



Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería



PROYECTO FINAL

*Fabricación de palas de turbinas eólicas para
aerogeneradores de 4 m de diámetro*

Autor: Lozzi, Juan Pablo

Director: Dr. Exequiel Rodríguez

Codirectora: Dra. Vera Alvarez

Lugar de Trabajo: Grupo de Materiales Compuestos, INTEMA

INDICE

RESUMEN	4
OBJETIVOS	4
Objetivos generales.....	4
.....	5
Objetivos Específicos.....	5
1 INTRODUCCIÓN	6
Sección 1.03 1.1 Energía eólica	6
1.2. Materiales utilizados las aspas de molinos eólicos	11
1.3 Materiales compuestos.....	21
1.4 Técnicas de procesamiento usadas para fabricar palas.....	26
1.5 Estructura y aerodinámica del aspa	33
1.5.1 Estructura del aspa.....	36
1.6 Etapas del diseño y construcción de elementos laminados	38
2 MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.1 Materiales	40
2.2 Metodología	42
2.2.1 Ensayos de viscosidad	42
2.2.2 Permeabilidad	42
2.2.4 Caracterización mecánica.....	45
3 DISEÑO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL	49
3.1 Diseño geométrico	49
3.2 Diseño Estructural mediante el método de elementos finitos (MEF).....	51
3.2.2 Propiedades del material	53
3.2.3 Criterios de Falla.....	53
3.2.4 Simulación	54
3.2.6 Validación.....	55
4- MODELADO DEL PROCESO DE INFUSIÓN	61
5- CONSTRUCCIÓN DE MOLDES	68
5.1 Contramoldes.....	68
5.2 Moldes.....	71
6- PROCESAMIENTO	77

6.1 Infusión de las caras	78
6.2 Fabricación de la viga interna.....	90
7 CONCLUSIONES	96
8 REFERENCIAS	
9 TRABAJOS FUTUROS	
ANEXO I.....	
ANEXO II.....	
ANEXO III.....	

RESUMEN

En este proyecto se efectuó el diseño y construcción de un aspa de molino eólico de pequeña escala. Para ello se recorrieron todas las etapas del proceso de diseño, desde la obtención de una geometría, el cálculo estructural, el modelado de procesamiento, la construcción de moldes y la obtención de la pieza final.

El material utilizado para la construcción fue resina vinil éster y mat de fibra de vidrio. El aspa se fabricó mediante la técnica de infusión por vacío y para optimizar el proceso se utilizó un software que modeló el frente de avance de la resina. El espesor necesario del aspa se calculó mediante elementos finitos. Los datos de entrada del modelo se obtuvieron mediante un ensayo de tracción.

Finalmente, luego de una serie de procesos de optimización que incluyeron varias pruebas de infusión, se logró obtener un aspa libre de defectos, con buena terminación superficial y dimensiones por debajo de las tolerancias máximas admitidas. El aspa construida sirve como prototipo para evaluar la efectividad de la técnica de procesamiento, la influencia de las diferentes variables de proceso y el comportamiento de los materiales seleccionados para su fabricación.

OBJETIVOS

Objetivos generales

El objetivo general de este proyecto es el de contribuir a la producción de energías limpias mediante el desarrollo de palas para molinos eólicos de pequeña escala. Mediante la construcción de un prototipo, se busca recorrer todas las etapas requeridas para el diseño de un nuevo componente a escala industrial. Muchos de los estudios y análisis realizados en el proyecto son válidos para aspas de gran envergadura y aplicables al proceso de fabricación de otros componentes grandes como embarcaciones, antenas parabólicas o partes de aeronaves. Además se espera capitalizar la experiencia surgida de este desarrollo para emprendimientos de mayor envergadura y futuros proyectos del equipo en otras áreas relacionadas. El desarrollo de este tipo de tecnologías se encuentra en pleno auge, y dadas las condiciones geográficas y climáticas de Argentina y otras regiones de Latinoamérica, éste es un tipo de fuente de energía renovable con amplio

futuro. Al mismo tiempo se busca colaborar con el desarrollo de fuentes de energía renovables, en un momento en el que éste es un tema de vital importancia.

Objetivos Específicos

- ✓ Obtener un modelo CAD de una pala de molino eólico de alrededor de 2 m de largo
- ✓ Construir moldes para la fabricación de prototipos
- ✓ Modelar el comportamiento mecánico de la pala mediante elementos finitos para determinar el espesor de la misma.
- ✓ Obtener palas de fibra de vidrio y resina poliéster mediante la técnica utilizada industrialmente para su fabricación (infusión por vacío)
- ✓ Evaluar distintas estrategias de infusión, y determinar la calidad de las piezas obtenidas (contenido huecos, presencia de puntos secos, contenido de fibra)
- ✓ Determinar las propiedades mecánicas de las palas obtenidas.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Energía eólica

El uso del viento como fuente de energía comienza en la antigüedad. En Persia en el siglo X y en China en el siglo XIII fueron reportados molinos de viento de eje vertical para moler grano. La fuerza del viento fue la fuente de energía mas importante antes de la invención del motor a vapor .Molinos de viento para moler el grano y bombear agua se cuentan por miles en toda Europa, incluso algunos fueron utilizados con fines industriales, por ejemplo en el aserrado de madera. Como los europeos iniciaron la colonización del mundo, los molinos de viento se construyeron en todo el mundo. El principal uso a largo plazo del viento ha sido para el bombeo de agua. La mayoría de los molinos de granja (Figura 1.1) se encuentran en África, Argentina, Australia, Canadá y los Estados Unidos.



Figura 1.1 – Molino de viento para bombear agua.

El molino de viento de granja demuestra que la energía eólica es un bien muy valioso, aunque el tamaño del molino sea pequeño. Por ejemplo, se estima que hay operando en este momento cerca de 30.000 molinos de viento agrícolas en el sur de los Estados Unidos. A pesar de que la potencia de los mismos es baja, 0.2-0.5 kilowatts (kW), que proporcionan en conjunto una producción estimada de 6 megawatts (MW). Si estos molinos de viento para el bombeo de agua se convirtieran en electricidad, se requeriría alrededor de 15 MW de potencia térmica en la estación de generación y más de 1.000 millones de dólares para las líneas de transmisión, bombas eléctricas, etc. Esto sin contar los dólares ahorrados en combustibles fósiles con una energía equivalente de 130 millones de kilowatts hora (kWh) por año que representan 80.000 barriles de petróleo al año es decir 8 millones de dólares. [1]

En la actualidad la energía eólica es considerada una energía limpia, totalmente renovable y más económica de lo que usualmente se cree, mas allá de tener costos iniciales relativamente elevados en comparación con otras tecnologías convencionales de generación. Si bien se requerirán varios años para que se instale un numero de parques eólicos lo suficientemente significativo como para impactar en la matriz energética nacional, su potencial es tal que no puede ser dejado de lado. Después de todo, ya existen muchos ejemplos a nivel mundial que ilustran que la mejor manera de modificar el actual sistema carbono-dependiente es apelando a trazados energéticos que logren utilizar con éxito todo el espectro de energías alternativas.

Por otro lado, la utilización eficaz del recurso eólico garantiza la diversificación de la matriz energética, ayuda a evitar factores de dependencia geopolítica y promueve la estabilización de los precios pagados por energía en el largo plazo, favoreciendo la previsibilidad económica.

La Republica Argentina cuenta con características técnicas inigualables en cuanto a recurso eólico aprovechable. El país tiene cerca del 70% de su territorio cubierto con vientos cuya velocidad media anual, medida a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo, supera los 6 m/s. Particularmente, zonas en la Patagonia media y sur cuentan con velocidades promedio que superan los 9 m/s y hasta 12 m/s.

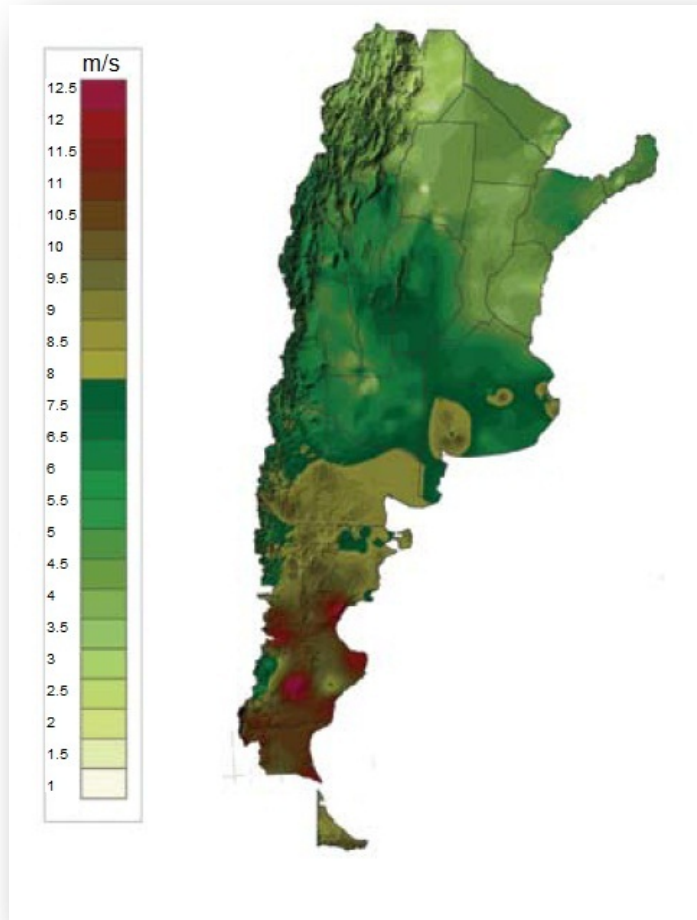


Figura 1.1 - Velocidad Media Anual a 50m de altura en m/s. Fuente: Centro Regional de Energía Eólica - Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios

Argentina cuenta con tan solo 30 MW instalados principalmente por cooperativas eléctricas entre 1994 y 2002. La última incorporación ha sido una turbina de 2 MW. El generador eólico de Veladero se encuentra ubicado a 4.100 metros sobre el nivel del mar, en la provincia de San Juan y es el más alto que se haya instalado en el mundo. El segundo molino en esta categoría se eleva a 2.800 metros sobre el nivel del mar, y se encuentra en Suiza. La Figura 1.2 presenta la ubicación de las granjas existentes e incorpora algunos proyectos actualmente en el mercado.

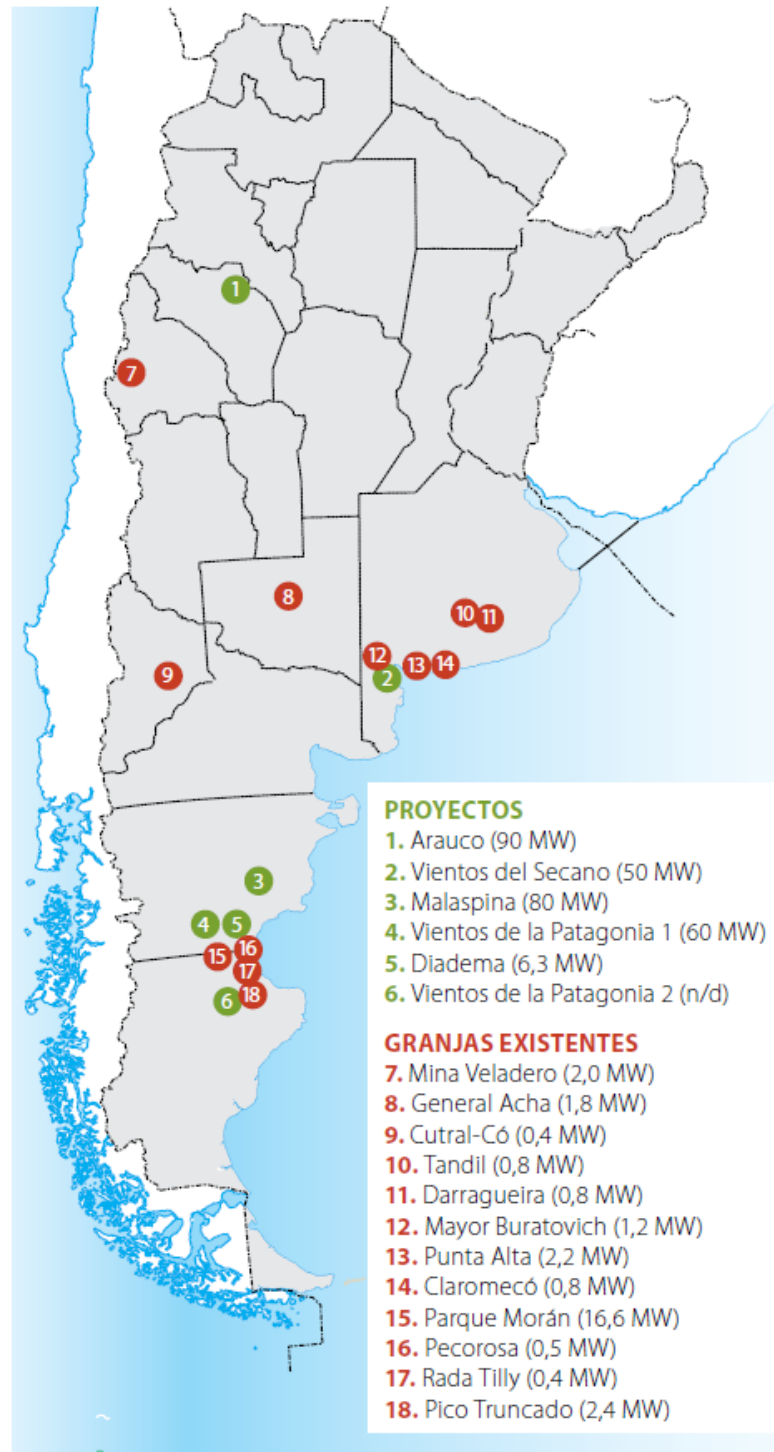


Figura 1.2 - Proyectos y granjas existentes

El programa oficial de desarrollo de la industria eólica en Argentina se centra en el Plan Estratégico Nacional de Energía Eólica (PENEE) mediante el cual el Gobierno Nacional impulsa la instalación de al menos 300 MW de potencia. Las primeras tareas del PENEE incluyeron la elaboración de un mapa de vientos nacional que estuvo a cargo del

Centro Regional de Energía Eólica (CREE). Los primeros proyectos de generación englobados dentro de este plan son Vientos de la Patagonia I y II.

