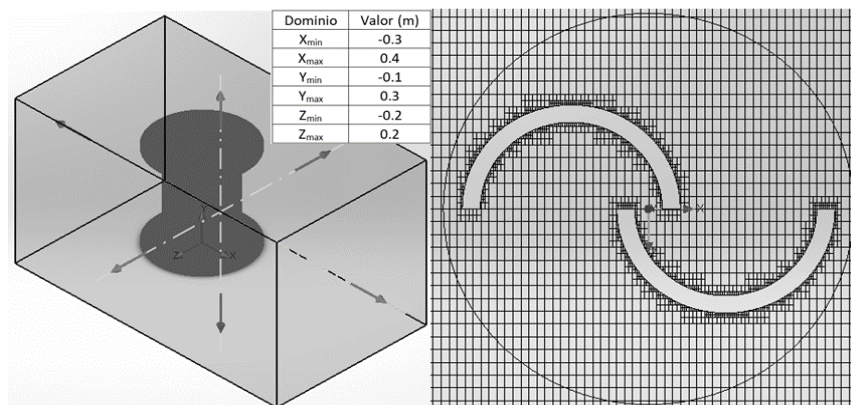


Figura 2.5. Dominio computacional y mallado.

Finalmente, los coeficientes estáticos de torque se hallaron utilizando el modelo de cálculo propuesto por diversos autores (39; 41; 42), a partir de los valores de presión total promedio obtenidos en las simulaciones. Este modelo consiste en obtener valores experimentales de presión en puntos dispuestos a lo largo de la sección media del dispositivo, con los cuales se calculan coeficientes de presión. Los coeficientes de presión se emplean para encontrar los coeficientes locales estáticos de torque que, posteriormente, son integrados con el objeto de hallar los coeficientes estáticos de torque. A continuación, en la Tabla 5, se detallan las ecuaciones y las variables que intervienen.

	Ecuación	Variables que intervienen
Coefficiente de presión	$C_{pr} = \frac{2(P-P_{\infty})}{\rho U^2} \quad (5)$	P = Presión en la superficie del álabe P _∞ = Presión atmosférica (101325 Pa) ρ = Densidad del aire a 30° C (1,164 kg/m ³) U = Velocidad de corriente libre (8,98 m/s)
Coefficiente local estático de torque , calculado para cada ángulo del álabe, 10° < Φ _a < 170° cada 10° para el álabe de avance, y entre 190° < Φ _i < 350° cada 10° para el álabe de retroceso.	$C_{\Phi} = \frac{R_{int}}{D^2} \Delta C_{pr} r \sin \Phi \quad (6)$	R _{int} = Radio interior del álabe (52 mm) D = Diámetro del rotor (213,5 mm) ΔC _{pr} = C _{pr} cóncavo - C _{pr} convexo r = Brazo de palanca Φ = Ángulo del álabe
Coefficiente estático de torque , calculado para cada ángulo del rotor entre 0° < Θ < 165° cada 15°.	$C_{\Theta} = \frac{2R_{int}}{D^2} \left[\int_0^{\pi} \Delta C_{pr} r \sin \Phi_a d\Phi_a + \int_{\pi}^{2\pi} \Delta C_{pr} r \sin \Phi_r d\Phi_r \right] \quad (7)$	Θ = Ángulo del rotor R _{int} = Radio interior del álabe (52 mm) D = Diámetro del rotor (213,5 mm) ΔC _{pr} = C _{pr} cóncavo - C _{pr} convexo r = Brazo de palanca Φ _a = Ángulo de álabe de avance Φ _r = Ángulo de álabe de retroceso
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (8)$	Re ⁹ = Número de Reynolds (120000) ρ = Densidad del aire a 30° C (1,164 kg/m ³) U = Velocidad de corriente libre (8,98 m/s) D = Diámetro del rotor (213,5 mm) μ = Viscosidad dinámica a 30°C (1,86.10 ⁻⁵ N s/m ²)

Tabla 5. Ecuaciones y variables que intervienen.

Dentro de las variables que intervienen, el brazo de palanca (r) se determina de forma geométrica a través de la proyección sobre el eje x del punto de aplicación de la fuerza, respecto del origen (43; 41; 44). En este caso, el punto de aplicación de la fuerza está definido por los puntos colocados cada 10° en la sección media del álabe para la determinación de la presión; y el origen se encuentra en a/2, es decir, a la mitad de la distancia entre álabes.

Para el álabe de avance, se calculan los valores de r dividiéndolos en 4 rangos que abarcan los puntos de presión del 1-8, 9, 10-14 y 15-17. Luego, los valores de r en el álabe de retroceso son idénticos a los del álabe de avance, pero con signo contrario y teniendo en cuenta la equidistancia de los puntos respecto al origen. En la Figura 2.6, se ejemplifica el cálculo del brazo de palanca para el álabe de avance con un ángulo de rotor de 0°.

⁹ Este número de Reynolds se obtiene con una velocidad de corriente libre de ≈ 9 m/s (32,4 km/h). Según la escala de viento del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, este valor se corresponde con un viento regular (se balancean los árboles pequeños, se forman en los estanques pequeñas olas).

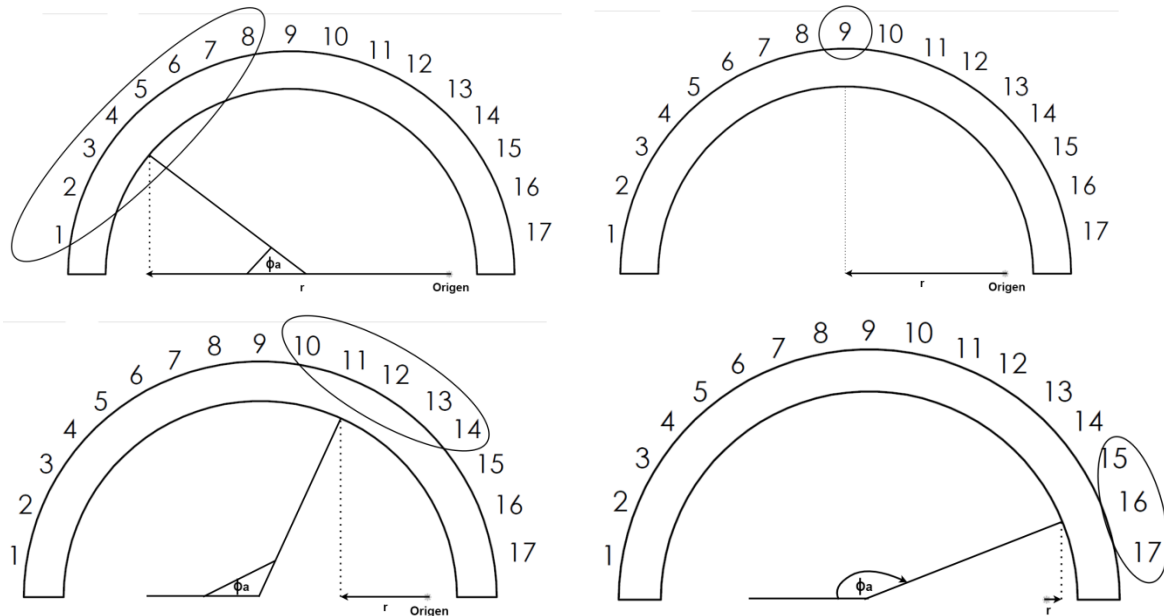


Figura 2.6. Cálculo del brazo de palanca en el álabe avance con un ángulo de rotor de 0°.

2.2 Simulaciones de materiales

A continuación, se presenta la metodología de simulación para estimar las solicitaciones mecánicas a las que se verán sometidos los álabes, bajo dos condiciones de cargas estáticas. Por un lado, se incorporaron las presiones obtenidas en las simulaciones estáticas CFD al modelo FEM a escala, ya que dichos resultados no son extrapolables fácilmente¹⁰ al modelo a fabricar. Por otro lado, se realizaron simulaciones siguiendo el trabajo realizado por Spies & Tacca para la verificación estructural de un aerogenerador Savonius según el reglamento CIRSOC 102/2005¹¹, utilizando el modelo a escala y a fabricar para comparar cómo se distribuyen las tensiones (45). El objetivo de realizar estas simulaciones es obtener un punto de partida, para sentar las bases de un proceso de diseño que requiere de retroalimentación a través de la caracterización del material compuesto, y demanda conocer las condiciones de contorno del sitio de emplazamiento del dispositivo.

Para realizar estas simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés), se recurrió al software ANSYS Composite PrepPost¹² y a la colaboración de la División de Materiales Avanzados, que cuenta con una amplia experiencia en el tema.

Los modelos de aerogeneradores Savonius utilizados en las simulaciones se observan en las Figura 2.7 y Figura 2.8. En la Figura 2.7, se observa el modelo a escala idéntico al utilizado en las simulaciones estáticas CFD, en el cual se modificó el espesor de los álabes ya que en los materiales compuestos éste depende de la cantidad de capas de fibra. En la Figura 2.8, se observa el modelo que será fabricado en función del tamaño de la matriz de laminación disponible. Los detalles de la selección y cálculo de materiales, fabricación, ensamble de los componentes y los ensayos de tracción, se describen en las secciones siguientes de este trabajo.

¹⁰ Se deben establecer relaciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica.

¹¹ Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones. INTI-CIRSOC.

¹² Licencia Académica Ansys 19.2 del Departamento de computación de alta precisión, Cluster Neurus.

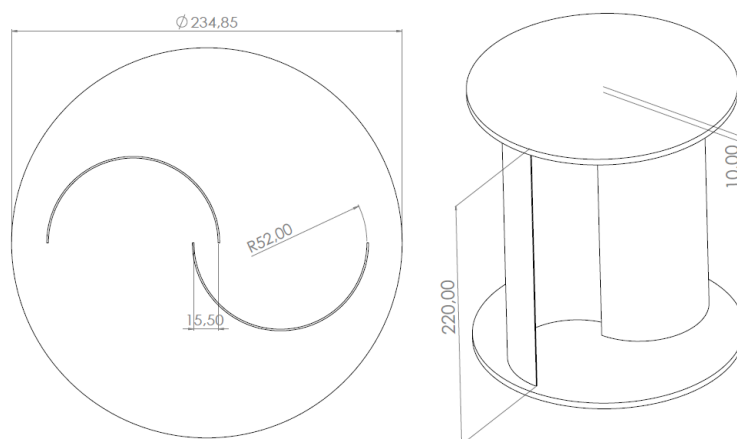


Figura 2.7. Aerogenerador Savonius a escala, medidas en mm.

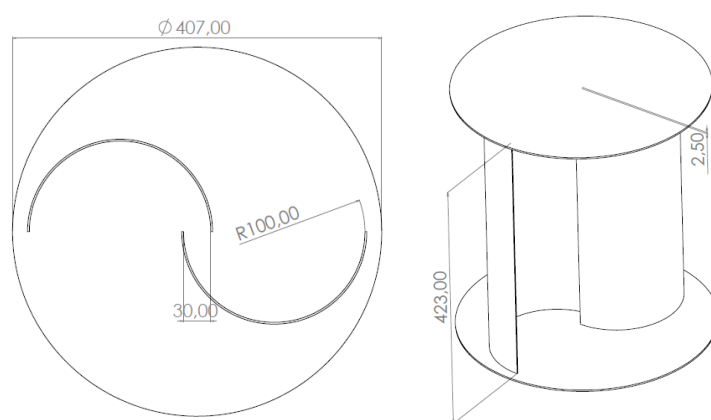


Figura 2.8. Aerogenerador Savonius a fabricar, medidas en mm.

A continuación, en la Figura 2.9, se observa el esquema global adoptado para las simulaciones.

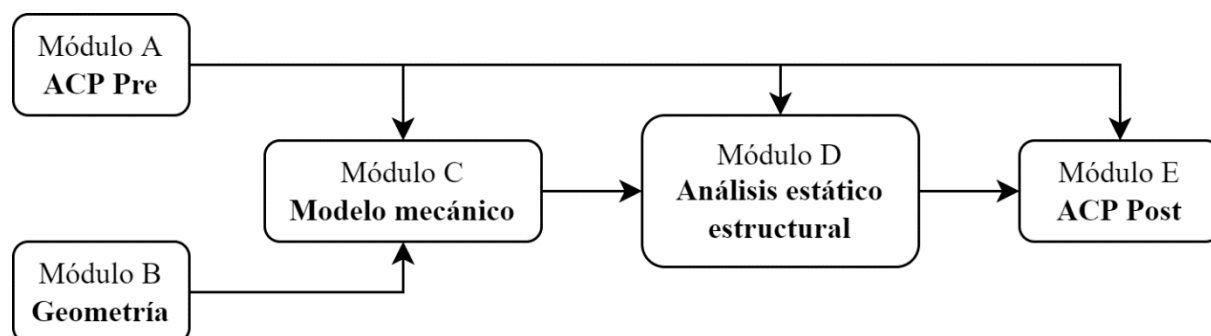


Figura 2.9. Esquema global adoptado en las simulaciones.

En el módulo A se construyeron los álabes con un material compuesto, el cual se añadió a la librería de ANSYS® teniendo en cuenta valores típicos (46), ya que no se contaba con datos propios a excepción del límite de tensión longitudinal producto de los ensayos de tracción realizados. Dichos valores, se observan en la Tabla 6. En caso de datos faltantes, se tomaron valores promedio y/o valores típicos.

Propiedades mecánicas	Valores típicos
Módulo de Young longitudinal	31,5 GPa
Módulo de Young transversal	31,5 GPa
Límite de tensión longitudinal	155,84 MPa
Límite de tensión transversal	155,84 MPa
Módulo de corte en el plano	2,85 GPa
Límite de compresión longitudinal	-155,84 MPa
Límite de compresión transversal	-155,84 MPa
Límite de corte en el plano ¹³	150 MPa

Tabla 6. Propiedades típicas de laminados fabricados a partir de tejidos biaxiales de fibra de vidrio y sistemas epoxis (46).

Asimismo, se colocó una roseta cilíndrica¹⁴ y un conjunto de elementos orientados¹⁵ por cada álabe. La secuencia de apilamiento y los espesores de cada capa se observan en la Figura 2.10, teniendo en cuenta que las capas se estructuraron de forma monolítica¹⁶ para facilitar el tratamiento de los resultados.

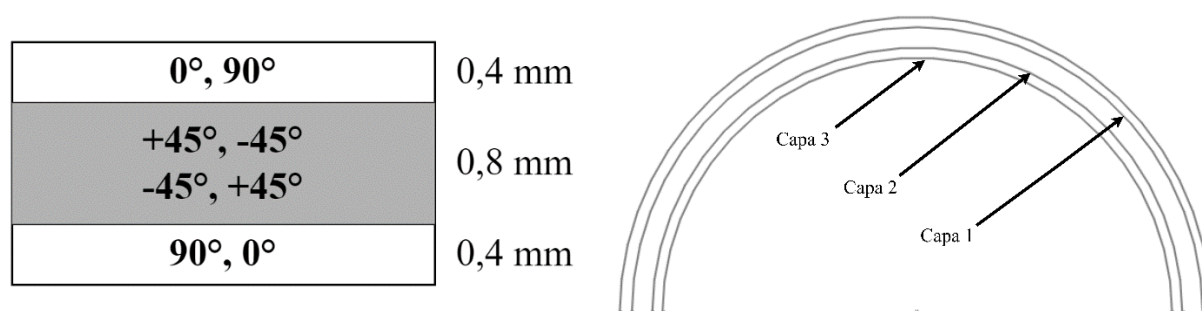


Figura 2.10. Secuencia de apilamiento y espesor de cada capa monolítica.

En el módulo B, se incluyeron las tapas utilizando una aleación de aluminio perteneciente a la librería de ANSYS. Sus propiedades mecánicas principales se observan en la Tabla 7. Posteriormente, estas tapas se unieron con los álabes en el módulo C.

Propiedades mecánicas	Valores
Módulo de Young	71 GPa
Módulo de corte	27 GPa
Tensión de rotura	310 MPa

Tabla 7. Propiedades de la aleación de aluminio disponible en la librería de ANSYS.

El análisis estático estructural se llevó a cabo en el módulo D. En éste, se establecieron dos sistemas de coordenadas cilíndricas, C11 (álabe 1) y C12 (álabe 2), los cuales fueron necesarios para programar los comandos con las presiones en puntos para cada ángulo de rotor, y ejecutarlos mediante APDL¹⁷. En la Figura 2.11, se observan los sistemas de coordenadas cilíndricas C11 y C12.

¹³ Se tomó este valor como punto de partida, ya que depende de la interacción entre capas del laminado y no resulta sencillo tomarlo de bibliografía.

¹⁴ Las rosetas son sistemas de coordenadas que establecen la dirección de referencia de los conjuntos de elementos orientados. En otras palabras, definen la dirección de 0° (141).

¹⁵ Un conjunto de elementos orientados es un conjunto de elementos con información adicional sobre las orientaciones de los elementos. La dirección de orientación de un conjunto de elementos es responsable de establecer la dirección de apilamiento de los elementos asociados (141).

¹⁶ Capas con propiedades continuas y homogéneas.

¹⁷ Lenguaje de diseño paramétrico en ANSYS (APDL por sus siglas en inglés).

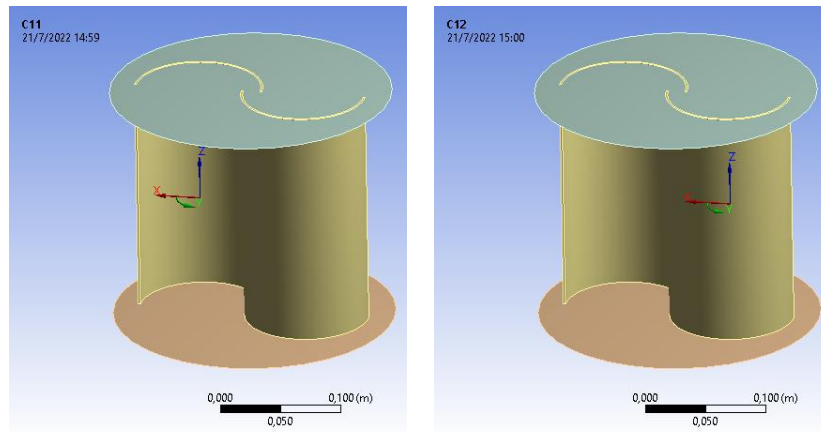


Figura 2.11. Sistemas de coordenadas cilíndricas, C11 (álabe 1) y C12 (álabe 2).

Luego, para realizar el mallado del modelo, se agruparon los componentes (tapas y álabes) mediante una condición de empotramiento, ya que este es el peor caso al que pueden estar sometidos. En esta condición, los componentes no pueden moverse (no se deslizan ni se separan) pero pueden rotar entre sí (47). Esto fuerza al mallado a tener continuidad entre los diferentes componentes e interpretar al modelo como un todo (48). En la Figura 2.12, se observan las condiciones de empotramiento y el mallado del modelo, el cual se adaptó a la capacidad de cálculo disponible y teniendo en cuenta que un mallado más fino no reportaba variaciones significativas en los resultados. En el **anexo**, se detallan los parámetros del mallado según la experiencia de la División de Materiales Avanzados.

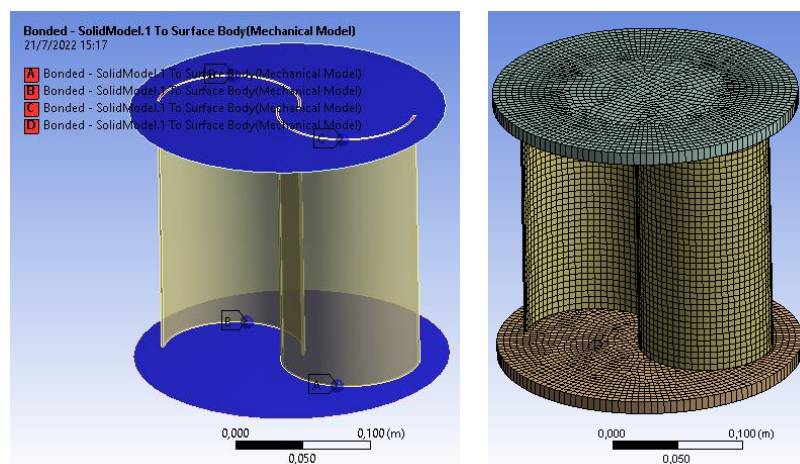


Figura 2.12. Condiciones de empotramiento y mallado del modelo.

Asimismo, se establecieron desplazamientos remotos para las tapas, con un comportamiento deformable en X e Y (pueden moverse libremente en el plano y rotar), y Z restringido (Figura 2.13). Luego, se programaron los comandos para su ejecución mediante APDL con las presiones en puntos obtenidos en las simulaciones CFD en la sección media, para ángulos de rotor de 0 °, 45 °, 90 ° y 135°. Estos valores se extrapolaron a toda la superficie del álabe para reproducir condiciones asimilables a una situación real, donde la interacción entre el fluido y los álabes produce diferencias de presiones en toda la superficie. Se utilizaron los resultados obtenidos para estos ángulos de rotor, debido a que en estas posiciones angulares se observan grandes cambios en las velocidades y presiones del fluido. En total, se realizaron 3 simulaciones. Los comandos programados pueden observarse de manera integral en el **anexo**.

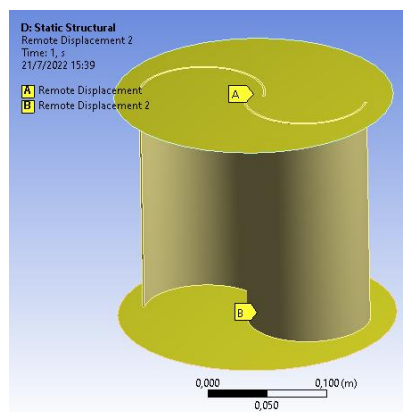


Figura 2.13. Desplazamientos remotos.

En el módulo E, se realizó el procesamiento de los resultados para lo cual se requirió el uso de criterios de falla. Existen una amplia variedad de criterios propuestos por diferentes autores. En este trabajo se utilizó el criterio propuesto por Tsai-Wu, por su simplicidad a la hora de implementarlo en programas FEM y debido a su uso con resultados positivos por parte de diversos autores (48; 49). Asimismo, se utilizó el criterio de falla de máximas tensiones, para verificar las mismas en cada capa de los álabes. Para ello, en este módulo se identificaron las tensiones máximas y mínimas principales, y tensiones de corte (50). Las ecuaciones y las variables que intervienen en la aplicación de ambos criterios, se detallan en el **anexo**.

Finalmente, se realizó una simulación con los parámetros detallados anteriormente, teniendo en cuenta el trabajo realizado por Spies & Tacca para la verificación estructural de un aerogenerador Savonius realizado con materiales compuestos. A partir del reglamento CIRSOC 102/2005, estos autores obtuvieron una fuerza transversal de $9806,6 \text{ N}^{18}$ a la cual debe verificarse el aerogenerador y su estructura completa (45). Para realizar esta simulación, se reemplazaron las presiones en puntos por una fuerza transversal de $9806,6 \text{ N}$, tal como se observa en la Figura 2.14.

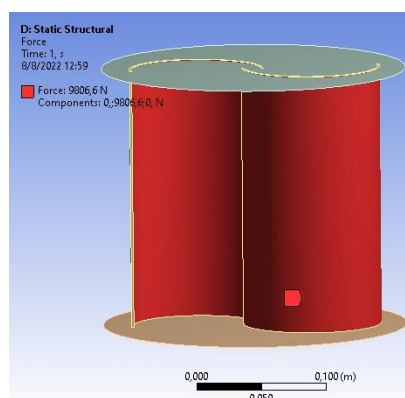


Figura 2.14. Fuerza aplicada.

2.3 Selección y cálculo de materiales

Como mencionamos en los fundamentos teóricos, en el presente trabajo sólo se contempla el uso de resina epoxi, por ser la más utilizada en la fabricación de álabes de aerogeneradores. Lo mismo sucede con la fibra de vidrio, que no sólo representa el material más utilizado (3), sino también el menos

¹⁸ Utilizando el reglamento CIRSOC 102/2005, Spies & Tacca obtienen la velocidad de viento a la cual se debe verificar la turbina y su estructura completa. Para la condición planteada (lugar geográfico, altura y condiciones del entorno) dicha velocidad es de 183 km/h , lo que da como resultado una fuerza transversal de $9806,6 \text{ N}$. Según la escala de viento del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, este valor se corresponde con un temporal huracanado (ocasiona destrozos).

costoso (26). Finalmente, se seleccionó un *top coat* para mejorar la apariencia estética de los álabes y otorgarles terminación superficial.

2.3.1 Resina

Las resinas deben tener una viscosidad baja para ser trabajables a mano. Sin embargo, esto suele comprometer sus propiedades mecánicas y térmicas (51). Para laminación manual, se pueden utilizar resinas epoxi con viscosidades de mezcla entre 300 - 1500 mPas. Estos valores se establecieron a partir de la guía comercial de la empresa Olin®, que presenta una lista de resinas epoxis disponibles en la región de Asia Pacífico, tal como se observa en la Tabla 8 (52).

Denominación	Vida útil 100 gr (min)	Tiempo de gel a 70°C (min)	Viscosidad de la mezcla a 25°C (mPas)	Tg DSC, 10K/min (°C)	Descripción
AIRSTONE 730E/734H	10-20	2-6	1000-1500	70-80	Curado extra rápido, buena para aplicación vertical
AIRSTONE 730E/735H	30-50	3-8	600-1000	75-85	Curado rápido, utilizada para aplicación vertical
AIRSTONE 730E/736H	120-180	10-20	300-600	75-85	Larga vida útil, utilizada para piezas grandes
AIRSTONE 720E/723H	60-120	5-10	900-1300	95-105	Utilizada para aplicación vertical

Tabla 8. Viscosidades de mezcla para laminación manual (52).

Para el presente trabajo se realizó una búsqueda de resinas ofrecidas por proveedores/fabricantes locales. Asimismo, se determinaron los requerimientos técnicos necesarios para la selección de las resinas candidatas en base a las variables y necesidades del proceso de laminación, y teniendo en cuenta las tecnologías disponibles. En cuanto a ello, el proceso de laminación se llevaría a cabo de manera manual por lo que se necesitarían tiempos de gel largos, y el proceso de curado se realizaría a temperatura ambiente. Finalmente, los requerimientos técnicos para la selección de la resina fueron los siguientes:

- Viscosidad de mezcla entre 300-1500 mPas;
- Tiempo de gel lo más largo posible;
- Proceso de curado a temperatura ambiente;
- Bajo costo.

Sin embargo, el criterio último de selección fue el bajo costo. A continuación, se presenta un resumen de las tres resinas candidatas.

Epoxi YD 128 – Endurecedor KH 816

Comercializada por Náutica Escalada, ésta es una resina epoxi estándar de tipo líquido derivada del bisfenol A. Tiene excelente adherencia, resistencia química, resistencia al calor, y otros.; y se recomienda para su uso como matriz para la impregnación de refuerzos basados en fibra de vidrio (53). El endurecedor KH-816, es una amina cicloalifática modificada utilizada como agente de curado con resinas epoxi (54).

La resina está compuesta por diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) (100%) (55); y el agente de curado está compuesto isoforondiamina (10%-30%), alcohol benzílico (40%-70%), y solventes y aditivos CSP 100% (56).

Dipreg 86 – Endurecedor

Comercializado por Novarchem, éste es un sistema epoxi líquido de muy baja viscosidad, recomendado para laminados estructurales de alta calidad. No contiene solventes (COV's), tiene una

baja reacción exotérmica y baja contracción durante el curado, y posee un largo tiempo de uso. Su curado debe realizarse preferentemente a una temperatura 50°C. Tiene una excelente capacidad de mojado sobre diversos sustratos y refuerzos de vidrio, carbono y aramidas. Con un post curado adicional, mejora sensiblemente su comportamiento estructural y solidez térmica. Este sistema está indicado para su uso en la fabricación de álabes y accesorios en impulsores de generadores eólicos, ventiladores y extractores industriales, especialmente en ambientes agresivos (industrias químicas, petroleras y ambientes marinos) (57).

Dipreg 52 – Endurecedor

Comercializado por Novarchem, éste es un sistema epoxi líquido de baja viscosidad, libre de solventes y recomendado para laminados estructurales de alta calidad. Posee una baja reactividad, largo tiempo de uso y su curado puede realizarse a temperaturas > 20°C. Tiene una excelente capacidad de mojado sobre diversos sustratos y refuerzos de vidrio, carbono y aramidas. Con un post curado adicional hasta los 130°C, mejora sensiblemente su comportamiento estructural y resistencia química. Este sistema está indicado para su uso en la fabricación de álabes y accesorios en impulsores de generadores eólicos, ventiladores y extractores industriales, especialmente en ambientes agresivos (industrias químicas, petroleras y ambientes marinos) (58).

En la Tabla 9, se exponen los requerimientos mencionados anteriormente con sus valores correspondientes según la resina. En función a ello, se seleccionó la resina epoxi YD 128 distribuida por Nautica Escalada, la cual cumple con los criterios expuestos.

Resinas candidatas	Viscosidad mezcla a 25°C (mPas)	Tiempo de gel (min)	Curado a T _{amb}	Costo x kg (\$)
Epoxi YD 128 – Endurecedor KH 816 Nautica Escalada	2350	50	Si (7 días)	2925
Dipreg 86 - Endurecedor Novarchem	250—350	180-200 ¹⁹	Si (7 días)	6226
Dipreg 52 - Endurecedor Novarchem	600—700	400—500	Si (7 días)	10493

Tabla 9. Opciones de resinas epoxis y resina seleccionada.

2.3.2 Fibra

En cuanto a la selección de la fibra de vidrio, sólo se consideraron las propuestas de la empresa Náutica Escalada, con el objetivo de adquirir los materiales en un mismo lugar y así facilitar su adquisición (Náutica Escalada se seleccionó como proveedor de la resina epoxi).

Esta empresa ofrece tejidos de fibra de vidrio tipo E biaxiales de distintas densidades, con sus direcciones principales a $\pm 45^\circ$ y con la posibilidad de ajustar el ángulo entre $\pm 30^\circ$ y $\pm 60^\circ$. Asimismo, el proveedor establece que estos tejidos son adecuados para la fabricación de materiales por medio de resinas poliéster, viniléster, fenólica y epoxi, entre otras. Este tipo de tejidos, se utilizan principalmente en el área de energía eólica, los deportes, la construcción de barcos, la industria del automóvil y el tren, entre otros (59). En la Figura 2.15 se observa el tejido.

¹⁹ Este dato no es exactamente el tiempo de gel, sino la vida útil cada 100 gr. Se tomó como tiempo de gel estimado debido a que no se contaba con información del fabricante.

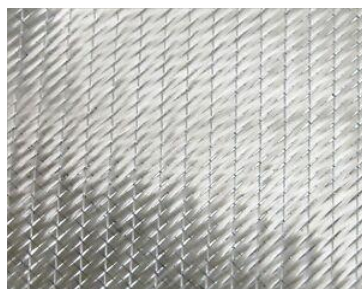


Figura 2.15. Tejido de fibra de vidrio biaxial (59).

Los tejidos de refuerzo deben ser seleccionados considerando su aptitud a acomodarse a las curvaturas de la geometría del componente (*drapeability*). También es fundamental que los refuerzos o tejidos permitan un buen compactado durante la fase de manipulación en seco, asegurando una correcta orientación de la fibra (60; 61). Por ello, se seleccionó el tejido de menor densidad teniendo en cuenta su compatibilidad con el método de fabricación del material y la geometría del componente.

En la Tabla 10, se observan los tejidos ofrecidos por la empresa. El tejido seleccionado para realizar el presente trabajo fue el de menor densidad, es decir, el de 300 gr/m².

Propuestas	Densidad (gr/m ²)	Costo por kg (\$)
Tejido vidrio E-glass biaxial cosido db300+-45	300	1160
Tejido vidrio E-glass biaxial cosido db400+-45	400	1027
Tejido vidrio E-glass biaxial cosido db600+-45	600	960

Tabla 10. Opciones de tejidos de fibra de vidrio biaxiales y tejido seleccionado (59).

2.3.3 Top coat

La función del *top coat* es mejorar la apariencia estética de los álabes y otorgarles terminación superficial. Por ello, el criterio de selección en este caso fue la accesibilidad para la compra minorista y el bajo costo, considerando proveedores nacionales. Asimismo, se contempló que sea de color blanco, según lo detallado en el marco teórico en la **sección 1.2.1.3** acerca del *top coat*.

En la Tabla 11 se observan los tipos de *top coats* ofrecidos por la empresa Servifibras. El *top coat* seleccionado fue el ortoftálico.

Propuestas	Costo por kg (\$)
<i>Top coat</i> ortoftálico	1144
<i>Top coat</i> isoftálico	2214

Tabla 11. Opciones de *top coats* (62).

2.3.4 Materiales a utilizar

Para realizar las estimaciones teóricas de materiales necesarios para el proceso, se tuvieron en cuenta las medidas de la matriz de laminación. Debido a que los álabes son semicirculares, se seleccionó como matriz un retazo de tubo de PVC de 200 mm de diámetro. Esto, eliminó el costo de la fabricación de la matriz y redujo los tiempos de fabricación de los álabes. Teniendo en cuenta el diámetro del tubo de PVC, se llevó a escala el modelo utilizado en las simulaciones, y se plegó en SolidWorks® para hacer las estimaciones. El resultado del plegado se observa en la Figura 2.16.

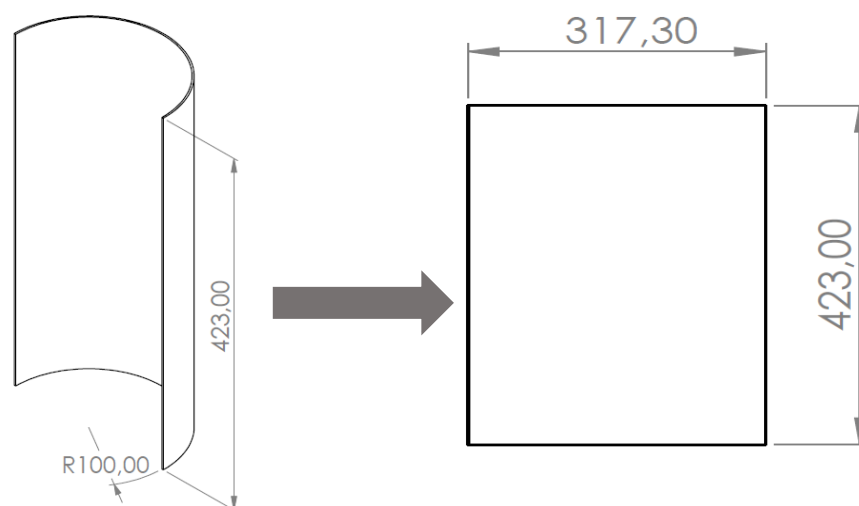


Figura 2.16. Álabe plegado para cálculo de área, medidas en mm.

Por la experiencia adquirida por la División de Materiales Avanzados, se decidió colocar 4 capas de tejido biaxial de fibra de vidrio con una secuencia de apilamiento $[0^\circ, 90^\circ/+45^\circ, -45^\circ]_s$, ya que es el mínimo punto de partida para realizar un material compuesto balanceado y simétrico con un comportamiento cuasi isotrópico. A partir de este mínimo de capas, se pueden enfocar los recursos a futuro para hacer mejoras del proceso (disminuir costos, cantidades de material, etc.).

El punto “cuasi isotrópico” es de gran relevancia para la obtención de secuencias de apilamiento que ofrezcan un comportamiento lo más cercano a la isotropía en el plano, de tal manera que el laminado diseñado ofrecerá “casi” el mismo comportamiento en todas las direcciones. En los laminados de material compuesto, esta situación se alcanza cuando está formado por igual número de capas con fibras orientadas en ángulos que cubren toda la circunferencia de forma equilibrada (63). En la Figura 2.17, se observa a modo esquemático las direcciones principales del laminado establecido.