Se trata de proyectos financiados por el Gobierno Nacional y los diferentes gobiernos provinciales. Vientos de la Patagonia 1 es propiedad 80% de ENARSA y 20% de la Pcia. de Chubut y está estructurado en dos fases. La Fase 1 tiene por objetivo la instalación y homologación de 2 turbinas prototipo de producción nacional (una de IMPSA Wind y otra de NRG Patagonia). La Fase 2 contempla la instalación de un parque de 60 MW en Chubut utilizando los aerogeneradores homologados en la Fase 1.

En caso de cumplirse las proyecciones de instalación de energía eólica de 1.250 MW hasta 2016, se estima que la energía eólica podría abastecer con energía limpia el consumo de cerca de un millón de hogares argentinos.

En países con industrias eólicas desarrolladas, la incidencia de estas ayuda a abaratar el costo que los ciudadanos pagan por la energía en general ya que reemplaza generación con combustibles líquidos (generalmente caros y en muchos casos importados) y tecnologías menos eficientes.

En España, por ejemplo, la generación eólica efectiva del año 2007 alcanzo los 27 TWh (11% del total). En la hipótesis de que se hubiesen requerido combustibles fósiles para generar la misma cantidad de energía eléctrica aportada por la eólica, dichos combustibles habrían tenido en 2007 un costo de € 1.000 millones o 37 €/MWh (este costo se habría más que duplicado en 2008 con las pronunciadas subas experimentadas en el precio del petróleo). Asimismo, la generación eólica permitió evitar la emisión de 18 millones de toneladas de CO₂ (con un valor de mercado de € 360 millones), 11 mil toneladas de NO_x y 34 mil toneladas de SO₂. Considerando que España durante 2007 pago incentivos a generadores eólicos por un monto de € 990 millones, surge que en realidad el sistema en su conjunto experimento un ahorro de € 370 millones (14 €/MWh).

Como hemos mencionado con anterioridad, los beneficios de la utilización de energía eólica son múltiples: se trata de un recurso extremadamente limpio, totalmente renovable y económicamente muy competitivo. Además, la utilización eficaz del recurso eólico garantiza la diversificación de la matriz energética, ayuda a evitar factores de dependencia geopolítica y promueve la estabilización de los precios pagados por energía en el largo plazo, favoreciendo la previsibilidad económica. [2]

1.2. Materiales utilizados las aspas de molinos eólicos

El diseño dominante en la tecnología de energía eólica de la actualidad, está orientado en generadores eólicos que tiene su eje de rotación en posición horizontal (Figura 1.3). La indiscutible superioridad de este diseño hasta la fecha se basa principalmente en las siguientes características:

- En los diseños de eje horizontal, la velocidad del rotor y la potencia pueden ser controladas por la rotación de las palas sobre su eje longitudinal. Es decir que cuando el viento es excesivo las aspas rotan sobre su eje longitudinal para disminuir el ángulo de ataque, bajando de esta manera la velocidad del rotor y así proteger la integridad estructural del aerogenerador. Este tipo de protección es la más eficaz contra el exceso de velocidad y los vientos extremos, especialmente en los grandes aerogeneradores.
- La forma del aspa puede ser optimizada aerodinámicamente y se ha demostrado que alcanzará su máxima eficacia cuando la sustentación aerodinámica se explota al máximo.

En conjunto, estas ventajas son la razón por la cual casi todas las turbinas de viento para la generación de electricidad construidas hasta la fecha están compuestas por rotores de eje horizontal (Figura 1.3).



Figura 1.3 - Generador eólico de eje horizontal. San Juan, Argentina.

Desde el punto de vista estructural el rotor de una turbina eólica consiste en un conjunto de subsistemas. Basándonos en la definición de que el rotor comprende todas las piezas giratorias de la unidad exterior de la carcasa, el mismo incluye a subsistemas como las palas, el buje, y el mecanismo de control del ángulo del aspa, los cuales poseen gran autonomía con respecto a su diseño, su funcionamiento y las técnicas de fabricación (ver Figura 1.4).

La tecnología de las palas del rotor se asocia más con la ingeniería aeronáutica liviana que con la ingeniería mecánica convencional. En contraste con todos los demás componentes de la turbina, que pueden ser adoptados en gran parte de la ingeniería mecánica, las palas del rotor debe ser desarrolladas desde cero. Los problemas de diseño son similares los que enfrenta la ingeniería aeronáutica. El espectro de carga que se aplica con respecto a la resistencia a la fatiga, y los métodos matemáticos aplicados para el dimensionamiento de la estructura, que es solicitada de manera dinámica, son también similares. La gran carga a la cual las palas del rotor están sometidas es una de las principales razones por las cuales estos componentes son de gran importancia en el diseño de la turbina. El momento flector debido a la carga de gravedad da como resultado 10^8 ciclos de carga durante la vida de un de la turbina. Además, existen cargas aleatorias causadas por la turbulencia del viento y los efectos del envejecimiento del material debido al clima. Los problemas asociados con durabilidad del rotor hasta ahora son más difíciles de resolver que en ningún otro componente. Por lo tanto las palas del rotor son consideradas como el componente clave para el avance en el desarrollo de la turbina eólica.

Lo que es cierto de los problemas de desarrollo es que los mismos no necesariamente se aplican a la fabricación, sin embargo, utilizar métodos de fabricación propuestos por la ingeniería aeronáutica solo es posible a un número limitado de casos debido a que el margen de costo es mucho menor y prohíbe la aplicación de métodos tradicionales de fabricación de aviones. La tecnología de producción es con frecuencia adoptada de otros campos. La transferencia de tecnológica proviene principalmente de la construcción moderna de barcos, donde los materiales compuestos de fibra de vidrio son los más utilizados. Las palas del rotor de los aerogeneradores modernos daneses fueron casi siempre fabricados por antiguos constructores de barcos.

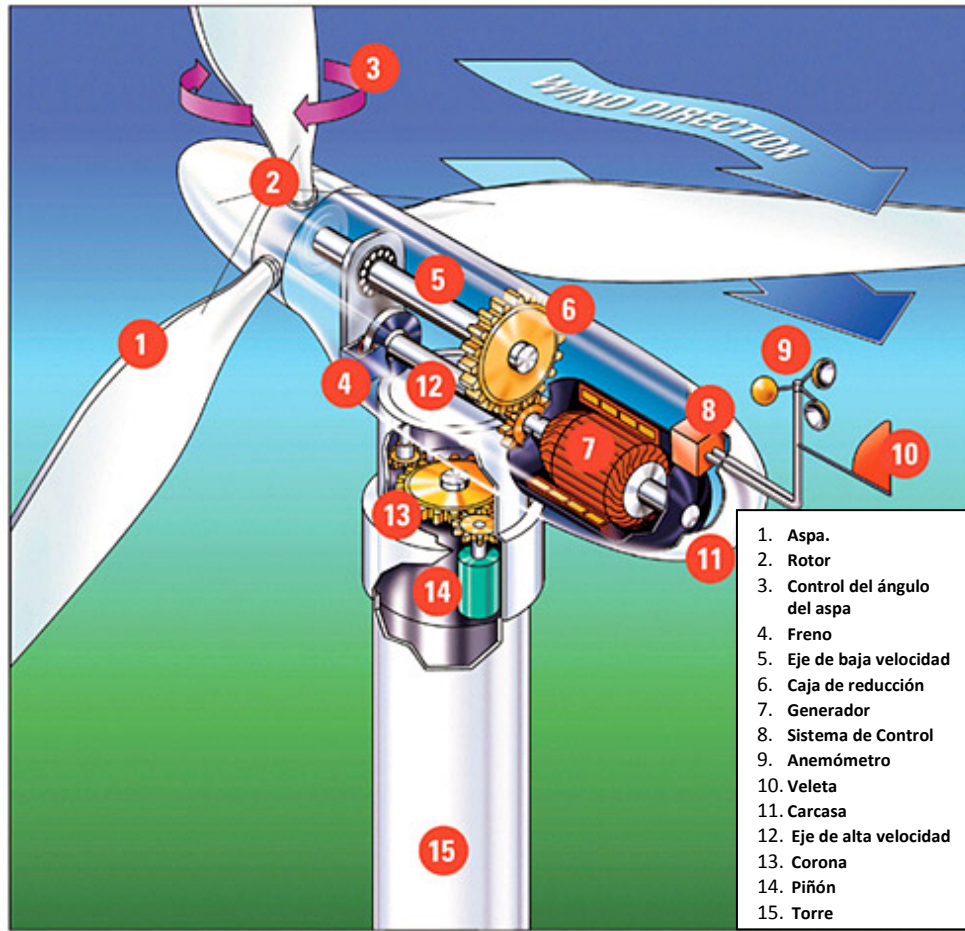


Figura 1.4 – Generador eólico de eje horizontal.

Se han utilizado como prototipos un gran número de diferentes palas fabricadas con distintos procesamientos y materiales. Algunos diseños, como por ejemplo los que usaban acero o aluminio, no eran más que soluciones temporales para las turbinas de prueba utilizadas en aquel entonces. Los diseños de hoy en día están determinados por el uso de materiales compuestos de fibra y resina.

El punto de partida para la definición del diseño de las palas del rotor fue la selección del material más adecuado. El principio del diseño conceptual y el método de producción no pueden ser considerados independientemente el uno del otro en una situación real. No obstante, tiene sentido analizar inicialmente los materiales disponibles para construir las palas del molino eólico. Una primera selección de las clases de materiales potencialmente utilizables, se representa en la Figura 1.5. El gráfico de rigidez en función de la densidad indica los materiales más adecuados para la fabricación de aspas desde el punto de vista mecánico.

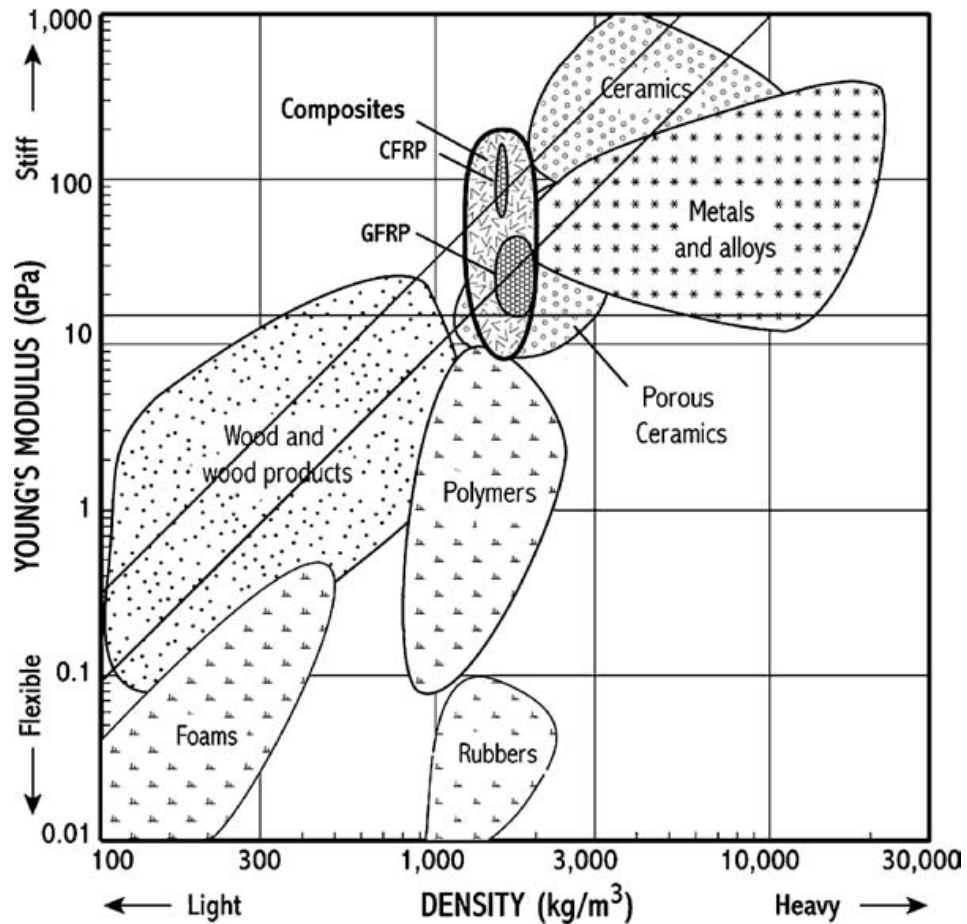


Figura 1.5 – Grafico representa la rigidez en función de la densidad de todos los materiales. El índice de performance para una viga es $Mv = E^{1/2}/\delta$ y se representa por líneas inclinadas con Mv igual a 0.003 (línea inferior) y 0.006 (línea superior). El criterio de rigidez absoluta $E = 15\text{GPa}$ se indica con la línea horizontal. [3]

Las dos líneas que se muestran en la Figura 1.5 son arbitrarias e ilustran materiales que son igual de buenos en términos de rigidez y densidad para una viga en voladizo.

Un segundo criterio es la rigidez en una escala absoluta, (un material rígido causa menos deflexión de una viga que un material flexible). En el diagrama de la Figura 1.5, el criterio de rigidez corresponde a una línea horizontal. Esta consideración está relacionada con la geometría del asa y sus dimensiones, así como también a la concepción global de la torre y el rotor, en particular cuando la pala pasa por la torre. Una aproximación razonable requiere una rigidez del material de 10-20 GPa, por lo tanto en el diagrama se dibuja la línea de $E = 15\text{GPa}$. Los materiales o por encima de esta línea de satisfacer el criterio.

A partir de la Figura 1.5 podemos decir que los materiales más adecuados para la producción de aspas de molinos eólicos son los siguientes:

- **Aluminio**
- **Titanio**
- **Acero**
- **Materiales compuestos de fibras (vidrio, carbono y aramida)**
- **Madera**
- **Cerámicos**

Para realiza un análisis mas detallado debemos tener en cuenta las siguientes propiedades en conjunto.

- **Densidad (Kg/m^3)**
- **Tensión de fluencia (N/mm^2)**
- **Módulo de elasticidad (kN/mm^2)**
- **Resistencia a la rotura en relación con la densidad**
- **Módulo de elasticidad en relación con la densidad**
- **Fatiga**
- **Costo**

En este caso los cerámicos quedan descartados debido a su baja resistencia a la fatiga y a la propagación de fisuras.

En la Tabla 1.1 se comparan algunas de estas propiedades de los materiales más utilizados en la aeronáutica.

El titanio y los aceros de alta aleación que son descartados por razones de costos. La selección se concentra en aluminio, acero, material compuesto reforzado con fibra de vidrio, diseños de fibra de vidrio con fibra de carbono y más recientemente también diseños compuestos de madera y epoxi.

Parámetro Material	Densidad δ	Tensión de Fluencia σ	Modulo de elasticidad E	σ/δ	E/δ
	Kg/m³	MPa	GPa	KPa/(Kg/m³)	MPa/(Kg/m³)
Acero St 52	7850	520	210	66	27
Acero aleado 1.7735.4	7850	680	210	87	27
Aluminio AlZnMgCu	2700	480	70	180	26
Aluminio AlMg ₅	2700	236	70	87	26
Aleación de Titanio	4500	900	110	200	24
Compuesto de epoxi* y fibra de vidrio	1700	420	15	247	9
Compuesto de epoxi y fibra de carbono	1400	550	44	390	31
Compuesto de epoxi* y fibra de aramida	1250	450	24	360	19
Madera (Abeto)	380	65	8	170	21
Madera y epoxi*	580	75	11	130	19

*Matriz de epoxi a 40% en vol.

Tabla 1.1 – Propiedades de posibles materiales para la construcción de aspas.

El duraluminio, utilizado en la construcción de aviones, es una aleación de aluminio de alta resistencia con la que se puede alcanzar una disminución del peso de aproximadamente el 30% con respecto a los diseños de acero con propiedades mecánicas equivalentes. La buena resistencia a la fatiga y los valores de resistencia a la corrosión son una gran ventaja de este material. Su desventaja decisiva radica en la costosa producción. Hojas y largueros de duraluminio son prácticamente insoldables, por tanto, toda las piezas son unidas con remaches (Figura 1.6). En el diseño de aeronaves, donde el peso es el factor que lo domina todo, la mano de obra intensiva que

requiere este método de producción se tolera, pero se considera demasiado costoso la producción de palas de turbinas eólicas. Sin embargo, se realizaron algunos prototipos de turbinas con aspas de duraluminio.

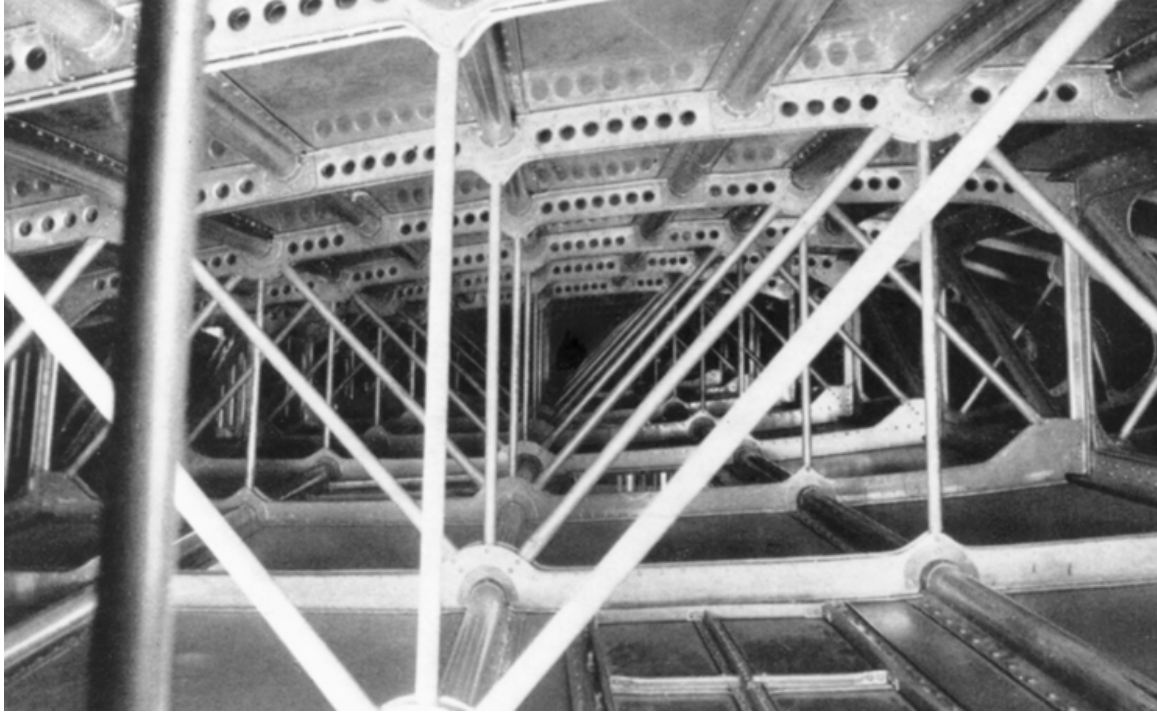


Figura 1.6 – Ala de Aeronave de duraluminio remachado

El acero fue el material predominante en la construcción de palas de grandes turbinas de prueba a principios de los años ochenta. Esto incluye las palas del rotor de la turbina Growian alemana, la turbina la Americana MOD-2 y la turbina de Sueca WTS-75.

El bajo precio del material, siempre y cuando se utilice acero convencional no aleado, y los bajos costos de producción, con técnicas convencionales de soldadura y las muy conocidas propiedades del material, hicieron que el acero se posicionara dentro de los favoritos. Los riesgos en el desarrollo en relación con a la producción eran predecibles. Sin embargo, la deformación del acero se convirtió en un problema, ya que al copiar la geometría aerodinámica de la secciones de las palas se requería deformar chapas de acero de espesores de hasta 20 mm, este proceso sólo se lograba con grandes dificultades. Independientemente de estos problemas, las aspas de la turbina Americana MOD-2 se construyeron a partir de un monocasco de acero (Figura 1.7).



Figura 1.7 – Aspa Completamente de acero de la turbina experimental Americana MOD-2.

Las palas de la turbina Alemana Growian fueron también un ejemplo de diseño mediante vigas de acero. La viga de acero se colocó en el interior del perfil aerodinámico (Figura 1.8). El recubrimiento exterior del aspa, que compone la superficie de sustentación consistió en sándwiches de un polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) de aproximadamente de 16 a 18 mm de espesor. Las fibras, en las capas se cruzan entre sí, para que las propiedades de elongación de la piel externa sean compatibles con las deformaciones de la viga de acero. La zona trasera de la viga se rigidizó con de las costillas de fibra de vidrio.

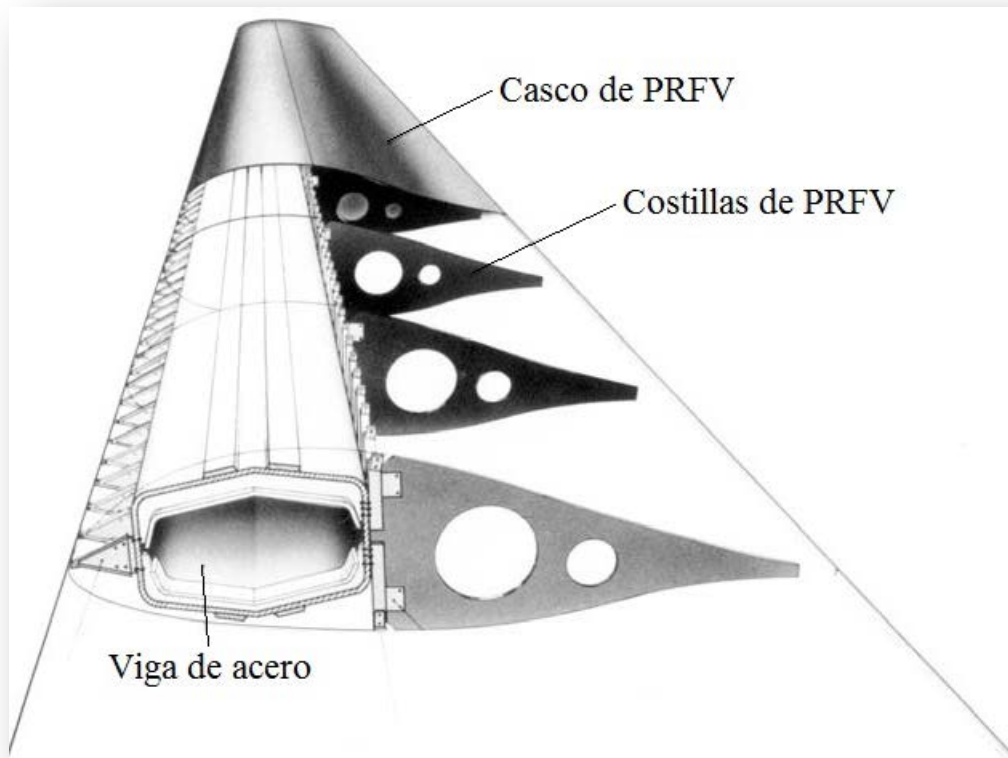


Figura 1.8 – Diseño de las palas (híbridas acero-PRFV) del rotor de la turbina experimental alemana Growian.

A pesar de ser un material convencional, el desarrollo y la producción de aspas de acero plantea varios problemas. Se debe garantizar la calidad de la soldadura teniendo en cuenta las cargas aleatorias extremas. Los valores permitidos de tensión sobre todo deben hacer referencia a los límites de resistencia de las costuras de soldadura. Otro gran problema con el acero es la corrosión. En particular en las áreas interiores de la viga que ya no son accesibles, estas zonas fueron especialmente problemáticas. La corrosión lleva a la formación de grietas, que pueden llevar a la falla catastrófica del componente. Por lo tanto los chequeos continuos en busca de fisuras eran imprescindibles.

En la actualidad, el acero ya no es una alternativa realista en la fabricación de palas de turbinas de viento. El peso por sí solo es claramente una desventaja muy grande. El uso de acero solo fue una solución temporal para el diseño y desarrollo de los primeros aerogeneradores experimentales de gran tamaño.

Componentes de materiales compuestos de resina reforzada con fibras han sido ampliamente utilizados por décadas. Fue así como un paso obvio, el comenzar a utilizar este material también para la construcción de las palas de molinos eólicos.

El fundamento básico de funcionamiento de los materiales compuestos reforzados con fibra consiste en fortalecer las propiedades de las matrices poliméricas mediante la incorporación de fibras con mejores propiedades de resistencia que el material de base, por lo que estos "plásticos baratos" fueron capaces de satisfacer las exigencias de aplicaciones más severas. El desarrollo histórico de esta tecnología de materiales y de los diseños asociados y los métodos de producción tomó dos caminos diferentes.

A finales de los años 50, los compuestos reforzados con fibra de alta calidad se desarrollaron en la aviación, más tarde también en la ingeniería aeroespacial y en la construcción de vehículos. Este desarrollo fue impulsado sobre todo por la demanda de la industria aeroespacial de materiales ligeros de alta resistencia, lo cual era vital para su existencia, independientemente de los costos. Hoy en día, estas industrias no pueden concebirse sin estos materiales.

Producir componentes dimensionalmente estables en casi todas las formas sin costosas herramientas y dispositivos fue lo que impulsó la utilización de materiales compuestos en reemplazo de materiales como la madera o el metal. Contrariamente a lo que puede creerse, su elevada resistencia a la rotura y su bajo peso jugaron un papel menos importante que los bajos costos de fabricación, en la ampliación del uso de estos materiales en nuevas aplicaciones. Es así que los materiales reforzados con fibras comenzaron a usarse masivamente en la construcción de barcos y para la fabricación de recipientes de presión.

El desarrollo de las palas del rotor de las turbinas de viento en compuestos reforzados con fibra estuvo vinculado con las dos vías de desarrollo. Por un lado, los requisitos de resistencia y rigidez son tan altos como en la aviación y, por otro lado, se necesitaban técnicas de fabricación económicas como las utilizadas en la fabricación de embarcaciones, siendo el peso una variable no tan relevante. El mérito de haber sido uno de los primeros en hacer las palas del rotor de una turbina eólica de materiales compuestos se debe a U. Hütter. Hütter diseñó las palas del rotor de 17 m de largo de Thew-34 en la tecnología de compuesto de fibra de vidrio en 1959. Él resolvió el problema de la transferencia de carga del material compuesto mediante una conexión bridada entre el rotor y el aspa. Las palas del rotor tuvieron mucho éxito y fueron

utilizados como modelo para grandes componentes de alta calidad fabricados con materiales compuestos reforzados con fibra en general, no sólo para las palas del rotor de las turbinas de viento, al menos en Alemania.

En los años siguientes, los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio se convirtieron en los preferidos para la fabricación de palas de aerogeneradores. [4]

1.3 Materiales compuestos

Se conoce como materiales compuestos a aquellos que son una combinación de dos o más materiales (conocidas como sustancias componentes, constituyentes o fases) que se diferencian en función, forma o composición a escala macroscópica. Las fases mantienen sus identidades, es decir, no se disuelven o se mezclan completamente. Normalmente las fases pueden ser distinguidas físicamente y es posible identificar la interfase entre una y la otra. Asimismo, si los materiales compuestos son usados por sus peculiares propiedades estructurales, la definición de materiales compuestos se puede restringir a aquellos en los que una sustancia componente es el refuerzo (conocido por fibra o partícula) soportado por la otra fase que actúa como material aglutinante (conocido como matriz).

La combinación de diferentes matrices (normalmente se usan polímeros o metales ligeros) con distintos materiales o disposiciones de fibra (fibra de vidrio, de carbono, orgánicas o de polímeros, entre otras) permite conseguir materiales con propiedades mecánicas especiales que se adaptan a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño. Existe pues una gran cantidad de combinaciones posibles y, por lo tanto, muchos tipos de compuestos. Se pueden distinguir en función de su tipología (fibras cortas o largas, continuas o discontinuas, orientadas o con disposición aleatoria, una sola capa o laminados multicapa, etc.), o bien en función del tipo de sustancias componentes.

La Tabla 1-2 muestra una clasificación de los diferentes tipos de compuestos según los distintos tipos de refuerzo. Normalmente estos compuestos se presentan en forma de laminados unidireccionales (todo el refuerzo en una misma dirección) o en laminados bidimensionales (láminas apiladas con el refuerzo en distintas orientaciones).