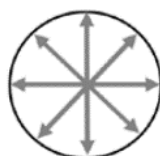


Figura 2.17. Direcciones principales del laminado.

En las Tabla 12 y Tabla 13, se observan las estimaciones teóricas de tejido biaxial de fibra de vidrio teniendo en cuenta un 30% de descartes²⁰, y los cálculos teóricos de sistema epoxi contemplando que el 55% en peso del material representa el peso del tejido, según la experiencia adquirida por la División Materiales Avanzados.

TEJIDO BIAxIAL			
Área por capa (m ²) + 30 %	Densidad (gr/m ²)	Cantidad por capa (kg)	Total para 2 álabes de 4 capas(kg)
0.23	300	0.07	0.54

Tabla 12. Estimación teórica de tejido necesario.

RESINA AMBOS ÁLABES (kg)	
55%peso tejido	0.54
45%peso sistema epoxi	0.44

Tabla 13. Estimación teórica de materiales necesarios.

²⁰ Los tejidos se comercializan en rollos, y como producto de la manipulación, el almacenamiento y el transporte de los mismos, en los bordes se generan problemas de alineación y descompactación.

2.4 Fabricación de los álabes

Para fabricar los álabes semicirculares del aerogenerador Savonius mediante laminación manual, se comenzó con la preparación de la matriz de laminación y el corte del tejido. Cada álabe se laminó por separado, ya que la construcción del primero nos permitiría mejorar el proceso de construcción del segundo. La laminación se realizó utilizando 4 capas de tejido biaxial y un sistema epoxi. Asimismo, una vez finalizada la construcción, se procedió a otorgarles terminación superficial mediante el uso de un sistema top coat²¹. Las etapas de fabricación se observan en la Figura 2.18.

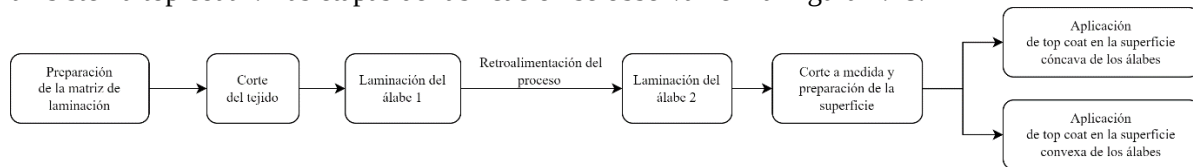


Figura 2.18. Etapas de fabricación de los álabes.

Todos los procesos de fabricación del presente trabajo se realizaron en el laboratorio del proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS) del Centro Atómico Constituyentes, diseñado para la fabricación de componentes de uso aeroespacial.

2.4.1 Preparación de la matriz de laminación

Con el objetivo de preparar la superficie de la matriz de laminación, se lijó y se utilizó un sistema epoxi para cubrir las imperfecciones pequeñas del tubo. Luego, se colocó masilla plástica en las imperfecciones de mayor tamaño y se lijó nuevamente. En la Figura 2.19 se observa la matriz de laminación luego de su preparación.



Figura 2.19. Matriz de laminación.

2.4.2 Corte del tejido

Se cortaron 8 capas (4 por cada álabe) de tejido biaxial de fibra de vidrio de 53 cm alto x 42 cm ancho, teniendo en cuenta las zonas a descartar a causa de los defectos del proceso de laminación manual. Además, para ajustar los cálculos de resina a utilizar, se pesaron las capas de tejido cortadas de cada álabe.

2.4.3 Laminación álabe 1

El proceso de laminación comenzó con la preparación de la superficie de la matriz de laminación, colocando en los extremos del tubo varios trozos de cinta para formar una tapa con el objetivo de que la bolsa de vacío no colapse hacia el interior del tubo. Además, se colocaron 4 capas líquido desmoldante. En la Figura 2.20 se observan los materiales utilizados, y en la Figura 2.21 la matriz lista para la laminación.

²¹ Cuando se menciona sistema *top coat*, se hace referencia a la mezcla entre la resina y su respectivo catalizador.



Figura 2.20. Materiales utilizados para la preparación de la matriz.



Figura 2.21. Matriz lista para la laminación.

Luego, se registraron las condiciones ambientales, como se observa en la Tabla 14, y se presentaron los distintos materiales auxiliares de laminación en la mesa de trabajo junto a la matriz, colocando la cinta de sellado de bolsa de vacío, como se observa en la Figura 2.22.

Temperatura (°C)	Humedad (%)
24,8	44

Tabla 14. Condiciones ambientales durante la laminación del álabe 1.



Figura 2.22. Presentación de materiales para la laminación del álabe 1.

Los lotes de laminación del sistema epoxi se prepararon en una relación 100:60 en peso, teniendo en cuenta un tiempo de gel de 50 min y el peso del tejido una vez cortado²². En la Tabla 15, se observan los lotes realizados.

²² Esto provocó que los valores difirieran 45% de la estimación teórica realizada.

N° lote	Resina (gr)	Endurecedor (gr)
1	65	39
2	75	45
3	30	18
4	30	18
Total	200	120

Tabla 15. Lotes realizados del sistema epoxi para la laminación del álabe 1.

Antes de comenzar a laminar, se colocó el sistema epoxi en una campana de vacío para desgasar la mezcla. Luego, se laminó capa por capa utilizando pinceles, rodillos y espátulas, y teniendo en cuenta el tiempo de gel del sistema, como se observa en la Figura 2.23.



Figura 2.23. Laminación del álabe 1.

Finalmente, se envolvió el laminado con film desmoldante y manta de absorción, y se selló la bolsa de vacío teniendo en cuenta de colocar la parte inferior de la válvula de vacío dentro, tal como se observa en la Figura 2.24. Se sometió el laminado a vacío durante una hora y se curó durante 7 días a temperatura ambiente, según los datos brindados por el fabricante. En la Figura 2.25 se observa el laminado sometido a vacío.



Figura 2.24. Colocación de bolsa de vacío en álabe 1.



Figura 2.25. Realización de vacío sobre álabe 1.

Posteriormente, se desmoldó el álabe como se observa en la Figura 2.26, teniendo en cuenta de no dañar los materiales auxiliares para poder reutilizarlos en la fabricación del álabe 2.



Figura 2.26. Desmolde del álabe 1.

2.4.4 Laminación álabe 2

El proceso de laminación del álabe 2 fue similar al realizado con el álabe 1. Sin embargo, antes de envolver el laminado con el film desmoldante, se colocó cinta en los bordes para que se fije sobre la matriz de laminación y así girarlo 180° sobre el eje longitudinal durante el proceso de curado, debido a las observaciones del proceso de laminación del álabe 1 que se detallarán en los resultados. En la Figura 2.27, se observa la colocación de cinta en los bordes del laminado.



Figura 2.27. Colocación de cinta en bordes en álabe 2.

Finalmente, se envolvió el laminado con el film desmoldante y manta de absorción, y se selló la bolsa de vacío posicionando las arrugas de la bolsa de vacío en secciones a descartar del laminado, debido a la experiencia adquirida del proceso de laminado del álabe 1 que se detallará en los resultados. Posteriormente, se desmoldó el álabe luego de someterlo a un proceso de curado durante 7 días a temperatura ambiente.

2.4.5 Terminación superficial

Para comenzar con el proceso de terminación superficial, primero se lijaron las arrugas de los álabes. Luego, se procedió a realizar el corte de los álabes para ajustarlos al tamaño final. En la Figura 2.28 se observan los álabes luego del corte.



Figura 2.28. Álabes luego del corte.

Posteriormente, se realizaron las estimaciones teóricas de cantidades de sistema *top coat* a aplicar mediante el cálculo de áreas de los álabes, como se observa en la Figura 2.29, y los cálculos de áreas a cubrir se observan en la Tabla 16.

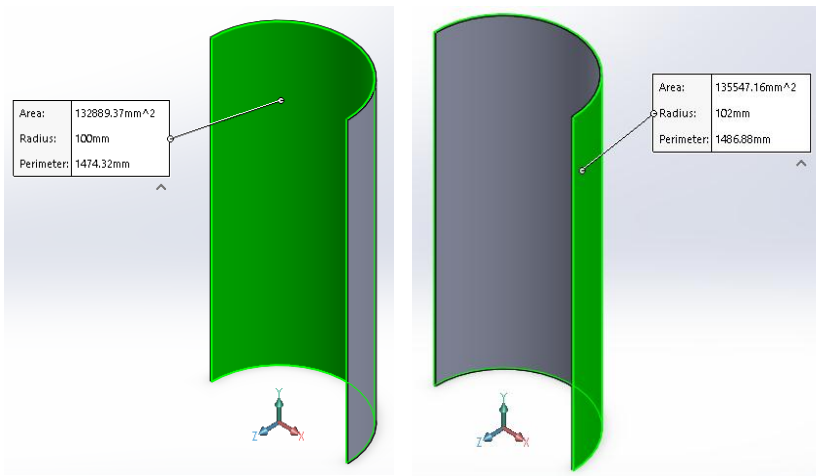


Figura 2.29. Área a cubrir del álabes.

Superficie	Área a cubrir (m ²)
Ambos álabes	0.54
Colocando dos capas de sistema <i>top coat</i>	1.07

Tabla 16. Cálculo de áreas total a cubrir.

El proveedor en su sitio web establece que 1 kg de sistema *top coat* cubre 5 m² de superficie (62), por lo que se estimó preparar 0.21 kg aproximadamente teniendo en cuenta la colocación de dos capas por cada álabes. Antes de comenzar a aplicar el sistema *top coat*, se preparó la superficie según las instrucciones del proveedor. En la Figura 2.30 se observan dichos procesos.

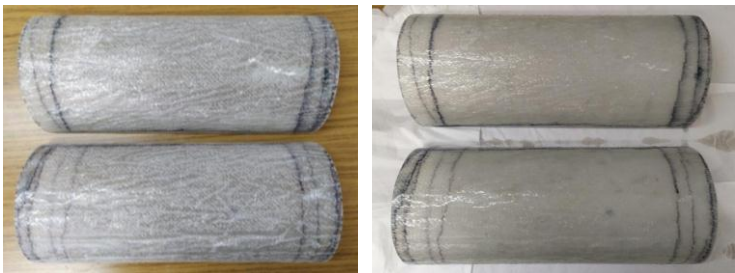


Figura 2.30. Preparación de la superficie. Izquierda, lijado. Derecha, limpieza con acetona y detergente.

El proceso de colocación del sistema *top coat* sobre los álabes se dividió en dos, como consecuencia de la terminación superficial obtenida en el proceso de laminación. Así, se aplicó por un lado sistema *top coat* en las superficies cóncavas, y por otro en las superficies convexas.

2.4.5.1 Aplicación de sistema *top coat* en la superficie cóncava de los álabes

En la superficie cóncava de los álabes, se colocaron dos capas de sistema *top coat* con pincel y rodillo, con una relación de mezcla 15ml de catalizador en un 1kg de resina, teniendo en cuenta un curado de 2 hs entre capa y capa. Debido a que el sistema *top coat* tenía una viscosidad alta para su aplicación con rodillo, se decidió diluirlo con acetona para que penetre en las pequeñas imperfecciones.

2.4.5.2 Aplicación de sistema *top coat* en la superficie convexa de los álabes

La aplicación de sistema *top coat* en la superficie convexa de los álabes, fue más compleja debido a la terminación superficial obtenida del proceso de laminación. Primero, se colocó en ambos álabes una capa de sistema *top coat* con una relación de mezcla 15ml de catalizador en un 1kg de resina, dejándola curar durante 2 hs. Luego, se utilizó una chapa previamente rodada para realizar vacío posteriormente a la colocación de la segunda capa de sistema *top coat* y con el objetivo de que la superficie alcance mayor homogeneidad. La chapa rodada se lijó, se le colocó cinta en los bordes para evitar la rotura de la bolsa de vacío, y se le colocaron 5 capas de líquido desmoldante y 1 capa de cera desmoldante, como se observa en la Figura 2.31.

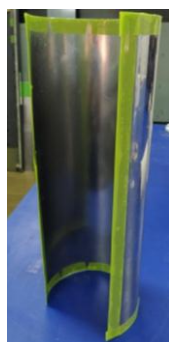


Figura 2.31. Preparado de la chapa rodada.

Antes de colocar la segunda capa de *top coat*, se presentaron los distintos materiales a utilizar en la mesa de trabajo y se colocó la cinta de sellado de bolsa de vacío. El álabe a cubrir se alineó con la matriz y se encintaron los bordes con el objetivo de fijarlo a la matriz durante la colocación de la chapa, como se observa en la Figura 2.32.

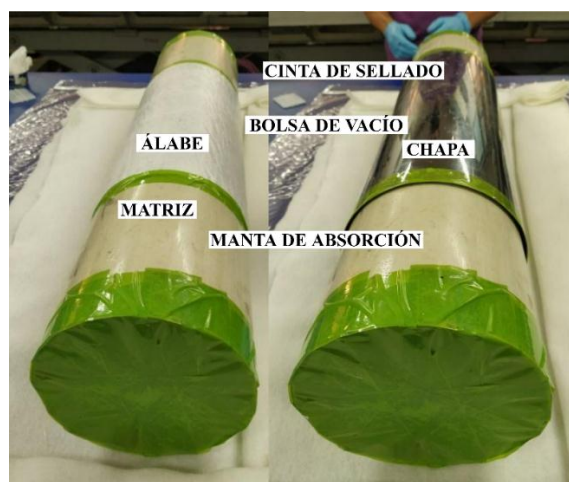


Figura 2.32. Presentación de los materiales.

Luego, se preparó el lote a colocar adisionándole acetona para otorgarle mayor fluidez. Posteriormente, se aplicó el sistema *top coat* y se colocó la chapa de manera envolvente con cinta en los bordes para fijarla a la matriz, como se observa en la Figura 2.33.



Figura 2.33. Fijado de la chapa a la matriz.

Finalmente, se selló la bolsa y se realizó vacío durante 2 hs. Luego desmoldamos y, debido a los resultados observados, no se repitió el procedimiento en el otro álabe quedando éste con una sola capa de *top coat* aplicada. Estos procesos se observan en la Figura 2.34.



Figura 2.34. Realización de vacío y desmolde.

2.5 Ensamble del aerogenerador

2.5.1 Diseño del ensamble

Con el objetivo de vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, se diseñó un ensamble para vincular los álabes fabricados con materiales compuestos y las posibles tapas del aerogenerador. El Laboratorio Perfil Alar cuenta con amplia disponibilidad para la impresión 3D, y por ello, sumado a la versatilidad que proporciona esta técnica respecto a la adaptabilidad del modelo, se decidió realizar el ensamble mediante manufactura aditiva.

El primer diseño contempló la vinculación entre la tapa y el ensamble mediante tornillos, y la zona central incluyó una geometría que permitiera insertarle un eje que le otorgue rigidez estructural al aerogenerador. Asimismo, incluyó orificios para el ingreso y egreso de adhesivo Loctite²³, con el objetivo de vincular el ensamble con los álabes, y establecer un anclaje químico y mecánico entre ambos componentes. Este adhesivo se inyecta con una pistola manual de doble cartucho, como se observa en la Figura 2.35. Los orificios se realizaron con las medidas propuestas por el laboratorio del

²³Pasta adhesiva estructural de dos partes, una parte de adhesivo y otra de endurecedor que permite la polimerización. Cura a temperatura ambiente.

proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS) a partir de su experiencia (Figura 2.36), en la cual las piezas a vincular se diseñan con orificios de ingreso y de desagote, para determinar si el adhesivo atravesó la zona de interés. Además, para lograr que el adhesivo penetre en el ensamble y obtener mayor superficie de contacto con el álabe, se diseñó una cuña no simétrica como se observa en la Figura 2.37. El lado recto de la cuña cumple la función de soporte estructural del álabe. Finalmente, se consideró que el diseño debía tener transiciones suaves para afectar lo menos posible el flujo de aire en el aerogenerador.



Figura 2.35. Pistola manual de doble cartucho y adhesivo.

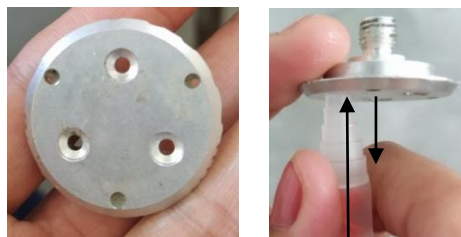


Figura 2.36. Ingreso y egreso de adhesivo, experiencia del ARAS.

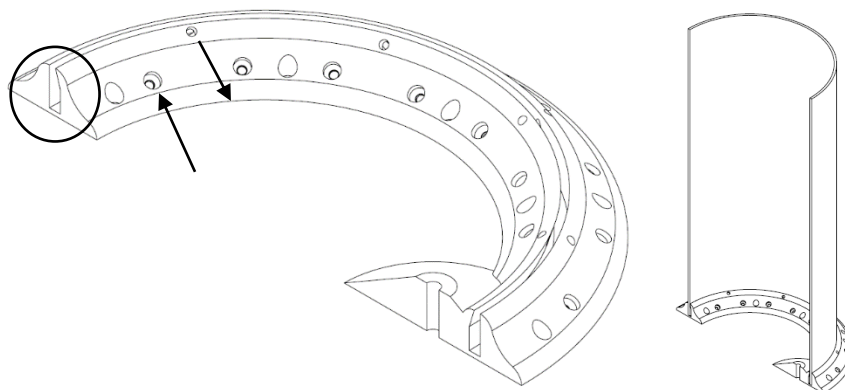


Figura 2.37. Primer diseño.

Luego, se realizó una prueba de impresión, tal como se observa en la Figura 2.38. Esta prueba se realizó con un relleno de 20%, con el objetivo de reducir los tiempos de impresión y la cantidad de material a utilizar.



Figura 2.38. Pruebas de impresión 3D con filamento PLA.

Asimismo, se realizó una prueba de adhesión utilizando un retazo de los álabes, lijado previamente para mejorar la adherencia. El procedimiento se basó en la experiencia del laboratorio del proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS), que fabrica componentes de uso aeroespacial. La secuencia de pasos realizados se observa en la Figura 2.39.

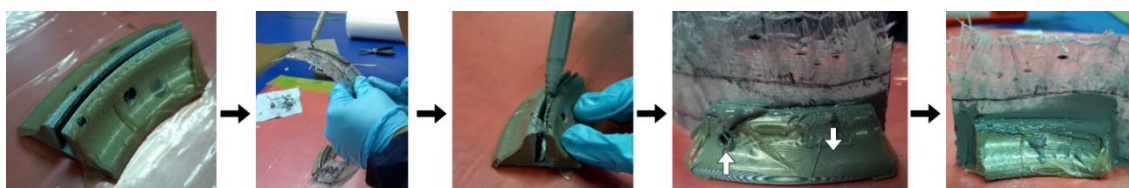


Figura 2.39. Pasos realizados en la prueba de adhesión.

Debido a las observaciones en esta prueba, que se detallarán en los resultados, se rediseñó el ensamble y se modificó el procedimiento para realizar la colocación del adhesivo. Los diseños y sus pruebas de impresión, se observan en las Figura 2.40 y Figura 2.41.

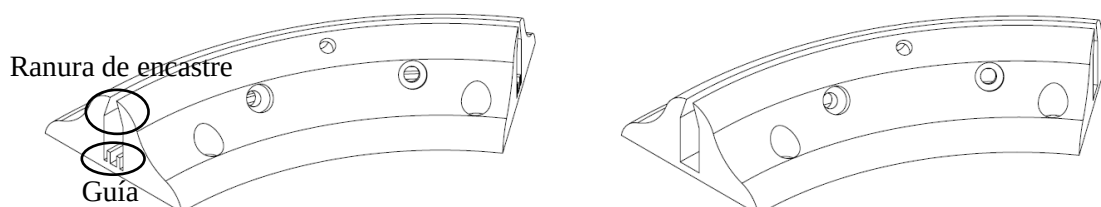


Figura 2.40. Segundo diseño con guía y sin guía.



Figura 2.41. Pruebas de impresión 3D con filamento PLA.

La prueba de adhesión con este segundo diseño, se realizó como se detalla a continuación. Luego de lijar, limpiar y enmascarar el álabes, se enmascaró la sección impresa. Asimismo, se realizaron diques con cinta para evitar la salida lateral de adhesivo, y la sección impresa se adhirió a la superficie de trabajo para facilitar la inyección. Seguidamente, se inyectó adhesivo por el orificio de ingreso hasta observar el egreso por el orificio de desagote, y se colocó el adhesivo sobrante sobre el retazo del álabes para evitar desperdicios. Una vez realizado esto, se acoplaron los componentes. En esta prueba

el retazo se cortó a medida para poder colocar los diques y aproximarnos a las condiciones reales de vinculación de los componentes. Asimismo, durante la limpieza final se realizó un menisco entre el álabe y la pieza, para generar una transición suave en la vinculación y disminuir así la concentración de tensiones. Finalmente, se taparon los orificios teniendo en cuenta los posibles rechupes generados durante el curado del adhesivo. Los pasos más relevantes ser observan en la Figura 2.42.

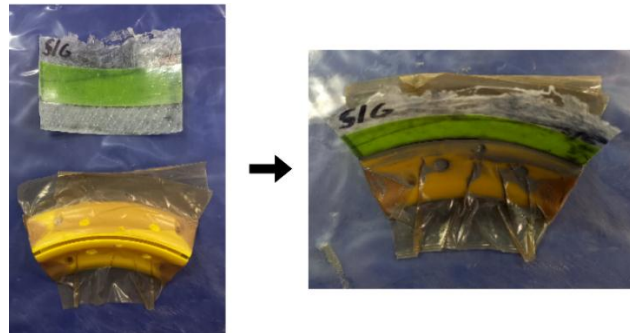


Figura 2.42. Pasos relevantes realizados en la prueba de adhesión.

Sin embargo, debido a las observaciones durante este nuevo procedimiento de colocación del adhesivo, que se detallarán en resultados, se realizó un tercer diseño. En este caso no se realizaron las pruebas, ya que la experiencia adquirida era lo suficientemente relevante para no hacerlas. Este diseño se imprimió y se vinculó con el álabe. El diseño y la impresión final se observan en la Figura 2.43.

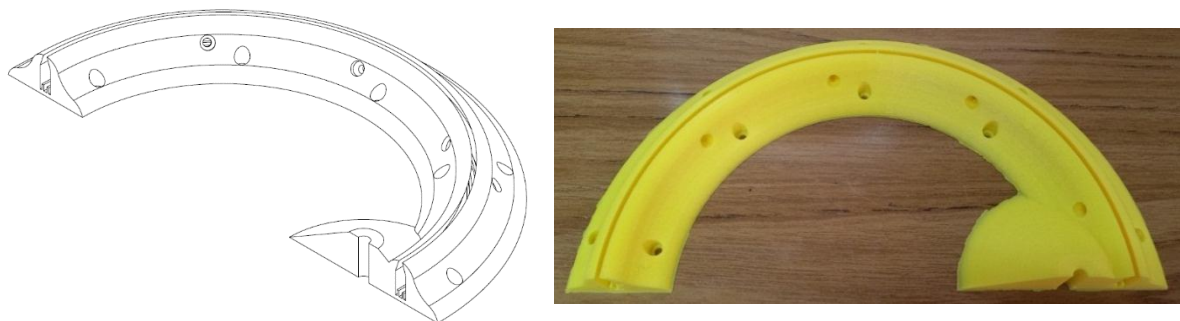


Figura 2.43. Tercer diseño e impresión final.

Finalmente, esta etapa terminó con el corte transversal de las pruebas de adhesión, luego de 7 días de curado del adhesivo a temperatura ambiente, para realizar una inspección visual de los diseños propuestos.

La inspección visual, con la ayuda de una luz intensa, puede ser utilizada para detectar fallas y defectos graves. En la Tabla 17 se enumeran las características de uniones defectuosas que se pueden detectar visualmente. Los defectos más difíciles de detectar son aquellos relacionados al proceso de curado y tratamientos superficiales inadecuados (64).

Falla	Causa	Solución
Falta de adhesivo alrededor de los bordes de unión o línea de unión adhesiva demasiado gruesa	1-Presión de sujeción demasiado baja 2-Unión con falta de adhesivo 3-Temperatura de curado muy baja	1-Aumentar la presión. Verificar que las abrazaderas estén situadas correctamente 2-Aplicar más adhesivo 3-Usar mayor temperatura de curado. Controlar que la temperatura esté por encima del mínimo especificado
Línea de unión adhesiva muy delgada	1-Presión de sujeción demasiado alta 2-Temperatura de curado demasiado alta 3-Unión con falta de adhesivo	1-Disminuir la presión 2-Utilizar una temperatura de curado más baja 3-Aplicar más adhesivo
El adhesivo rompe fácilmente lejos del sustrato	1-Tratamiento superficial inadecuado	1-Chequear el procedimiento de tratamiento: usar disolventes y trapos de limpieza limpios. Cerciorarse que las piezas limpias no se toquen antes de la unión
El adhesivo es excesivamente poroso	1-Exceso de aire en el adhesivo por agitación 2- El solvente no está completamente seco antes de unir 3-El material adhesivo contiene volátiles	1-Desgasar al vacío el adhesivo antes de la aplicación 2-Aumentar el tiempo de secado o la temperatura 3-Buscar el consejo de los fabricantes
El adhesivo se ablanda por calentamiento o por el solvente de limpieza	1-El adhesivo no curó debidamente	1-Usar una mayor temperatura o aumentar el tiempo de curado. La temperatura y el tiempo deben estar por encima del mínimo especificado. Comprobar la mezcla.

Tabla 17. Defectos en uniones adhesivas relevados por inspección visual (64).

2.5.1.1 Material de impresión

El Laboratorio Perfil Alar cuenta con una amplia disponibilidad de PLA (ácido poliláctico), ya que es un filamento relativamente económico y de amplia disponibilidad en el mercado. Por ello, se imprimió el ensamble con este tipo de filamento. Sin embargo, cuenta con una baja resistencia UV y es un factor clave al momento de diseñar una pieza a partir de polímeros que estarán sometidos a condiciones ambientales, ya que se puede producir un fenómeno de envejecimiento, entre otros (65).

2.6 Técnicas experimentales

Con el objetivo de caracterizar los materiales constituyentes de los álabes, el ensamble, y el material compuesto laminado, se recurrió a técnicas térmicas, mecánicas y químicas de caracterización, incluyendo la observación mediante microscopía óptica y la determinación de la viscosidad. De todas las técnicas disponibles, se optó por realizar un ensayo de tracción, FT-IR y DSC.

Los valores de viscosidad de la resina epoxi YD 128, se obtuvieron empleando un viscosímetro rotacional, estableciendo su aptitud para el proceso de laminación manual. Asimismo, estos valores se contrastaron con los datos provistos por el fabricante.

Para evaluar la resistencia mecánica del material compuesto, se realizó un ensayo de tracción con probetas impregnadas y con falta de impregnación. De estas probetas se extrajeron muestras que fueron observadas por métodos ópticos, junto con muestras extraídas de retazos de los álabes, para estimar el contenido de fibra, resina y poros. Asimismo, se utilizó el material disponible para realizar

probetas de tamaño reducido, las cuales se sometieron a un tratamiento térmico de post curado a 80°C durante 1,5 hs.

Se realizaron corridas de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR por sus siglas en inglés) en muestras de resina epoxi y su endurecedor, sistema epoxi a tiempo cero y curado, *top coat* y su catalizador, y PLA. Esta técnica, se realizó con el objeto de identificar enlaces químicos y determinar los compuestos presentes.

Por último, se empleó la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC por sus siglas en inglés) para obtener los valores de la temperatura de transición vítrea (T_g) del sistema epoxi curado bajo distintos tratamientos térmicos, el valor de la temperatura de degradación y el valor de la $T_{g\infty}$. También se analizó una muestra del sistema epoxi a tiempo cero, para determinar el porcentaje de curado de las muestras. Finalmente, se analizó el valor de la T_g bajo los estándares Germanischer Lloyd para la certificación de aerogeneradores.

2.6.1 Viscosidad

Los datos de viscosidad de la resina epoxi YD 128, se obtuvieron mediante el uso de un viscosímetro rotacional MYR VR 3000 modelo V1 L, perteneciente a la División de Materiales Avanzados. Estos viscosímetros permiten una rápida determinación de la viscosidad según ISO 2555 y normas ASTM. Los resultados obtenidos son compatibles al 100% con el método Brookfield (66). Asimismo, durante las mediciones se tomó la temperatura mediante una termocupla que forma parte del equipo.

2.6.2 Ensayo de tracción

2.6.2.1 Introducción

Para obtener la resistencia mecánica del material compuesto, se utilizó la norma ASTM D3039/3039M-08 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”. La misma establece el método de prueba para un ensayo de tracción dirigido a materiales compuestos laminados de matriz polimérica reforzada por fibras largas continuas o bien a un laminado equilibrado de fibra corta simétrico con respecto a la dirección del ensayo, donde la probeta tiene una sección transversal rectangular constante y se ensaya a una velocidad recomendada de 2 mm/min. De esta manera se obtiene la tensión de rotura del material, es decir, la carga máxima soportada antes de la falla. Vale aclarar que, en este tipo de ensayo, las propiedades obtenidas pueden variar con la preparación de la probeta, las condiciones ambientales y la velocidad de ensayo.

Para realizar este ensayo, se fabricaron probetas impregnadas y con falta de impregnación, con el objetivo de evaluar cómo varían las propiedades mecánicas en función del proceso de laminación. Asimismo, se utilizó el material disponible y se fabricaron probetas de tamaño reducido las cuales se sometieron a un tratamiento térmico de post curado, para evaluar las propiedades mecánicas del laminado en función de las condiciones con las cuales se lleva a cabo el proceso de curado.

2.6.2.2 Fabricación de probetas

La geometría de las probetas impregnadas y con falta de impregnación, se basó en las recomendaciones de la norma, tal como se observa en la Tabla 18.

Orientación de la fibra	Ancho	Longitud total	Espesor
Balanceado y simétrico	25 mm	250 mm	2,5 mm

Tabla 18. Recomendaciones de geometría de probetas de tracción (67).

El proceso de laminación para realizarlas fue similar al de fabricación de los álabes, donde se utilizó un sistema epoxi y 4 capas de tejido biaxial de fibra de vidrio. En la Figura 2.44 se observa este proceso.

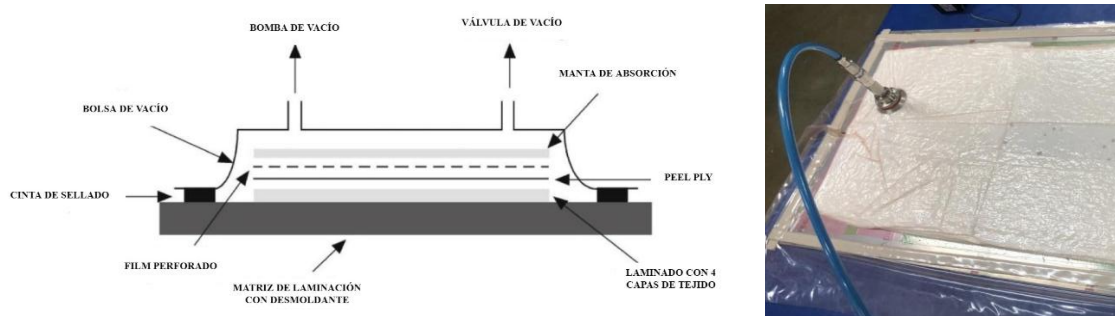


Figura 2.44. Proceso de fabricación de probetas (35).

La norma ASTM D3039/3039M-08 no establece la colocación de *tabs* en el tipo de probetas realizadas, sin embargo, se les colocó para mejorar el agarre según las medidas establecidas por Priya et.al. (68), y con el objeto de limitar la zona específica de ensayo. Este proceso se observa en la Figura 2.45 utilizando adhesivo Loctite®.

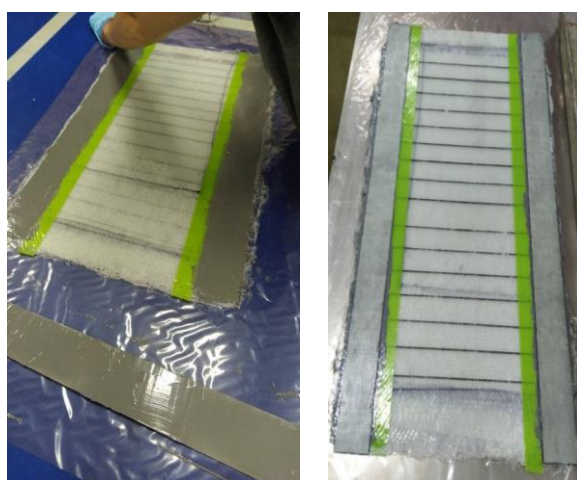


Figura 2.45. Colocación de adhesivo y pegado de material para realizar *tabs*.

Asimismo, se utilizó el material disponible para realizar probetas de tamaño reducido, las cuales se sometieron a un tratamiento térmico de post curado a 80°C durante 1,5 hs.

2.6.2.3 Procedimiento del ensayo

En las Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21, se observan las medidas promedio de las probetas.

Número de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área transversal (mm ²)
1.1	249	26.33	1.6	42.13
1.2	249.5	23.90	1.63	39.04
1.3	247.5	25.6	1.5	38.4
1.4	249	25.8	1.73	44.72
1.5	247.5	25.3	1.5	37.95
1.6	249	25.7	1.56	40.26
1.7	247.5	26.16	1.6	41.86
1.8	249	24	1.66	40

Tabla 19. Medidas de probetas impregnadas.

Número de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área transversal (mm ²)
2.1	251.5	26.8	1.6	42.88
2.2	251.5	25.13	1.56	39.37
2.3	252.5	25.5	1.7	43.35
2.4	251.5	25.66	1.46	37.64
2.5	254	24.8	1.63	40.51
2.6	253	26.46	1.56	41.46

Tabla 20. Medidas de probetas con falta de impregnación.

Número de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área transversal (mm ²)
3.1	158	25.3	1.63	41.27
3.2	159	25.1	1.63	41.00
3.3	158	25.6	1.60	40.96
3.4	161	25.7	1.63	41.98
3.5	157	22.7	1.57	35.61
3.6	158.5	25.9	1.47	37.99
3.7	161	22.4	1.53	34.29

Tabla 21. Medidas de probetas tamaño reducido con tratamiento de post curado.

Se ensayaron en total 21 probetas: 8 impregnadas, 6 con falta de impregnación, y 7 probetas de tamaño reducido, a una velocidad de ensayo de 2 mm/min hasta rotura a temperatura ambiente, y utilizando una máquina de ensayos Shimadzu Autograph AG 100 kN perteneciente a la División de Materiales Avanzados.

Durante el ensayo se registró la fuerza, y luego la tensión se calculó como la fuerza ejercida sobre área transversal inicial de la probeta, como se observa en la ecuación 9.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (9)$$

2.6.2.4 Validación de resultados

Para validar los resultados del ensayo se tuvieron en cuenta los criterios de la norma ASTM D3039/3039M-08 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”, y además, el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico “*Grubbs test for Outlying Observations*” (69).

La norma ASTM D3039/3039M-08 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*” establece dos criterios de validación:

- Los valores se descartan en caso de que la probeta se rompa por algún defecto obvio, a menos que tal defecto constituya una variable bajo estudio.
- En caso de que una fracción significativa de fallas en las probetas ocurran dentro del ancho del *tab* o mordaza, se deben volver a examinar los medios con los cuales se imprime la fuerza en el material. Los factores a considerar deben incluir la alineación de los *tabs*, material, ángulo y adhesivo del *tab*, tipo de mordaza, presión de la mordaza y su alineación.

El criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico “*Grubbs test for Outlying Observations*”, determina que se descartarán aquellos valores donde T sea más alto (69). T se calcula por medio de la ecuación 10, tal como se observa en la Tabla 22. Para aplicar este método se requieren como mínimo 7 valores (70).