Fibra larga y continua	Fibra orientada unidireccional
	Fibra orientada bidimensional (tejido, <i>mat</i> cosido)
	Fibra orientada tridimensional (tejido 3-D, cosido 3-D)

	Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo continuo)
Fibra discontinua	Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo troceado)
	Orientación predominante
Partículas y <i>whiskers</i>	Orientación aleatoria
	Orientación predominante

Tabla 1-2. Breve clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo [5]

En las aplicaciones que se estudian en el presente trabajo el material compuesto utilizado es uno de los más típicos: laminado multicapa constituido por una matriz de polímero reforzado con fibras discontinuas (FRP, fibre reinforced polymer). Los FRP se suelen utilizar en forma de laminados, es decir, como apilamientos de láminas cada una de las cuales contiene fibras de refuerzo en direcciones alternadas.

En aplicaciones industriales los FRP más comunes son los de matriz termorrígida reforzada con fibras cerámicas largas orientadas (a veces entrelazadas en forma de tejido o bien cosidas). Estos son materiales que dan una muy buena relación entre su facilidad de producción, su costo y sus propiedades mecánicas específicas. Las matrices más comunes son las de resina epoxi, de poliéster o vinil éster, en cuanto a las fibras suelen ser de vidrio, que dan lugar a los GFRP (glass fibre reinforced polymer), o bien de carbono, que dan lugar a los CFRP (carbon fibre reinforced polymer).

Las características estructurales más valoradas en los polímeros reforzados con fibra larga son sus elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia. Tal como se muestra de forma comparativa en la Figura 1.9, con los metales comúnmente utilizados en piezas estructurales (acero y aluminio) no se logran los mismos valores de rigidez y resistencia por unidad de masa que con los FRP. Por otra parte, otra característica que hace interesantes a los FRP es que pueden presentar una resistencia a la fatiga excepcional. Este factor es de vital importancia, ya que la fatiga es uno de los modos de falla más comunes en las aspas de molinos eólicos, debido a las cargas cíclicas que se producen con el movimiento de la estructura. [6]

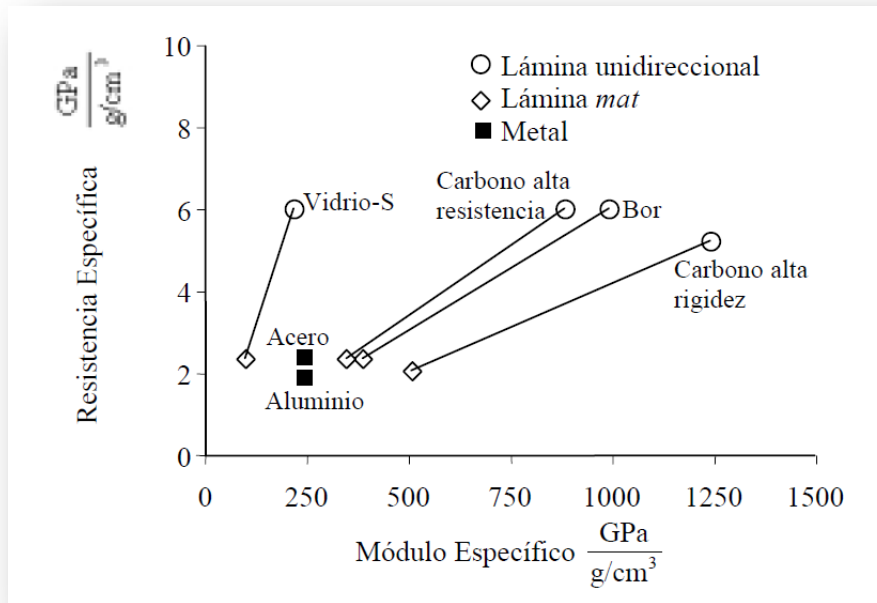


Figura 1.9 – Rigidez específica vs. Resistencia específica. Comparación cualitativa entre compuestos de matriz polimérica y metales. [7]

Las propiedades estructurales efectivas (o globales) que se obtienen en un material compuesto son la adición de contribuciones de sus distintas sustancias componentes y de su configuración. De forma que las propiedades mecánicas del compuesto final dependen en parte tanto de las propias propiedades de los constituyentes como de la disposición geométrica de éstos. A continuación se presentan las propiedades de las sustancias más comunes usadas en FRP como fibras de refuerzo (Tab 1.2) y más adelante como matriz (Tab 1.3).

Material	Densidad δ (g/cm ³)	Módulo elástico E (GPa)	Resistencia tracción S_t (MPa)	Alargamiento (%)	Coef. Poisson ν	Módulo específico (E/δ)	Resist. específica (S_t/δ)
<i>Fibra vidrio</i>							
E-Glass	2,54	72,4	3450	4,8	0,20	28,5	1,36
S- Glass	2,49	86,9	4300	5,0	0,22	34,9	1,73
<i>Fibra carbono</i>							
P-100 (‡)	2,15	758,0	2410	0,32	0,20	352,5	1,12
T-40 (‡)	1,81	290,0	5650	1,80	—	160,2	3,12

T-300 (‡)	1.76	231,0	3650	1,40	0.20	131,3	2,07
-----------	------	-------	------	------	------	-------	------

Tabla 1.2 - Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. (‡) Producto comercial de Amoco. (Reifsnider-Case, 2002)

Las fibras de vidrio tienen una rigidez específica no superior a la de los metales tradicionales, pero tienen amplia aceptación debido a su alta resistencia específica y a su bajo costo. Las fibras de carbono presentan a la vez unas excepcionales propiedades de rigidez y resistencia, lo que las hace ideales para aplicaciones de alta *performance*. Sus propiedades mecánicas varían mucho en función de su proceso de producción.

La matriz es el material aglutinante que permite a las fibras trabajar de forma conjunta transmitiendo los esfuerzos de unas a otras. Las matrices de polímero tienen como principales limitaciones la pérdida de propiedades a alta temperatura, su susceptibilidad medioambiental (son afectadas por la humedad, las radiaciones, etc.) y la baja resistencia al corte. Las matrices poliméricas pueden ser divididas en dos grupos: las termoplásticas y las termorígidas. Las termoplásticas se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser remodeladas con una temperatura y presión adecuada. Aunque su proceso de producción limita su uso en compuestos de fibras largas, son especialmente indicadas para ser utilizadas en aplicaciones donde es necesario mucho volumen con bajo costo. Los polímeros termoplásticos utilizados en compuestos incluyen entre otros el polipropileno (PP), las poliamidas (Nylon), poliuretano (PU) y el poli-eter-eter-cetona (PEEK). Normalmente el rango de temperatura que permite su uso no supera los 225 °C. En cuanto a los termorígidos, estos polimerizan (proceso de curado) en el mismo momento de la fabricación y no se reblandecen con el calor. Su estado líquido antes del curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas. Los termorígidos más usados como matriz son el poliéster, viniléster, el epoxi y las poliamidas. El poliéster y el viniléster se usan principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones hasta los 100 °C. Las epoxis resultan más caras pero tienen mejor resistencia a la humedad, menos variaciones dimensionales durante el curado y pueden alcanzar temperaturas de uso de hasta 175 °C. La poliamida permite aplicaciones en temperaturas elevadas (hasta 300 °C) pero requiere de un proceso de producción más complicado. En la tabla 1-3 se muestran las propiedades elásticas y de resistencia estática de algunas matrices típicas usadas en polímeros reforzados.

Material	Densidad δ (g/cm ³)	Módulo elástico E (GPa)	Resistencia tracción σ_{rot} , (MPa)	Alargamiento (%)	Coef. Poisson ν	Módulo específico E/δ	Resist. específica $[\sigma_{rot}/\delta]$
<i>Termoplásticos</i>							
PEEK (*)	1,30 – 1,32	3,24	100,0	50	0,4	2,5	76,3
PPS (‡)	1,36	3,3	82,7	4	–	2,4	60,8
<i>Termorígidos</i>							
Poliéster	1,1-1,4	2,1 – 3,4	34– 103	1 – 5	–	2,2	55,2
Viniléster	1,0-1,2	3,5 – 4	73 - 83		–	3,7	18
Epoxi	1,38	4,6	55 - 130	–	0,36	5,5	74,0
Poliamida	1.46	3,5	103,0	–	0,35	2,4	70,5

Tabla 1.3 - Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. (*) Victrex, producto comercial deICI. (‡) Ryton, producto comercial de Phillips Petroleum. [8]

Las propiedades que se pueden obtener con un polímero reforzado dependen tanto de las propiedades de sus constituyentes como de la proporción volumétrica entre ellos y de su disposición geométrica. En los laminados con fibras largas la fase de refuerzo suele estar alineada obteniéndose sólidos altamente anisótropos dado que muestran distintas propiedades en distintas direcciones.

Las propiedades de los laminados están limitadas por las propiedades ortótropas de las láminas unidireccionales (UD). En los laminados UD se consiguen los valores extremos de rigidez y resistencia para una matriz y fibra concreta en una determinada proporción volumétrica. Mientras que los laminados con fibras cortas distribuidas al azar dan lugar a un material transversalmente isótropo, es decir que las propiedades son equivalentes en dos direcciones, este es el material que se utilizara en este trabajo.

En la Tabla 1.4 se muestran a modo de ejemplo las propiedades efectivas de algunos laminados UD con matriz de epoxi. En la tabla se pueden comparar las características de rigidez y resistencia. Los valores máximos y mínimos se consiguen en la dirección del refuerzo (dirección 1) y en la dirección perpendicular al refuerzo (dirección 2) respectivamente.

Material	Densidad δ (g/cm ³)	Módulo elástico E (GPa)	Resistencia tracción $\sigma_{rot-t}/\sigma_{rot-c}$ (MPa)	Coef. Poisson ν	Módulo específico (E/δ)	Resist. específica (σ_{rot-t}/δ)
E glass-epoxi	1,80	39 / 4,8	1130 / 96	0,30	21,6	627,7
S glass-epoxi	1,82	43 / –	1214 / 758	–	–	–
AS – epoxi	1,54	127 / 9,0	1447 / 62	0,25	82,3	939,6
T-300-epoxi	1,55	138 / 10	1447 / 44	0,21	–	–
Boro-epoxi	1,99	207 / 19	1585 / 62	0,21	–	–
Kevlar49-epo	1,38	76 / 5,5	1379 / 28	0,34	–	–

Tabla 1.4.- Propiedades mecánicas de las laminados UD con matriz de epoxi. [9]

1.4 Técnicas de procesamiento usadas para fabricar palas

En los comienzos, pequeñas aspas empezaron a fabricarse a partir de una matriz de poliéster reforzada con fibras de vidrio mediante el método tradicional de *hand lay-up* sobre moldes abiertos (Figura 1.10). Este método había sido utilizado durante décadas para construir barcos. Este proceso se basa en colocar los refuerzos en el molde e impregnar la resina manualmente con la ayuda de pinceles o rodillos. El refuerzo estaba compuesto por *mats* de fibras de vidrio cortas con la orientación de las fibras al azar, en algunos casos se agregaban tejidos unidireccionales para aumentar la rigidez y la resistencia. Este proceso no presenta un control preciso de la cantidad de resina absorbida por el refuerzo de fibra. La resina es muy frágil, por lo que cualquier exceso de la misma debilita la pieza final. Por lo tanto las piezas fabricadas con este método cuentan con bajas propiedades mecánicas debido a que el material compuesto tiene un exceso de resina, por otro lado los costos de procesamiento son muy bajos.

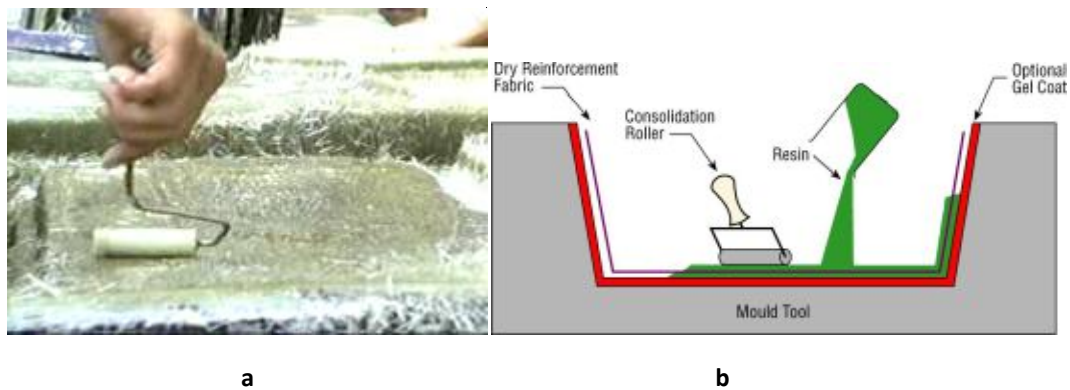


Figura 1.10 – Proceso de hand lay-up.

Cuando los gobiernos comenzaron a subsidiar a las grandes compañías para desarrollar aspas de turbinas eólicas más grandes en la década de 1970, las empresas involucradas buscaron técnicas de fabricación más racionales que la mano de obra intensiva que requiere el proceso de *hand lay-up*, y el *filament winding* (bobinado de filamentos) fue ampliamente estudiado por varias naciones. *Filament winding* es una forma racional de la colocar de una enorme cantidad de fibra de una manera controlada alrededor de un mandril giratorio. La forma de la pala de un aerogenerador no es cilíndrica, y la mayoría de las fibras tienen que ser colocadas a lo largo de la longitud del aspa, por lo tanto, la técnica de devanado de filamentos tenían que ser desarrollada para poder cumplir con esta aplicación específica.

El proceso mecanizado de producción comienza con el bobinado de la viga (Fig. 1.11 y 1.12). Luego, un molde con la forma geométrica de la superficie de sustentación trasera es colocado sobre la viga, más tarde la viga y el molde se envuelven de nuevo. Después de que todo el conjunto cura, el molde es removido.

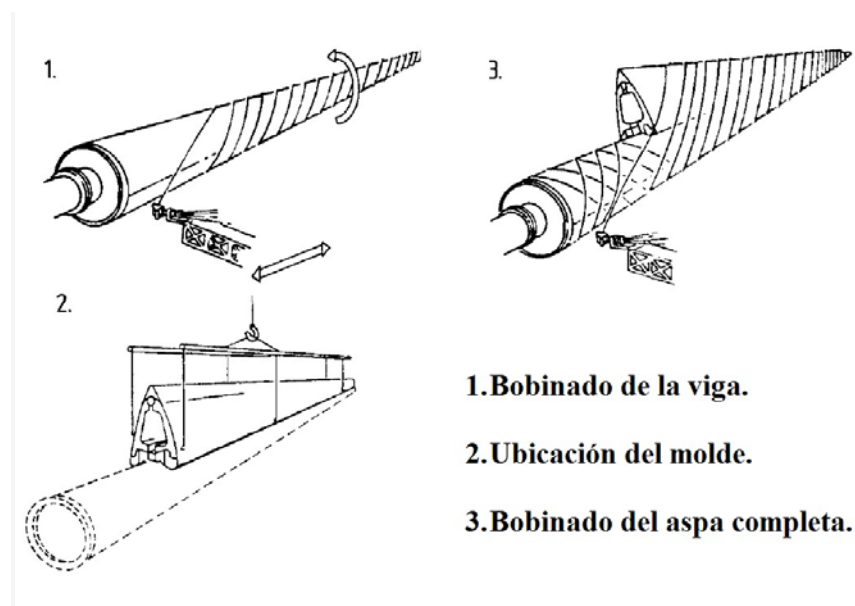


Figura 1.11 – Proceso mecanizado de producción de aspas.



Figura 1.12 – Aspa de la turbina WTS-3 sobre la máquina de *filament winding*.

Esta técnica se utiliza hoy en día para la fabricación de palas de compuestos reforzados con fibra. La desventaja de este proceso es que no es posible orientar la dirección de las fibras a lo largo del eje longitudinal, de acuerdo con la dirección de los esfuerzos máximos. La gran ventaja de este método es que se puede automatizar la producción.

Otra alternativa para fabricar aspas fue brindada por la tecnología de *prepregs* (preimpregnado) que es una adaptación de la industria aeroespacial y de aeronaves, y se basa en el uso de un producto semi-curado, donde las telas de fibras son preimpregnadas en resina, la cual no está completamente curada. A temperatura ambiente la resina es como un sólido pegajoso, por lo tanto pueden ser apilados uno sobre otro para construir el laminado deseado. Al aumentar la temperatura, la resina se convierte en un líquido viscoso, y el laminado se puede consolidar bajo presión y curar para obtener el componente final. Los *prepregs* están disponibles en muchas variedades y combinaciones de tipos de fibras, estilo de tejidos, y sistemas de resinas, todos ellos con temperaturas de curado diferentes, que pueden ir de los 70 hasta los 225 °C. En grandes palas de aerogeneradores, la temperatura de proceso aproximadamente de 80 °C. Esta temperatura es suficiente para la curar el laminado y mantener bajos los costos de proceso y equipamiento. La presión necesaria para consolidar las capas apiladas de preimpregnados

se logra mediante vacío. Todo el preimpregnado es cubierto por una membrana de polímero, que sella el molde a lo largo de su borde. El vacío tira debajo de la membrana de polímero, y la presión atmosférica prensa las capas de preimpregnado, hacia la superficie del molde. La vida útil de los *prepregs* a temperatura ambiente normalmente oscila entre de unos días a unas pocas semanas, según el sistema de resina. Por lo tanto, los *prepregs* normalmente se almacenan a -18°C , dando como resultado una vida útil de 6 a 12 meses.



Figura 1.13 – *Vacuum bagging.*

La tecnología preimpregnado ofrece algunas ventajas: es fácil de controlar y se obtienen propiedades del material constantes, así como también un mayor contenido de fibra que proporciona una mayor rigidez y resistencia del material, lo que lleva a palas más ligeras. Además, es un proceso limpio, lo que conduce a un mejor ambiente de trabajo, con menos requisitos en sistemas de ventilación del taller (que resulta en ahorro de costos).

En la actualidad la gran mayoría de las palas de molinos eólicos se fabrican mediante la inyección resina asistida por vacío (*VIP, vacuum infusion process*). Esta técnica principalmente consiste en colocar las fibras secas en el molde, encapsular y sellar el paquete de fibras, inyectar la resina líquida dentro del paquete de fibras y luego curar el componente. Esta tecnología se desarrollo en los años 50, pero fue utilizada muy pocas veces por la industria hasta los años 90. A partir de ese momento los accesorios para el proceso y el equipamiento para procesar fueron desarrollados en forma intensiva y

hoy en día la tecnología de inyección asistida por vacío es ampliamente utilizada en la industria. La inyección es un paso crucial en el proceso de fabricación del aspa ya que tanto el tiempo de producción como la calidad de la estructura dependen directamente del proceso de infiltración. Diversas técnicas y métodos han sido propuestos a través de los años para ayudar a los ingenieros a modelar el proceso de inyección de estructuras de materiales compuestos, pero la mayoría se han centrado en la fabricación de piezas de material compuesto de paredes finas. Una de las razones principales de ello es la falta de métodos para caracterizar las propiedades del material especialmente en la dirección del espesor.

La técnica se caracteriza por el hecho de que el motor de la transferencia de la resina en el refuerzo es el vacío, que al mismo tiempo también comprime el refuerzo. El proceso se divide en cinco pasos de producción que se ilustran en la Figura 1.14.

La primer paso en el proceso de fabricación es la preparación del refuerzo del aspa, también llamada preforma (véase Figura 1.14-a). Esto incluye el corte de distintos tipos de *mats* de fibra de vidrio y también la preparación del material del núcleo como por ejemplo, madera de balsa, para las áreas de sándwich en el aspa.

El segundo paso en el ciclo de fabricación es colocar el refuerzo y las distintas capas que permiten sellar el sistema en el molde de la pieza, como se muestra en la Figura 1.14-b. Aquí el material de refuerzo se apila y es colocado en el molde, y durante este proceso, la estructura del refuerzo se distorsiona en cierta medida para que las capas de material se adapten a la superficie curva de la molde. Este proceso se denomina *draping*. El drapeado es importante porque el apilamiento de las laminas de *mats* puede resultar en la arrugas de la preforma y alterar las propiedades del material en comparación con el material sin distorsiones. Durante el apilamiento, se utilizan los cortes realizados en el primer paso, pero la mayor parte del material de refuerzo se coloca directamente en el molde desde los rollos para minimizar la distorsión del material y también ahorrar tiempo. Un ejemplo de esto es muestra en la Figura 1.15.

Luego comienza la preparación para la inyección (Figura 1.14-c). En primer lugar toda la preforma es cubierta con una tela denominada *peel ply*, cuya función es separar la pieza inyectada de los tubos de entrada y la bolsa de vacío y al mismo tiempo dar rugosidad a la superficie para posteriores operaciones de pegado.

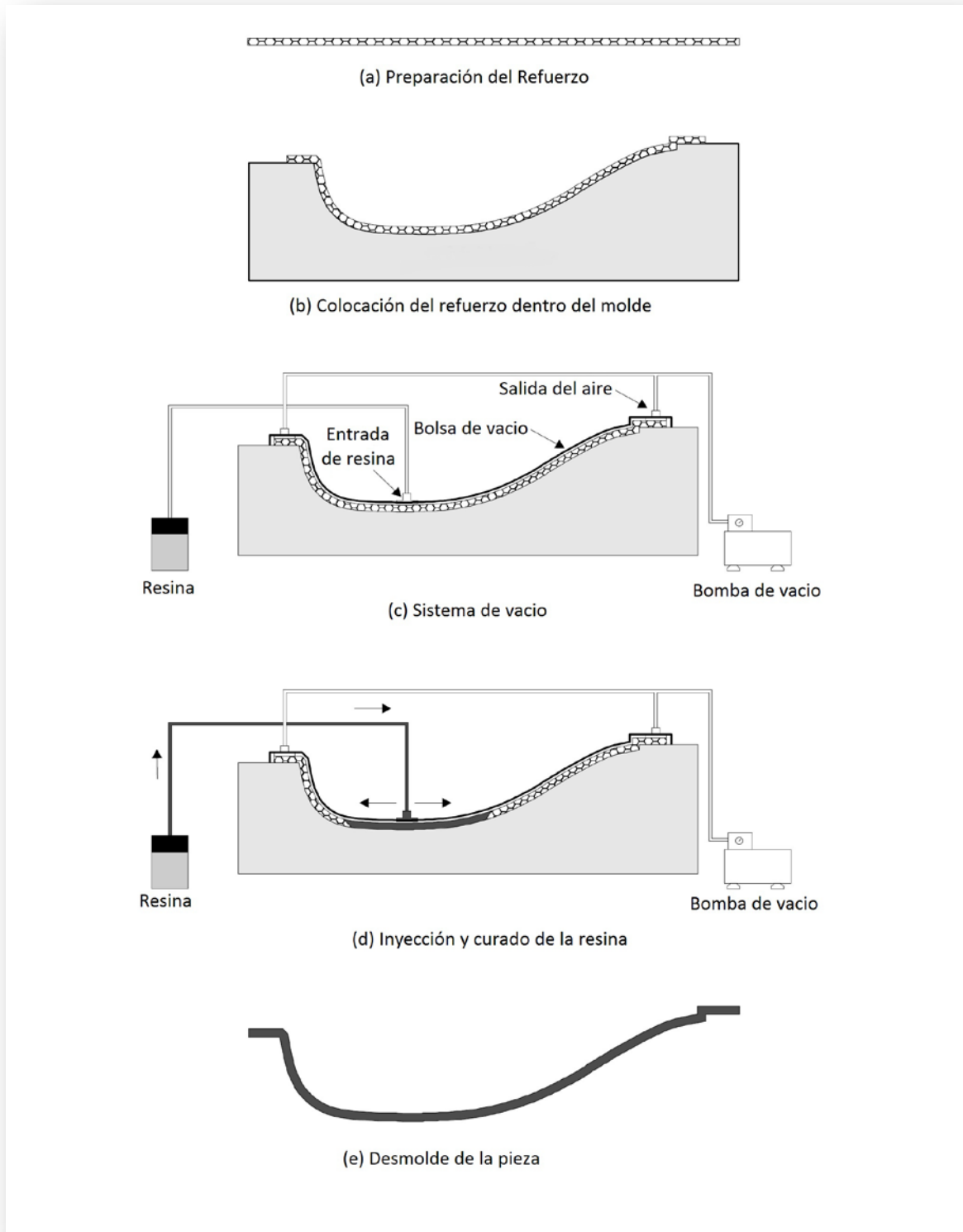


Figura 1.14 – Ciclo típico en el proceso de fabricación mediante VIP.



Figura 1.15 –Ubicación del material de refuerzo en el molde.

Una vez que la pala está cubierta, se colocan las entradas de la resina y los puntos de venteo del vacío. Las entradas de resina son tubos espiralados abiertos colocados en sentido longitudinal en la dirección del aspa y que están conectados al recipiente de la resina. En general, se utilizan varias entradas de resina, abriéndose las mismas en una secuencia predeterminada para evitar puntos secos y tener control sobre el frente de avance del fluido. El segundo sistema en funcionamiento es el sistema de vacío. Este consiste en una bomba de vacío conectada a la preforma con salidas del aire distribuidas por tubos espiralados a lo largo del molde. Por último, la preforma es cubierta por una delgada lámina de Nylon (la bolsa de vacío), y el molde se sella al aire a lo largo de los bordes usando una cinta selladora. Mediante el uso de una bomba de vacío, el aire en la preforma es evacuado, y la diferencia de presión entre la preforma y el aire a presión atmosférica hará que la misma se comprima contra el molde.

Después de que el nivel de vacío deseado se alcanza, el cual se mantiene constante durante toda infusión, el proceso se inicia como se muestra en la Figura 1.14-d y 1.16. Esto se hace mediante la apertura de la primera entrada de resina, donde la resina del recipiente es impulsada a través de la preforma debido a la diferencia de presión entre el interior y el exterior del molde. Este proceso continúa hasta que la preforma está completamente saturada, lo que significa que todos los poros de la preforma son llenados con resina. Con esto concluye el proceso de inyección, y la pieza se deja por varias horas para que se dé lugar al proceso de curado de la resina.

El paso final en el ciclo de VIP se muestra en la Figura 1.14-e, y es el desmolde de la pieza y dejándola lista para el montaje.

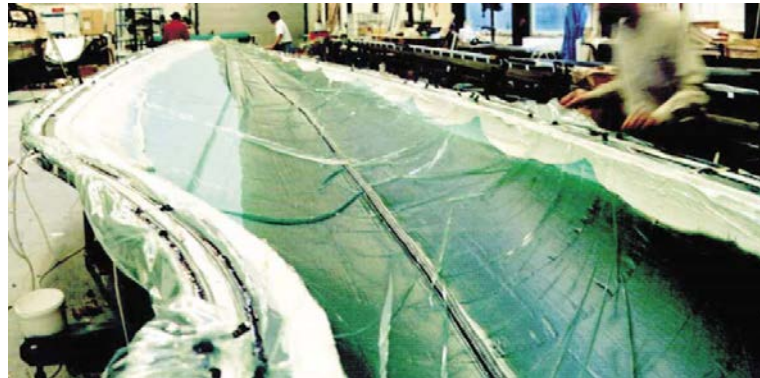


Figura 1.16 – Inyección de resina asistida por vacío.

1.5 Estructura y aerodinámica del aspa

Las palas de aerogeneradores están diseñadas para aprovechar al máximo la potencia del viento al menor costo. La etapa inicial del diseño está regido por la relación que existe entre los requerimientos aerodinámicos y el costo de fabricación.

El proceso de diseño del aspa comienza con la "mejor estimación" de compromiso entre la eficiencia aerodinámica y estructural. La elección de los materiales y el proceso de fabricación también tendrán influencia en el diseño. La forma elegida teniendo en cuenta únicamente factores aerodinámicos da lugar a las cargas, que se introducen en el diseño estructural. Los problemas identificados en esta etapa se pueden utilizar para modificar la forma si es necesario y volver a calcular el rendimiento aerodinámico.

Las palas capturan la energía eólica de la misma manera que las alas de un avión: a partir de la fuerza de sustentación del aspa que surge debido a su forma. La curvatura del perfil de la Figura 1.17 obliga al aire pasar a mayor velocidad por encima que por debajo causando una diferencia de presiones, más baja arriba que abajo, con lo cual el ala tenderá a subir. El resultado neto es una fuerza perpendicular a la dirección del flujo del aire.