Ecuación	Variables que intervienen
$T = \frac{ \bar{X}_n - X_i }{\sigma_N} \quad (10)$	T=Error implicado en la eliminación $\bar{X}_n$=Valor medio de las muestras X_i=Valor de la muestra i σ_n=Desviación estándar de las muestras

Tabla 22. Ecuación y variables que intervienen (69).

2.6.3 Microscopía óptica

2.6.3.1 Equipo utilizado

Para estimar el contenido de fibra, resina y poros, se utilizó un microscopio óptico OLYMPUS BX60M de la Gerencia de Materiales del Centro Atómico Constituyentes (CAC), con el objetivo de obtener micrografías de las muestras incluidas.

2.6.3.2 Preparación de muestras

Para realizar la observación mediante microscopía óptica se prepararon inclusiones, en donde se colocaron dos recortes de material en un sistema acrílico. Éste, se mezcló con colorante amarillo con el objetivo de diferenciar la resina de inclusión de la del compuesto. Una vez realizadas, se dejaron curar durante un día. En la Figura 2.46 se observa una inclusión.



Figura 2.46. Inclusión de muestra del material.

Luego, se preparó la superficie de la inclusión, realizando un desbaste con papel abrasivo en secuencia de malla 220, 400 y 600. Luego fueron pulidas con paños cargados con pasta de diamante de 6 μm y 1 μm , lubricados con mezcla de etilenglicol-agua. En total se prepararon 3 inclusiones para analizar muestras por medio de esta técnica:

- Una inclusión con muestras extraídas de una probeta con falta de impregnación (probeta 2.6).
- Una inclusión con muestras extraídas de una probeta impregnada (probeta 1.1).
- Una inclusión con muestras extraídas de retazos de los álabes fabricados.

2.6.3.3 Análisis con software de imágenes

La observación por microscopía óptica permitió obtener imágenes, en las cuales se identificaron poros, fibras y resina. Sin embargo, las imágenes se encuentran parcializadas, es decir, se tomaron micrografías sólo de algunas secciones de las muestras.

Las secciones para estimar el contenido de fibras y resina, se construyeron a partir de la unión de dos imágenes, como la que se muestra en la Figura 2.47, ya que el aumento de 10x no permitía obtener una imagen completa de la zona de la muestra a analizar. En cambio, para la estimación del contenido de poros, se analizaron las imágenes en forma individual con un aumento de 5x, como la que se muestra en la Figura 2.48.

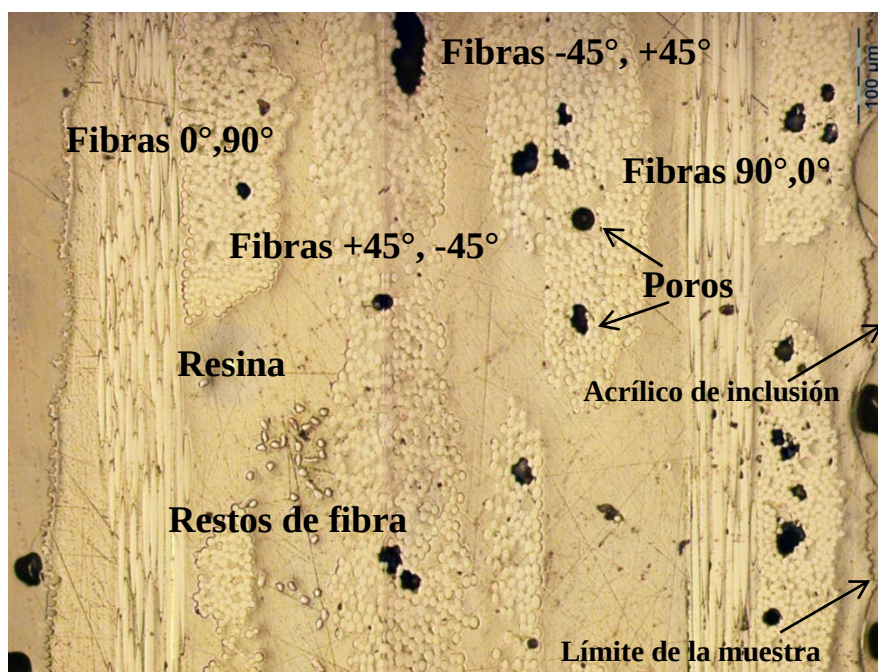


Figura 2.47. Sección con un aumento de 10x para identificar contenido de fibras y resina.

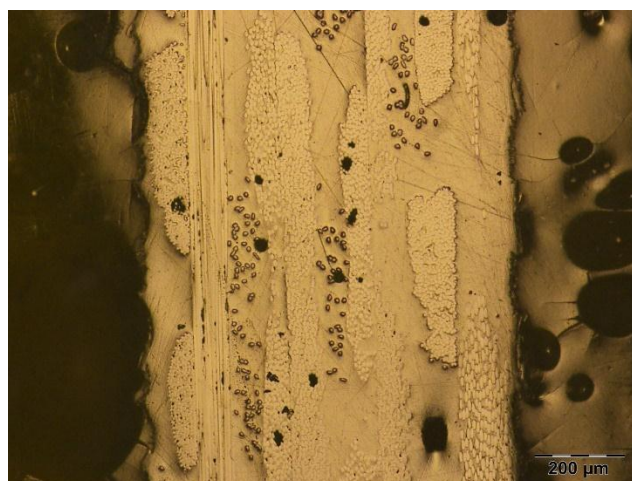


Figura 2.48. Imagen con un aumento de 5x para identificar el contenido de poros.

En la Tabla 23 se muestran la cantidad de secciones e imágenes que se tomaron para estimar el contenido de fibra, resina y poros de cada muestra incluida.

Muestra	Secciones	Imágenes
Probeta 1.1	5	24
Probeta 2.6	5	27
Retazos de álabes	5	16

Tabla 23. Secciones e imágenes tomadas para estimar el contenido de fibra, resina y poros.

Luego de la capturar las imágenes y construir las secciones correspondientes, se recurrió al software de procesamiento de imágenes digitales de dominio público ImageJ. Las imágenes se recortaron en los límites de la muestra con herramientas del software, para restringir la escala de grises de 8 bits exclusivamente al material, y se ajustó con el comando balance de color (71). Este proceso es importante debido a que la cantidad de tonos diferenciados (8 bits equivalen a $2^8=256$ tonos), pueden correlacionarse directamente con las distintas fases presentes en el material compuesto, y estimar así gráficamente el contenido de fibra, resina y poros.

Finalmente, mediante la herramienta *Threshold*, que permite marcar en un color específico un rango de grises determinado, se calcularon las áreas que ocupa cada una de las fases en la imagen total. A partir de esos datos, se calculó el área promedio ocupada por fibra y resina en cada una de las inclusiones. En el caso de los poros, además de la herramienta *Threshold*, se utilizó el contador de partículas, estableciendo como valor mínimo el área ocupada por el poro más pequeño (71).

2.6.4 FT-IR

2.6.4.1 Introducción

En la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, la radiación IR pasa a través de una muestra donde una parte es absorbida y otra parte es transmitida, obteniendo como resultado un espectro (72). Ésta, se basa en las distintas interacciones de la materia con la radiación infrarroja a las que dan lugar los distintos grupos funcionales que pueden presentar las moléculas (73).

Un espectro infrarrojo, representa una “huella dactilar” de una muestra con picos de absorción que se corresponden con las frecuencias de vibraciones de los enlaces de los átomos que forman la molécula²⁴. Debido a que cada molécula es una combinación única de átomos y enlaces, dos compuestos no producen exactamente el mismo espectro infrarrojo (72).

En los espectros de FT-IR, de forma generalizada, se grafica en función del número de onda k , siendo este la inversa de la longitud de onda λ . Los resultados se pueden representar tanto en transmitancia como en absorbancia, pudiendo transformar la información de una forma a otra utilizando la ecuación 11 (74).

$$A = -\log_{10} T \quad (11)$$

2.6.4.2 Equipo utilizado

Para obtener los espectros de las muestras, se utilizó el equipo Spectrum Two Perkin Elmer de la División de Materiales Avanzados. Este equipo permite utilizar el modo de reflectancia total atenuada (ATR por sus siglas en inglés) para trabajar con muestras líquidas, y en modo de reflectancia difusa para trabajar con sólidos, en longitudes de onda que van desde los 350 cm^{-1} hasta 8300 cm^{-1} (75).

2.6.4.3 Muestras analizadas

En la Tabla 24, se detallan las muestras líquidas y sólidas analizadas mediante esta técnica.

Muestra	Tipo
Resina epoxi YD 128	Líquida
Endurecedor KH 816	Líquida
<i>Top coat</i> ortoftálico	Líquida
Catalizador <i>top coat</i>	Líquida
Sistema epoxi luego de 3 minutos	Líquida
Sistema epoxi curado 7 días a T_{ambiente}	Sólida
PLA luego de extrusión en impresora 3D	Sólida

Tabla 24. Muestras analizadas.

²⁴ En compuestos simples y puros se puede determinar exactamente qué es mediante esta técnica. En mezclas y polímeros comerciales es más complejo identificar el compuesto (se identifica a que familia de compuestos pertenece).

2.6.4.4 Análisis de espectros

Antes de obtener el espectro de la muestra, se realizó un barrido de fondo ya que la medición puede verse afectada por la presencia de vapor de agua o dióxido de carbono (76).

Una vez obtenido el espectro, se realizó una corrección de la línea de base mediante el software Spectrum®, para eliminar las pendientes en las líneas de base que pudieran encontrarse inclinadas, curvas o desplazadas verticalmente (75). Asimismo, los espectros a comparar se normalizaron, aplicando un factor constante a todo el espectro para que la absorbancia máxima sea 1 mientras se conserva la forma del espectro (77). Finalmente, se utilizó la biblioteca de espectros de KnowItAll® para analizar el espectro de la resina epoxi YD 128, y facilitar la interpretación de resultados.

2.6.5 DSC

2.6.5.1 Introducción

Diversos autores utilizan la Calorimetría Diferencial de Barrido para determinar la temperatura de transición vítrea (T_g)²⁵. Por medio de esta técnica, entre otros, se puede medir el cambio que experimenta la capacidad calorífica de una muestra cuando, por calentamiento o enfriamiento de ésta, el material llega a la T_g . En ausencia de procesos endotérmicos o exotérmicos, la señal calorimétrica es directamente proporcional a la capacidad calorífica, por lo que la T_g puede determinarse a partir del cambio brusco que experimenta la señal calorimétrica, tal como se observa en la Figura 2.49. Si existen reacciones que se solapan con el fenómeno de la transición vítrea, entonces es necesario hacer dos barridos dinámicos. En el primer barrido, el proceso puede enmascarar la T_g , mientras que en el segundo puede determinarse la transición vítrea (78).

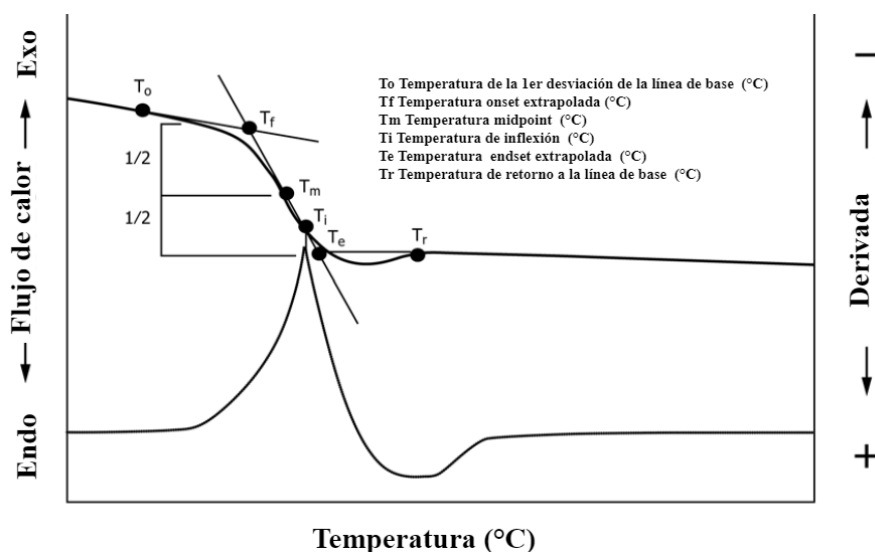


Figura 2.49. Puntos de uso común asociados a la región de transición vítrea (79).

Uno de los fenómenos que pueden enmascarar la T_g es el fenómeno de envejecimiento físico, que en las curvas DSC, se observa con la aparición de picos endotérmicos (80; 81). El envejecimiento físico ocurre cuando los materiales son almacenados a temperaturas inferiores a su temperatura de transición vítrea, los cuales evolucionan espontáneamente hacia un estado de equilibrio experimentando lo que se conoce como relajación entálpica (82).

²⁵ Temperatura que, en los polímeros termoestables, aumenta al incrementarse el número de entrecruzamientos. Los termoestables al calentarse, se hablan por encima de la T_g . Sin embargo, para un termoestable altamente reticulado, es posible que no se observe claramente el ablandamiento asociado. Si la temperatura se incrementa demasiado por encima de la T_g , el polímero puede degradarse (27).

Asimismo, el cambio de entalpía de la reacción de curado puede ser seguido mediante esta técnica, ya que el curado es un proceso exotérmico en el que el calor generado es proporcional al grado de avance de la reacción (78).

Finalmente, cuando el material está completamente curado, es decir, cuando el grado de entrecruzamiento se hace máximo, se pueden hallar los valores de la $T_{g\infty}$ (78; 83). La Figura 2.50 muestra en detalle la transformación de la resina durante la reacción de polimerización (84).

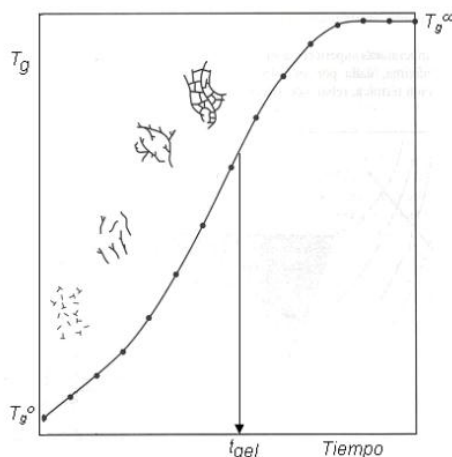


Figura 2.50. Transformaciones físicas y evolución de la T_g durante el entrecruzamiento, a una temperatura de curado próxima a $T_{g\infty}$ (84).

2.6.5.2 Equipo utilizado

Los ensayos se realizaron utilizando un equipo DSC disponible en el Centro Atómico Ezeiza (CAE), con un flujo constante de 50 ml/min de N_2 y una rampa de temperatura de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, bajo procedimiento de medición FO-DMA-001-Setup de la División de Materiales Avanzados. Además, las muestras se pesaron con una balanza analítica de 5 dígitos antes de comenzar con el ensayo, para colocar el valor de la masa en el equipo.

2.6.5.3 Preparación de muestras

Para preparar las muestras, se utilizaron crisoles de aluminio previamente pesados, donde se introdujeron mezclas del sistema epoxi en una relación 100:60 en peso. Por cada tratamiento térmico, se realizaron dos muestras para contar con una extra ante la eventual falla de algún experimento. A continuación, en la Tabla 25, se detallan las muestras realizadas.

Muestra	Temperatura de curado	Tiempo de curado	Cantidad de muestras
Sistema epoxi	120 °C	1,5 hs	2
Sistema epoxi	100 °C	1,5 hs	2
Sistema epoxi	80 °C	1,5 hs	2
Sistema epoxi	60 °C	1,5 hs	2
Sistema epoxi	T_{ambiente}	7 días	2
Sistema epoxi	T_{ambiente}	0 min	2

Tabla 25. Muestras realizadas.

2.6.5.4 Análisis de termogramas

Para obtener los termogramas, se realizó un primer barrido de las muestras, y en los casos en que la T_g se observaba enmascarada en un pico endotérmico, se realizó un segundo barrido borrando el historial térmico de la muestra (80). Este segundo barrido se realizó hasta una temperatura de 20°C por encima de la T_{endset} del pico endotérmico (85), y luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.

Obtención de porcentajes de curado

Para obtener los porcentajes de curado de las muestras, se utilizaron dos métodos diferentes teniendo en cuenta que la determinación de la línea de base afecta la cuantificación del $\Delta H_{\text{residual}}$ y ΔH_{total} . En el primero de ellos, se planteó el uso del software Origin® para determinar una línea de base. En el segundo método, se utilizó el modelo numérico planteado por Bandara (86). Con ambos métodos, se calculó el $\Delta H_{\text{residual}}$ y se obtuvieron los porcentajes de curado por medio de la ecuación 12 (87; 88). En esta ecuación, ΔH_{total} representa el área bajo la curva en la muestra de sistema epoxi a tiempo cero.

$$\% \text{ curado} = \frac{(\Delta H_{\text{total}} - \Delta H_{\text{residual}})}{\Delta H_{\text{total}}} * 100 \quad (12)$$

Método de línea de base en Origin®

Para determinar $\Delta H_{\text{residual}}$, se estableció una línea de base y se calculó el área bajo la curva mediante la herramienta Analizador de Picos. Esta herramienta, es capaz de crear y sustraer una línea de base a partir de puntos de anclaje que se establecen de forma automática o manual, que se conectan a través de una interpolación o se ajustan mediante una función (89). A modo de ejemplo en la Figura 2.51 se observa el valor de ΔH_{total} a partir de este método.

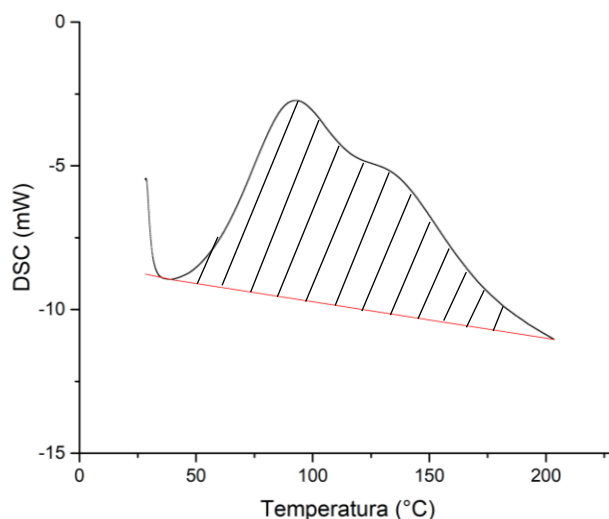


Figura 2.51. Cálculo de ΔH_{total} mediante el método de línea de base en Origin®.

Método de Bandara

En los métodos estándares prevalecientes en la literatura, las curvas DSC se conectan desde el inicio al final por medio de líneas rectas o curvas sigmoidales para cuantificar $\Delta H_{\text{residual}}$ y ΔH_{total} (86). Por ello, Bandara plantea la aplicación de un modelo numérico a partir de las ecuaciones 13 y 14, donde se realizan iteraciones de $F(t)$ hasta que la solución converge hacia valores más representativos del sistema. En la Tabla 26, se observan las ecuaciones y las variables que intervienen.

Ecuaciones	Variables que intervienen
$F(t) = \alpha (P_2(t) + P_1(t)) + P_1(t) \quad (13)$ $\alpha = \frac{\int_0^t (G(t) - F(t)) dt}{\int_0^{tn} (G(t) - F(t)) dt} \quad (14)$	$F(t) = \Delta H_{\text{residual}}$ t = coordenada de tiempo α = grado de conversión actual $P_2(t)$ = señal DSC para el producto solo, que se puede estimar a través de la extrapolación lineal ²⁶ de la porción de la curva total después del evento térmico $P_1(t)$ = señal DSC para la(s) sustancia(s) inicial(es) en ausencia del evento, que se puede estimar a través de la extrapolación lineal ¹⁹ de la porción de la curva total anterior al evento térmico tn = tiempo de terminación del evento térmico $G(t)$ = señal total DSC

Tabla 26. Ecuaciones y variables que intervienen (86).

En la Figura 2.52, se observa el método de Bandara aplicado a una muestra.

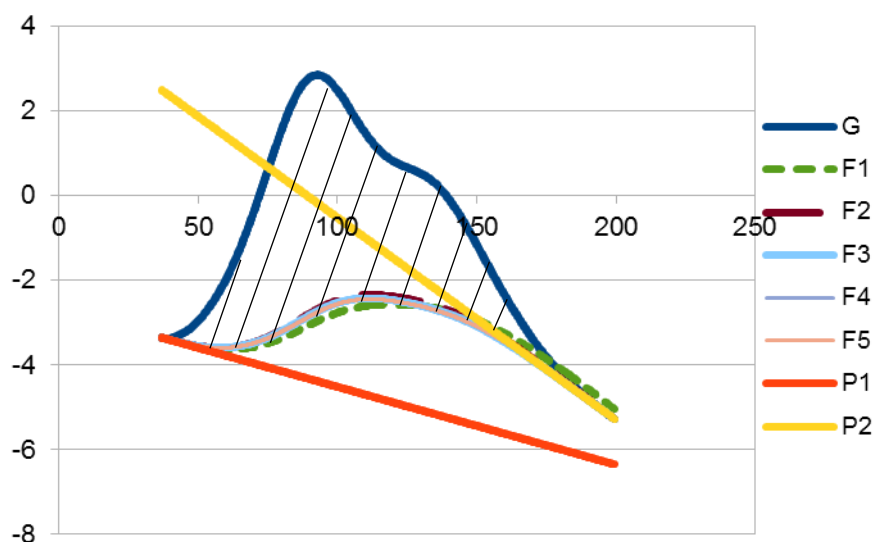


Figura 2.52. Cálculo de ΔH_{total} mediante el método de Bandara.

Comparación de picos endotérmicos

La entalpía de relajación se registró a partir del uso del software STARe®, estableciendo un intervalo para la toma de datos, como se observa en la Figura 2.53.

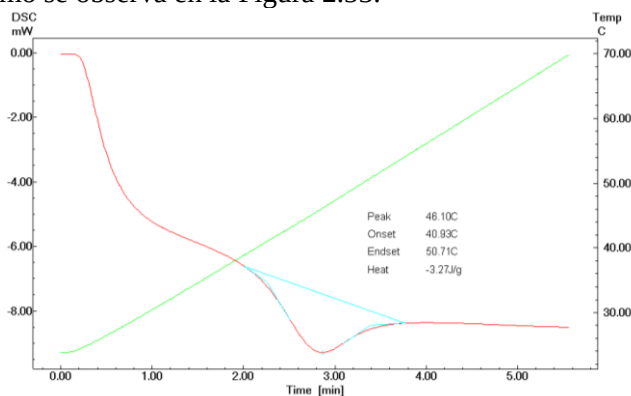


Figura 2.53. Cálculo de entalpía de relajación.

²⁶ Las extrapolaciones lineales aplicadas para estimar P_1 y P_2 , se justifican por la razón de que los calores específicos de la mayoría de los compuestos inorgánicos y orgánicos varían linealmente con la temperatura (86).

Obtención de la Tg

Los valores de la Tg se obtuvieron mediante el software STARE®, a partir de distintos criterios y estableciendo intervalos para la toma de datos. Por un lado, se relevaron los valores de las temperaturas *mid point* y *onset*, como se observa en la Figura 2.54. Por otro, se utilizó el criterio de la derivada primera relevando la Tg en el punto de inflexión, como se observa en la Figura 2.55.

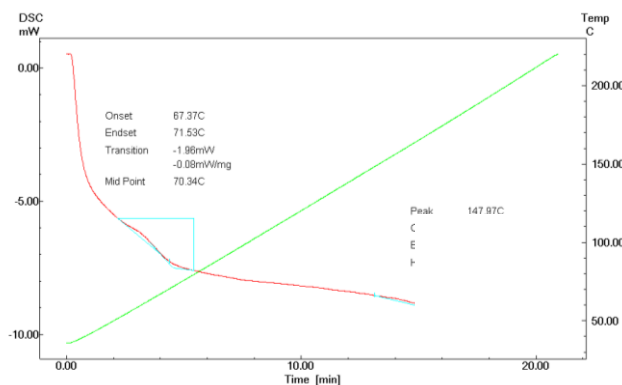


Figura 2.54. Valores de la Tg utilizando el criterio del *mid point* y el *onset*.

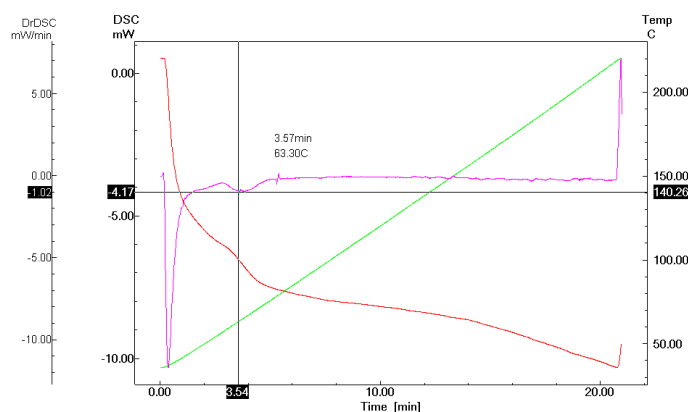


Figura 2.55. Valor de la Tg utilizando el criterio de la derivada primera.

Los criterios de la derivada primera y *el mid point* dan valores de la Tg similares, ya que el *mid point* se corresponde con el pico de la derivada primera (87). El criterio del *onset*, es más conservador debido a que marca el inicio del intervalo de temperatura en el que se produce la transición vítrea (85).

2.6.5.5 Importancia de la Tg y el curado en los álabes de los aerogeneradores

Los aerogeneradores a menudo están expuestos a cambios extremos de temperatura, que van desde -30°C a 55°C (90). Otros autores mencionan un rango de operación entre -10°C y 40°C para aerogeneradores terrestres y marinos (91). Sin embargo, los estándares de certificación de energías renovables DNV GL establecen un rango de operación entre -20°C y 50°C (92). Asimismo, en la guía para la certificación de aerogeneradores Germanischer Lloyd, se establece que la Tg *onset* de la matriz y de los materiales de unión estructural, debe ser superior a 65 °C y también superior a la temperatura que se espera en el miembro estructural²⁷ (93). Por ello, si el valor de la Tg debe superar los 65°C, estaría 15°C por encima del rango de operación establecido por los estándares DNV GL, con lo cual el material no podría pasar a un estado viscoelástico de aspecto gomoso (78) y alterar sus propiedades mecánicas debido al aumento de la movilidad de las cadenas (94).

Para alcanzar un valor de Tg determinado, se debe seleccionar el tratamiento térmico adecuado. A modo de ejemplo, en la Figura 2.56 se observa el grado de curado alcanzado mediante distintos

²⁷ Refiere a los distintos componentes del aerogenerador. Los estándares GL establecen 3 categorías de miembros estructurales: miembros especiales (bridas anulares de los mástiles por ej.), miembros primarios (portador del generador eléctrico, etc.) y miembros secundarios (superficies no estructurales, escaleras, etc.).

tratamientos térmicos y los valores de T_g para una resina poliuretánica utilizada en la fabricación de álabes de aerogeneradores (95).

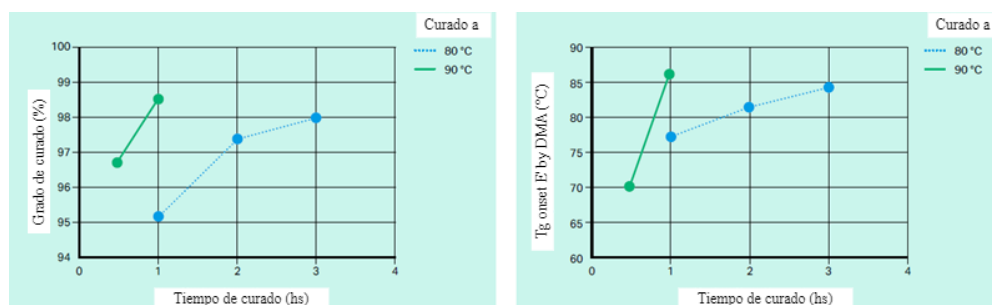


Figura 2.56. Grado de curado y T_g en función del tiempo de curado para una resina poliuretánica (95).

El tratamiento térmico bajo el cual se lleva a cabo el proceso de curado, no sólo es importante porque determina el valor de la T_g , sino que también determina las propiedades mecánicas del material. En la Figura 2.57 se observan las curvas tensión-deformación para un material compuesto laminado curado bajo distintos tratamientos térmicos.

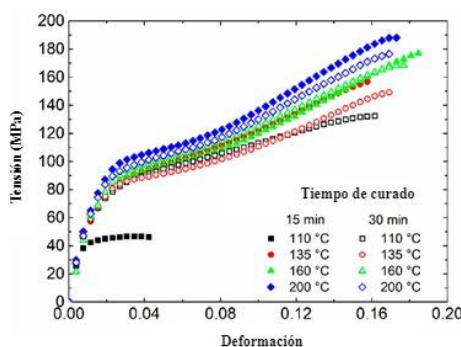


Figura 2.57. Curvas tensión-deformación para un laminado bajo distintos tratamientos térmicos (96).

En muchas ocasiones el curado se lleva a cabo a temperaturas inferiores a la $T_{g\infty}$. Por ello, posteriormente se realiza un tratamiento de post curado. Éste, consiste en someter al material durante un cierto tiempo a una temperatura superior a su $T_{g\infty}$, con el fin de obtener el máximo grado de entrecruzamiento. No obstante, es importante señalar que no es conveniente mantener al sistema a temperaturas muy superiores a su $T_{g\infty}$, ya que no se puede sobrepasar el máximo grado de entrecruzamiento definido por su estructura química, y en todo caso se producirá degradación térmica, rebajando las propiedades químicas, mecánicas y otras (84). En general, el post curado incrementa la T_g y mejora propiedades, por lo que este tratamiento estará definido en función de las prestaciones mecánicas y térmicas que se requieran del componente (97).

3 Resultados

3.1 Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius

En la Figura 3.1 se observan los contornos de velocidad y presión total obtenidos de forma estática, para un aerogenerador Savonius con álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15, un número de Reynolds de 120000, y ángulos de rotor de 0° , 45° , 90° y 135° .

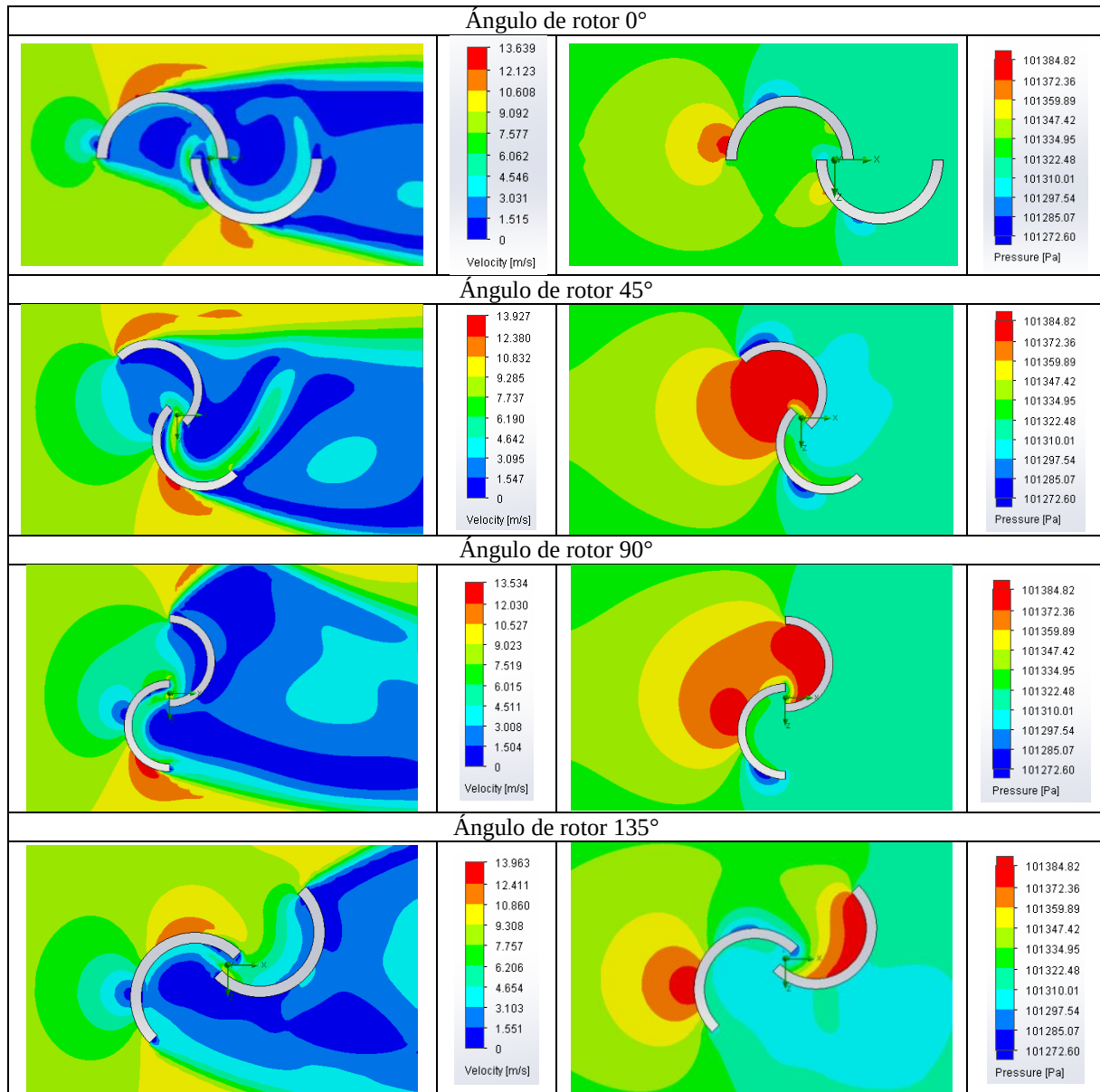


Figura 3.1. Contornos de velocidad y presión obtenidos mediante simulación para ángulos de rotor de 0° , 45° , 90° y 135° .

En la Figura 3.2, se observan los coeficientes de presión calculados a partir las simulaciones, y se comparan con los obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al., para un Savonius con las características mencionadas. En esta figura se observan los resultados para ángulos de rotor (θ) de 0° , 45° , 90° y 135° , teniendo en cuenta que por cada álabe se establecieron 34 puntos para la toma de presiones colocados cada 10° (ángulo de álabes Φ). Se verifica que las tendencias de las curvas son similares y los coeficientes hallados tienen los mismos órdenes de magnitud, incluso en algunos puntos de la curva los valores son coincidentes. Sin embargo, para un ángulo del rotor de 0° , en el álabes de retroceso se

observan grandes diferencias en los coeficientes de presión obtenidos para la superficie convexa. En el álabe de avance (ángulos de álabe de 0° a 180°), en general, las presiones en la superficie cóncava son mayores que las presiones de la superficie convexa para los ángulos de rotor de 45° , 90° y 135° , tal como se observa en los contornos de presión en la Figura 3.1. En el álabe de retroceso (ángulos de álabe de 180° a 360°), en general, las presiones de la superficie convexa son mayores que las presiones de la superficie cóncava para un ángulo del rotor de 135° , tal como se observa en los contornos de presión en la Figura 3.1.