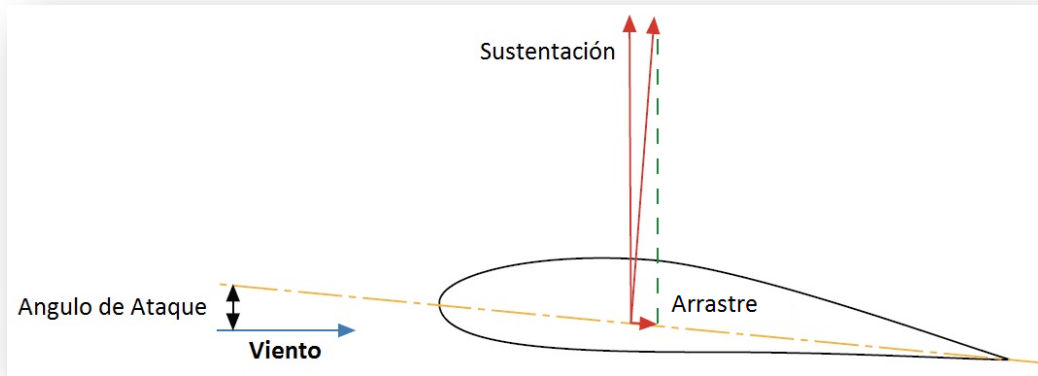


Figura 1.17 - Diagrama de fuerzas del aspa.

La fuerza de sustentación aumenta a medida que el perfil rota a lo largo del aspa y exhibe un ángulo mayor con respecto al viento. Este se conoce como el ángulo de ataque (véase Figura 1.18). Al aumentar el ángulo de ataque progresivamente se llega a obtener una fuerza normal máxima a partir de la cual el perfil entra en pérdida. La entrada en pérdida es un fenómeno aerodinámico que consiste en la disminución de la fuerza de sustentación sobre cualquier perfil aerodinámico. Esta disminución puede ser más o menos brusca en función del diseño del perfil aerodinámico. Así que existe un ángulo de ataque óptimo para generar la elevación máxima como vemos en la Figura 1.18.

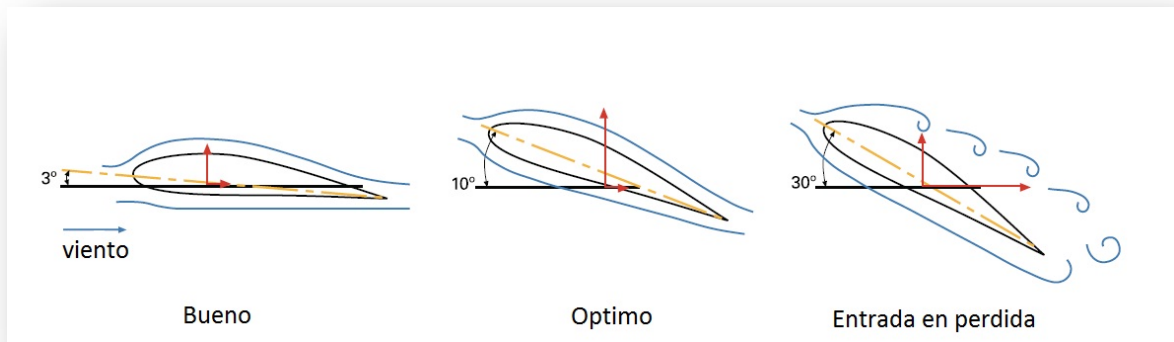


Figura 1.18 – Ángulos de ataque.

Lamentablemente también existe una fuerza de resistencia en el aspa: el arrastre. Esta es la fuerza paralela al flujo del viento, y también aumenta con el ángulo de ataque. Si el perfil aerodinámico es bueno, la fuerza de sustentación es mucho mayor que la resistencia, pero cuando el ángulo de ataque es muy grande, la resistencia aumenta de forma espectacular. Por lo tanto el ángulo óptimo debe ser ligeramente menor que el

ángulo de sustentación máximo, en esta configuración el aspa alcanza su máxima relación sustentación/arrastre.

Dado que la resistencia se encuentra en la dirección del viento, puede parecer que no importa para una turbina de viento ya que el arrastre sería paralelo al eje de la turbina, por lo que no disminuiría la velocidad rotor. Sin embargo el movimiento propio del molino a través del aire implica que, para el aspa, el viento sopla desde un ángulo diferente al real, dando lugar a lo que se conoce como viento aparente. El viento aparente es más fuerte que el viento real, pero su ángulo es menos favorable: cambia la dirección de la fuerza de sustentación y arrastre (véase Figura 1.19), reduciendo la fuerza que hace girar el aspa y aumentando el efecto de arrastre que tiende a frenarla.

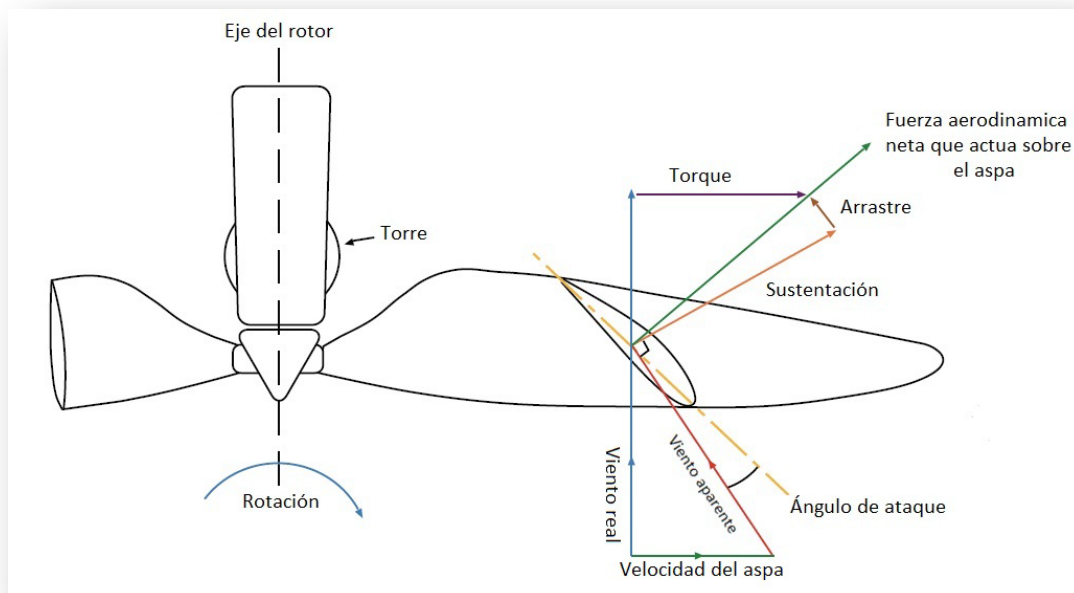


Figura 1.19 – Viento aparente.

El resultado de esto es que, para mantener un buen ángulo de ataque, la pala debe girar más que el ángulo propuesto para el viento real.

Como podemos ver en la Figura 1.20 el perfil del aspa gira con respecto al eje de su longitud mayor, ya que cuando nos acercamos a la punta de la pala, la velocidad tangencial es mayor y por lo tanto mayor es el ángulo del viento aparente. De esta manera, la pala debe girar más en la punta que en la raíz, en otras palabras, debe ser construida con un giro a lo largo de su longitud. Normalmente, el giro es de alrededor de 10°-20° desde la raíz hasta la punta. El requisito de giro de la pala tiene repercusiones en la complejidad de la fabricación.

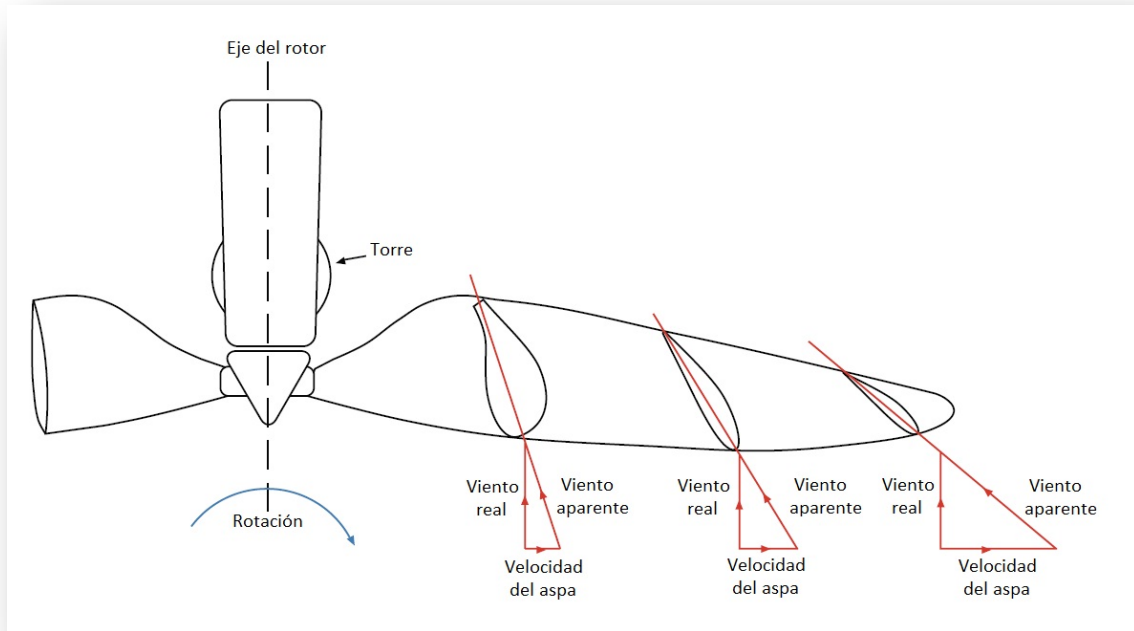


Figura 1.20 – Giro del perfil a lo largo del asa.

1.5.1 Estructura del asa

Como vimos en la discusión sobre la aerodinámica el proceso de diseño del asa comienza con la "mejor estimación" de compromiso entre la eficiencia aerodinámica y estructural. La elección de materiales y proceso de fabricación también tendrá una influencia en qué geometría se pueda construir, y a qué costo. Por lo tanto, la ingeniería estructural tiene un papel esencial para lograr que las disciplinas del diseño y fabricación se junten para dar lugar a la solución óptima en términos de rendimiento y costo.

- El asa como una viga estructural

La fuerza de sustentación en el asa, que hace girar la turbina, se distribuye a lo largo de la misma aproximadamente en proporción a la radio local, es decir, hay más fuerza de elevación cerca de la punta de la que hay cerca del centro. La fuerza de sustentación tiende a flexionar el asa generando un momento flector a lo largo de la misma.

Por lo tanto, es intuitivo pensar que el asa debe ser más gruesa, es decir, más fuerte, en la raíz y de menor espesor en la punta en donde el momento flector es menor. Afortunadamente esta disposición de espesores es favorable también desde el punto de

vista aerodinámico: el aspa necesita una sección más delgada en la punta, donde el arrastre es más crítico. Cerca del eje del rotor la sección debe ser más ancha para generar sustentación ya que la velocidad del viento es menor. Aumentar el ancho del aspa genera un aumento en el costo de la misma, por lo tanto lo que se hace es aumentar el alto del perfil. Por desgracia, el alto necesario para que el aspa sea lo suficientemente fuerte y rígida es mayor que el necesario para la eficacia aerodinámica, por lo tanto se debe buscar un compromiso entre el peso estructural (costo) y la pérdida de eficiencia aerodinámica.

- *Estructura de vigas internas*

Si el aspa fuese sólida en lugar de hueca, el espesor requerido en cada punto a lo largo de la misma simplemente sería determinado por el momento flector en ese punto. Debemos tener en cuenta que cuando el viento somete al aspa a un momento flector, la cara expuesta al viento va a estar solicitada en tracción, mientras que la cara opuesta va a estar solicitada en compresión. El material del centro de esta hipotética aspa sólida, no va a estar sometido ni a tensión ni a compresión, es decir, no va a tomar carga. Así que para reducir el costo de fabricación del aspa tiene mucho sentido quitar el material del centro, y hacerla hueca. Para mantener la resistencia a la flexión y unir las dos caras del aspa estructuralmente se coloca un perfil doble T en el centro de la misma tal como vemos en la Figura 1.21.

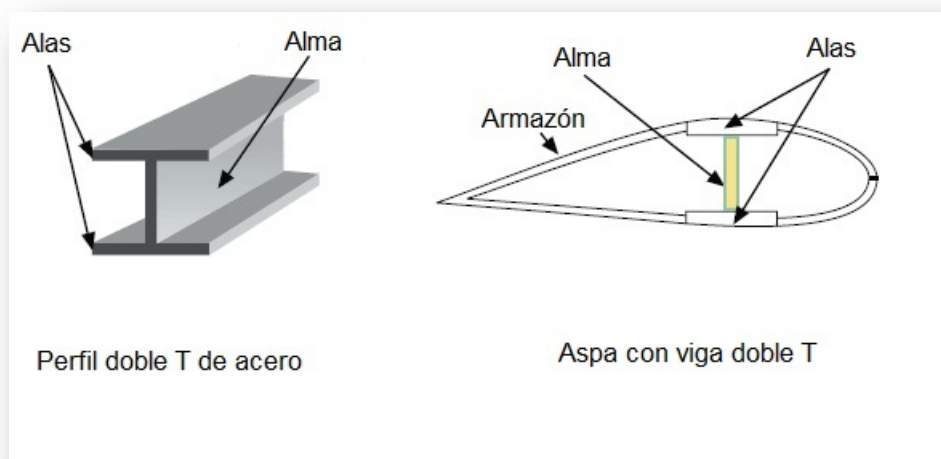


Figura 1.21 – Viga central aspa.

La pala de aerogenerador funciona de la misma manera que un perfil de acero doble T excepto que el armazón exterior que da la forma aerodinámica también contribuye para aumentar la resistencia a la flexión. Por lo general se construyen las dos piezas que forman el armazón y por otro lado se construye el alma. Luego las tres partes se pegan para dar lugar a una única pieza.