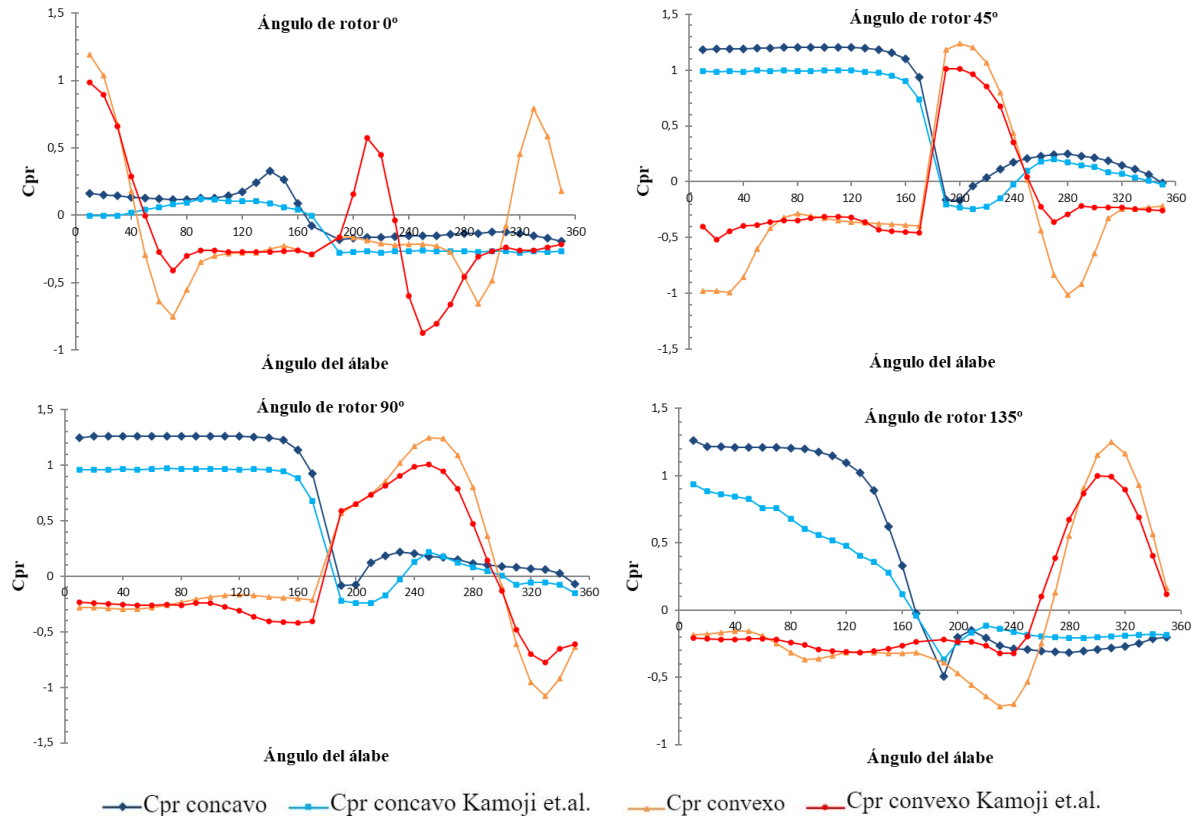


Figura 3.2. Coeficientes de presión obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al., y calculados a partir de las simulaciones.

En la Figura 3.3, se observan los coeficientes locales estáticos de torque calculados a partir de los coeficientes de presión, y se comparan con los obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al. Se verifica que las tendencias de las curvas son similares y los coeficientes hallados tienen los mismos órdenes de magnitud. Tanto en el álabe de avance como en el de retroceso, los coeficientes locales estáticos de torque toman valores positivos y negativos para todos los ángulos de rotor. El valor máximo del coeficiente local estático de torque, aumenta con el aumento de ángulo del rotor de 0° a 45° , y disminuye a medida que el ángulo del rotor aumenta de 45° a 135° . Las diferencias entre los C_{pr} observadas en la Figura 3.2, podrían contribuir a las diferencias entre las curvas de los coeficientes locales estáticos de torque en la Figura 3.3, ya que éstos se calculan a partir del C_{pr} . En el álabe de retroceso para un ángulo de rotor de 0° se observan diferencias que coinciden con lo destacado en la Figura 3.2, donde también se aprecian grandes diferencias entre los C_{pr} obtenidos y los hallados por Kamoji et.al.

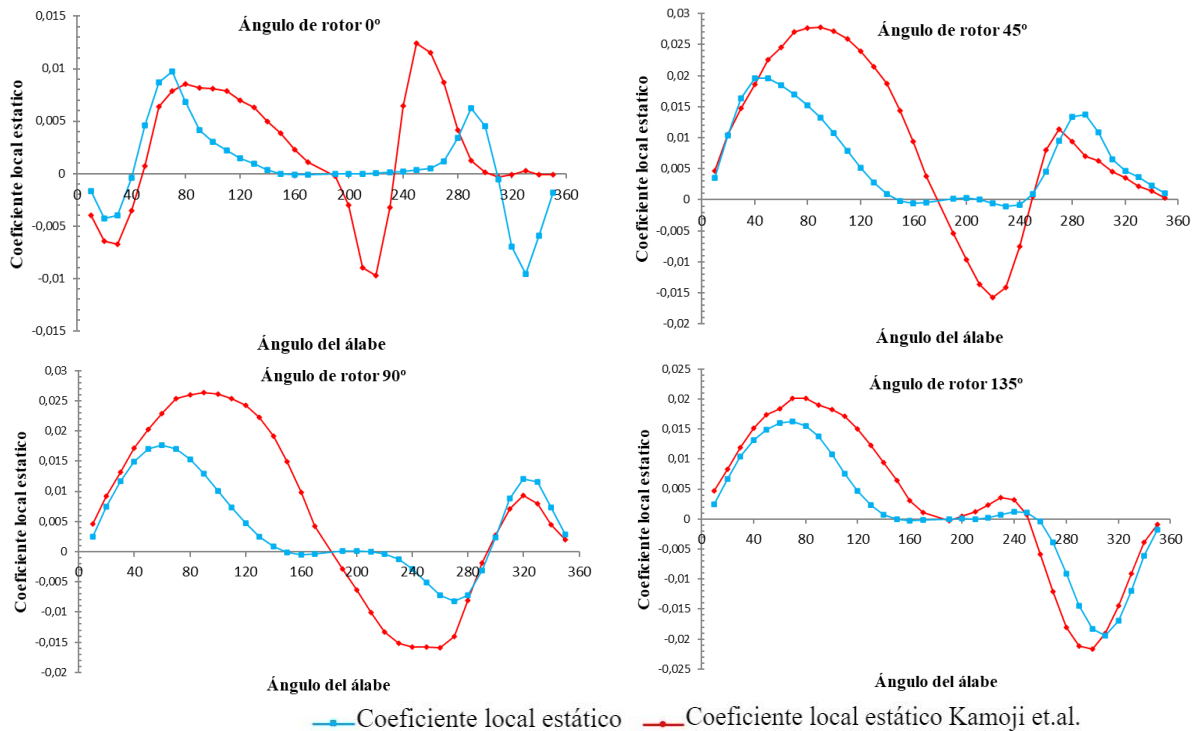


Figura 3.3. Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al., y calculados a partir de los coeficientes de presión.

En la Figura 3.4, se observan los coeficientes estáticos de torque calculados a partir de la integración de los coeficientes locales estáticos de torque, y se comparan con los obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al. Se verifica que las tendencias de las curvas son similares y los coeficientes hallados tienen los mismos órdenes de magnitud. En las curvas se observa que se produce un incremento del coeficiente estático de torque para ángulos de rotor de 0° a 45°, y luego disminuye con el aumento del ángulo del rotor entre 45° y 165°, haciéndose negativo en 165°. Las diferencias observadas entre los valores, se podrían explicar por lo observado en la Figura 3.2, ya que el coeficiente estático de torque se calcula a partir de la integración de los coeficientes locales estáticos de torque, que a su vez se obtienen a partir de los C_{pr} .

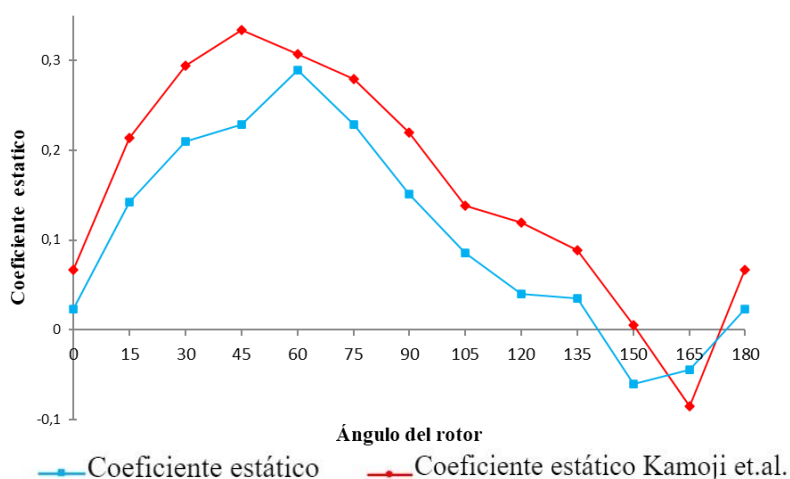


Figura 3.4. Coeficientes estáticos de torque obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al., y calculados a partir de la integración de los coeficientes locales estáticos de torque.

3.2 Simulaciones de materiales

A continuación, se presentan los resultados más relevantes obtenidos de la realización del análisis estático estructural de los modelos estudiados.

3.2.1 Simulaciones con presiones

En la Figura 3.5, se observan zonas rojas donde las tensiones son máximas, y zonas azules donde las tensiones son mínimas. Estas zonas se descartaron durante el relevamiento de resultados.

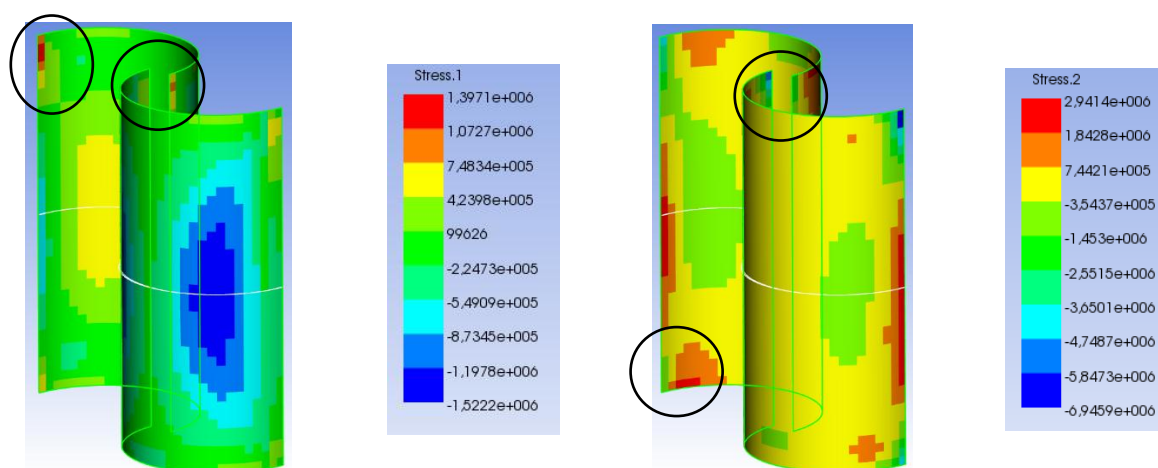


Figura 3.5. Resultados descartados.

Por cuestiones de simplicidad, no se muestran los resultados gráficos capa por capa. Sin embargo, en la Tabla 27, se exponen las tensiones máximas y mínimas principales y las tensiones de corte de las 3 capas que componen el modelo, generadas a partir de las presiones de las simulaciones CFD. Esta tabla se realizó con el objetivo de aplicar el criterio de falla de máximas tensiones detallado en el **anexo**. Bajo este criterio, se producirá una falla en el laminado si cualquiera de las condiciones de tensiones principales o tensiones de corte en una capa dada, es igual o excede las correspondientes tensiones límites.

Capa	$\sigma_{1\max}$ (MPa)	$\sigma_{1\min}$ (MPa)	$\sigma_{2\max}$ (MPa)	$\sigma_{2\min}$ (MPa)	t_{12} (MPa)	Falla por criterio de máx. tensiones
0°						
1	0,75	-1,52	2,94	-1,45	0,24	no
2	1,05	-1,07	1,02	-1,14	0,38	no
3	0,71	-1,49	3,02	-1,50	0,23	no
45°						
1	0,75	-1,45	2,88	-1,43	0,24	no
2	1,03	-1,05	1,00	-1,12	0,38	no
3	0,69	-1,52	2,98	-1,47	0,22	no
90°						
1	0,74	-1,46	2,90	-1,44	0,24	no
2	1,03	-1,06	1,01	-1,11	0,37	no
3	0,69	-1,51	2,95	-1,46	0,22	no
135°						
1	0,76	-1,46	2,93	-1,45	0,23	no
2	1,05	-1,07	1,02	-1,14	0,38	no
3	0,71	-1,50	3,03	-1,49	0,22	no

Tabla 27. Tensiones principales y de corte obtenidas sobre el modelo, con las presiones de las simulaciones CFD para ángulos de rotor de 0°, 45°, 90° y 135°.

Finalmente, analizando los resultados con el criterio de falla de Tsai-Wu, se observa que el material no falla. Esto se determinó a partir del Factor de Reserva Inverso (IRF por sus siglas en inglés), con el cual si $IRF > 1,0$ el material falla. Los resultados no se muestran por una cuestión de simplicidad, ya que $IRF < 1,0$.

3.2.2 Simulaciones según reglamento CIRSOC

En la Figura 3.6, se observan en ambos modelos, zonas rojas donde las tensiones son máximas, y zonas azules donde las tensiones son mínimas. Estas zonas se descartaron durante el relevamiento de resultados.

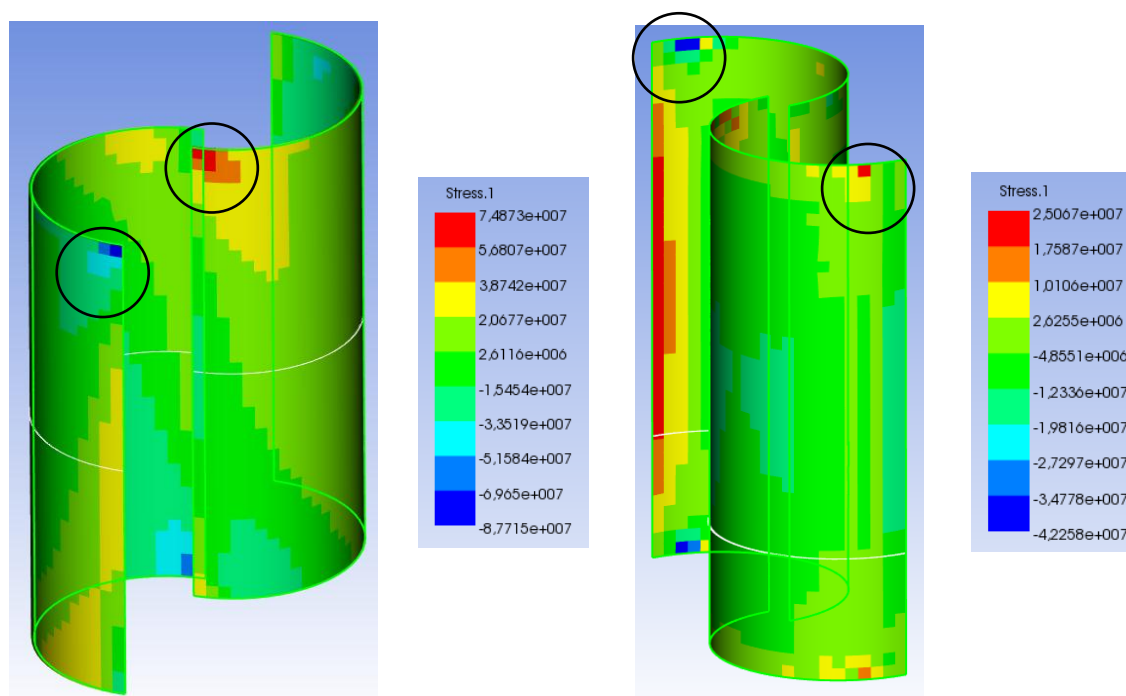


Figura 3.6. Resultados descartados. Izquierda, Savonius a escala. Derecha, Savonius a fabricar.

3.2.2.1 Aerogenerador Savonius a escala

Por cuestiones de simplicidad, no se muestran los resultados gráficos capa por capa. Sin embargo, en la Tabla 28, se exponen las tensiones máximas y mínimas principales y tensiones de corte de las 3 capas que componen el modelo, generadas por una fuerza de 9806,6 N. Esta tabla se realizó con el objetivo de aplicar el criterio de falla de máximas tensiones detallado en el **anexo**.

Capa	σ_{1max} (MPa)	σ_{1min} (MPa)	σ_{2max} (MPa)	σ_{2min} (MPa)	t_{12} (MPa)	Falla por criterio de máx. tensiones
1	24,92	-27,16	103,52	-63,30	6,32	no
2	38,74	-15,45	37,42	-15,88	11,78	no
3	18,52	-26,84	89,42	-110,55	7,42	no

Tabla 28. Tensiones principales y de corte obtenidas sobre el modelo a escala, con una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

Finalmente, analizando los resultados con el criterio de falla de Tsai-Wu, se observa en la Figura 3.7 que el material falla en $tw(1)$. Esta condición denota que los álabes fallan en la capa 1, donde $IRF > 1,0$.

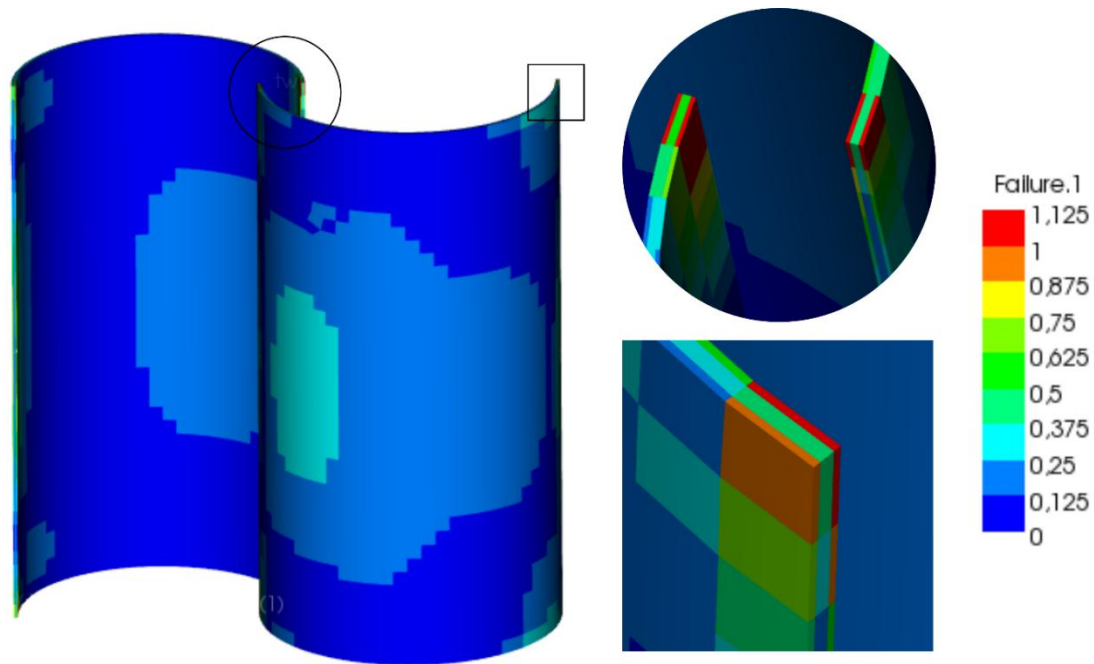


Figura 3.7. Criterio de falla de Tsai-Wu aplicado sobre las tres capas, para una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

3.2.2.2 Aerogenerador Savonius a fabricar

Por cuestiones de simplicidad, no se muestran los resultados gráficos capa por capa. Sin embargo, en la Tabla 29, se exponen las tensiones máximas y mínimas principales y tensiones de corte de las 3 capas que componen el modelo, generadas por una fuerza de 9806,6 N. Esta tabla se realizó con el objetivo de aplicar el criterio de falla de máximas tensiones detallado en el **anexo**.

Capa	$\sigma_{1\max}$ (MPa)	$\sigma_{1\min}$ (MPa)	$\sigma_{2\max}$ (MPa)	$\sigma_{2\min}$ (MPa)	t_{12} (MPa)	Falla por criterio de máx. tensiones
1	25,07	-12,34	89,51	-87,16	6,39	no
2	32,71	-34,64	40,76	-28,96	11,33	no
3	22,51	-23,10	79,23	-98,78	4,55	no

Tabla 29. Tensiones principales y de corte obtenidas sobre el modelo a fabricar, con una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

Finalmente, analizando los resultados con el criterio de falla de Tsai-Wu, se observa en la Figura 3.8 que el material no falla, ya que $IRF < 1,0$.

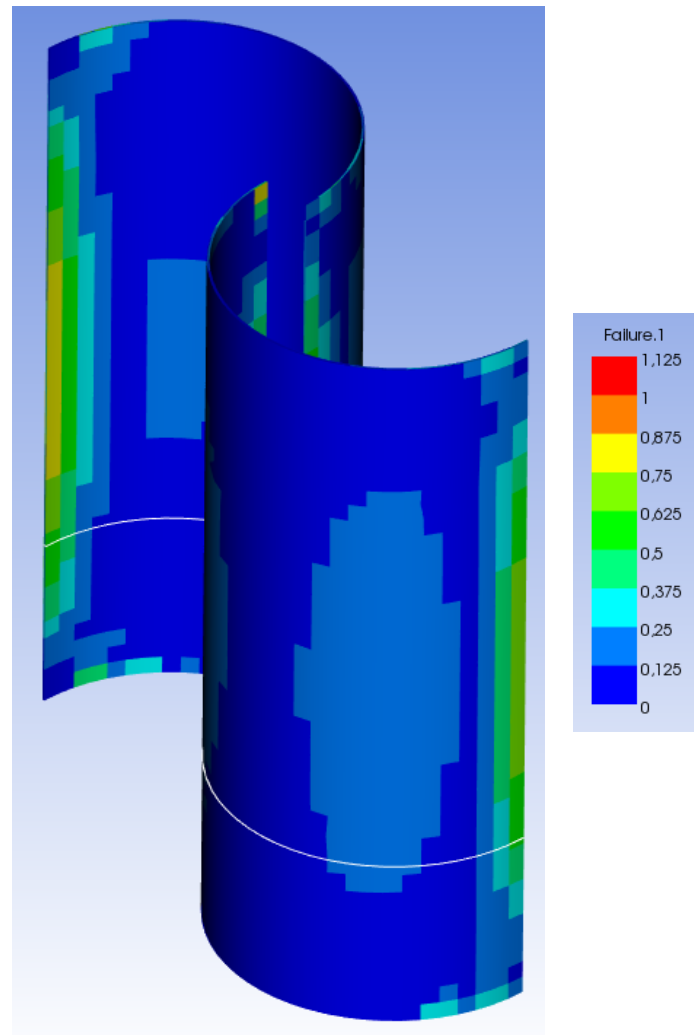


Figura 3.8. Criterio de falla de Tsai-Wu aplicado sobre las tres capas, para una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

3.3 Fabricación de los álabes

3.3.1 Laminación álabes 1

Al finalizar el proceso de curado, se observó que el sistema epoxi fluyó hacia la zona inferior de la matriz, lo que provocó una falta de impregnación en la superficie convexa del álabes. En la Figura 3.9, se plantea esquemáticamente este inconveniente. Asimismo, la bolsa de vacío generó arrugas superficiales en el laminado. En la Figura 3.10, se observan ambos defectos. Sin embargo, se observó que la superficie cóncava del álabes en contacto con la matriz, obtuvo una buena terminación superficial.

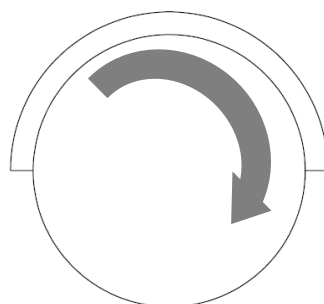


Figura 3.9. Flujo de sistema epoxi durante el curado.



Figura 3.10. Falta de impregnación y arrugas.

3.3.2 Laminación álabes 2

Debido a la experiencia adquirida durante el proceso de laminación del álabes 1, se decidió una vez laminado el álabes, colocarle cinta para fijarlo a la matriz y girarlo 180° sobre el eje longitudinal durante el proceso de curado, como se observa esquemáticamente en la Figura 3.11.

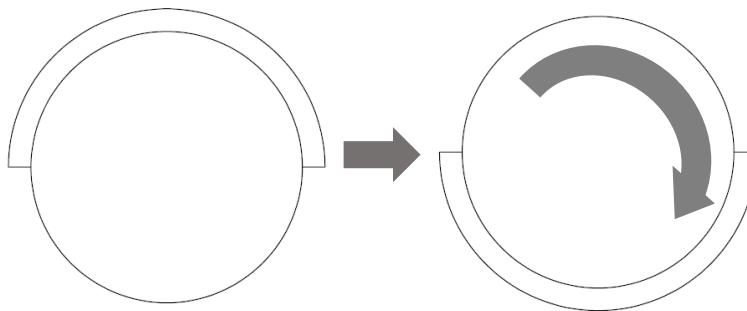


Figura 3.11. Modificaciones en el proceso de laminación.

Esto se realizó con el objetivo de obtener una mejor impregnación de la fibra, y para posicionar las arrugas provocadas por la bolsa de vacío en sectores a descartar del laminado. En la Figura 3.12, se observan las mejoras obtenidas respecto a la impregnación de la fibra. Al finalizar el proceso de curado, se observó que la superficie cóncava del álabes en contacto con la matriz, obtuvo una buena terminación superficial.



Figura 3.12. Mejoras en la impregnación.

3.3.3 Terminación superficial

La aplicación de sistema *top coat* en las superficies cóncavas de los álabes, debido a la terminación superficial obtenida, permitieron fácilmente el recubrimiento con rodillo y pincel, como se observa en la Figura 3.13.

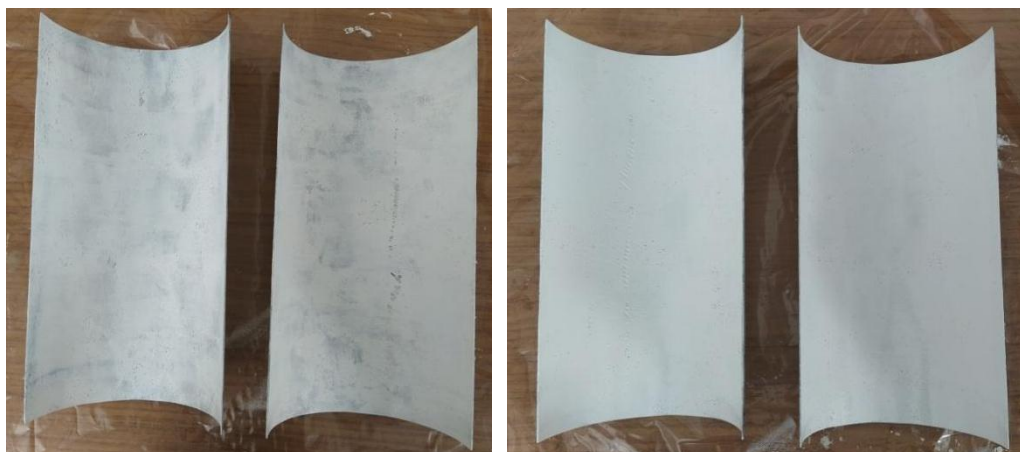


Figura 3.13. Superficies cóncavas. Izquierda, primera capa con rodillo. Derecha, segunda capa con pincel.

Sin embargo, con el procedimiento utilizado para la aplicación de sistema *top coat* en las superficies convexas de los álabes, no se obtuvieron buenos resultados. Al desmoldar la pieza, se observó rugosidad superficial, y falta de desmoldante sobre la chapa rolada, tal como se muestra en la Figura 3.14. Por ello, no se repitió el procedimiento en el otro álabes.



Figura 3.14. Aplicación de *top coat* con la chapa rolada.

Asimismo, en la Tabla 30, se identifican los principales problemas observados posteriores a la aplicación del *top coat* en ambas superficies de los álabes.

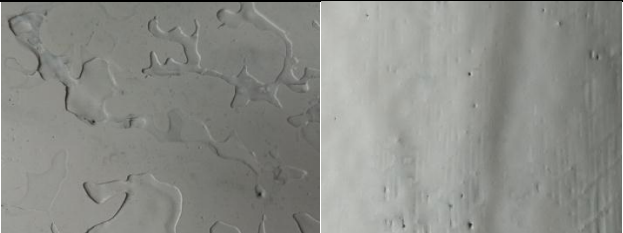
Problema	Visualización	
Flujo y nivelación deficientes		
Agrietamiento		
Orificios/porosidad		

Tabla 30. Problemas posteriores a la aplicación del *top coat*.

3.4 Ensamble del aerogenerador

En la Figura 3.15, se observa la prueba de adhesión realizada con el primer diseño propuesto. La cuña y la disposición de los orificios permitieron un buen flujo del adhesivo. Sin embargo, se observó un desplazamiento lateral del adhesivo y rechupes en los orificios, lo que provocó una falta de relleno, consecuencia además del gran espaciado introducido en la ranura de encastre superior del álabe.



Figura 3.15. Zoom del primer diseño.

Debido a lo mencionado anteriormente, se propuso un segundo diseño con guía y sin guía. En éste, se incorporó una cuña simétrica para mejorar el contacto en ambas superficies del álabe, la ranura de encastre del álabe se adaptó a su espesor en la parte superior, y la ubicación de los orificios no se cambió.

Una vez realizada la impresión 3D de este diseño, el procedimiento modificado para llevar a cabo la prueba de adhesión mostró notables mejoras. La incorporación de diques de contención del adhesivo permitió mejorar el relleno; la limpieza de excedentes con acetona, disminuyó las acciones de mecanizado posteriores; el menisco le otorgó una transición suave a las piezas vinculadas, lo que disminuye la concentración de tensiones; y no se observaron rechupes en los orificios de inyección. En las Figura 3.16 y Figura 3.17, se observan las pruebas de adhesión realizadas con el segundo diseño.

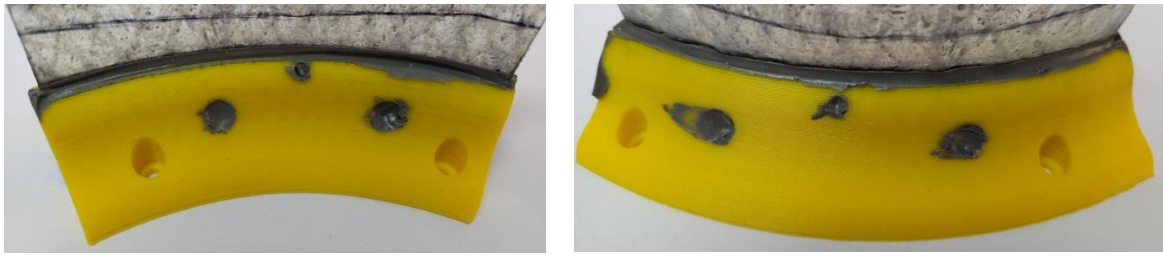


Figura 3.16. Zoom del segundo diseño con guía.

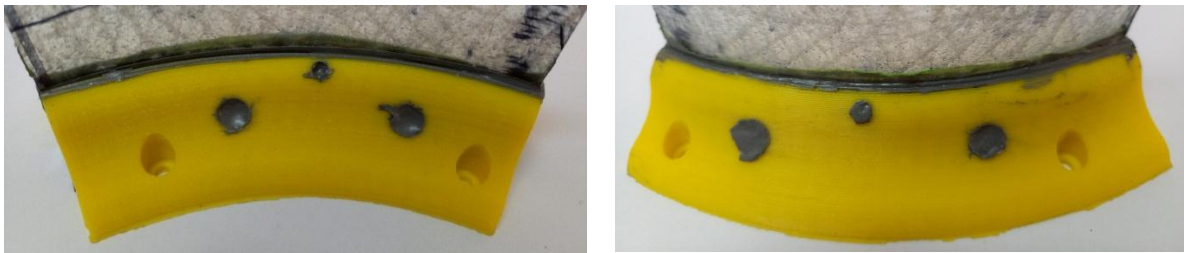


Figura 3.17. Zoom del segundo diseño sin guía.

A continuación, en la Figura 3.18 se observan los cortes transversales realizados mediante una lupa; y en las Figura 3.19, Figura 3.20 y Figura 3.21, con un microscopio digital Andonstar. A partir de estas imágenes se realizaron observaciones por inspección visual.

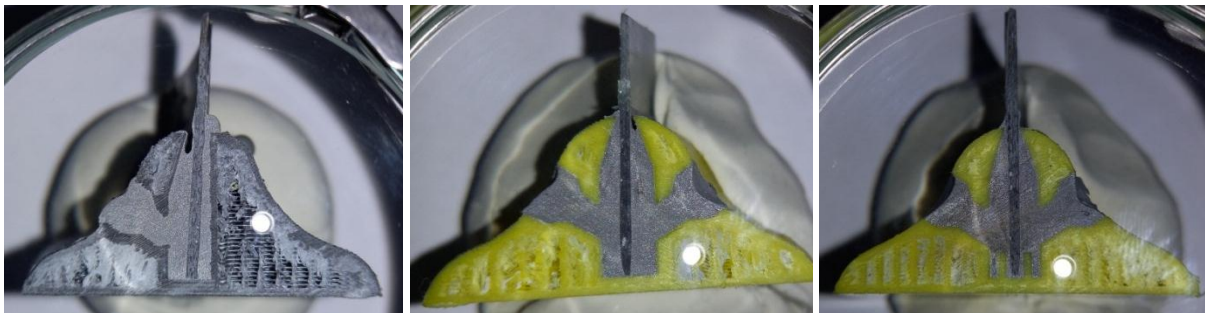


Figura 3.18. Cortes transversales de los orificios de ingreso de adhesivo. Izquierda, primer diseño. Centro, segundo diseño sin guía. Derecha, segundo diseño con guía.



Figura 3.19. Imágenes del corte transversal del primer diseño.



Figura 3.20. Imágenes del corte transversal del segundo diseño sin guía.

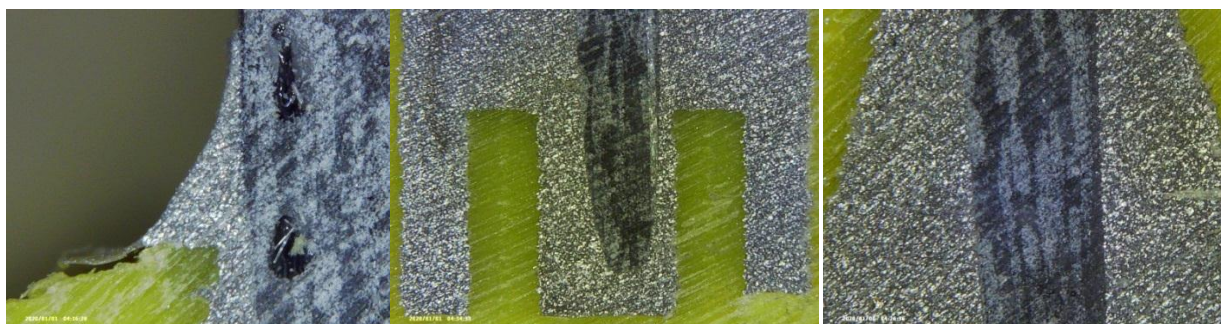


Figura 3.21. Imágenes del corte transversal del segundo diseño con guía.

Las observaciones mediante inspección visual, se resumen en la Tabla 31.

Observación	Primer diseño	Segundo diseño sin guía	Segundo diseño con guía
Falta de adhesivo alrededor de los bordes de unión	SI	SI	NO
Línea de unión adhesiva de sección constante	NO	NO	SI
Exceso de adhesivo en la zona de ranura de encastre	SI	NO	NO
Penetración del adhesivo	SI	SI	SI
Poros	NO	NO	NO
Presencia de menisco	NO	SI	SI
Mezcla adhesiva homogénea	SI	SI	SI
Fisuras en el adhesivo	NO	NO	NO

Tabla 31. Observaciones mediante inspección visual.