1.6 Etapas del diseño y construcción de elementos laminados

El diseño de piezas de materiales compuestos es considerablemente más complejo que el diseño de piezas de materiales tradicionales. No sólo se debe idear la geometría del elemento sino también diseñar el propio material. Históricamente, al principio del uso de los materiales compuestos, la secuencia de apilado se limitaba a configuraciones cuasi-isotrópicas, con propiedades parecidas en cualquier dirección de la lámina, como por ejemplo con secuencias del tipo $[\pm 45, 0, 90]_s$ (laminado simétrico formado por una lámina a $\pm 45^\circ$, una a 0° , dos a 90° , una a 0° y una a $\pm 45^\circ$). Esto simplificaba el proceso de diseño, ya que gracias a este comportamiento isotrópico el compuesto equivalía a un material tradicional de bajo peso. No obstante, estos laminados desaprovechaban la posibilidad de los materiales compuestos para obtener mejores propiedades en las direcciones más solicitadas. Es decir, diseñar las propiedades de material a través de la elección del número y orientación de las láminas que forman el laminado con la finalidad de obtener una rigidez y resistencia que cumpla con los requisitos deseados a medida de la aplicación. [10]

Por lo tanto, en el diseño de una pieza de material compuesto es habitual diseñar la geometría de la pieza y la configuración de los componentes, de forma que se aprovechen mejor las cualidades de este tipo de materiales, reforzando las direcciones con mayor nivel de esfuerzo. Así, se debe empezar por definir cada uno de los materiales componentes, la orientación del refuerzo en cada lámina u orientaciones del tejido, el espesor de cada una de las láminas (que básicamente dependerá de la densidad del refuerzo o tejido utilizado) y, finalmente, la secuencia de apilado óptima de éstas. Es bien conocido que la secuencia de apilado de las láminas juega un papel crucial en el comportamiento final del laminado.

Otro aspecto importante durante el diseño es comprobar el grado de compatibilidad del refuerzo con el método de producción y la geometría del componente. 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.

A pesar de las cualidades de los materiales compuestos, en cuanto a reducción de peso y diseño de propiedades, el costo unitario de este tipo de materiales continúa siendo el principal inconveniente para una mayor utilización. El principal responsable de este elevado costo es el estado actual de la tecnología de fabricación y de laminado de este tipo de materiales. Asimismo, es muy importante la correcta elección del proceso de fabricación empleado, a fin de garantizar una buena calidad final del elemento.

Así, el proceso de diseño (esquemático en la Figura 1.6) requiere de un primer paso de definición del problema y de las especificaciones que deberá cumplir el elemento a diseñar.

A partir de esta información se genera una serie de soluciones mediante un proceso de síntesis apoyado básicamente por la experiencia y conocimientos del diseñador. Las posibles soluciones viables se analizan posteriormente para comprobar su efectividad.

Todo este proceso no es lineal, más bien se trata de una tarea iterativa que permite ir mejorando la solución propuesta hasta llegar al diseño final. [11]

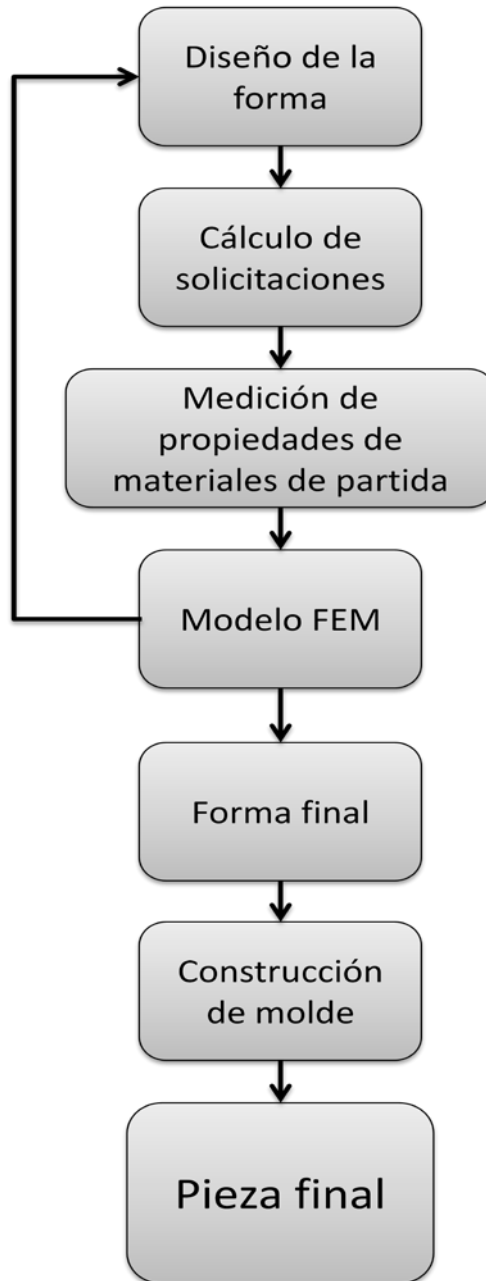


Figura 1.6 –Esquematzación de las etapas del proceso de diseño.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción del contra molde fueron los siguientes:

- ✓ Madera terciada de 6 mm
- ✓ MDF (fibrofácil) de 3 mm
- ✓ Pino de 2” x 1”
- ✓ Polivinil acetato (Cola de carpintero)
- ✓ Mat de fibras de vidrio cortas de 300 gr/m²
- ✓ Yeso
- ✓ Espuma de Poliuretano en aerosol
- ✓ Lijas
- ✓ Masilla Poliéster
- ✓ Tela de Teflón autoadhesiva

En la fabricación del molde se utilizó resina vinil éster DERAKANE 411–350, mat de fibras de vidrio cortas de 300 g/m² y perfiles de pino de 2” x 1”.

Para la producción del aspa la resina utilizada fue la DERAKANE 411–350 Vinil éster*. La misma es una resina epoxi basada en bisfenol-A. Posee baja viscosidad y tolera grandes cargas sin causar la falla del componente debido al daño de la resina.

Como refuerzo se utilizaron *mats* de fibra de vidrio cortas tipo E de 300g/m² (ver Figura 2.1). Se verificó este valor cortando láminas de 20 cm x 20 cm y pesando las mismas. El resultado fue de 288 ± 13 g/m².



Figura 2.1 – Mat de fibra de vidrio cortas.

Las fibras de vidrio tipo mat se mantienen cohesionados gracias a un emulsionante soluble en estireno, que a su vez favorece la adhesión entre la matriz y el

refuerzo. Las mismas son utilizadas en la construcción de laminados estructurales e impermeabilizaciones con resinas de poliéster y vinil éster.

Para la realización del nervio que se colocó en el interior del aspa se utilizó el mismo tipo de refuerzo que en el material de la cáscara pero con matriz de resina poliéster*.

Dentro del aspa también se colocó Espuma de Poliuretano Fischer*.

*Ver ficha técnica en Anexo I.

2.2 Metodología

2.2.1 Ensayos de viscosidad

Los valores de la viscosidad de la resina antes de los ensayos de infusión se obtuvieron utilizando un viscosímetro Brookfield modelo DV-II plato y cono. La temperatura del ensayo fue ambiente y la velocidad de rotación de 50 RPM.



Figura 2.2 – Viscosímetro Brookfield

2.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido que pasa a través de él en cierto tiempo es despreciable. Este dato se utilizará en el Capítulo 4 para simular el proceso de infusión.

Basándonos en la ley de Darcy como el modelo que rige el flujo en la situación que se asemeja a las condiciones reales de fabricación, se realizaron ensayos para determinar los valores de la permeabilidad en el plano utilizando el método del canal de flujo.

En esta técnica la resina es inyectada a través de de una cavidad rectangular que contiene las fibras de vidrio, como vemos en la Figura 2.3.

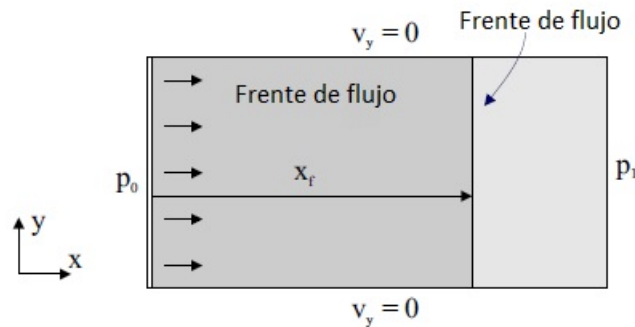


Figura 2.3 – Método del canal de flujo.

Tomando como hipótesis que la velocidad del fluido es nula a los lados de la placa, tenemos flujo en una sola dimensión. El flujo puede tener un frente de avance o puede estar en estado estacionario. Para el caso que estamos analizando el frente de flujo se encuentra en movimiento, donde la preforma esta inicialmente seca, podemos utilizar presión constante o caudal de constante. Al utilizar presión constante el flujo se vuelve inestable debido a cambios en la velocidad de avance del frente. La permeabilidad se obtiene a partir de la siguiente ecuación. [12].

$$K = \frac{\mu\phi}{2\Delta P} x_f^2 \frac{1}{t_f} \quad (2.1)$$

Donde t_f es el tiempo transcurrido, φ la porosidad, K la permeabilidad en la dirección del flujo, ΔP la presión de inyección y finalmente x_f es la posición del frente de flujo. Graficando x_f^2 en función de t se obtiene la permeabilidad.

De las variables anteriores la única que no es conocida es la porosidad. La porosidad del refuerzo de un material se define como cantidad de espacio que puede ser ocupado por la resina durante la inyección. La porosidad φ está relacionada con la fracción de volumen de fibra V_f mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = 1 - V_f \quad (2.2)$$

Cuando se procesan materiales compuestos por técnicas de infusión, donde una de las caras del molde es flexible, el contenido de fibras de la pieza final no puede predecirse a menos que se conozca exactamente la curva de compresibilidad del refuerzo de fibras. Como esa curva no era conocida, se calculó la fracción de volumétrica de fibra fue obtenida mediante calcinación de muestras obtenidas de las placas procesadas. Para obtener este valor se midió el peso y la densidad de tres probetas que luego se calcinaron en una mufla (2 horas a 250 °C y 4 horas a 565 °C) para eliminar la resina y poder calcular la fracción másica de fibra en el material compuesto. Utilizando la siguiente ecuación podemos calcular el valor de la fracción en volumétrica de fibra.

$$V_f = \frac{M_f \delta_c}{\delta_f} \quad (2.3)$$

Donde M_f es la fracción másica de fibra, δ_c es la densidad del compuesto y δ_f es la densidad de la fibra.

La densidad de la fibra se obtuvo a partir de bibliografía mientras que la densidad del compuesto se calculó a partir de la medición del volumen y la masa de 3 probetas de 5 cm x 1 cm. El volumen se midió mediante un picnómetro y la masa a partir de una balanza digital. Los instrumentos empleados se muestran en la Figura 2.4.



Figura 2.4 – Pícnómetro (izquierda), balanza digital (derecha).

Estas probetas se calcinaron para degradar la resina y dejar sólo las fibras de vidrio. Pesando las naves con la probeta antes y después del proceso de calcinación se calculó el porcentaje de fibra y luego la porosidad.



Figura 2.5 – Mufla (izquierda), probeta calcinada (derecha).

2.2.3 Caracterización mecánica

Para obtener las propiedades mecánicas de los compuestos, que se utilizaron como valores de entrada en el modelado estructural se realizaron ensayos de tracción. Los mismos se efectuaron en base a la norma ASTM-D3039 obteniéndose valores de módulo de elasticidad y resistencia a la rotura del material (E y σ_{rot} respectivamente).

Es importante remarcar 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.

Se ensayaron 10 probetas que se obtuvieron a partir del corte de una placa realizada mediante infusión asistida por vacío. Para obtener las probetas se cortaron 10 rectángulos de 14 mm x 120 mm (y 40 cuadrados de 14 mm x 14 mm, tabs) utilizando una amoladora de mano con un disco de corte de 4 ½”. El corte que genera esta herramienta no es perfectamente recto por lo que se lijaron los bordes de las probetas tratando de que las caras de la misma quedaran paralelas.

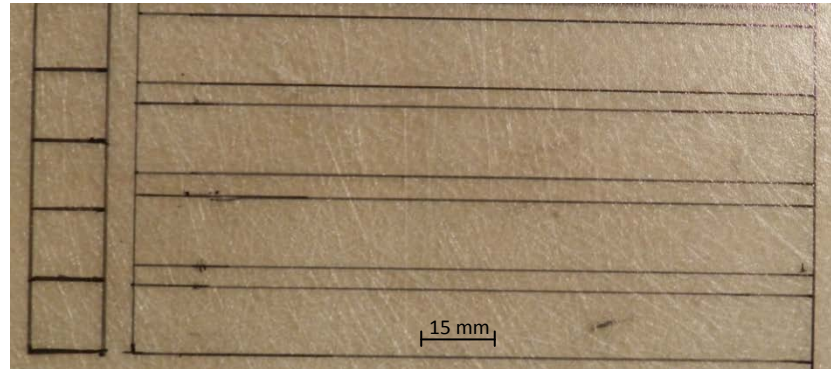


Figura 2.6 –Corte de probetas.

Al ensayar probetas rectangulares se pueden obtener resultados no deseados ya que en la zona de la mordaza se concentran tensiones debido a la compresión que las mismas generan por lo tanto se decidió colocar tabs. El material de los tabs fue obtenido de la misma placa de donde se extrajeron las probetas. La colocación de los mismos se realizó lijando levemente el tab y la probeta en la zona de agarre (Figura 2.7 izquierda.) y luego pegando los tabs con cianoacrilato en gel (Figura 2.7 derecha).

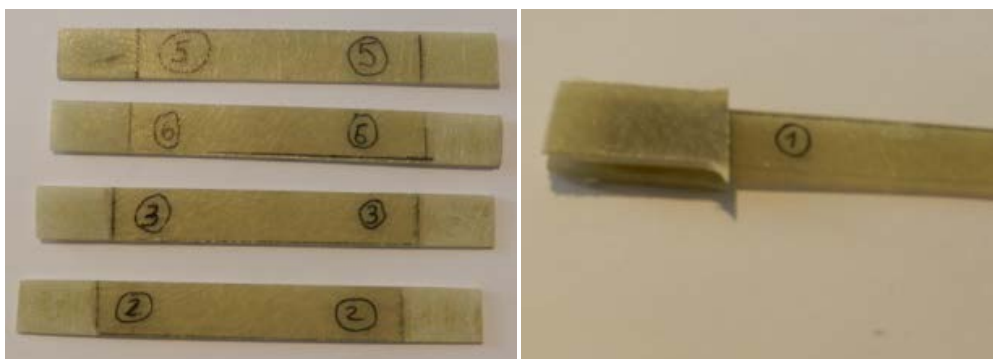


Figura 2.7 – Probetas lijadas (izquierda), colocación de tabs (derecha)..