Finalmente, se realizó un tercer diseño debido a que, durante la inyección de adhesivo en el segundo diseño, no todos los orificios fueron utilizados. Por lo tanto, se eliminaron los orificios de desagote; y se redujo la cantidad de orificios de ingreso colocándolos de manera asimétrica debido a que se verificó que el adhesivo inyectado por un orificio de ingreso fluye hacia ambos laterales por lo que no requiere de otro orificio enfrentado. Esta disminución de orificios, mejoró las prestaciones mecánicas del ensamble, disminuyendo la concentración de tensiones. En la Figura 3.22, se presenta la vinculación final entre componentes.



Figura 3.22. Vinculación final entre componentes.

3.5 Técnicas experimentales

3.5.1 Viscosidad

Los valores de viscosidad de la resina epoxi YD 128²⁸ en función de la temperatura, se presentan en la Tabla 32 junto con sus promedios. Asimismo, los valores de viscosidad provistos por el fabricante se observan en la Figura 3.23, en la cual se señalaron los valores promedios obtenidos durante el ensayo.

	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPas)
	26,8	9189
	26,8	9277
	26,9	8868
	26,9	9016
	26,9	8830
	26,9	8350
Promedio	26,87	8921,67

Tabla 32. Viscosidades de la resina epoxi YD 128.

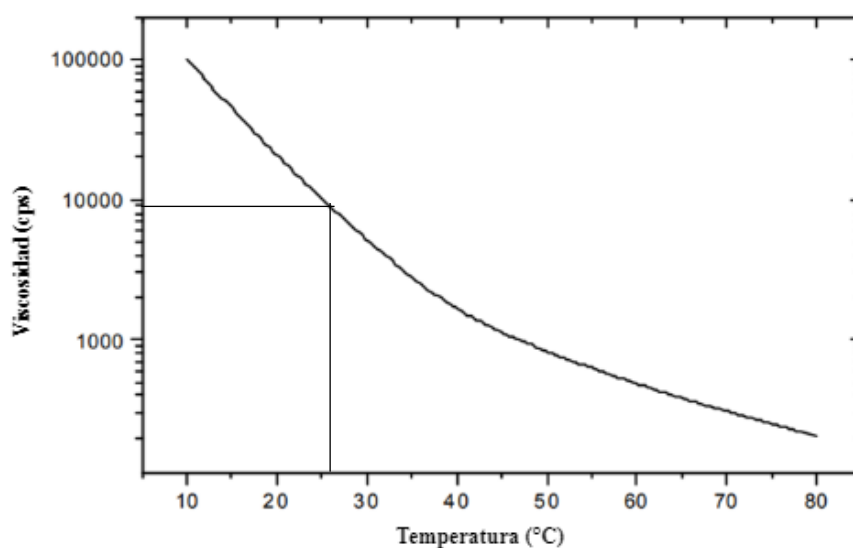


Figura 3.23. Viscosidad de la resina epoxi YD-128 en función de la temperatura (53).

²⁸ No se determinó la viscosidad del endurecedor y la mezcla debido a que no se contaba con la cantidad suficiente para los ensayos.

Asimismo, mediante el programa KnowItAll® utilizado para comparar el espectro obtenido de la resina epoxi YD 128 con la biblioteca disponible, se halló una coincidencia del 96,32% con una resina epoxi D.E.R.331. Esta resina de la empresa Dow tiene una viscosidad a 25°C de entre 11000-14000 mPas (98), y se utiliza, entre otros, para procesos de laminación manual (99). En la Tabla 33, se resumen los valores de la viscosidad de la resina epoxi YD 128, su endurecedor KH 816 y la mezcla según las fichas técnicas, lo que coincide con los valores de viscosidad de la resina epoxi D.E.R.331 a 25°C.

Producto	Viscosidad a 25°C (mPas)
Epoxi YD 128	11500-13500
Endurecedor KH 816	300-500
Mezcla 100:60	2350

Tabla 33. Valores de viscosidad a 25°C de la resina epoxi, su endurecedor y el sistema (53).

3.5.2 Ensayo de tracción

A continuación, se observan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

3.5.2.1 Probetas impregnadas

En la Figura 3.24 se observan las probetas luego del ensayo, y en la Figura 3.25 los valores de tensión en función del desplazamiento del cabezal de la máquina.

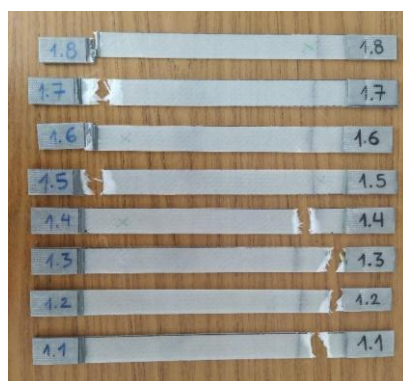


Figura 3.24. Probetas impregnadas ensayadas.

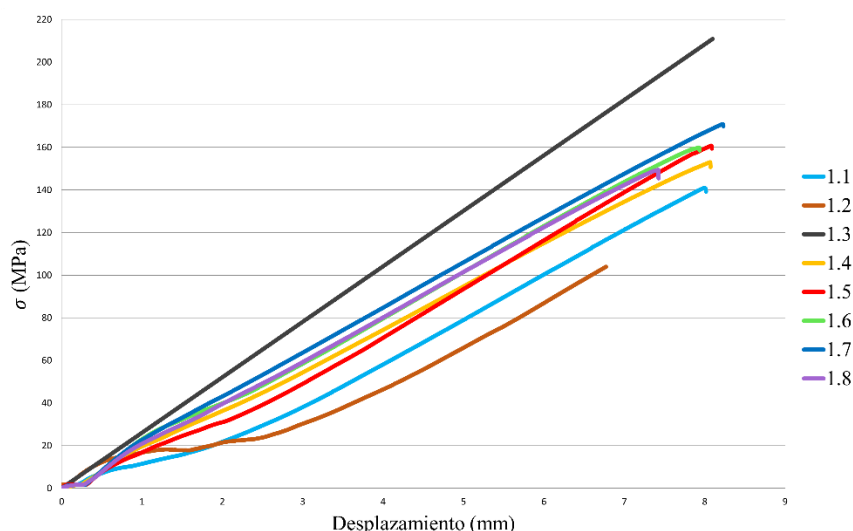


Figura 3.25. Curva tensión-desplazamiento de probetas impregnadas.

Los resultados de las probetas 1.2 y 1.3, fueron descartados por varios motivos. Por un lado, la probeta 1.2 sufrió inconvenientes de agarre durante el ensayo lo que se ve reflejado en la curva (donde se registró desplazamiento, pero no un aumento proporcional de carga), rompió dentro del *tab* y cumplió el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico de Grubbs. Por otro, la probeta 1.3 rompió dentro del *tab* y cumplió el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico de Grubbs. En la Figura 3.26, se observa la rotura de las probetas, y en la Tabla 34 se muestran los resultados finales.



Figura 3.26. Rotura de probetas dentro del *tab*.

Probeta	Tensión de rotura (MPa)
1.1	140,98
1.4	153,06
1.5	160,74
1.6	159,95
1.7	170,90
1.8	149,44
Promedio	155,84
Desvío	10,36
Coeficiente de variación	6,65

Tabla 34. Resultados de probetas impregnadas.

3.5.2.2 Probetas con falta de impregnación

En la Figura 3.27 se observan las probetas luego del ensayo, y en la Figura 3.28 los valores de tensión en función del desplazamiento del cabezal de la máquina.

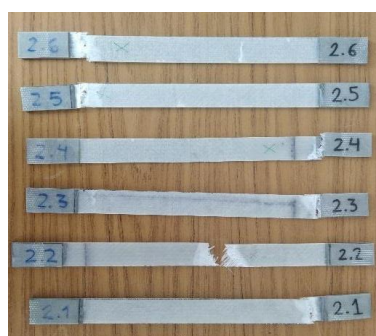


Figura 3.27. Probetas con falta de impregnación ensayadas.

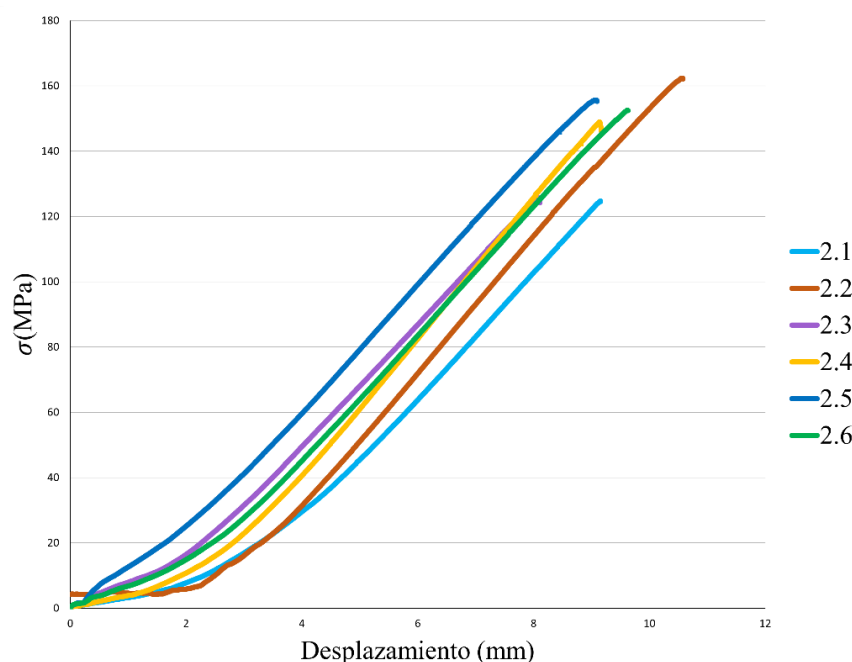


Figura 3.28. Curva tensión-desplazamiento de probetas con falta de impregnación.

La probeta 2.2 sufrió inconvenientes de agarre durante el ensayo, lo que se ve reflejado en la curva donde se registró desplazamiento, pero no un aumento proporcional de carga. Por este motivo fue descartada. Asimismo, no se aplicó el criterio de eliminación de datos de Grubbs, ya que este lote de probetas no contaba con la cantidad de resultados necesarios para la aplicación del método. En la Tabla 35 se observan los resultados finales.

Probeta	Tensión de rotura (MPa)
2.1	124,77
2.3	125,66
2.4	148,96
2.5	155,65
2.6	152,54
Promedio	141,52
Desvío	15,07
Coefficiente de variación	10,65

Tabla 35. Resultados de probetas con falta de impregnación.

3.5.2.3 Probetas de tamaño reducido con tratamiento térmico de post curado

En la Figura 3.29 se observan las probetas luego del ensayo, y en la Figura 3.30 los valores de tensión en función del desplazamiento del cabezal de la máquina.

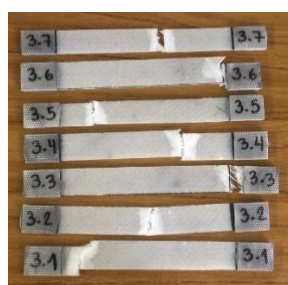


Figura 3.29. Probetas de tamaño reducido con tratamiento térmico de post curado ensayadas.

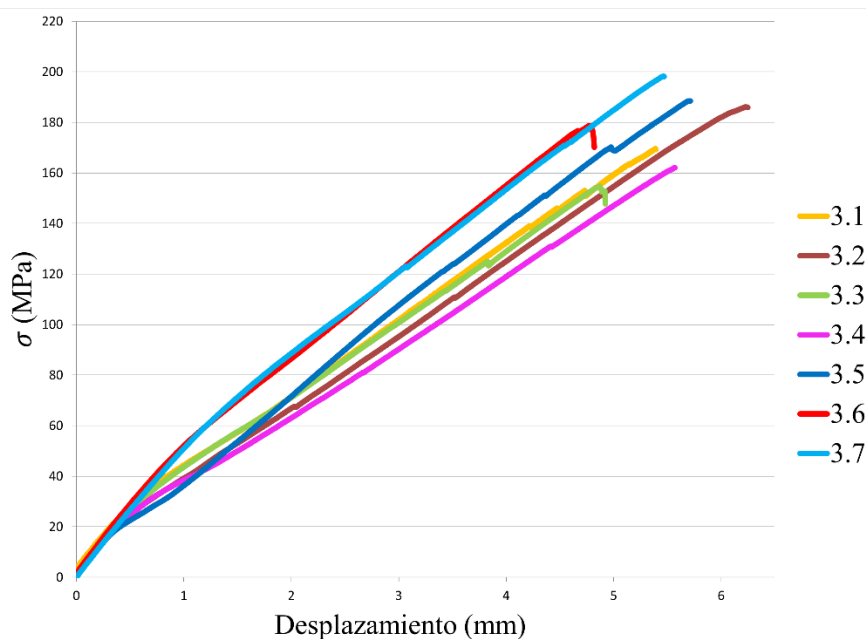


Figura 3.30. Curva tensión-desplazamiento de probetas de tamaño reducido con tratamiento térmico de post curado.

Los resultados de las probetas 3.3 y 3.4, fueron descartados por varios motivos. Por un lado, la probeta 3.3 rompió dentro del *tab* y cumplió el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico de Grubbs. En la Figura 3.31 se observa la rotura de la probeta. Por otro lado, la probeta 3.4 cumplió el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico de Grubbs. En la Tabla 36 se observan los resultados finales.



Figura 3.31. Rotura de probetas dentro del *tab*.

Probeta	Tensión de rotura (MPa)
3.1	169,62
3.2	186,12
3.5	188,47
3.6	178,68
3.7	198,28
Promedio	184,23
Desvío	10,76
Coefficiente de variación	5,84

Tabla 36. Resultados de probetas de tamaño reducido con tratamiento térmico de post curado.

3.5.2.4 Comparación entre probetas

En la Figura 3.32 se observan los valores de tensión de rotura promedio y el error estándar para todas las probetas ensayadas.

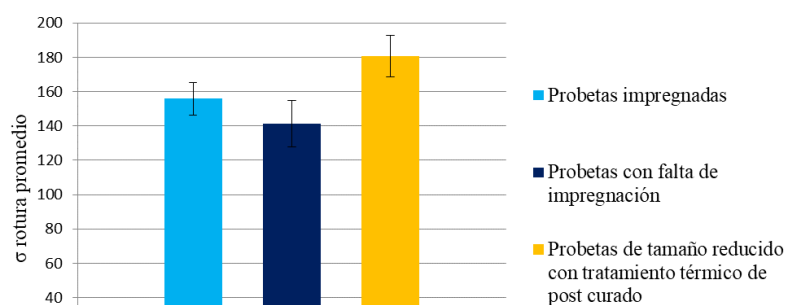


Figura 3.32. Tensión de rotura promedio y error estándar.

3.5.3 Observaciones mediante microscopía óptica

En la Tabla 37, se observa el contenido estimado de fibra, resina y poros.

Inclusión	% resina	% fibra	% poros
Probeta 1.1	47,98	52,02	1,96
Probeta 2.6	53,79	46,20	14,18
Retazos de los álabes	68,39	31,61	3,16

Tabla 37. Contenido estimado de fibra, resina y poros.

En las Figura 3.33, Figura 3.34 y Figura 3.35, se observan las muestras extraídas de retazos de los álabes construidos y de las probetas del ensayo de tracción, con un aumento de 10x (100 μm). Además, para mostrar las diferencias respecto a los tamaños de poros observados, se presenta la Figura 3.36 con un aumento de 5x (200 μm).

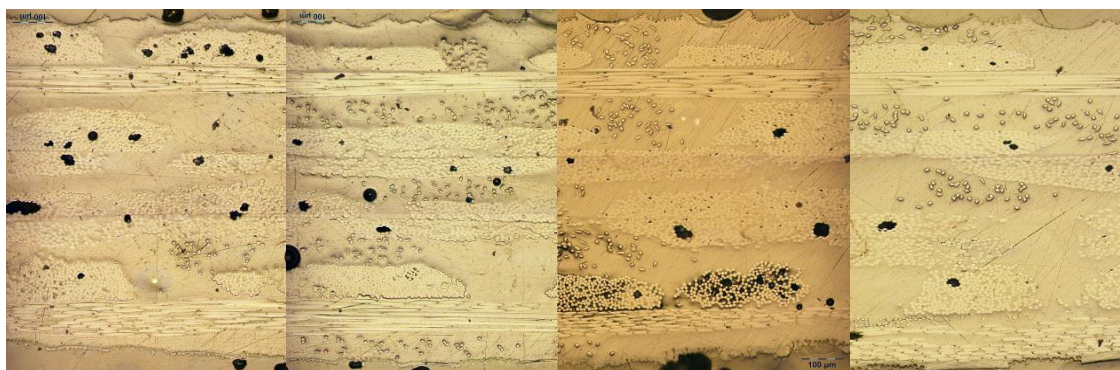


Figura 3.33. Secciones de la probeta 1.1 con aumento de 10x.

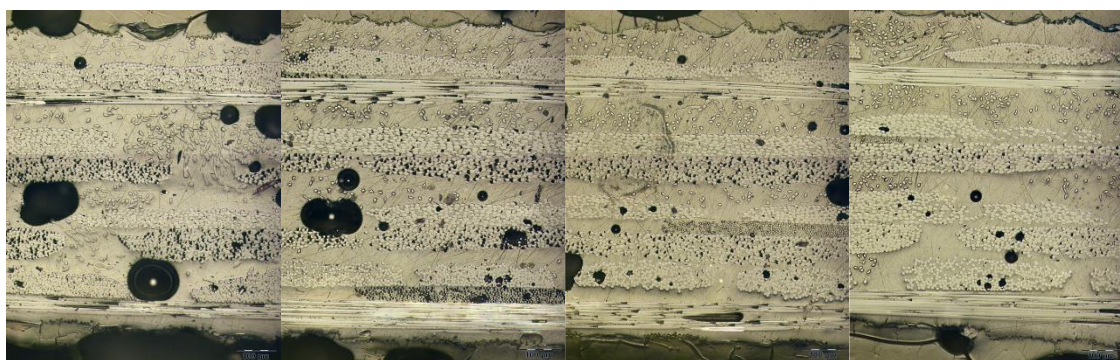


Figura 3.34. Secciones de la probeta 2.6 con aumento de 10x.

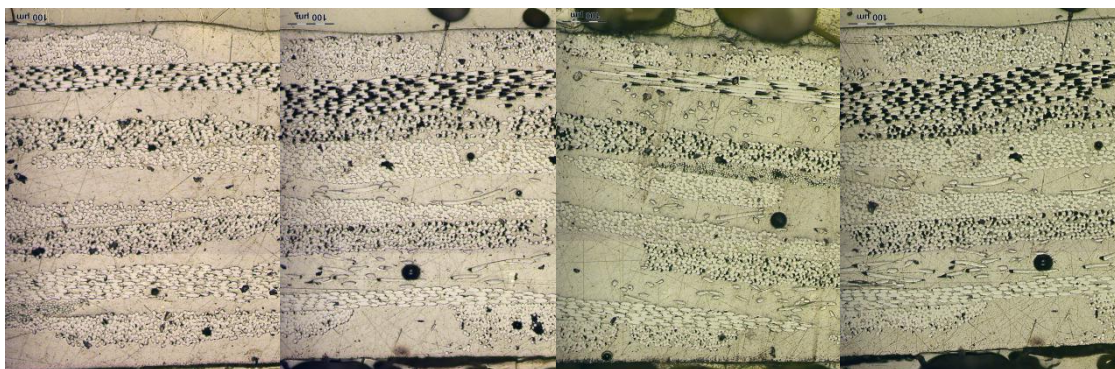


Figura 3.35. Secciones de retazos de los álabes con aumento de 10x.

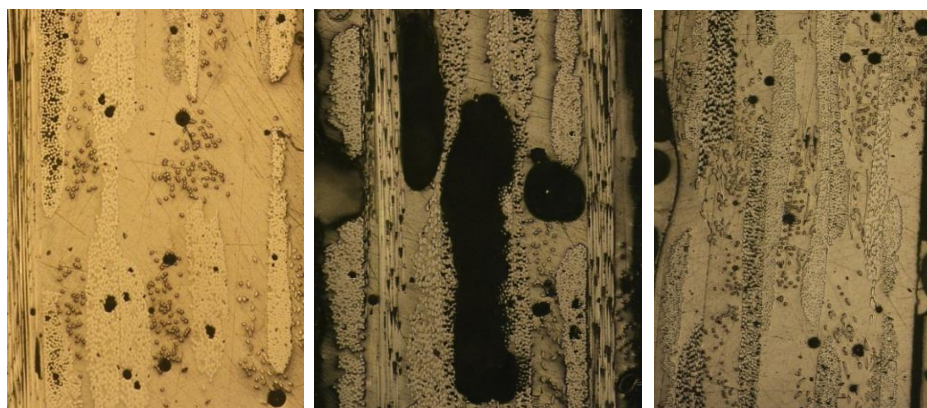


Figura 3.36. Poros con aumento de 5x. Izquierda, probeta 1.1. Centro, probeta 2.6. Derecha, retazos de los álabes.

3.5.4 FT-IR²⁹

En la espectrometría de la muestra de la resina epoxi (Figura 3.37), se observan picos asociados al grupo oxirano, como el 915 cm^{-1} asignado al estiramiento asimétrico del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del anillo oxirano, y el pico a 760 cm^{-1} que se asigna a la vibración rocking del enlace CH_2 (104). También se asigna al anillo oxirano el pico de 863 cm^{-1} (105) (75).

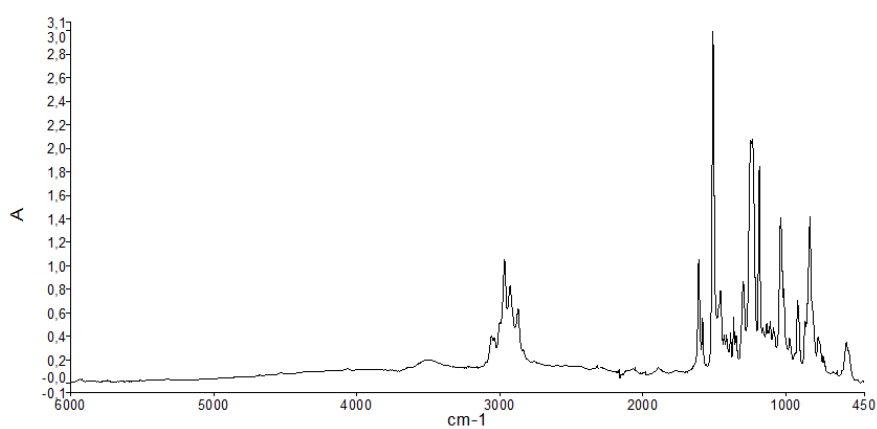


Figura 3.37. Espectro de la resina epoxi YD 128.

²⁹ Todos los espectros se encuentran normalizados respecto al espectro del sistema epoxi, el cual fue corrido luego mezclarse y aguardar 3 minutos.

Según la hoja de seguridad, el endurecedor está compuesto por isoforondiamina, entre otros. En la espectrometría de la muestra (Figura 3.38), se observan picos asociados a la amina primaria ($-\text{NH}_2$). Los picos 3172 cm^{-1} , 3283 cm^{-1} y 3345 cm^{-1} están asociados al estiramiento del enlace N-H (100), y los picos entre $1570\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ asociados a la flexión del enlace N-H.

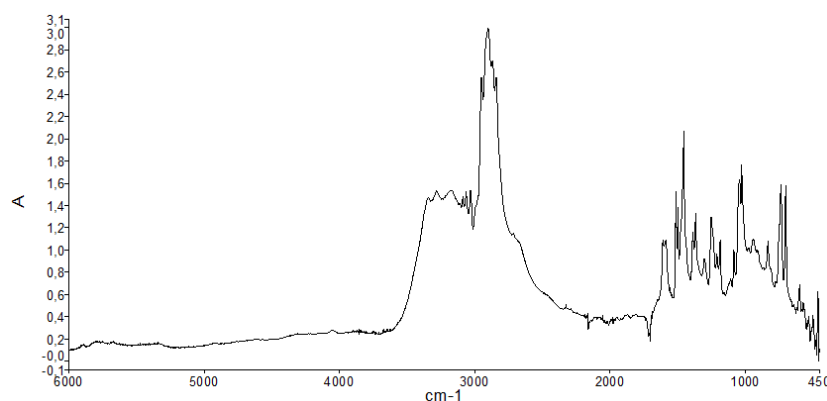


Figura 3.38. Espectro del endurecedor KH 816.

En la espectrometría de la muestra del *top coat* ortoftálico (Figura 3.39), se observan picos asociados a una resina de tipo poliéster insaturada. El pico 1730 cm^{-1} está asociado al enlace éster $\text{C}=\text{O}$ (101), en el rango $3250\text{--}3550\text{ cm}^{-1}$ los picos se asocian con las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H, y los picos entre $2850\text{--}2980\text{ cm}^{-1}$ se corresponden con las vibraciones de estiramiento de los grupos C-H (102). Los picos entre $1134\text{--}1290\text{ cm}^{-1}$ se asignan a la vibración de estiramiento simétrica y asimétrica C-O-C (éster aromático), y en 979 cm^{-1} , el pico está asociado al doble enlace $\text{C}=\text{C}$ (102).

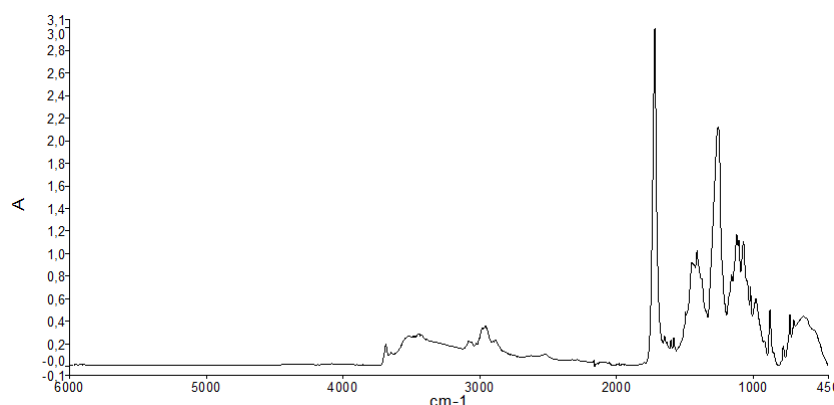


Figura 3.39. Espectro del top coat ortoftálico.

En la espectrometría de la muestra del catalizador del *top coat* ortoftálico (Figura 3.40), se observan picos asociados al PMEK (Peróxido de Metil Etil Cetona). Éste, es un catalizador típico de resinas de tipo poliéster. Los picos entre $800\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ se asignan al estiramiento del grupo peróxido $-\text{O}-\text{O}-$ (103). Los picos entre $1050\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ se pueden asociar con las vibraciones de estiramiento del grupo $-\text{C}-\text{O}-$, y los picos entre $1780\text{--}1805\text{ cm}^{-1}$ se corresponden con las vibraciones de estiramiento del grupo $-\text{C}=\text{O}$ (103).

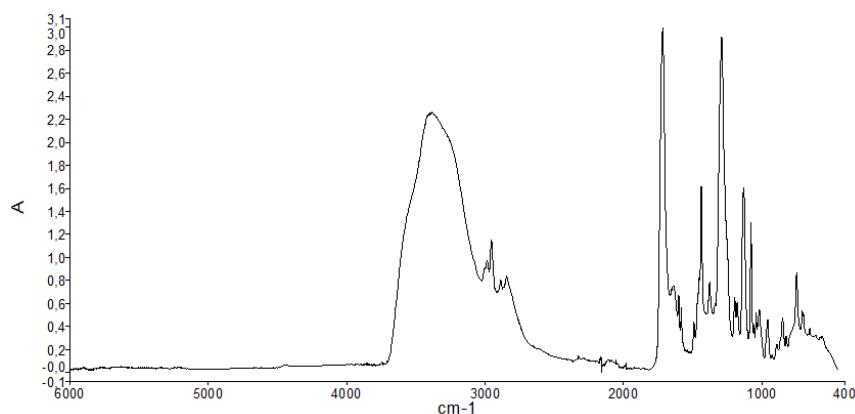


Figura 3.40. Espectro del catalizador del top coat ortoftálico.

En la espectrometría de las muestras del sistema epoxi luego de 3 minutos y curado 7 días a T_{ambiente} (Figura 3.41), se observan picos asociados al curado de las resinas epoxi. Diversos investigadores utilizan el pico entre $910\text{--}916\text{ cm}^{-1}$ para hacer evaluaciones del curado de las resinas epoxi (104; 105), y los picos entre $3055\text{--}3060\text{ cm}^{-1}$ (106; 107).

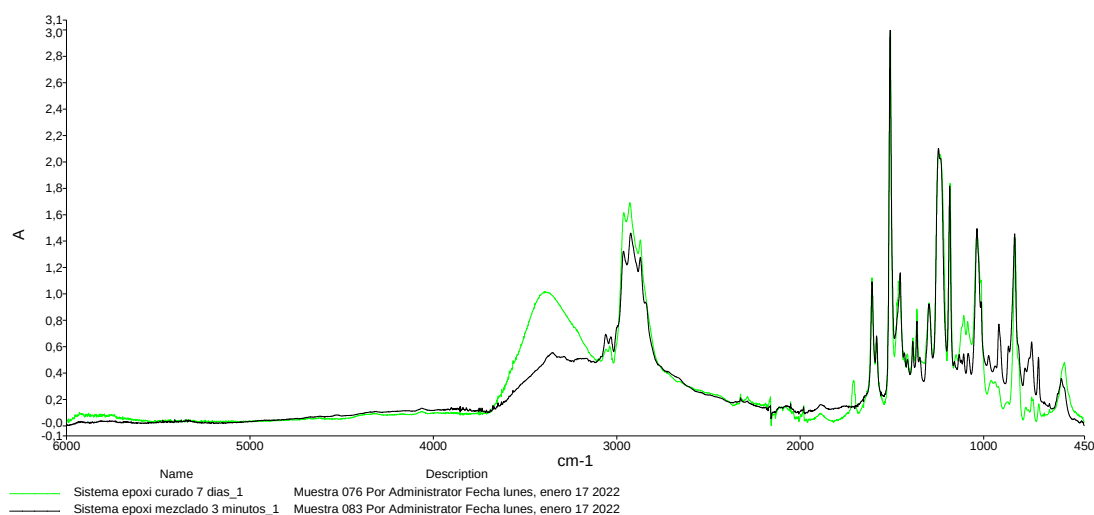


Figura 3.41. Espectros del sistema epoxi luego de 3 minutos, y luego de 7 días de curado a T_{ambiente} .

En la espectrometría de la muestra de PLA luego de su extrusión en impresora 3D (Figura 3.42), se observa una banda asociada al enlace $\text{C}=\text{O}$ en $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$, que es sensible a modificaciones morfológicas y representa la reestructuración de la cadena de PLA durante la impresión 3D. Las dos bandas en ~ 867 y $\sim 755\text{ cm}^{-1}$ se pueden atribuir a las fases amorfa y cristalina de PLA respectivamente (108).

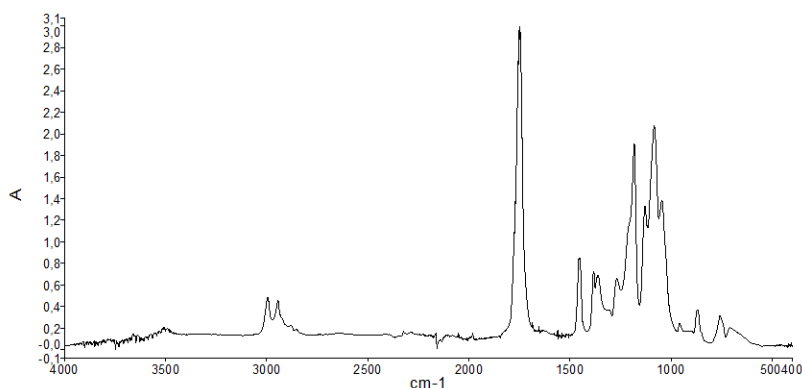


Figura 3.42. Espectro del PLA extruido.

3.5.5 DSC

El primer lote de muestras realizadas, una vez curadas bajo distintos tratamientos térmicos, se mantuvieron a temperatura ambiente hasta la fecha de realización del ensayo. Luego, en el ensayo se observaron picos endotérmicos que enmascaraban la T_g en todas las muestras. Por ello, se decidió realizar nuevas muestras tomando los recaudos necesarios respecto al resguardo de las mismas hasta la fecha de realización del ensayo, y se utilizaron otros hornos para realizar el curado de las muestras a temperatura. Así el segundo lote, se realizó curando algunas muestras a temperatura ambiente y colocándolas bajo vacío hasta la fecha de realización del ensayo (109), y otras, se curaron a distintas temperaturas en hornos y se mantuvieron en el freezer hasta el día del ensayo (88).

En la Figura 3.43, se observan las curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a $T_{\text{ambiente}}-7$ días y $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs, donde se destaca la presencia de picos endotérmicos; y en la Tabla 38 se observan los valores de la entalpía de relajación. Debido a que dichos picos enmascaraban el valor de la T_g en el primer barrido, se les realizó un segundo barrido borrando el historial térmico de las muestras.

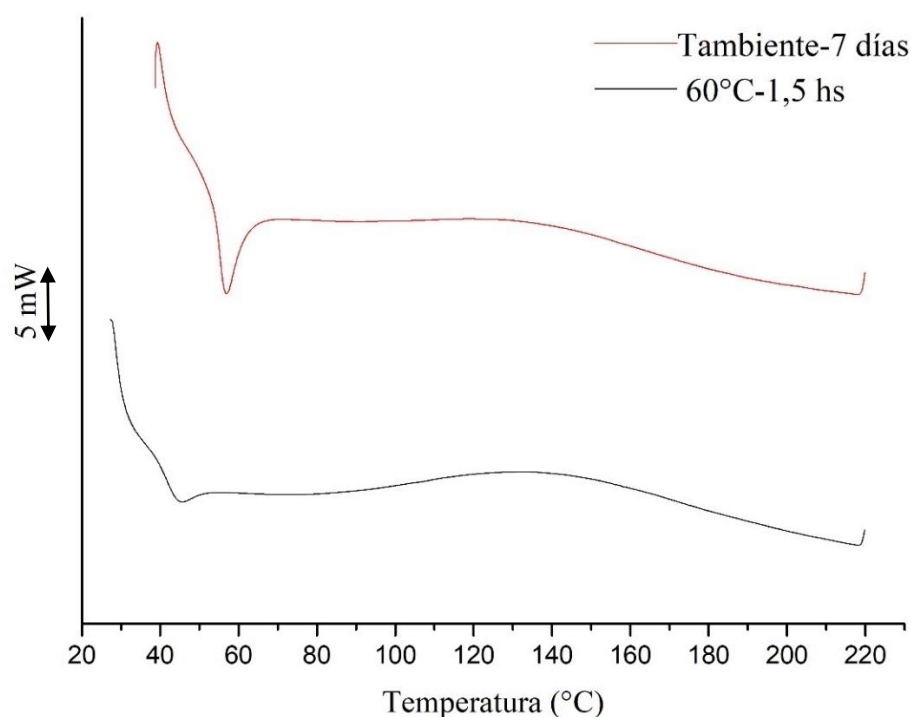


Figura 3.43. Curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a $T_{\text{ambiente}}-7$ días y $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs.

Muestra	Entalpía de relajación (J/g)	T_{pico} ($^{\circ}\text{C}$)
$60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs	- 3,27	45,70
$T_{\text{amb}}-7$ días	-5,91	56,90

Tabla 38. Entalpía de relajación de muestras curadas a $T_{\text{ambiente}}-7$ días y $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs.

En la Figura 3.44, se observan las curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a distintas temperaturas. A excepción de las curvas DSC de las muestras curadas a $T_{\text{ambiente}}-7$ días y a $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs, todas las curvas son resultado de un primer barrido. Los valores de T_g relevados bajo distintos criterios se detallan en la Tabla 39.

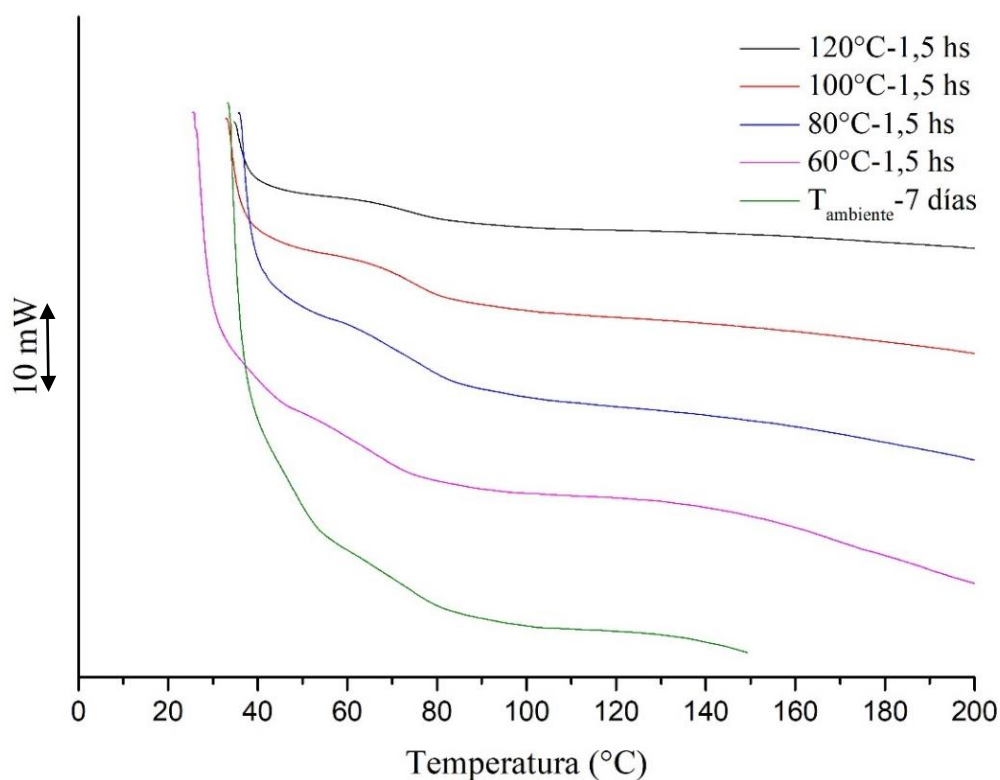


Figura 3.44. Curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a T_{ambiente} -7 días, 60°C-1,5 hs, 80°C-1,5 hs, 100°C-1,5 hs y 120°C-1,5 hs.

Tratamiento térmico	Tg onset (°C)	Tg derivada primera (°C)	Tg mid point (°C)
120°C-1,5 hs	65,00	73,91	75,24
100°C-1,5 hs	69,51	76,16	76,62
80°C-1,5 hs	60,18	63,30	66,78
60°C-1,5 hs	41,92	44,76	46,41
T_{amb} -7 días	47,78	49,98	51,34

Tabla 39. Valores de Tg relevados bajo distintos criterios.

En la Tabla 40, se observan los porcentajes de curado obtenidos por diferentes métodos, y en la Figura 3.45, se observan las curvas DSC luego de un primer barrido. Nótese que temperatura de degradación del sistema epoxi se encuentra entre 218°C -220°C aproximadamente.

Tratamiento térmico	% Curado con línea de base Origin®	% Curado con método de Bandara
120°C-1,5 hs	≈100	≈100
100°C-1,5 hs	≈100	≈100
80°C-1,5 hs	92,92	94,78
60°C-1,5 hs	65,10	89,60
T_{amb} -7 días	84,34	-
Sist.epoxi 0 min	0	0

Tabla 40. Porcentajes de curado.

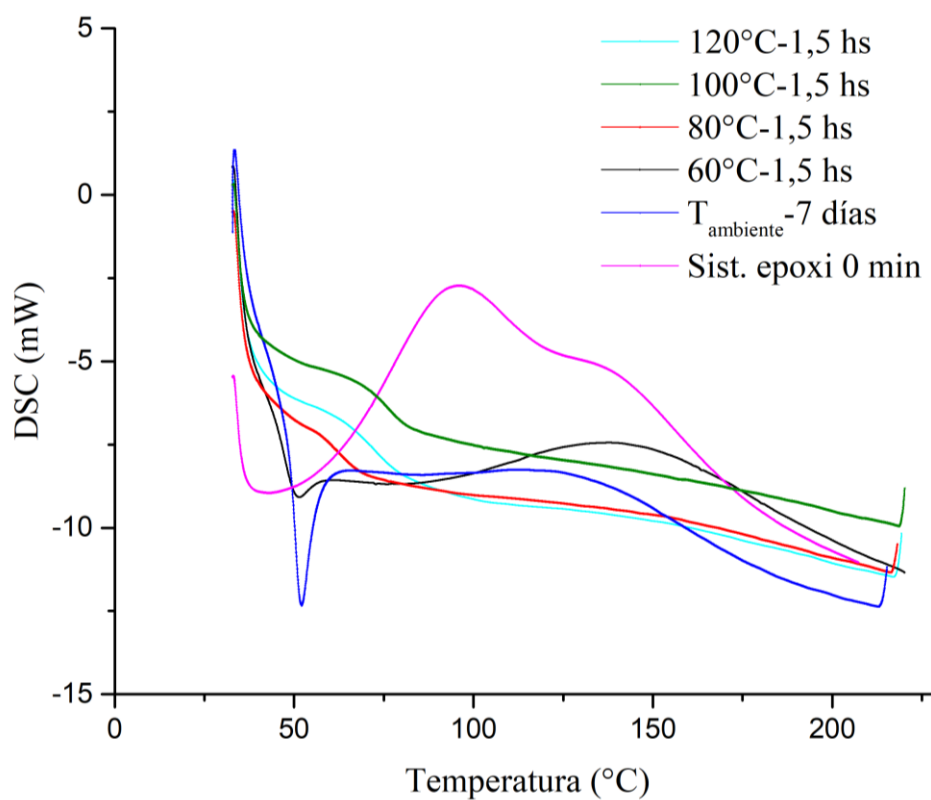


Figura 3.45. Curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a $T_{\text{ambiente}}-7$ días, $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs, $80^{\circ}\text{C}-1,5$ hs, $100^{\circ}\text{C}-1,5$ hs y $120^{\circ}\text{C}-1,5$ hs; y muestra del sistema epoxi a tiempo 0.

Finalmente, en la Tabla 41 se observan los valores registrados de Tg_{∞} bajo el criterio de Tg_{onset} .

Tratamiento térmico	$Tg_{\text{onset}} (^{\circ}\text{C})$
$120^{\circ}\text{C}-1,5$ hs	65,00
$100^{\circ}\text{C}-1,5$ hs	69,51
Valor Tg_{∞}	$67 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Tabla 41. Valores de Tg_{∞} .

4 Discusión

4.1 Simulaciones para obtener los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius

Los fenómenos observados experimentalmente por Fujisawa & Shirai (8), es decir, puntos de remanso, cómo varía el ancho de la estela, el desprendimiento de la capa límite y el desarrollo de vórtices (Figura 1.3); coinciden con lo observado en las simulaciones. En la Figura 4.1, se destacan algunos ejemplos, donde los puntos de remanso se visualizan como puntos donde la velocidad es nula y la presión es máxima; y los vórtices son zonas donde la presión forma un mínimo local, la velocidad es alta alrededor del mismo y en su centro la velocidad resulta nula (110).

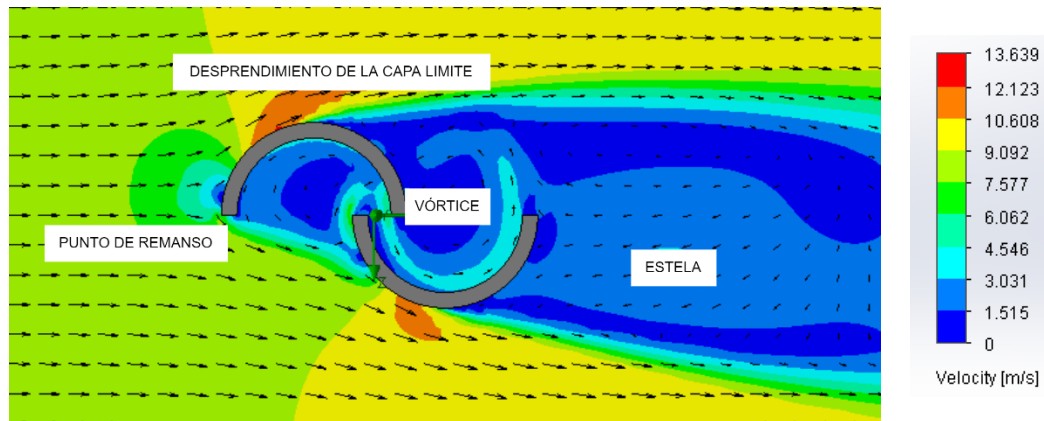


Figura 4.1. Fenómenos observados en las simulaciones para un ángulo de rotor de 0°.

Esto podría explicar las diferencias observadas entre los coeficientes de presión obtenidos mediante las simulaciones y los obtenidos experimentalmente por Kamoij et.al., ya que los parámetros de simulación no lograron reproducir estos fenómenos. Para mejorar dichos parámetros, se requiere gran capacidad de cálculo que al momento de realizar las simulaciones no estaba disponible. Principalmente, se debe modificar el mallado y el dominio computacional (10), con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados en los puntos de presión. Asimismo, en relación con las simulaciones CFD, éstas emplean modelos de turbulencia para predecir los efectos de los flujos turbulentos, por tanto, la selección del modelo correcto es parte fundamental de la obtención de resultados satisfactorios. Según lo estudiado en el año 2013 por Nasef et al.³⁰ el modelo de turbulencia SST $\kappa-\omega$ es el más adecuado para simular el comportamiento y patrón del flujo alrededor de un aerogenerador Savonius, tanto para simulaciones estáticas como dinámicas (10). Sin embargo, Flow Simulation® emplea el modelo modificado de turbulencia k- ϵ con funciones de amortiguación, propuesto por Lam y Bremhorst en 1981, el cual describe flujos laminares, turbulentos y transición de fluidos homogéneos (111).

Las mayores diferencias entre resultados se observan para el ángulo de rotor de 0°, tal como se muestra en las Figura 4.2 y Figura 4.3. Estas diferencias entre coeficientes de presión influyen en el cálculo de los sucesivos coeficientes. No obstante, los coeficientes hallados en general, exhibieron tendencias similares y órdenes de magnitud comparables con los resultados obtenidos experimentalmente por Kamoji et.al.

³⁰ Estos investigadores estudiaron un aerogenerador Savonius en condiciones estáticas y dinámicas, simulando el comportamiento del flujo para distintas relaciones de superposición de los álabes (0,00, 0,15, 0,20, 0,30 y 0,50) y utilizando cuatro modelos de turbulencia en el software ANSYS Fluent: $\kappa-\epsilon$ estándar, $\kappa-\epsilon$ de grupo de renormalización (RNG, por sus siglas en inglés: Renormalization Group), $\kappa-\epsilon$ realizable, $\kappa-\omega$ de transporte de esfuerzo cortante (SST, por sus siglas en inglés: Shear Stress Transport). Los resultados de los modelos fueron comparados con valores experimentales publicados en otros artículos, y de esta manera, seleccionaron el modelo más adecuado (10).

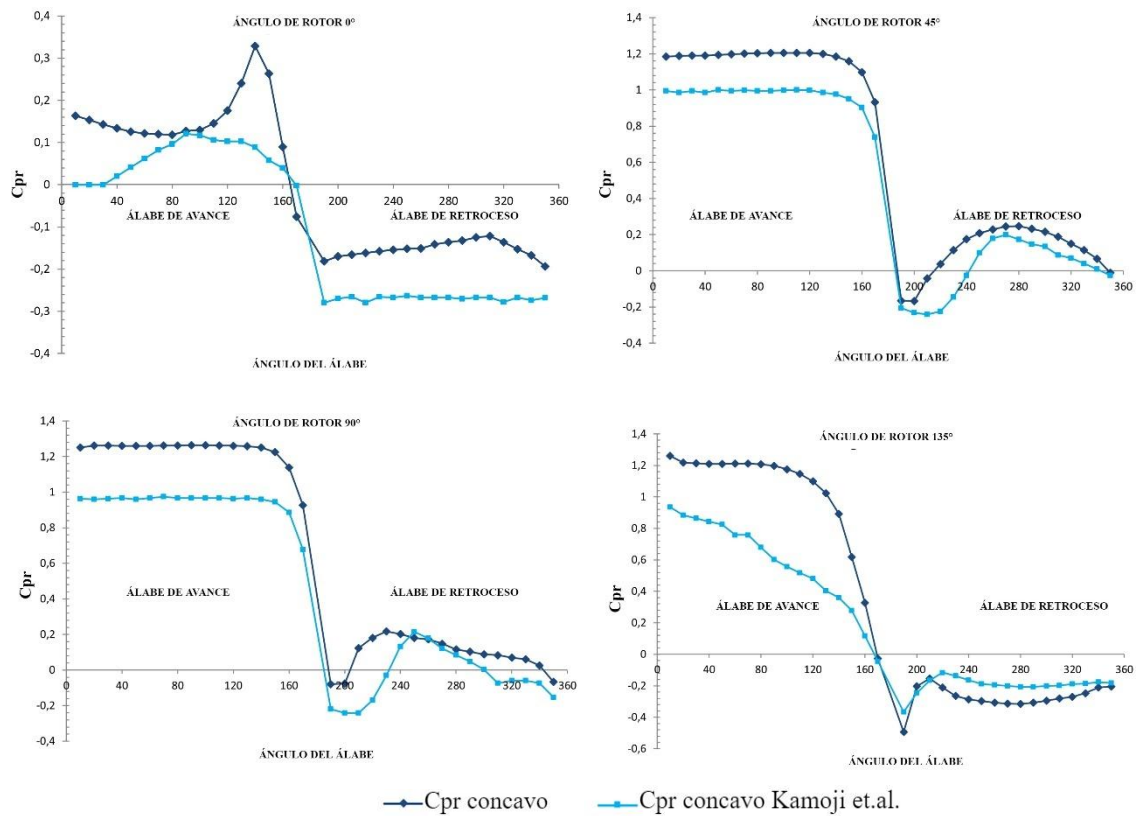


Figura 4.2. Coeficientes de presión en la superficie cóncava de los álabes.

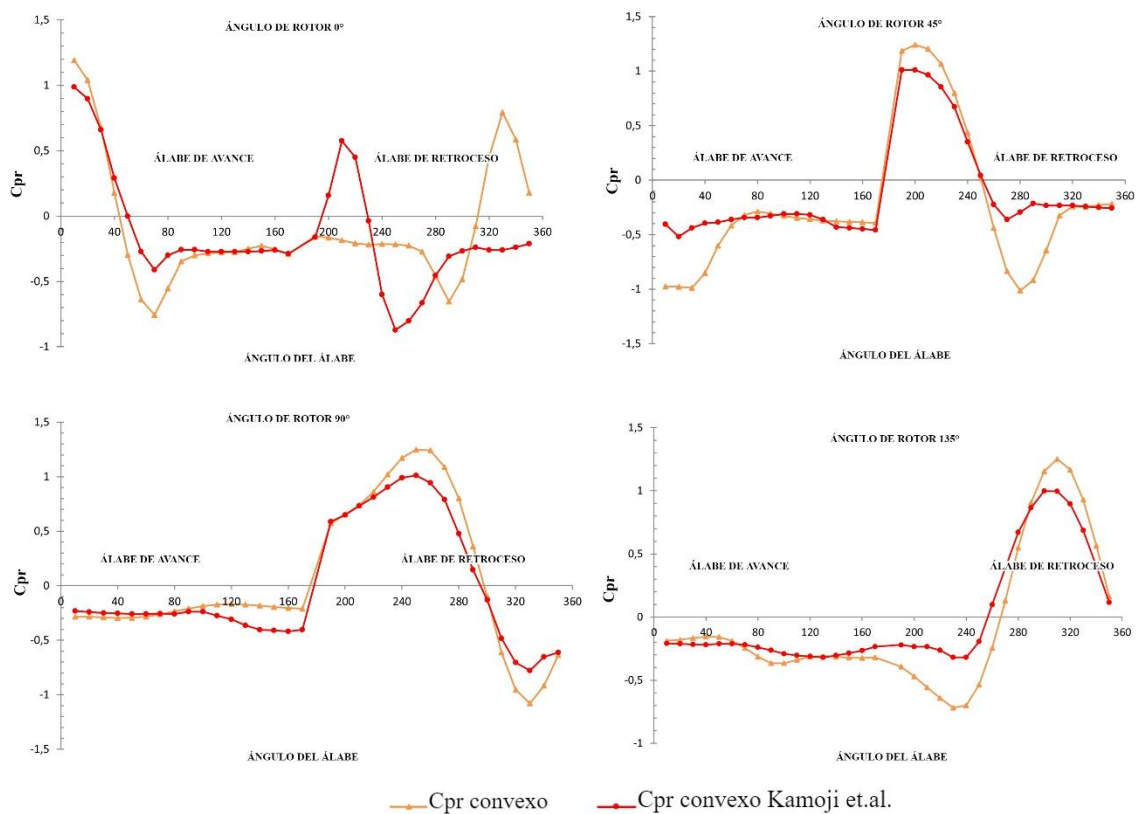


Figura 4.3. Coeficientes de presión en la superficie convexa de los álabes.

Finalmente, en la Figura 3.4 los valores de los coeficientes estáticos de torque negativos o cercanos a cero, podrían implicar una capacidad de arranque automático muy pobre (37), mientras que los coeficientes estáticos de torque positivos, podrían indicar que el rotor puede iniciar en esa posición angular (38).

4.2 Simulaciones de materiales

En los resultados de las simulaciones las zonas rojas, donde las tensiones se hacen máximas, y las zonas azules, donde las tensiones se hacen mínimas, aparecen por una inestabilidad de la malla en el área donde se aplicó una condición de empotramiento. Por ello, los resultados cercanos a dicha zona no son fiables. Estas condiciones de empotramiento se establecieron durante el mallado del modelo para agrupar los componentes y que el modelo sea interpretado como un todo, y con el objetivo de establecer la peor condición posible. Sin embargo, el aerogenerador una vez construido incorporará:

- ensambles, tornillos y adhesivos para la unión entre las tapas y los álabes
- una estructura soporte y un eje para el montaje final

Por lo que esta zona estará fuertemente rigidizada y podría no verse sometida al estado tensional que se muestra en la simulación, razón por la cual las tensiones máximas y mínimas en estas zonas se descartaron (48).

Asimismo, de acuerdo al criterio de falla de máximas tensiones, se puede observar en todas las simulaciones que no se producirá falla por esfuerzos de tracción, compresión ó corte, ya que dichos valores se encuentran dentro de las tensiones límites admisibles.

Respecto a los resultados analizados bajo el criterio de falla de Tsai-Wu, se observa que el material de los álabes falla en el caso del modelo a escala, donde se aplica una fuerza de 9806,6 N. El material falla en $tw(1)$, es decir, en la capa 1. Incluso tomando como criterio de seguridad $IRF > 0,9$, es decir, dejando un 10% de margen para ser conservativos, el material continúa fallando en $tw(1)$ en la misma zona. Sin embargo, como analizamos anteriormente, estas áreas no son representativas del componente ya que aparecen por la condición de empotramiento, y esta condición está lejos de representar la realidad. El aerogenerador una vez construido, empleará ensambles, adhesivos, tornillos, una estructura soporte y un eje, para la unión de todos los componentes, por lo que se podría estimar que el material no fallará.

Finalmente, se debe tener en cuenta que estas simulaciones se realizaron con el objetivo de obtener un punto de partida para sentar las bases de un proceso de diseño que requiere de retroalimentación a través de la caracterización del material compuesto, y demanda conocer las condiciones de contorno del sitio de emplazamiento del dispositivo. Asimismo, dentro de las limitaciones de las simulaciones, se debe mencionar que no se añadieron las propiedades mínimas del material fabricado (en el caso de un tejido biaxial, se requiere caracterizar la tensión de rotura y el módulo de Young en la dirección 1 como mínimo. El resto de los datos necesarios pueden obtenerse de bibliografía), no se incorporaron los ensambles, adhesivos, tornillos, eje y estructura soporte, y no se contemplaron las cargas dinámicas a las que está sometido el aerogenerador durante su rotación. Por ello, estos resultados no son concluyentes respecto del comportamiento del material, y no se puede validar el diseño. Sin embargo, se destaca que a través de estas simulaciones se puede comprender la respuesta estructural del dispositivo y mejorar la vinculación entre componentes.

4.3 Fabricación de los álabes

4.3.1 Laminación

Los mejores resultados se obtuvieron con el procedimiento realizado en la laminación del álabe 2. Sin embargo, la superficie del álabe continuó exhibiendo imperfecciones. Ello determina la necesidad de modificar el proceso de laminación haciendo uso de un molde macho y hembra, con el objetivo de obtener una sección transversal constante.

4.3.2 Terminación superficial

El procedimiento propuesto para realizar la terminación superficial de los álabes, en general, no obtuvo buenos resultados. La recomendación principal es modificar el proceso de laminación utilizando un molde macho y hembra, para obtener una superficie más homogénea en el laminado, y realizar así una aplicación directa del sistema *top coat*. Asimismo, en la Tabla 42, se enumeran sus posibles causas de los problemas identificados posteriores a la aplicación del *top coat*.

Problema	Causas
Flujo y nivelación deficientes	Viscosidad alta del <i>top coat</i> , baja temperatura de trabajo.
Agrietamiento	<i>Top coat</i> demasiado espeso.
Orificios/porosidad	Solvente atrapado (agregamos acetona para diluirlo), contaminación por partículas extrañas, cantidad de catalizador inadecuado, <i>Top coat</i> demasiado espeso, tiempo de gel corto, baja temperatura de trabajo.

Tabla 42. Problemas identificados posteriores a la aplicación del *top coat*, y sus posibles causas (29).

4.4 Ensamble del aerogenerador

La elección del mejor diseño de ensamble, se basó en las observaciones durante las pruebas de adhesión, luego del curado del adhesivo, y en la inspección visual de los cortes transversales. El mejor diseño fue el segundo, ya que reunió las siguientes características:

- Los orificios con adhesivo funcionan como anclaje mecánico y químico de los álabes;
- La cuña simétrica maximiza la superficie de contacto con el adhesivo sobre ambas superficies del álabe;
- La guía permite mantener el álabe a 90° respecto de la horizontal, durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural;
- La ranura de encastre adaptada al espesor del álabe, permite mantener el álabe a 90° respecto de la horizontal durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural;
- Mejoras en el procedimiento de aplicación: la incorporación de diques de contención del adhesivo permitió un adecuado relleno del ensamble, la limpieza exhaustiva ahorró tiempo y costo de mecanizado, y el menisco le otorgó una transición suave entre los componentes vinculados disminuyendo la concentración de tensiones.

Sin embargo, la vinculación final se llevó a cabo entre el álabe y el tercer diseño, en el cual se redujeron la cantidad de orificios de ingreso y se eliminaron los orificios de desagote del adhesivo, con el objetivo de disminuir los concentradores de tensiones en la pieza y mejorar las prestaciones mecánicas del ensamble.

4.5 Técnicas experimentales

4.5.1 Viscosidad

Teniendo en cuenta una temperatura promedio de 26,87 °C durante el ensayo, y utilizando la tabla de viscosidades provistas por el fabricante de la resina epoxi, se observa que la viscosidad coincide con los valores hallados (8921,67 mPas), como se observa en la Figura 3.23. Asimismo, la viscosidad de la resina epoxi coincide con los valores de una resina utilizada para laminación manual identificada a partir de KnowItAll®. Finalmente, según los datos del fabricante, una vez realizada la mezcla disminuye la viscosidad del sistema. Esto permitió realizar sin dificultades los procesos de laminación manual de las probetas para el ensayo de tracción y la fabricación de los álabes. Sin embargo, se observó falta de impregnación en algunas probetas mediante microscopía óptica, hecho que refuerza la

importancia de tener valores de viscosidad de mezcla menores a 1500 mPas, según lo desarrollado en selección de materiales en la Tabla 8.

4.5.2 Ensayo de tracción

Las curvas de tensión-desplazamiento muestran un comportamiento elástico-lineal hasta rotura, lo que se corresponde con el comportamiento de este tipo de materiales (112). Asimismo, los valores de tensión obtenidos coinciden con los reportados por Reis et.al. en cuanto a los órdenes de magnitud, para polímeros reforzados con fibra de vidrio (113).

Las probetas impregnadas presentaron valores más homogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 155,84 MPa y un coeficiente de variación de un 6,65%. En comparación con las probetas con falta de impregnación, esto podría indicar que contienen menor cantidad de defectos (poros, exceso de resina, etc.) debido al bajo coeficiente de variación, hecho que además se podría relacionar con lo observado mediante microscopía óptica (se analizará a continuación). Asimismo, el valor promedio de tensión de rotura es más alto, por lo que se podría indicar que estas probetas presentan mejores prestaciones mecánicas.

Las probetas con falta de impregnación presentaron valores más heterogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 141,52 MPa y un coeficiente de variación de un 10,65%, lo que podría implicar una menor uniformidad en el laminado y que el mismo se generó de manera incorrecta.

Finalmente, las probetas con tratamiento térmico de post curado presentaron valores más homogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 184,23 MPa y un coeficiente de variación de un 5,84%. Respecto a las probetas impregnadas curadas a temperatura ambiente, se observó un aumento de 28 MPa aproximadamente respecto a los valores promedio, lo que podría indicar que estas probetas presentan mejores prestaciones mecánicas.

4.5.3 Observaciones mediante microscopía óptica

Para estimar el contenido de fibra, resina y poros, se extrajeron dos muestras de cada laminado con el objetivo de que el resultado sea representativo. En la Tabla 23, se observan la cantidad de secciones analizadas para estimar el contenido de fibra y resina, y la cantidad de imágenes analizadas para estimar el contenido de poros.

En las probetas con falta de impregnación, se estimó un contenido de poros de 14,18%, y en las probetas impregnadas 1,96%. Estos valores coinciden con los reportados por Mehdikhani et.al. y Abdelal et.al. Según estos autores, un alto contenido de poros disminuye las propiedades mecánicas (114; 115), lo cual se podría asociar con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción donde las probetas con falta de impregnación exhibieron un valor promedio de tensión de rotura menor en comparación con las probetas impregnadas. Debido a que ambas probetas se extrajeron del mismo laminado, el alto contenido de poros se podría explicar debido a la pérdida parcial o total de vacío (115) en un sector del laminado, ya que la cinta de sellado de la bolsa de vacío se encontraba por fuera de la fecha de vencimiento. Por otra parte, en los retazos de los álabes, se estimó un bajo contenido de poros (3,16%). A modo de ejemplificar el tamaño y cantidad de poros observados, en la Figura 3.36 se muestra que las probetas con falta de impregnación son las más afectadas, seguidas por las probetas impregnadas y por los retazos de los álabes.

EL-Wazerya et. al. estudiaron cómo variaban las propiedades mecánicas de un material compuesto en función del contenido de fibra, demostrando que a medida que aumenta mejoran las propiedades, y estableciendo que el contenido óptimo es del 60% (116). Mas allá de este valor, entre 70% y 80%, se observa una disminución de las propiedades mecánicas debido a que se torna insuficiente la cantidad de matriz para humectar las fibras, lo que conduce a una falta de unión y falla prematura del material compuesto a causa de la tensión de corte entre láminas (117). En las probetas impregnadas, el contenido de fibra es más alto que en las probetas con falta de impregnación (52,02% y 46,20% respectivamente), lo que se podría asociar con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción. En

cambio, los retazos de los álabes presentan un contenido de resina alto (68,39%), lo que podría explicarse debido a la falta de utilización de film perforado durante la fabricación, el cual evita el exceso de resina.

Al comparar las Figura 3.33 y Figura 3.34, se puede observar que las probetas presentan una morfología compuesta por empaquetamientos aislados de fibra con cierta distancia entre sí, en comparación con los retazos de los álabes, que poseen paquetes de fibra con una distribución más homogénea y con menor distancia entre sí (Figura 3.35). En todos los laminados, estos empaquetamientos de fibras se corresponden con la secuencia de apilamiento $[0^\circ, 90^\circ/+45^\circ, -45^\circ]_s$ con la cual se fabricaron, y todos presentan un límite inferior “recto” en la zona que copia la matriz de laminación (rectangular en el caso de las probetas y tubular en el caso del laminado de álabes). En cambio, los límites superiores presentan irregularidades en la superficie. En el caso de las probetas, se observan picos que podrían explicarse por el uso de *peel ply*, y en el caso de los retazos de los álabes, ondulaciones. Estas ondulaciones macroscópicamente se aprecian como una baja calidad en la superficie de los álabes, lo que refuerza la idea de modificar el proceso de fabricación utilizando un molde macho y hembra.

4.5.4 FT-IR

4.5.4.1 Caracterización de la resina epoxi y endurecedor

Resina epoxi YD 128

En la espectrometría de la muestra de resina epoxi se observan picos asociados al grupo oxirano, 915 cm^{-1} asignado al estiramiento asimétrico del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del anillo oxirano, 970 cm^{-1} asignado al estiramiento del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del éter, y el pico a 760 cm^{-1} que se asigna a la vibración *rocking* del enlace CH_2 (118). También se asigna al anillo oxirano el pico de 863 cm^{-1} (119; 83).

Según la hoja de seguridad, la resina epoxi está compuesta por una resina de tipo DGEBA (Diglycidyl ether of bisphenol A). La estructura de la misma, se observa en la Figura 4.4. Los grupos éter en la molécula DGEBA están caracterizados por el pico en 1032 cm^{-1} ($-\text{O}-\text{CH}_2$). También aparece un pico de absorción a 1243 cm^{-1} y otro a 1296 cm^{-1} asociados al grupo (aromático-O- CH_2) y al enlace C-O, respectivamente (119; 83).

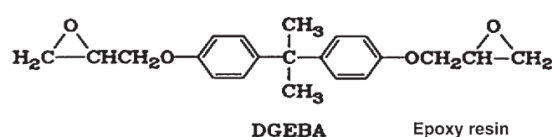


Figura 4.4. Estructura de una resina epoxi DGEBA.

El pico a 1132 cm^{-1} es asignado al estiramiento del enlace C-O-C del éter, y el pico a 1184 cm^{-1} se asigna al enlace C-O del anillo aromático en el DGEBA (120; 119; 83). La banda a 1508 cm^{-1} y 828 cm^{-1} puede ser asignada a los grupos p-fenilos (120), mientras que el pico a 1582 cm^{-1} y 1606 cm^{-1} se asignan al estiramiento del enlace C=C del anillo aromático del DGEBA (100; 119; 83). Los picos entre $2871\text{--}2967\text{ cm}^{-1}$ se asignan al estiramiento C-H del CH_2 y C-H aromático y alifático. El pico a 3060 cm^{-1} se puede asignar al estiramiento del enlace C-H del anillo oxirano (107; 120; 119). El ancho pico a 3500 cm^{-1} es asignado a grupos OH presentes en las resinas comerciales DGEBA, no como parte constitutiva de la molécula, sino como residuo del proceso productivo (83) (119).

En la Figura 4.5 y Figura 4.6 se observan los picos detallados anteriormente.

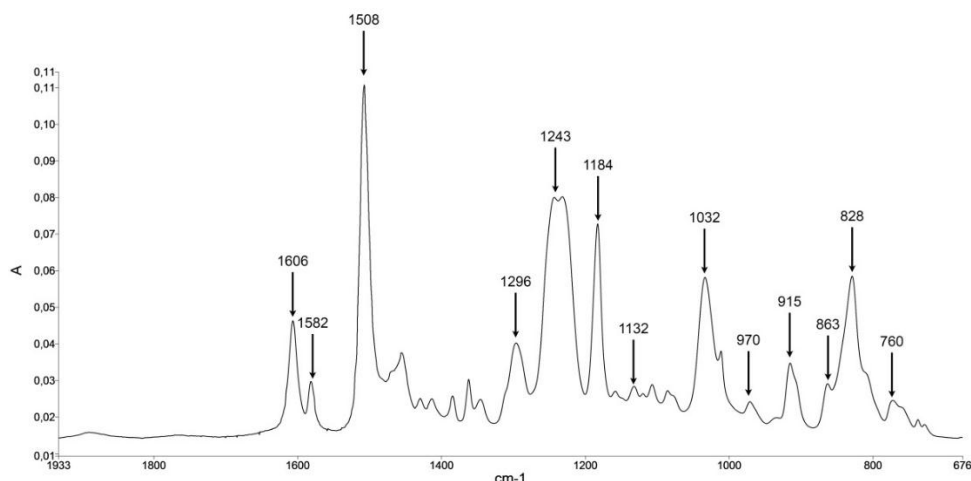


Figura 4.5. Espectro de la resina epoxi YD 128.

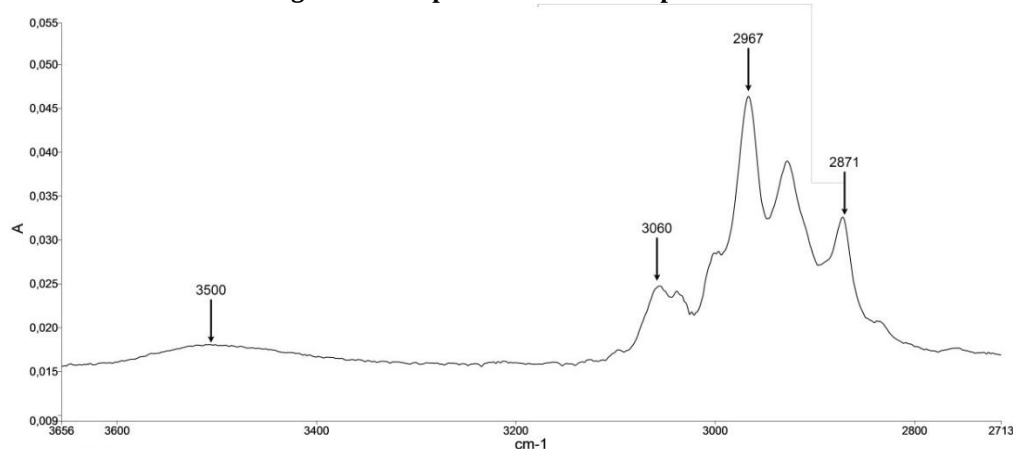


Figura 4.6. Espectro de la resina epoxi YD 128.

Endurecedor KH 816

Según la hoja de seguridad, el endurecedor está compuesto por isoforondiamina, entre otros. La estructura de la misma, se observa en la Figura 4.7.

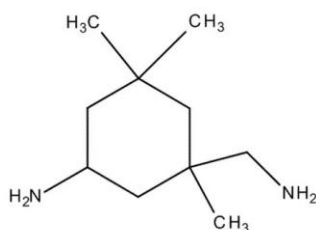


Figura 4.7. Estructura de la isoforondiamina.

En la espectrometría de la muestra se observan los picos 3172 cm⁻¹, 3283 cm⁻¹ y 3345 cm⁻¹ asociados al estiramiento del enlace N-H del grupo amina primaria (-NH₂) (100), mientras que los picos entre 1570-1650 cm⁻¹ se asocian a la flexión del enlace N-H del mismo grupo.

Los picos a 2839 cm⁻¹, 2899 cm⁻¹ y 2949 cm⁻¹ se pueden asociar al enlace C-H de los grupos alifáticos, metilo y metileno de la isoforondiamina. Los picos entre 1460-1477 cm⁻¹ y 1362-1384 cm⁻¹ se pueden asociar a los grupos CH₃-C (alifático).

En la Figura 4.8, se observan los picos detallados anteriormente.

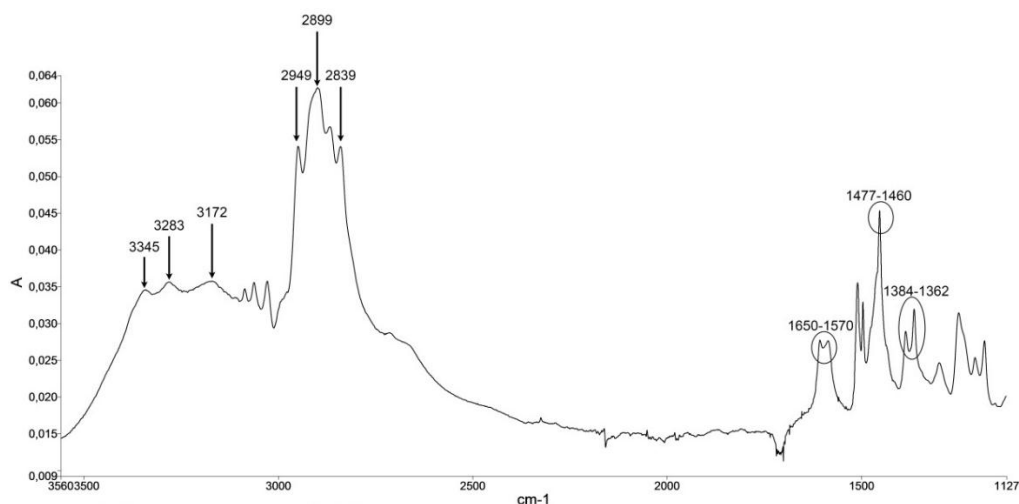


Figura 4.8. Espectro del endurecedor KH 816.

4.5.4.2 Caracterización del top coat y su catalizador

Top coat ortoftálico

En la espectrometría de la muestra del *top coat* ortoftálico se observan picos asociados a una resina de tipo poliéster insaturada. La estructura de una resina poliéster, se observa en la Figura 4.9.

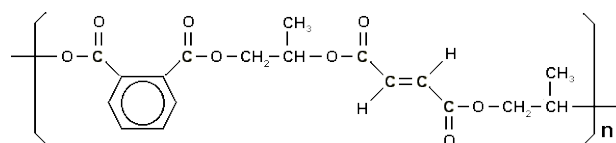


Figura 4.9. Estructura de una resina poliéster ortoftálica.

El pico 1730 cm^{-1} está asociado al enlace éster $\text{C}=\text{O}$ (101), en el rango $3250\text{--}3550\text{ cm}^{-1}$ los picos se asocian con las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H , y los picos entre $2850\text{--}2980\text{ cm}^{-1}$ se corresponden con las vibraciones de estiramiento de los grupos C-H como CH_2 y CH_3 (102). Los picos entre $1134\text{--}1290\text{ cm}^{-1}$ se asignan a la vibración de estiramiento simétrica y asimétrica C-O-C (éster aromático). Asimismo, entre $1072\text{--}1160\text{ cm}^{-1}$ los picos están asociados a las vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas C-O-C (éster alifático) (121). En 979 cm^{-1} , el pico está asociado al doble enlace $\text{C}=\text{C}$ (102).

En la Figura 4.10 y Figura 4.11, se observan los picos detallados anteriormente.

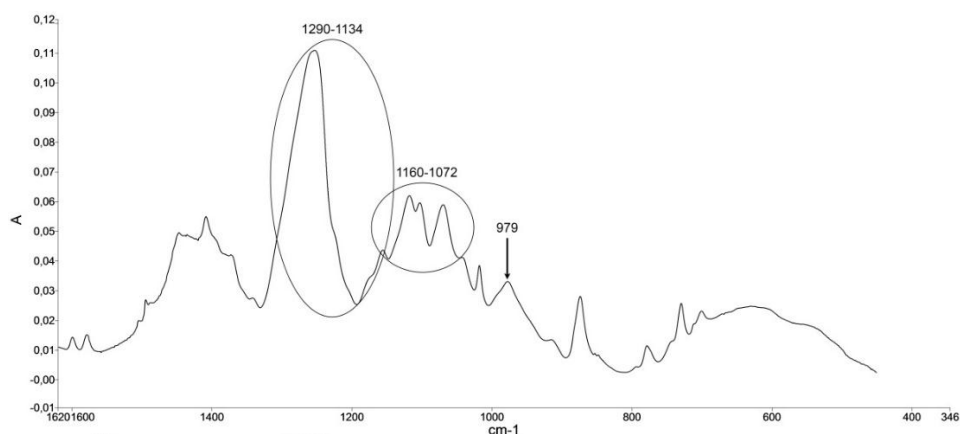


Figura 4.10. Espectro del *top coat* ortoftálico.

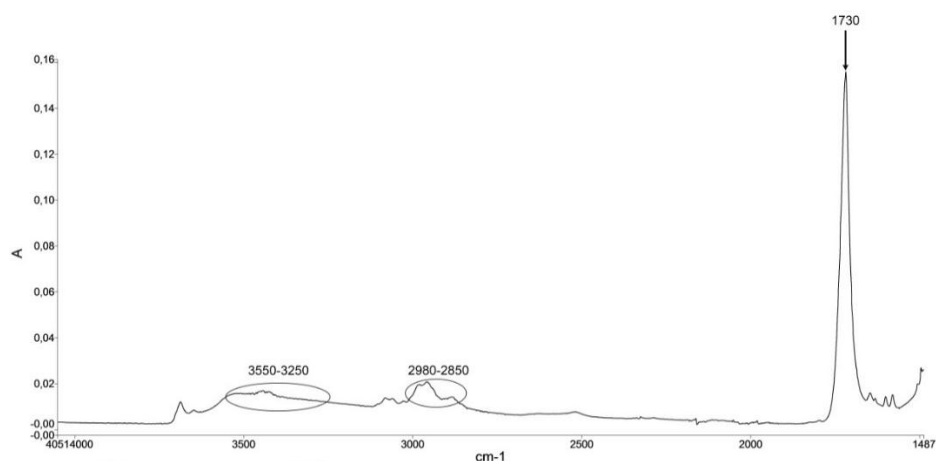


Figura 4.11. Espectro del top coat ortoftálico.

Catalizador del top coat ortoftálico

En la espectrometría de la muestra del catalizador del top coat, se observan picos asociados al PMEK (Peróxido de Metil Etil Cetona). Éste es un catalizador típico de resinas de tipo poliéster (122). En la Figura 4.12 se observa su estructura.

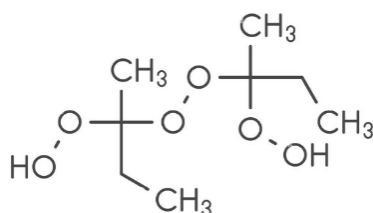


Figura 4.12. Estructura del PMEK.

Los picos entre 800-900 cm^{-1} se asignan al estiramiento del grupo peróxido $-\text{O}-\text{O}-$ (103). Asimismo, los picos en 1200 cm^{-1} , 1400 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} se corresponden con las vibraciones de estiramiento de los grupos C-H (123). Los picos entre 1050-1300 cm^{-1} se pueden asociar con las vibraciones de estiramiento del grupo $-\text{C}-\text{O}-$. Los picos entre 1780-1805 cm^{-1} se corresponden con las vibraciones de estiramiento del grupo $-\text{C}=\text{O}$, y la banda entre 3580-3200 cm^{-1} está asociada a los grupos O-H (103).

En la Figura 4.13, se observan los picos detallados anteriormente.

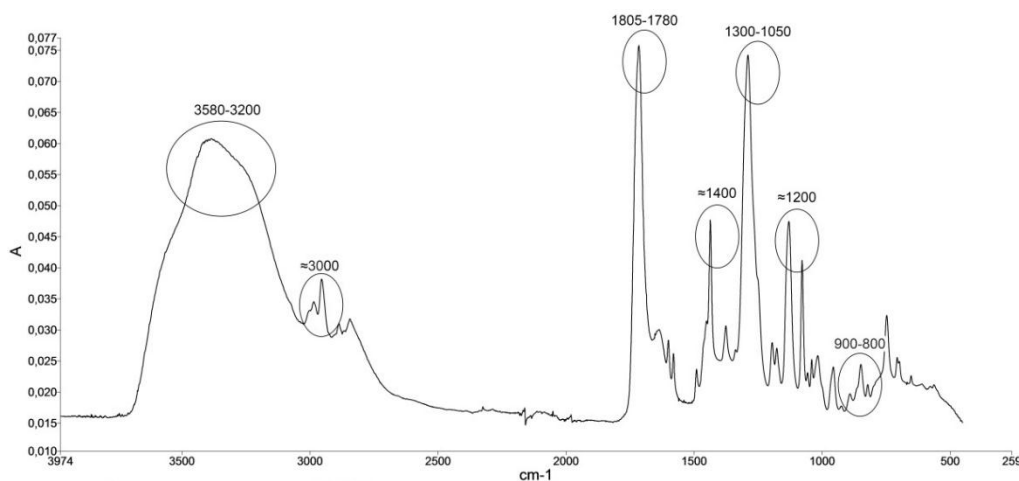


Figura 4.13. Espectro del catalizador del top coat ortoftálico.

4.5.4.3 Caracterización sistema epoxi

Varios investigadores utilizan el pico entre $910\text{-}916\text{ cm}^{-1}$ para hacer evaluaciones del curado de las resinas epoxi (104; 105), y los picos entre $3055\text{-}3060\text{ cm}^{-1}$ (106; 107). La desaparición de la banda a 915 cm^{-1} asociada con el anillo de oxirano, indica que la resina epoxi polimeriza (124), es decir, que los anillos epoxi reaccionan para formar enlaces éter. Además, el decrecimiento de los picos en 760 y 970 cm^{-1} también se asocia con la reacción de curado (118). Asimismo, el pico del grupo epoxi a 3060 cm^{-1} también disminuye durante la reticulación (106).

En la Figura 4.14 y Figura 4.15, se observan los picos detallados anteriormente.

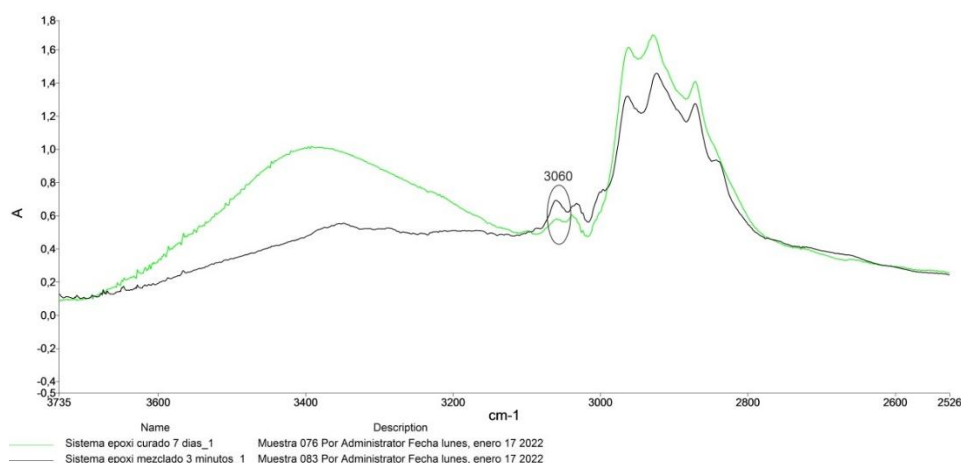


Figura 4.14. Espectro del sistema epoxi luego de 3 minutos, y luego de 7 días de curado a T_{ambiente} .

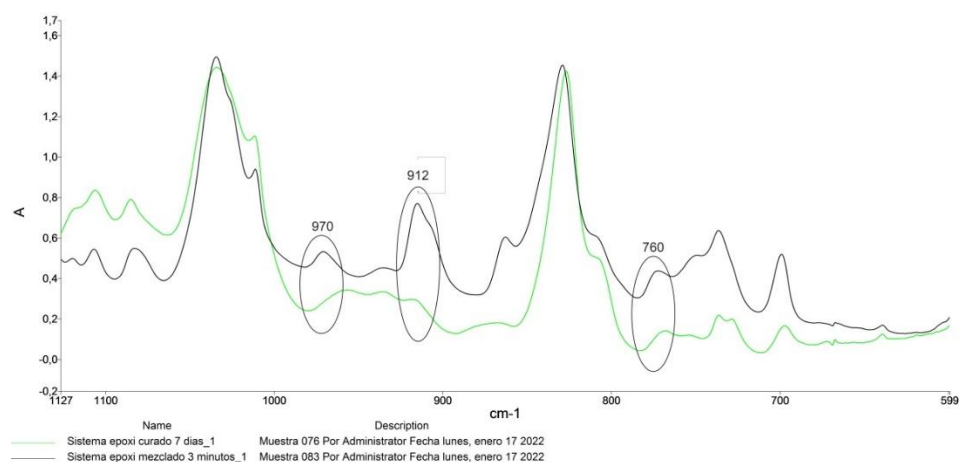


Figura 4.15. Espectro del sistema epoxi luego de 3 minutos, y luego de 7 días de curado a T_{ambiente} .

4.5.4.4 Caracterización del PLA

Unos de los componentes más frecuentes en la fabricación de filamentos de impresión 3D son los polímeros termoplásticos, entre los que destaca el ácido poliláctico (PLA). La estructura del PLA se observa en la Figura 4.16.

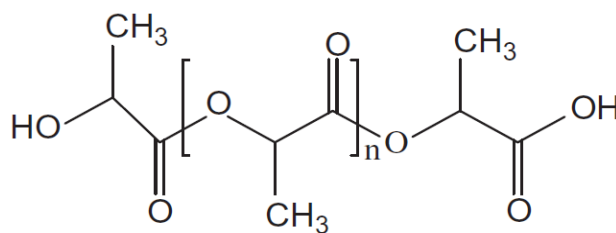


Figura 4.16. Estructura del PLA.

En la espectrometría de la muestra de PLA luego de extrusión en impresora 3D, se observan picos asociados con los modos de estiramiento C-H entre $2847\text{--}2998\text{ cm}^{-1}$, una banda de estiramiento C=O en $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$, el estiramiento simétrico del éster C-O- en 1183 cm^{-1} y un estiramiento asimétrico C-O-C- en $\sim 1072\text{ cm}^{-1}$ (108).

Las dos bandas en ~ 867 y $\sim 755\text{ cm}^{-1}$ se pueden atribuir a las fases amorfa y cristalina de PLA, respectivamente. Pop et.al. plantean que el índice de cristalinidad de PLA podría calcularse como la relación entre las áreas de las dos bandas A_{756}/A_{861} . Asimismo, la banda de estiramiento C=O en el PLA es sensible a modificaciones morfológicas que representan la reestructuración de la cadena de PLA durante la impresión 3D (108).

En la Figura 4.17, se observan los picos detallados anteriormente.

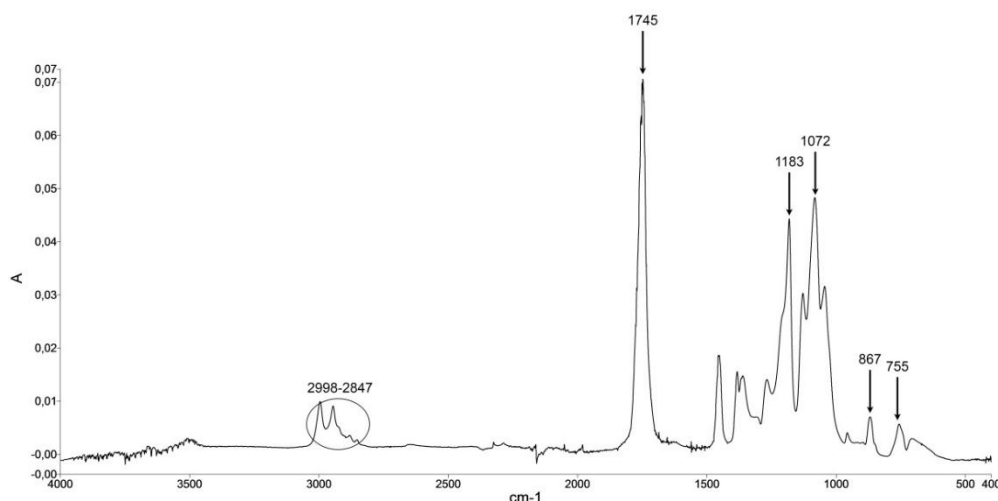


Figura 4.17. Espectro del PLA extruido.

4.5.5 DSC

El fenómeno de envejecimiento físico se observó con la aparición de picos endotérmicos (78; 81; 80), en las muestras curadas a 60°C -1,5 hs y T_{ambiente} -7 días, tal como se muestra en la Figura 3.43.

Diversos autores utilizan el criterio del *mid point* para relevar el valor de la T_g (83; 125; 126; 78). Sin embargo, se seleccionó la T_g onset tal como se describe en la guía para la certificación de aerogeneradores de Germanischer Lloyd, donde la T_g onset de la matriz y de los materiales de unión estructural debe ser superior a 65°C y también superior a la temperatura que se espera en el miembro estructural (93; 95). Este valor, marca el inicio del intervalo de temperatura en el que se produce la transición vítrea, donde las propiedades mecánicas del sistema son alteradas debido al aumento de la movilidad de las cadenas (94). Comparando los valores de T_g onset para los tratamientos térmicos realizados durante 1,5 hs, se puede observar en la Figura 3.44 y la Tabla 39, que a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico aumenta el valor de la T_g , tal como lo observan los autores Moranco y Salla (80). Si la temperatura de curado es lo suficientemente elevada, la reacción de curado continúa hasta conversión total, alcanzándose el máximo entrecruzamiento del termoestable.

En la Tabla 41 se observa el valor de la $T_{g\infty}$ promedio (84), calculada a partir de los tratamientos térmicos realizados a 100°C-1,5hs y 120°C-1,5 hs, en los cuales se alcanzaron porcentajes de curado total.

Asimismo, los valores de T_g onset relevados para los tratamientos térmicos realizados durante 1,5 hs, son coherentes con los porcentajes de curado obtenidos, tal como se observa en la Tabla 40 y la Figura 3.45, ya que a medida que aumenta el porcentaje de curado del material, mayor es el valor de la T_g (78; 80; 127). Además, comparando ambos métodos de obtención de porcentajes de curado, se pueden realizar las siguientes observaciones. En ambos métodos las muestras bajo tratamientos térmicos realizados a 100°C y 120°C se encuentran totalmente curadas. Esto se verificó a través de la gráfica de las derivadas primeras en Origin®, donde la pendiente de la derivada fue negativa, lo que determinó que no existe un pico exotérmico ya que debería observarse un cambio de pendiente. Los resultados de las derivadas fueron omitidos de los resultados por cuestiones de simplicidad. La muestra curada a 80°C en ambos métodos exhibió porcentajes de curado similares. Sin embargo, la muestra curada a 60°C exhibió porcentajes de curado diferentes. En este caso, se tomó como representativo el porcentaje obtenido mediante el método de Bandara, ya que el método de la línea de base en Origin® toma como línea de base una recta y esto hace que el $AH_{residual}$ sea más grande subestimando así el porcentaje de curado. Finalmente, la muestra a $T_{ambiente}$ no pudo ser procesada con el método de Bandara, ya que se produjeron inconvenientes técnicos durante el relevamiento de los resultados del ensayo DSC en el segundo barrido. Sin embargo, mediante el método de la línea de base en Origin® se estimó un porcentaje de curado a partir del primer barrido, destacando que se esperaría obtener un porcentaje de curado aún mayor mediante el método de Bandara. Todo ello según lo observado en la muestra curada a 60°C, donde la T_g onset es de 41,92°C y el porcentaje de curado es de 89,60%, lo que podría indicar que en la muestra a $T_{ambiente}$ con una T_g onset 47,78°C debería ser mayor el porcentaje de curado obtenido por el método de Bandara.

En la curva DSC del sistema epoxi a tiempo cero, se observan dos picos exotérmicos. Esto coincide con lo investigado por Cruz-Cruz et.al., los cuales establecen que una curva con dos picos exotérmicos expresa la convolución de dos reacciones diferentes. Ambas reacciones ocurren casi simultáneamente, la reacción 1 asociada al pico 1, y la reacción 2 asociada al pico 2. Sin embargo, la reacción 1 es más rápida que la reacción 2. Con base en la contribución relativa de cada reacción al proceso de curado total, la reacción 1 podría estar relacionada con el consumo de aditivo (o modificador) incluido en la resina epoxi modificada, mientras que la reacción 2 incluye el aporte de la apertura del anillo de oxirano y las reacciones posteriores (128). Por ello, debido a que el fabricante del sistema epoxi no ofrece información completa respecto de la composición química del endurecedor, se podría inferir que este producto posee algún componente que está generando la aparición de estos dos picos exotérmicos.

La muestra realizada según las recomendaciones de curado establecidas por el fabricante de la resina epoxi ($T_{ambiente}$ -7 días), registró un valor de T_g onset y un porcentaje de curado parcial más alto que el obtenido para 60°C-1,5 hs. En la fabricación de los álabes, se utilizaron estas condiciones. Sin embargo, este tratamiento en conjunto con los realizados a 60°C-1,5hs y 80°C-1,5hs, no cumplen con el valor de T_g establecido por los estándares Germanischer Lloyd (T_g onset >65°C). En este caso se plantea la necesidad de realizar tratamientos de post curado por encima de la $T_{g\infty}$ (67±2°C) durante cierto tiempo ó extender los tiempos de los tratamientos térmicos para aumentar la T_g . Finalmente, los tratamientos térmicos realizados a 100°C-1,5 hs y 120°C-1,5 hs cumplen con los estándares.

5 Conclusiones

A partir de este trabajo, se adquirió experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores, se desarrollaron las capacidades del Laboratorio Perfil Alar y la División de Materiales Avanzados, y se realizó la puesta a punto del equipamiento utilizado. A continuación, se destacan las conclusiones en relación a los ejes principales del trabajo.

5.1 Simulaciones de un aerogenerador Savonius

Con el método de cálculo propuesto por diversos autores, se hallaron los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius mediante simulaciones en Flow Simulation®, y se compararon con los resultados experimentales de Kamoji et.al. Los coeficientes hallados, en general, exhibieron tendencias similares y órdenes de magnitud comparables con los resultados experimentales de Kamoji et.al. Las diferencias observadas podrían reducirse con el ajuste de los parámetros de simulación, modificando las condiciones de mallado y dominio computacional principalmente, con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados en los puntos de presión, ya que con estos valores se calculan los sucesivos coeficientes. Finalmente, a partir del coeficiente estático de torque, se puede evaluar si el rotor puede iniciar la rotación en esa posición angular.

En las simulaciones de materiales en Ansys Composite PrepPost, la observación de zonas de máximas y mínimas tensiones subraya la necesidad de mejorar la vinculación entre componentes. Asimismo, bajo los criterios de falla de máximas tensiones y Tsai-Wu, se estima que el material no fallará. Sin embargo, las simulaciones se realizaron con ciertas limitaciones, entre las cuales se destaca la falta de caracterización mecánica mínima del material fabricado; la falta de incorporación de piezas y otros, necesarios para la vinculación entre componentes del aerogenerador; y no se contemplaron las cargas dinámicas a las que está sometido el aerogenerador durante su rotación. Por ello, estos resultados no son concluyentes respecto del comportamiento del material, y no se puede validar el diseño. No obstante, estas simulaciones demuestran ser una herramienta muy poderosa para comprender la respuesta estructural del dispositivo y mejorar la vinculación entre componentes.

5.2 Fabricación de los álabes

Los mejores resultados se obtuvieron con el procedimiento realizado en la laminación del álabe 2. Sin embargo, la superficie del álabe continuó exhibiendo imperfecciones. Asimismo, el procedimiento propuesto para realizar la terminación superficial de los álabes, en general, no obtuvo buenos resultados. La recomendación principal es modificar el proceso de laminación utilizando un molde macho y hembra, para obtener una superficie más homogénea en el laminado, y realizar así una aplicación directa del sistema *top coat*.

5.3 Ensamble del aerogenerador

Para que la vinculación entre el álabe y el ensamble sea exitosa, el diseño del ensamble y el procedimiento de aplicación del adhesivo debe considerar lo siguiente:

- Los orificios con adhesivo funcionan como anclaje mecánico y químico de los álabes, pero se debe limitar su cantidad debido a la concentración de tensiones y su consecuente disminución de las prestaciones mecánicas del ensamble;
- Una cuña simétrica maximiza la superficie de contacto con el adhesivo sobre ambas superficies del álabe;
- La guía permite mantener el álabe a 90° respecto de la horizontal durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural;
- La ranura de encastre adaptada al espesor del álabe permite mantener el álabe a 90° respecto de la horizontal durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural;
- En el procedimiento de aplicación del adhesivo se deben seguir los siguientes pasos. Luego de lijar, limpiar y enmascarar el álabe, se debe enmascarar el ensamble, así como también realizar diques

con cinta para evitar la salida lateral de adhesivo. Asimismo, el ensamble se debe adherir a la superficie de trabajo para facilitar la inyección. Seguidamente, la inyección del adhesivo debe realizarse a través del orificio de ingreso hasta observar el egreso por la ranura superior. El adhesivo sobrante, puede colocarse sobre el álabe para evitar desperdicios. Una vez realizado esto, se acoplan las piezas. Finalmente, durante la limpieza final, se debe realizar un menisco entre componentes para generar una transición suave en la vinculación, y se deben tapar los orificios de inyección teniendo en cuenta los posibles rechupes generados durante el curado del adhesivo.

5.4 Técnicas experimentales

Mediante el ensayo de viscosidad de la resina epoxi, se hallaron valores que coinciden con los provistos por el fabricante (8921,67 mPas a 26,87°C). Asimismo, la viscosidad de la resina coincidió con los valores de una resina utilizada para laminación manual identificada a partir de KnowItAll®. Una vez realizada la mezcla disminuye la viscosidad del sistema, según el fabricante, lo que permitió realizar sin dificultades los procesos de laminación manual de las probetas para el ensayo de tracción y la fabricación de los álbes. Sin embargo, se observó falta de impregnación en las probetas mediante microscopía óptica, hecho que refuerza la importancia de tener valores de viscosidad de mezcla menores a 1500 mPas.

Respecto al ensayo de tracción, se ensayaron 3 tipos de probetas. Las probetas con tratamiento térmico de post curado presentaron el valor promedio de tensión de rotura más alto (184,23 MPa). Estas probetas exhibieron un aumento del 18% aproximadamente respecto al valor promedio de tensión de rotura registrado para las probetas impregnadas curadas a temperatura ambiente (155,84 MPa), lo que implica una mejora de las prestaciones mecánicas del material bajo el tratamiento térmico propuesto. Finalmente, las probetas con falta de impregnación presentaron un valor promedio de tensión de rotura de 141,52 MPa.

Mediante las observaciones por microscopía óptica, se estimó un alto contenido de poros en las probetas con falta de impregnación (14,18%) y un bajo contenido de fibra (46,20%), en relación a las probetas impregnadas (1,96% y 52,02%, respectivamente). Este hecho se relacionó con los valores promedio de tensión de rotura hallados en el ensayo de tracción. En los retazos de los álbes el contenido de poros fue bajo (3,16%), no así el contenido de resina (68,39%). Finalmente, todas las muestras presentaron un límite inferior de muestra “recto” en la zona que copia la forma de la matriz de laminación. En cambio, los límites superiores presentaron irregularidades en la superficie. En el caso de las probetas se observaron picos, y en el caso de los álbes ondulaciones que refuerzan la idea de modificar el proceso de fabricación utilizando un molde macho y hembra.

Por último, se empleó la técnica de DSC para obtener los valores de T_g del sistema epoxi sometido a diversos tratamientos térmicos. Estos valores se obtuvieron bajo distintos criterios, de los cuales se seleccionó la T_g onset acorde con la guía para la certificación de aerogeneradores de Germanischer Lloyd, la cual establece que debe ser superior a 65°C. Así, comparando los valores de T_g onset para los tratamientos térmicos realizados durante 1,5 hs, se observó que a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico, aumenta el valor de la T_g y los porcentajes de curado. Para determinar estos porcentajes, se analizó una muestra del sistema epoxi a tiempo cero, y se utilizó el método de la línea de base de Origin® y el método de Bandara. El valor de $T_{g\infty}$ (67±2°C) se estableció como un promedio de los valores relevados en los tratamientos térmicos realizados a 100°C-1,5 hs y 120°C-1,5 hs, debido a que las muestras alcanzaron porcentajes de curado total. Asimismo, se observaron dos fenómenos importantes. En las muestras curadas a 60°C-1,5 hs, y $T_{ambiente}$ -7 días se observó envejecimiento físico, y en la curva DSC del sistema epoxi a tiempo cero, se observaron dos picos exotérmicos. Finalmente, en la fabricación de los álbes, se siguieron las recomendaciones de curado provistas por el fabricante ($T_{ambiente}$ -7 días). Sin embargo, este tratamiento en conjunto con los realizados a 60°C-1,5hs y 80°C-1,5hs, no cumplieron con los estándares Germanischer Lloyd, por lo que se plantea la necesidad de realizar tratamientos de post curado por encima de la $T_{g\infty}$ (67±2°C) durante cierto tiempo ó extender los tiempos de los tratamientos térmicos para aumentar la T_g . No obstante, los tratamientos térmicos realizados a 100°C-1,5 hs y 120°C-1,5 hs cumplieron con los estándares.

6 Trabajos futuros

6.1 Simulaciones de un aerogenerador Savonius

Con la metodología expuesta para hallar el coeficiente estático de torque, se deben realizar simulaciones con el dispositivo a escala real, mejorando los parámetros de simulación, estableciendo las condiciones de contorno en función del sitio de emplazamiento del dispositivo, y teniendo en cuenta la influencia del modelo de turbulencia en las simulaciones CFD. Asimismo, los valores hallados se deben contrastar con resultados experimentales. Finalmente, para seguir avanzando en la determinación de los parámetros característicos de este tipo de aerogeneradores, se deben realizar simulaciones dinámicas para hallar el coeficiente de potencia (C_p) y contrastar estos valores con resultados experimentales obtenidos mediante un túnel de viento. Para ello, se recomienda utilizar el software ANSYS CFX y ANSYS Fluent.

Respecto a las simulaciones de materiales, se deben realizar ensayos para efectuar una caracterización mecánica mínima del laminado, con los cuales se obtengan algunos de los parámetros necesarios para ingresar un material nuevo como parte de la librería de ANSYS. Asimismo, se podrían analizar los criterios teóricos de falla y contrastarlos con resultados experimentales, para evaluar qué criterio se adapta mejor. Finalmente, se deben incorporar los elementos necesarios para la vinculación entre componentes, y realizar simulaciones contemplando las cargas dinámicas a las cuales está sometido el aerogenerador durante su rotación.

6.2 Fabricación de los álabes

Debido a la terminación obtenida en las superficies convexas de los álabes, se recomienda utilizar un molde macho y hembra. Como molde macho, puede utilizarse una matriz de laminación tubular, y como hembra una chapa rolada, tomando como ejemplo el procedimiento realizado para colocar el sistema *top coat*. El macho y hembra, deben tener una longitud tal que se puedan laminar dos álabes juntos, y que contemple el espacio para colocar la válvula de vacío y la cinta de sellado de la bolsa de vacío.

6.3 Ensamble del aerogenerador

Se recomienda realizar la pieza de manera monolítica, de forma tal que las dos piezas de ensamble inferiores o superiores se impriman como una sola pieza y obtener así una mayor precisión en la vinculación. Luego, se deben realizar simulaciones del aerogenerador completo (tapas, álabes, eje, ensambles y estructura soporte), para evaluar los ensambles en función de las cargas que soportará el dispositivo en el sitio puntual de emplazamiento. Esto se puede complementar con un ensayo de adherencia por tracción (“pull-off test”), para evaluar el comportamiento de los materiales vinculados. Luego, para fabricar los ensambles con impresión 3D, se recomienda utilizar como filamento de impresión ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato), el cual soporta todo el rango UV. Finalmente, se recomienda realizar un mecanizado de los ensambles, en caso que de queden defectos de impresión, restos de adhesivo u otros, con el objetivo de no perturbar el flujo alrededor del aerogenerador.

6.4 Técnicas experimentales

Se deben establecer nuevas condiciones de curado y/o post curado, con el objeto de aumentar los valores de la Tg en función a los estándares Germanischer Lloyd. Asimismo, se deben realizar ensayos mecánicos con probetas sometidas a distintos tratamientos térmicos para evaluar cómo cambian las propiedades mecánicas en función del grado de curado. Finalmente, para seleccionar el tratamiento térmico bajo el cual fabricar los componentes, se debe establecer una relación de compromiso entre las propiedades mecánicas deseadas según las cargas a soportar en el sitio específico de emplazamiento del aerogenerador, y los estándares a cumplir

7 Referencias

1. **MAyDS**. *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional de la República Argentina*. Argentina : Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020.
2. **ArgentinaGob**. Generación Distribuida de Energías Renovables. [En línea] <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida>.
3. **Brøndsted, P. y Nijssen, R.P.L.** *Advances in wind turbine blade design and materials*. s.l. : Woodhead Publishing Series in Energy: Number 47, 2013.
4. *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. **Mishnaevsky, L. J., y otros**. 1285, 2017, Materials, Vol. 10, págs. 1-24.
5. *Dynamic Analysis of the Optimized Savonius Vertical Axis Wind Turbine Composite Blades*. **Ghoneam, S.M., Hamada, A.A. y Sherif, T.S.** 5, 2021, J. Sol. Energy Eng., Vol. 143.
6. *A review on the performance of Savonius wind turbines*. **Akwa, J. V., Vielmo, H. A. y Petry, A. P.** s.l. : Elsevier, 2012, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, págs. 3054-3064.
7. *Aerodynamic characteristics of a Stationary Savonius Rotor*. **Sadrul Islam, A., y otros**. 1993, International Energy Journal, Vol. 15, págs. 125-136.
8. *Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around A Savonius Rotor at the Maximum Power Performance*. **Fujisawa, N. y Shirai, H.** 4, Japón : Wind Engineering, 1987, Vol. 11.
9. **Amada, J. M.** Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética. *Curso de energía eólica*. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Eléctrica, s.f.
10. **Espinosa, S. T.** *Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius*. Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2021.
11. *Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies*. **Nasef, M., y otros**. s.l. : Elsevier, 2013, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 123, págs. 1-11.
12. *Numerical Investigation and Improvement of Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbine*. **Olaoye, O. S. y Adeoye, O.** 2016, Journal of Energy Technologies and Policy, Vol. 6, págs. 34-43.
13. *Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics*. **Akwa, J.V., Alves da Silva Júnior, G. y Petry, A.P.** s.l. : Elsevier, 2012, Renewable Energy, Vol. 38, págs. 141-149.
14. *An analysis of the transient forces acting on Savonius rotors with different aspect ratios*. **Jaohindy, P., y otros**. s.l. : Elsevier, 2013, Renewable Energy , Vol. 55, págs. 286-295.
15. *A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study*. **Menet, J.-L.** s.l. : Elsevier, 2004, Renewable Energy, Vol. 29, págs. 1843-1862.
16. *An experimental study on improvement of Savonius*. **Mahmoud, N., y otros**. 2012, Alexandria Engineering Journal, Vol. 51, págs. 19-25.
17. *Wind Tunnel Tests On a Savonius Rotor*. **Alexander, A. y Holownia, B.** 1978, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 3, págs. 343-351.

18. *Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors.* **Kang, C., Liu, H. y Yang, X.** s.l. : Elsevier, 2014, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 33, págs. 499-508.
19. *Secondary Parameters Affecting the Performance of Resistance-Type Vertical-Axis Wind Rotors.* **Sivasegaram, S.** 1978, Wind Engineering , Vol. 2, págs. 49-58.
20. *Vertical axis wind rotors-status and potencial.* **Vance, W.** 1973, Proceedings of the conference on wind energy conversion systems, págs. 96-102.
21. *Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments.* **Saha, U., Thotla, S. y Maity, D.** s.l. : Elsevier, 2008, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , Vol. 96, págs. 1359-1375.
22. **Masramon, E.** *Experimental study of flow through a Savonius wind turbine.* s.l. : Universidad Politecnica de Cataluña, 2015.
23. *Performance analysis of wind turbine blade materials using nanocomposites.* **Muhammed, K. A., Kannan, C. R. y Stalin, B.** 2020, Materials Today: Proceedings, Vol. 33, págs. 4353–4361.
24. *Effect of Blade Materials on the Performance of Savonius Wind Turbine for Operation in Taif City-Saudi Arabia.* **Balabel, A. y Alzaed, A.** 2020, Applications of modelling and simulation, Vol. 4, págs. 12-20.
25. **Morshed, K.N.** *Experimental and Numerical Investigations on Aerodynamic Characteristics of Savonius Wind Turbine with Various Overlap Ratios.* 2010. Electronic Theses and Dissertations 773.
26. **Chawla, K. K.** *Composite Materials. Science and Engineering.* . s.l. : Springer, 2012. Vol. Third Edition.
27. **Mallick, P.K.** *Processing of polymer matrix composites.* s.l. : Taylor & Francis Group, 2018.
28. *Multifunctional Gelcoats for Fiber Reinforced Composites.* **Pomázi, A. y Toldy, A.** 2019, Coatings , págs. 1-23.
29. **IneosComposites.** *GUÍA DE APLICACIÓN DE GELCOAT, AYUDANDO A ALCANZAR RESULTADOS DESTACABLES.*
30. **Dominguez, E.M.** *Fabricación y caracterización de green composites con bioresina y tejido de fibra natural de lino mediante moldeo por transferencia de resina.* s.l. : Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, 2016.
31. **BloombergNEF.** *Wind Power in 2020s Must Focus on Capability, Not Cost.* [En línea] 2021. <https://about.bnef.com/blog/wind-power-in-2020s-must-focus-on-capability-not-cost/>.
32. **VestasWindSystems, y otros.** *New coalition of industry and academia to commercialise solution for full recyclability of wind turbine blades.* [En línea] 2022. https://www.vestas.com/en/media/company-news?n=3974601#!grid_0_content_0_Container.
33. *Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Manufacture with Composite Materials.* **Bucur, I.O, Malael, I. y Breban, S.** 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 916, págs. 1-7.
34. *Fabrication and thermo-mechanical characterization of glass fiber/vinyl ester wind turbine rotor blade.* **Javaid, U., y otros.** 2016, Composites Part B: Engineering, Vol. 91, págs. 257-266.

35. *Open Mold Techniques for Thermoset Composites*. **Cripps, D., Searle, T.J. y Summerscales, J.** 2000, *Comprehensive Composite Materials*, págs. 737-761.
36. **Gurit**. Guide to composites. [En línea] 2022. <https://www.gurit.com/en/our-business/composite-materials>.
37. *Chapter 2 - 3D-printed miniature Savonius wind harvester*. **Zhao, D., y otros.** s.l. : Elsevier, 2019, *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, págs. 21-165.
38. *Static and dynamic study of a conventional Savonius rotor using a numerical simulation*. **Menet, J.-L. y De Rezende, T.** 2013, 21ème Congrès Français de Mécanique.
39. *Experimental Investigations on the Effect of Overlap Ratio and Blade Edge Conditions on the Performance of Conventional Savonius Rotor*. **Kamoji, M. A., Kedare, S. B. y Prabhu, S. V.** 2, 2008, *Wind engineering* , Vol. 32, págs. 163-178.
40. **Domínguez, M. R.** *Diseño de un microaerogenerador de eje vertical*. Ensenada, Baja California, México : Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, 2018.
41. *On the torque mechanism of Savonius rotors*. **Fujisawa, N.** s.l. : Elsevier, 1992, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 40, págs. 277–292.
42. *Pressure measurements and flow visualization study of a Savonius rotor*. **Fujisawa, N. y Gotoh, F.** s.l. : Elsevier, 1992, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , Vol. 39, págs. 51-60.
43. *Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor*. **Fujisawa, N. y Gotoh, F.** 1994, *ASME journal of solar energy engineering*, Vol. 116, págs. 148-152.
44. *Steady and rotating computational fluid dynamics simulations of a novel vertical axis wind turbine for small-scale power generation* . **McTavish, S., Feszty, D. y Sankar, T.** s.l. : Elsevier, 2012, *Renewable Energy*, Vol. 41, págs. 171-179.
45. *Diseño y Fabricación de una Turbina Eólica de Eje Vertical Impulsada por Drag*. **Tacca, E.A. y Spies, L.D.** s.l. : RTyC, 2016, Vol. 32.
46. *DEVELOPMENT OF FIXED END TYPE FLEXURAL FATIGUE TEST MACHINE AND STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF GLASS/EPOXY LAMINATED COMPOSITE*. **Balcioğlu, H.E., Sakin, R. y Gun, H.** Turquía : IV. International Ege Composite Materials Symposium - KOMPEGE 2018, 2018.
47. **Çapar, Y.** Finite Element Analysis Engineer. [En línea] <https://yasincapar.com/contact-types-and-behaviours-in-structural-analysis/#:~:text=In%20Ansys%20software%2C%20contact%20names,rough%2C%20bonded%20and%20no%20separation..>
48. **Ruiz, D.G.** *ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN AUTOBÚS FABRICADO CON MATERIAL COMPUESTO*. s.l. : Universidad Pública de Navarra, 2019.
49. **Montes, L.M.R.** *Valoración de criterios de fallo de una lámina de material compuesto en base a los resultados del World Wide Failure Exercise*. Sevilla : Universidad de Sevilla, 2020.
50. *Application of the inverse finite element method to design wind turbine blades*. **Albanesi, A., y otros.** s.l. : *Composite Structures* 161, 2017, Vol. 161, págs. 160–172.

51. *Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications*. **Jamir, M., Majid, M. y Khasri, A.** 2018, Sustainable Composites for Aerospace Applications, págs. 155-170.
52. **Olin.** ASIA PACIFIC 2020 EPOXY PRODUCT LISTING. [En línea] 2022. https://olinepoxy.com/wp-content/uploads/2020/12/296-02137-1020_APAC_Epoxy_Product_Brochure_English.pdf.
53. **Kukdo.** Data sheet YD 128. [En línea] Abril de 2022. <https://5.imimg.com/data5/HR/FD/MY-117280/standard-liquid-epoxy-resin-yd-128.pdf>.
54. —. Data sheet KH 816. [En línea] 2022. https://sfilev2.f-static.com/image/users/423667/ftp/my_files/Srafim/epoxy/KH-816%20%D7%9E%D7%A7%D7%A9%D7%94.pdf?id=27808057.
55. —. Safety data sheet YD 128. [En línea] 2022. https://www.tri-iso.com/documents/EPOKUKDO_YD-128_Kukdo_SDS.pdf.
56. —. Safety data sheet KH 816. [En línea] 2022. http://meruba.co.il/_files/pages/8852/8852_gal_1417758176_611.pdf.
57. **Novarchem.** Ficha técnica Dipreg 86 A/B. [En línea] 2022. <https://www.novarchem.com.ar/storage/app/uploads/public/5dd/568/192/5dd56819266b8168754278.pdf><https://www.novarchem.com.ar/storage/app/uploads/public/5dd/568/192/5dd56819266b8168754278.pdf>.
58. —. Ficha técnica Dipreg 52 A/B. [En línea] 2022. <https://www.novarchem.com.ar/storage/app/uploads/public/5d1/119/5fb/5d11195fbb8cb025419252.pdf>.
59. **NauticaEscalada.** TEJIDOS VIDRIO E-GLASS. [En línea] 2022. <https://nauticaescalada.com.ar/eshop/categoria/composites/tejido-vidrio-e-glass/>.
60. **Lozzi, J. P.** *Fabricación de palas de turbinas eólicas para aerogeneradores de 4 m de diámetro*. Mar del Plata : Universidad Nacional de Mar del Plata, 2011. Proyecto Final.
61. **Mayugo, M. J. A.** *Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas*. Cataluña : Universidad Politécnica de Cataluña, 2003.
62. **Servifibras.** Gel Coat Ortoftálico. [En línea] 2022. [Citado el:] <http://www.servifibras.com/gel-coat.html>.
63. **Gimeno, R.A.B.** *Estimación del punto “quasi isotrópico” de laminados de material compuesto a través de gráficos “carpet plot” con eLamX*. Valencia : Universitat Politècnica de València, 2015.
64. **Ebnasajjad, Sina.** 12 Quality Control. *Adhesives Technology Handbook*. s.l. : William Andrew, 2009, págs. 289-312.
65. **VENEGAS, M.A.T.** *Polifenoles de corteza de pino (Pinus radiata) como protectores de radiación UV para plásticos comerciales*. s.l. : UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN, 2018.
66. **Viscotech.** Myr viscosímetro rotacional. [En línea] Abril de 2022. <http://www.icientifica.com/Files/Productos/155.pdf>.
67. **ASTM.** D 3039 D 3039M – 08-Part 8. Sampling and Test Specimens. 2008.

68. *Mechanical behavior of biaxial non-crimp glass fiber reinforced polymer composite*. **Priya, I.M. y Senthil, R.** s.l. : Elsevier, 2020, Manufacturing and Mechanical Engineering for Sustainable Developments.
69. **GIRALDO, L. J. Q.** *DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO ELABORADO A PARTIR DE POLIPROPILENO Y FIBRAS CORTAS DE BAMBÚ MEDIANTE LA TÉCNICA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN EN CALIENTE*. MEDELLÍN : UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA , 2018.
70. **Zaiontz, C.** REAL STATISTICS USING EXCEL. [En línea] <https://www.real-statistics.com/students-t-distribution/identifying-outliers-using-t-distribution/grubbs-test/#:~:text=Grubbs'%20test%20can%20be%20used,that%20there%20is%20one%20outlier..>
71. **Fernández, Víctor M. Campa.** *Análisis de Imágenes de Microscopía con ImageJ*. s.f.
72. **ThermoScientific.** Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy. [En línea] Abril de 2022. <https://nicoletcz.cz/app/uploads/2021/07/294d0ab0.pdf>.
73. **Portolés, Javier Moros.** *Tratamiento numérico de los datos en el análisis cuantitativo por espectrometría vibracional*. s.l. : Universidad de Valencia, 2007. Tesis doctoral.
74. **Gayete, Josep Francesc Ventura.** *Desarrollo de métodos analíticos medioambientalmente sostenibles por espectrometría ftir*. s.l. : Universidad de Valencia, 2007. Tesis doctoral.
75. **PerkinElmer.** Spectrum Two FT-IR Spectrometer. [En línea] Abril de 2022. <https://www.perkinelmer.com/es/product/spectrum-two-ft-ir-sp10-software-l160000a>.
76. **Shimadzu.** Q: Is FTIR affected by the environment? [En línea] Abril de 2022. <https://www.shimadzu.com/an/service-support/faq/ftir/1/index.html>.
77. —. Algorithms Used for Data Processing in FTIR. [En línea] Abril de 2022. <https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/tips-ftir/algorithms.html>.
78. **Ramis, J. X.** *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado*. Cataluña : Universidad Politecnica de Cataluña, 1994.
79. **ASTM.** E1356 – 08 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry-Part 3. Terminology. 2014.
80. *Relaxation in partially cured samples of an epoxy resin and of the same resin modified with a carboxyl-terminated rubber Polymer*. **Moranchó, J.M. y Salla, J.M.** 1999, Elsevier, Vol. 40, págs. 2821–2828.
81. *ENVEJECIMIENTO FÍSICO DEL SISTEMA BADGE N = 0/M–XDA MODIFICADO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO Y NANOARCILLA*. **Fraga, F., y otros.** 2016, Revista Iberoamericana de Polímeros, págs. 219-230.
82. **Beceiro, Jorge José López.** *Modelización de la transición vítrea con relajación entálpica a partir de datos térmicos*. Departamento de enxeñaría industrial II, Universidad da Coruña. 2011. Tesis doctoral .
83. **Moranchó Llena, J.M.** *ESTUDIO DEL CURADO DE MATERIALES COMPUESTOS POR UN SISTEMA EPOXI Y PARTÍCULAS ELASTOMÉRICAS*. Cataluña : Universidad Politecnica de Cataluña, 1996.
84. **Tirado, Marta Sánchez- Cabezudo.** *Influencia de la adición de poliacetato de vinilo y nanopartículas de Silicato en el comportamiento de un termoestable epoxídico*. Universidad Politecnica de Madrid. 2012. Tesis doctoral.

85. **ASTM.** E1356 – 08 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry-10. Procedure. 2014.
86. *A systematic solution to the problem of sample background correction in DSC curves.* **Bandara, U.** 1986, Journal of Thermal Analysis, págs. 1063-1071.
87. **Guillen, Marjorie Yusneiry Flores.** *Toughness improvement of epoxy thermosets by adding dendritic structures.* Universitat Rovira I. 2014.
88. *Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA.* **Hardis, Ricky, y otros.** 2013, Composites: Part A 49, Vol. 49, págs. 100-108.
89. **OriginLab.** OriginLab. [En línea] 2022. <https://www.originlab.com/doc/Tutorials/Create-Subtract-Baseline>.
90. *Investigation on the Flexural Properties and Glass Transition Temperature of Kenaf/Epoxy Composite Filled with Mesoporous Silica for Wind Turbine Applications.* **Chai Hua, T. y Norkhairunnisa, M.** 2017, Pertanika J. Sci. & Technol., Vol. 4, págs. 1261 - 1274.
91. *THE USE OF A LARGE CLIMATE CHAMBER FOR EXTREME TEMPERATURE TESTING & TURBINE COMPONENT VALIDATION.* **Jordaens, P. J., y otros.** 2013. Winterwind Internacional Wind Energy Conference .
92. **Freudenreich, K., Steiniger, M. y Ramachandran, G. K. V. K.** New Recommended Practises for Low Temperature and Icing Climate Conditions. [En línea] 2017. https://windren.se/WW2017/4_1_12_Freudenreich_New_recommended_practises_for_low_temperature_and_icing_climate_conditions_Pub_v1.pdf.
93. **GermanischerLloyd.** *Guideline for the Certiication of Wind Turbines.* Hamburgo : Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH , 2010.
94. *Propiedades mecánicas de un sistema epoxi modificado con ABS.* **Barral, L., y otros.** 2000, Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, Vol. 39, págs. 431-433.
95. **Covestro.** Covestro polyurethane resin composites: an easy choice for wind turbine blades. [En línea] 2022. <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2020/covestro-polyurethane-solutions-easy-choice-wind-turbine-rotor-blades>.
96. *Influence of the Epoxy Resin Process Parameters on the Mechanical Properties of Produced Bidirectional Carbon/Epoxy Woven Composites.* **Ramírez-Herrera, C.A, y otros.** 1273, 2021, Polymers, Vol. 13, págs. 1-12.
97. *INFLUENCIA DEL POST-CURADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA RESINA EPOXI REFORZADA CON SiC:ESTUDIO ESTADÍSTICO.* **Abenojar, J. y Velasco, F., Martínez, M.A.** 3, 2009, Revista Iberoamericana de Polímeros, Vol. 10, págs. 167-179.
98. **Dow.** Product information. [En línea] 2022. <http://www.indur.com/datos/pdf/DER%20331.pdf>.
99. *PREPARATION AND CHARACTERISATION OF EPOXY/SILICA/KENAF COMPOSITE USING HAND LAY-UP METHOD.* **Jaafar, C.N.A., Zainol, I. y Rizal, M.A.M.** Malasia : s.n., 2018. 27th Scientific Conference of the Microscopy Society Malaysia.
100. *Cure kinetics of epoxy–amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic.* **G.Karayannidou, Evrikleia, S.AchiliasIriní, Dimitris y D.Sideridou.** 12, 2006, European Polymer Journal, Vol. 42, págs. 3311-3323.

101. *Process Cure Monitoring of Unsaturated Polyester Resins, Vinyl Ester Resins, and Gel Coats by Raman Spectroscopy*. **Skrifvars, Mikael, y otros**. 2004, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 93, págs. 1285–1292.
102. *Effect of Rice Husk Ash Filler of Resistance Against of High-Speed*. **Koto, N y Soegijono, B**. 2019, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 1191.
103. **Socrates, George**. *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*. s.l.: John Wiley & Sons, 2001.
104. *Network structure in diamine-cured tetrafunctional epoxy by UV-visible and fluorescence spectroscopy*. **Pyun, E. y Sung, C. S. P.** 4, 1991, Macromolecules, Vol. 24, págs. 855–861.
105. *ESTUDIO DEL CURADO DE RESINAS EPÓXICAS EMPLEANDO ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA*. **Jaramillo, Isaac, y otros**. 2004, Dyna, págs. 67-80.
106. *Fast Fourier Transform IR Characterization of Epoxy GY Systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH Polyamine Adducts*. **Nikolic, Goran, y otros**. 2010, Sensors, págs. 684-696.
107. **González, María González, Cabanelas, Juan Carlos y Baselga, Juan**. Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. [aut. libro] Theophile Theophanides. *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology*. 2012, págs. 261-284.
108. *Structural changes during 3D-printing of bio-derived and synthetic thermoplastic materials*. **Pop, Mihai Alin, y otros**. 2018, Journal of Applied Polymer Science, págs. 1-29.
109. **ASTM**. E1356 – 08 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry-6. Interferences. 2014.
110. **Gómez García, V**. *Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518*. s.l.: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2015.
111. **Sobachkin, A. y Dumnov, G**. *Base numérica de CFD integrada en CAD*. s.l.: SolidWorks, 2014.
112. **Callister, Jr.W.D**. Chapter 16 Composites. [aut. libro] Inc. John Wiley & Sons. *Materials Science and Engineering An Introduction*. 2005, págs. 577-617.
113. *Tensile behavior of glass/epoxy laminates at varying strain rates and temperaturas*. **Reis, J.M.L., Coelho, J.L.V. y Monteiro, H.S. da Costa Mattos**. s.l.: Elsevier, 2012, Composites: Part B, Vol. 43, págs. 2041–2046.
114. *Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance*. **Mehdikhani, M., y otros**. s.l.: Journal of Composite Materials, 2019, págs. 1579-1669.
115. *Comparison of methods for the characterization of voids in glass fiber composites*. **Abdelal, N. y Donaldson, S.L**. 2017, JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS, págs. 1-15.
116. *Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites*. **EL-Wazerya, M.S., EL-Elamy, M. I. y Zoalfakar, S.H.** 3, 2017, International Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 14, págs. 121-131.
117. *Effect of fiber-matrix volume fraction and fiber orientation on the design of composite suspension system*. **Ali, M.I. y Anjaneyulu, J**. s.l.: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 445.

118. *Curing kinetics of the epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/isophoronediamine by Fourier transform infrared spectroscopy.* **Fraga, F., y otros.** 2008, *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 19, págs. 1623-1628.
119. **KnowItAll.** s.l. : Wiley Science Solutions, 2022.
120. *Quantitative Analysis of Curing Mechanisms of Epoxy Resin by Mid- and Near-Fourier Transform Infra Red Spectroscopy.* **Cholake, Sagar T., y otros.** 3, 2014, *Defence Science Journal*, Vol. 64, págs. 314-321.
121. *Effect of artificial weathering on surface properties of unsaturated polyester (UP) resin.* **Jiaa, Zhijun, Li, Xiaogang y Zhaoc, Quanlin.** 2010, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 121, págs. 193-197.
122. **FibreGlast.** Polyester, Vinyl Ester, and Epoxy Resins: Making the Right Choice. [En línea] 2022. https://www.fibreglast.com/product/about-resins/Learning_Center.
123. **DocBrown.** Advanced Organic Chemistry: Infrared spectrum of butanone. [En línea] Abril de 2022. <https://docbrown.info/page06/spectra/butanone-ir.htm>.
124. *Kinetic Study by FTIR, TMA, and DSC of the Curing of a Mixture of DGEBA Resin and - Butyrolactone Catalyzed by Ytterbium Triflate.* **Ramis, Xavier, y otros.** 2004, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 92, págs. 381–393.
125. **Muedra, A.N.** *Influencia del ciclo de curado en las características a cizalladura de composites de alto gramaje con resinas vinil-uretano.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2012. Trabajo final de master.
126. *Modelling of chemical shrinkage evolution with curing degree of a filled epoxy adhesive.* **Holst, T., Saye, F. y Antoniou, A.** 2020, 41st Risø International Symposium on Materials Science, págs. 1-9.
127. **Camacho, J.R.S.** *Estudio del efecto de la temperatura de curado en las propiedades mecánicas de un material compuesto fibroso.* s.l. : Universidad de Sevilla, 2016. Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial.
128. *Influence of Epoxy Resin Curing Kinetics on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites.* **Cruz-Cruz, I., y otros.** 1100, 2022, *Polymers*, Vol. 14, págs. 1-17.
129. **Junyan, Lan, Junliang, Lan y Hui, Wu.** CN104877312A China, 2015.
130. *Impact of Site-Specific Thermal Residual Stress on the Fatigue of Wind-Turbine Blades.* **Antoniou, Alexandros, y otros.** 11, 2020, *AIAA JOURNAL*, Vol. 58, págs. 4781-4793.
131. *Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance.* **Ebrahimpour, M., y otros.** s.l. : MDPI, 2019.
132. **CientecInstrumentosCientíficos.** ¿Qué es un Microscopio Óptico? [En línea] Abril de 2022. <https://cientecinstrumentos.cl/que-es-un-microscopio-optico/#:~:text=El%20principio%20de%20funcionamiento%20de,a%20partir%20de%20distintas%20lentes>.
133. **Wason, K Satish.** US4497918A Estados Unidos, 1982.
134. **OliverBatlle.** QUÉ ES LA TIXOTROPÍA Y CÓMO INFLUYE EN LA FABRICACIÓN DE PINTURAS Y AFINES. [En línea] Abril de 2022. <https://oliverbatlle.com/que-es-la-tixotropia/>.

135. **Capeletti, Larissa Brentano y Zimnoch, João Henrique.** Fourier Transform Infrared and Raman Characterization of Silica-Based Materials. [aut. libro] Mark T. Stauffer. *Applications of Molecular Spectroscopy to Current Research in the Chemical and Biological Sciences*. 2016, págs. 3-22.
136. *Development of thermal residual stresses during manufacture of wind turbine blades.* **Rosemeier, M., Krimmer, A. y Antoniou, A.** 2020, Journal of Physics: Conference Series, págs. 1-14.
137. *Effect of curing temperature conditions on glass transition temperature values of epoxy polymer used for wet lay-up applications.* **Michel, M. y Ferrier, E.** 2020, Construction and Building Materials, Vol. 231, págs. 1-11.
138. **Frances, Sharp y Tony, Bonser.** WO2021048282A1 ARIPO, Eurasia, Europea, 2021.
139. *Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints.* **Omairey, S., Jayasree, N. y Kazilas, M.** 2021, SN Applied Sciences.
140. **Rheonics.** What are gelling and curing? pot life, cure and gel time, pot life: how important is viscosity? [En línea] <https://es.rheonics.com/what-is-gelation-and-curing-what-makes-viscosity-important/>.
141. **ANSYS.** ANSYS Composite PrepPost User's Guide. 2013.

8 Anexo

Comandos generados para la carga de los puntos de presión

```
!   ANGULO DE ROTOR 0°

!Tabla datos presiones alabe 1 cara concava
*DIM,tabA1CC,table,19,,Y,,C11
tabA1CC(1:5) = 101300,101332.662025619,101332.197466131,101331.717572299,101331.279860164
tabA1CC(6:10) = 101330.912321941,101330.693143774,101330.613178653,101330.552505721,101330.980000753
tabA1CC(11:15) = 101331.085066385, 101331.830504678,101333.227992282,101336.263981652,101340.440446484
tabA1CC(16:19) = 101337.348082775,101329.19484585,101321.459952254,101300
tabA1CC(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 1 cara convexa
*DIM,tabA1CV,table,19,,Y,,C11
tabA1CV(1:5) = 101300,101380.930755082,101373.820795119,101356.775378075,101333.388021388
tabA1CV(6:10) = 101311.086197234,101295.020637703,101289.582823734,101299.070943153,101308.695058109
tabA1CV(11:15) = 101310.914116104,101311.668603498,101312.017586124,101312.094816534,101313.326830558
tabA1CV(16:19) = 101314.439071479,101313.033505155,101311.397742054,101300
tabA1CV(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 2 cara concava
*DIM,tabA2CC,table,19,,Y,,C12
tabA2CC(1:5) = 101300,101316.492133576,101317.017733296,101317.231843449,101317.403351925
tabA2CC(6:10) = 101317.593260996,101317.747268043,101317.883227676,101317.914638976,101318.379398675
tabA2CC(11:15) = 101318.609450501,101318.779710923,101319.152004396,101319.292473116,101318.607334459
tabA2CC(16:19) = 101317.829297876,101317.151277427,101315.89849976,101300
tabA2CC(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

!Tabla datos presiones alabe 2 cara convexa
*DIM,tabA2CV,table,19,,Y,,C12
tabA2CV(1:5) = 101300,101317.72001749,101317.31121452,101316.336967332,101315.180727517
tabA2CV(6:10) = 101314.770558864,101314.97653745,101314.864296098,101314.410354838,101312.187635092
tabA2CV(11:15) = 101303.53223442,101294.368070814,101302.436165571,101321.308951104,101346.305473994
tabA2CV(16:19) = 101362.134399948,101352.484363461,101333.327616757,101300
tabA2CV(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

CMSEL,S,A1BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CC%
CMSEL,S,A1TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CV%
CMSEL,S,A2BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CC%
CMSEL,S,A2TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CV%
ALLSEL,ALL

!   ANGULO DE ROTOR 45°

!Tabla datos presiones alabe 1 cara concava
*DIM,tabA1CC,table,19,,Y,,C11
tabA1CC(1:5) = 101300,101380.561199604,101380.771933975,101380.837009575,101380.889682537
tabA1CC(6:10) = 101381.012400208,101381.191330363,101381.389156663,101381.455755317,101381.504599757
tabA1CC(11:15) = 101381.550805225,101381.579692201,101381.512607008,101381.258373318,101380.59274678
tabA1CC(16:19) = 101379.374296968,101376.523711414,101368.759425665,101300
tabA1CC(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 1 cara convexa
*DIM,tabA1CV,table,19,,Y,,C11
tabA1CV(1:5) = 101300,101279.186347687,101279.106064987,101278.553453006,101284.909622773
tabA1CV(6:10) = 101296.788741895,101305.460927336,101309.956904431,101311.471412981,101310.618596641
tabA1CV(11:15) = 101309.599280222,101308.743529451,101308.173307244,101307.636446073,101307.333399185
tabA1CV(16:19) = 101307.06342504,101306.822961687,101306.580622694,101300
tabA1CV(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 2 cara concava
*DIM,tabA2CC,table,19,,Y,,C12
tabA2CC(1:5) = 101300,101317.237452879,101317.100225969,101323.048124829,101326.708393774
tabA2CC(6:10) = 101330.352957241,101333.243685511,101334.806359754,101335.72375885,101336.486352904
tabA2CC(11:15) = 101336.606207482,101335.869072703,101335.094732539,101333.813001597,101332.027992818
tabA2CC(16:19) = 101330.39790663,101328.091514827,101324.502660608,101300
tabA2CC(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

!Tabla datos presiones alabe 2 cara convexa
*DIM,tabA2CV,table,19,,Y,,C12
tabA2CV(1:5) = 101300,101380.606140462,101383.227776886,101381.507838319,101375.010224837
tabA2CV(6:10) = 101362.495238094,101345.463282198,101325.841503163,101304.402563447,101285.767100927
tabA2CV(11:15) = 101277.470797188,101281.911782113,101294.746278662,101309.734710834,101313.566099494
tabA2CV(16:19) = 101313.422078101,101314.202729026,101314.82985825,101300
tabA2CV(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

CMSEL,S,A1BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CC%
CMSEL,S,A1TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CV%
CMSEL,S,A2BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CC%
CMSEL,S,A2TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CV%
ALLSEL,ALL
```



```

!   ANGULO DE ROTOR 90°

!Tabla datos presiones alabe 1 cara concava
*DIM,tabA1CC,table,19,,Y,,C11
tabA1CC(1:5) = 101300,101383.698098882,101384.23329885,101384.187513586,101384.138029633
tabA1CC(6:10) = 101384.109862659,101384.139515131,101384.190351583,101384.232222937,101384.258477743
tabA1CC(11:15) = 101384.267222159,101384.243260684,101384.165962156,101384.016769761,101383.706709928
tabA1CC(16:19) = 101382.470821413,101378.447807627,101368.440474402,101300
tabA1CC(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 1 cara convexa
*DIM,tabA1CV,table,19,,Y,,C11
tabA1CV(1:5) = 101300,101311.675016522,101311.695347908,101311.429937401,101311.104321862
tabA1CV(6:10) = 101311.157249148,101311.664749145,101312.660853881,101313.902438021,101315.174186562
tabA1CV(11:15) = 101316.277891940,101316.87669646,101317.101395595,101316.912110183,101316.412115553
tabA1CV(16:19) = 101315.885353298,101315.47387038,101315.11202364,101300
tabA1CV(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 2 cara concava
*DIM,tabA2CC,table,19,,Y,,C12
tabA2CC(1:5) = 101300,101321.243944506,101321.445204406,101330.77195901,101333.502871542
tabA2CC(6:10) = 101335.147303334,101334.504549916,101333.485059471,101333.113554698,101331.945885965
tabA2CC(11:15) = 101330.456889943,101329.813363218,101329.105076512,101328.918443819,101328.291052081
tabA2CC(16:19) = 101327.826135669,101326.234571528,101321.88714316,101300
tabA2CC(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

!Tabla datos presiones alabe 2 cara convexa
*DIM,tabA2CV,table,19,,Y,,C12
tabA2CV(1:5) = 101300,101351.812081373,101355.542988581,101359.610005701,101365.36679848
tabA2CV(6:10) = 101372.966796915,101379.906701087,101383.566154666,101383.209626954,101376.016841011
tabA2CV(11:15) = 101362.733252087,101341.919603229,101320.32234849,101296.220317896,101280.295557264
tabA2CV(16:19) = 101274.389721064,101281.956498179,101295.08195645,101300
tabA2CV(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

CMSEL,S,A1BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CC%
CMSEL,S,A1TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CV%
CMSEL,S,A2BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CC%
CMSEL,S,A2TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CV%
ALLSEL,ALL

!   ANGULO DE ROTOR 135°

!Tabla datos presiones alabe 1 cara concava
*DIM,tabA1CC,table,19,,Y,,C11
tabA1CC(1:5) = 101300,101384.112507229,101382.166518319,101381.918073399,101381.785062445
tabA1CC(6:10) = 101381.800513726,101381.875331771,101381.893953152,101381.636606088,101381.213469365
tabA1CC(11:15) = 101380.172702352,101378.760965731,101376.533073251,101373.036168707,101366.887281309
tabA1CC(16:19) = 101354.022302622,101340.382994053,101323.77148154,101300
tabA1CC(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 1 cara convexa
*DIM,tabA1CV,table,19,,Y,,C11
tabA1CV(1:5) = 101300,101316.19149923,101316.49226987,101317.16463161,101317.725130965
tabA1CV(6:10) = 101317.614775192,101316.130810619,101313.437029039,101310.243659578,101307.831325935
tabA1CV(11:15) = 101307.871093631,101309.088238327,101310.188508862,101310.426154332,101310.221942074
tabA1CV(16:19) = 101309.835590138,101309.781545528,101310.012475912,101300
tabA1CV(1,0) = 180,190,200,210,220,230,240,250,260,270,280,290,300,310,320,330,340,350,360

!Tabla datos presiones alabe 2 cara concava
*DIM,tabA2CC,table,19,,Y,,C12
tabA2CC(1:5) = 101300,101301.869522834,101315.461797437,101317.796330779,101315.112057158
tabA2CC(6:10) = 101312.566051755,101311.535992715,101311.083166814,101310.61499888,101310.296426151
tabA2CC(11:15) = 101310.185041504,101310.541741652,101311.162704323,101311.816906005,101312.310550901
tabA2CC(16:19) = 101313.410963248,101315.096600776,101315.422683525,101300
tabA2CC(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

!Tabla datos presiones alabe 2 cara convexa
*DIM,tabA2CV,table,19,,Y,,C12
tabA2CV(1:5) = 101300,101306.549716177,101302.88772022,101298.86047617,101294.835624544
tabA2CV(6:10) = 101291.30959214,101292.143879988,101299.884547179,101313.474181375,101331.04316874
tabA2CV(11:15) = 101350.824400528,101367.557532722,101379.157207251,101383.74774156,101379.770565309
tabA2CV(16:19) = 101368.657078269,101351.54590158,101332.577060148,101300
tabA2CV(1,0) = 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180

CMSEL,S,A1BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CC%
CMSEL,S,A1TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA1CV%
CMSEL,S,A2BN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CC%
CMSEL,S,A2TN,NODE
SF,ALL,PRES,%tabA2CV%
ALLSEL,ALL

```

Detalles del mallado

Variable	Álabes	Tapas
Nodos	15518	4366
Tipo de elementos	Volumétricos solid185	Placa shell181
Cantidad de elementos	12162	4242
Grados de libertad	8 grados de libertad	4 grados de libertad
Longitud característica	5 mm	5 mm

Criterio de falla de Tsai-Wu

Para una tensión de estado plano en 2D ($\sigma_3 = 0$, $\tau_{13} = 0$, $\tau_{23} = 0$), el criterio de falla de Tsai-Wu se expresa como:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_6t_{12} + F_{66}t_{12}^2 = 1$$

Los coeficientes F_{ij} del criterio de falla de Tsai-Wu están relacionados con los parámetros de resistencia de la lámina de material y se determinan experimentalmente. Se calculan a partir de las siguientes fórmulas:

$$F_1 = \frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C}; F_2 = \frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C}; F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T X_1^C X_2^T X_2^C}}; F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{X_2^T X_2^C}; F_6 = \frac{1}{X_{12}^T} - \frac{1}{X_{12}^C}; F_{66} = \frac{1}{X_{12}^T X_{12}^C}$$

X_1^T = límite de tensión longitudinal del material laminado

X_1^C = límite de compresión longitudinal del material laminado

X_2^T = límite de tensión transversal del material laminado

X_2^C = límite de compresión transversal del material laminado

X_{12}^T = límite cortante positivo del material laminado

X_{12}^C = límite cortante negativo del material laminado

El estado de las tensiones de la lámina se describe por los componentes: σ_1 , σ_2 y τ_{12} .

σ_1 = tensión longitudinal del material laminado

σ_2 = tensión transversal del material laminado

τ_{12} = tensión de corte del material laminado

Medidas de modo de falla en ANSYS Composite PrepPost

- Factor de Reserva Inverso (IRF por sus siglas en inglés). Si $IRF > 1$ falla.
- Margen de seguridad (MoS por sus siglas en inglés). Si $MoS < 0$ falla.
- Factor de Reserva (RF por sus siglas en inglés). Si $RF < 1$ falla.

Criterio de falla de máximas tensiones

Para una tensión de estado plano en 2D ($\sigma_3 = 0$, $\tau_{13} = 0$, $\tau_{23} = 0$), el criterio de falla de máximas tensiones se expresa como:

$$\begin{aligned} -X_C &< \sigma_1 < X_T \\ -Y_C &< \sigma_2 < Y_T \\ -S &< t_{12} < S \end{aligned}$$

X_T = límite de tensión longitudinal

X_C = límite de compresión longitudinal

Y_T = límite de tensión transversal

Y_C = límite de compresión transversal

S = límite de corte