Se realizaron tres mediciones del ancho y espesor para cada probeta con un calibre. En la Tabla 2.1 se detallan los valores promedio de las áreas calculadas a partir mediciones realizadas para cada probeta.

Probeta	Área (mm ²)	Desviación estándar
1	28,9	2,7
2	27,9	2,4
3	26,4	1,3
4	28,5	1,4
5	23,2	1,7
6	26,7	1,2
7	25,2	0
8	26,4	0,1
9	27,3	1,7
10	27,7	1,7

Tabla 2.1 – Áreas de las probetas ensayadas

Para la realización de este ensayo se utilizó la máquina universal de ensayo INSTRON - serie 4467 (Figura 2.9). La celda de carga utilizada fue de 30 KN. Las mismas se colocaron en posición vertical sostenidas por dos mordazas como se muestra en la Figura 2.8. La superficie de cada probeta debe estar libre de defectos o imperfecciones para evitar la falla prematura de la misma. Ésta debe sujetarse primero de la mordaza superior, la cual tiene una rótula que auto-alinea la probeta. Una vez en la posición correcta se la sujeta de la mordaza inferior que es fija. La sujeción debe ser lo más fuerte posible para evitar el deslizamiento relativo de la probeta respecto de las mordazas. Este paso es crítico porque de soltarse la probeta debe repetirse el ensayo y omitir los datos arrojados por la misma.

Antes de comenzar el ensayo se conecta un extensómetro en el centro de la probeta (Figura 2.8). Una vez que se alcanzó la deformación para la cual el extensómetro llega a su máxima amplitud, se paró el ensayo, se quitó el instrumento para continuar nuevamente con el ensayo.



Figura 2.8 – Maquina de ensayos INSTRON (izquierda), extensómetro y mordazas (derecha).

La velocidad de ensayo se determinó a partir de la norma ASTM D – 3039 de acuerdo con las dimensiones de las probetas. Las probetas se ensayaron a una velocidad de 2 mm/min, a temperatura ambiente y sin control de las condiciones ambientales.

Las propiedades mecánicas obtenidas en este capítulo se utilizaron como dato de entrada en el Capítulo 3 para el análisis estructural del aspa. Mientras que los datos de viscosidad y permeabilidad se utilizaron para diseñar el proceso de infusión.

3 DISEÑO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL

3.1 Diseño geométrico

Como vimos en el Capítulo 1 el proceso de diseño del aspa comienza con la "mejor estimación" de compromiso entre la eficiencia aerodinámica y estructural. Por lo tanto el diseño del aspa de una turbina eólica es extremadamente complejo. Realizar un diseño desde cero requeriría amplio conocimiento de aerodinámica. Es por eso que los datos geométricos del aspa fueron solicitados al profesor Turaj Ashuri de la Facultad de Ingeniería Aeroespacial Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos.

Los datos fueron proporcionados en archivos de texto con las coordenadas x e y de los puntos que dan lugar a diferentes cortes a lo largo del aspa. Utilizando el programa de diseño 3D SolidWorks se unieron los con puntos líneas (Figura 3.1). Cada perfil es diferente y a su vez rota con respecto al eje longitudinal del aspa según la Tabla 3.1. Una vez que todos los perfiles se colocaron en posición se recubrieron dando lugar a la geometría del aspa (Figura 3.2).

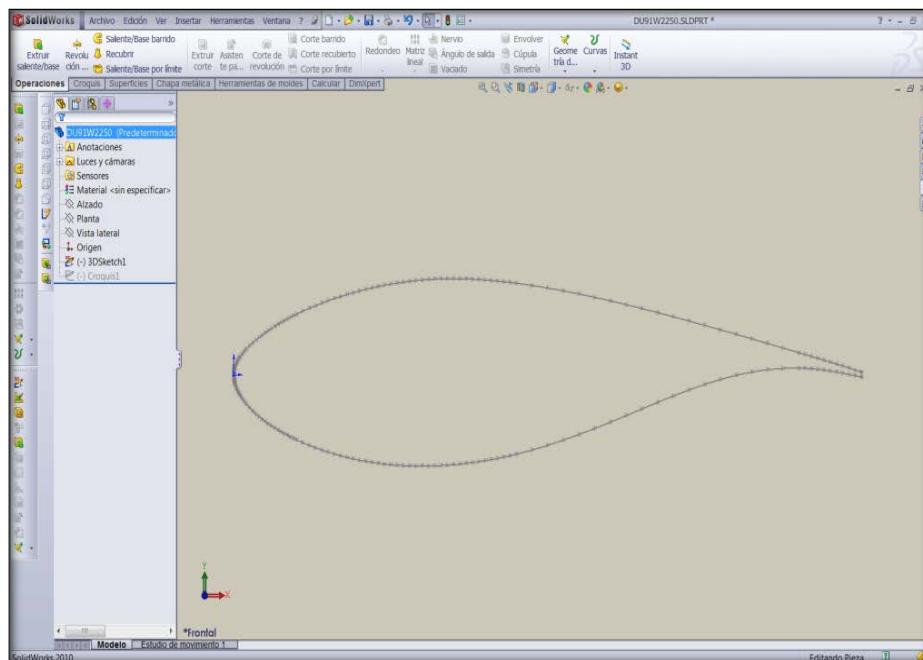


Figura 3.1 – Puntos del perfil aerodinámico unidos por una línea.

Perfil (N°)	Posición (mm)	Ancho (mm)	Rotación (grados)
1	0	80	-
2	40	80	-
3	305	132	13,31
4	413	145	13,31
5	543	148	11,48
6	673	142	10,16
7	803	135	9,01
8	934	127	7,79
9	1064	119	6,54
10	1194	111	5,36
11	1324	103	4,19
12	1454	96	3,13
13	1584	88	2,32
14	1715	80	1,53
15	1823	73	0,86
16	1910	66	0,37
17	1997	45	0,11
18	2018	32	0,06
19	2040	4	0,00

Tabla 3.1 – Posición y rotación de cada perfil aerodinámico.

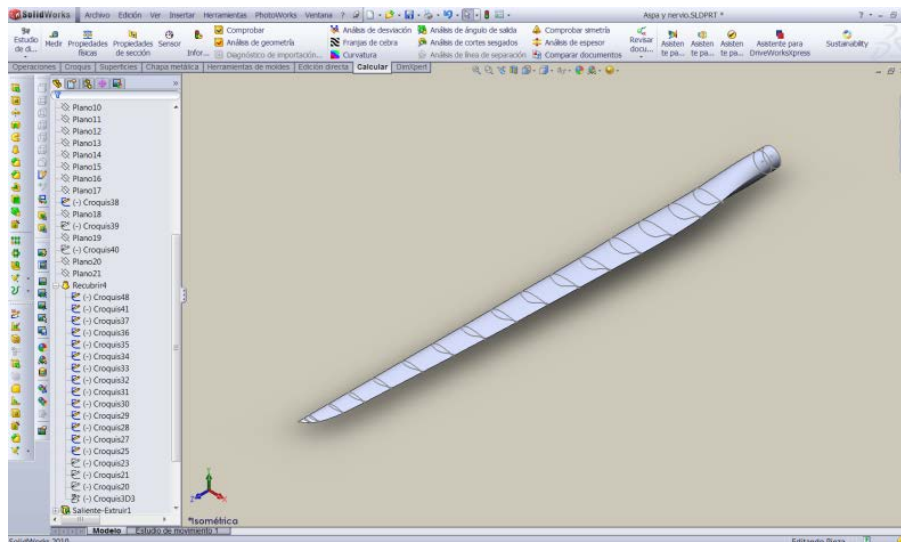


Figura 3.2 – Perfiles recubiertos.

Finalmente se obtuvo el modelo 3D, con el que luego se realizaron los planos para la fabricación de la misma.

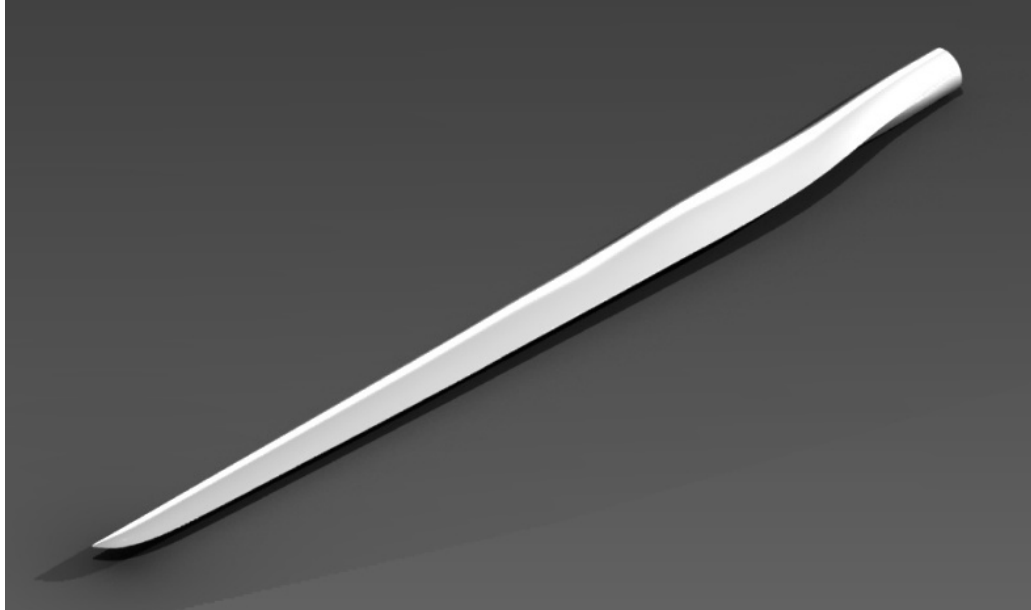


Figura 3.3 – Modelo 3D del aspa.

A este modelo se le agregó una viga central para disminuir el espesor de las paredes del aspa, tal como podemos ver en los planos de Anexo II.

3.2 Diseño Estructural mediante el método de elementos finitos (MEF)

El MEF se ha utilizado ampliamente para el análisis estructural de las aspas de turbinas de viento, diseñadas durante las últimas décadas. Es un método muy útil que captura todos los detalles necesarios y permite al diseñador determinar respuestas estructurales para una variedad de casos de carga. En este caso en particular el cálculo se realizó para dimensionar el espesor del aspa. En particular, la pala tiende a ser más gruesa que la aerodinámica óptima, cerca del rotor, donde las tensiones debido a la flexión son mayores.

3.2.1 Cargas

El análisis estructural comienza con la determinación de las cargas. A continuación se describen las cargas presentes en el aspa de una turbina eólica:

Fuerzas aerodinámicas: Son fuerzas distribuidas a lo largo de la pala, debidas a la acción del viento. Aunque son las responsables del par motor, actúan predominantemente en la dirección del eje del rotor. Tienen una importante variación a lo largo del tiempo, no sólo debido a los cambios en velocidad y dirección del viento, sino

también debido a la rotación de la pala, que produce cambios cíclicos en las cargas de frecuencia igual a la velocidad de rotación de la máquina. Son las causantes de los momentos flexores extremos y de buena parte de la fatiga.

Fuerzas máxicas: Asociadas a la masa del álabe, van cobrando mayor importancia a medida que aumenta el tamaño de las turbinas. A su vez pueden agruparse en:

Fuerzas de inercia: Aparecen cuando se producen cambios en la velocidad de rotación de la turbina, especialmente en paros de emergencia, o bien cuando aparecen fenómenos de resonancia. Actúan predominantemente en la dirección de la transversal al eje mayor del aspa. Son responsables de los momentos extremos en esta dirección. Los fenómenos de resonancia se producen cuando la frecuencia natural de la pala coincide con alguna de las excitaciones (velocidad de rotación del rotor, velocidad de paso de una pala, velocidad del generador, etc.) y normalmente conducen a la destrucción de la pala, por lo que la estrategia seguida habitualmente consiste en evitar que se produzca la resonancia, más que en dimensionar la pala para resistir dichas sollicitaciones.

Peso: El peso de las palas, aunque no produce cargas extremas, es responsable de buena parte de la fatiga sufrida por la pala.

Las fuerzas que actúan sobre el aspa pueden ser divididas en dos clases: cargas operacionales, cuando la turbina está girando, o cargas de viento extremo, en este último la turbina no se encuentra en operación. Los vientos extremos pueden disminuir la vida útil del aspa en forma drástica mientras que las cargas operacionales típicamente juegan un papel significativo en la vida a fatiga.

Debido a que la magnitud y dirección del viento varía de manera tan drástica a lo largo de la longitud del aspa durante el funcionamiento de la turbina, las cargas operacionales no son fáciles de definir. Además, estas cargas son menores que las impuestas por las condiciones de viento extremo. Por lo tanto, solo se tuvo en cuenta la condición de carga producida por vientos extremos.

Para realizar la simulación la velocidad del viento considerada fue de 214 km/h que es equivalente a un huracán clase 3. Para modelar la presión sobre el aspa debida a los fuertes vientos se utilizó la siguiente ecuación

$$P_{hp} = \frac{1}{2} \delta v^2 \quad (3.1)$$

donde δ es la densidad del aire (1.25 kg/m^3) y v es la velocidad del viento. Si la velocidad del viento es de 214 km/h, la presión en el aspa resulta de 2250 Pa. Si tomamos

el aspa como una placa plana que se encuentra frente al viento la diferencia de presión entre ambos lados de la placa puede aumentar un 40% debido a lo que se conoce como “presión de estancamiento” Por lo tanto la presión asciende a 3150 Pa.[13]

Sin embargo este tipo de vientos extremos viene acompañado de ráfagas que pueden entrar en resonancia con la frecuencia de oscilaciones del aspa y producir deflexiones muy grandes. Debido a esto se incrementó en un 40% la presión aplicada, que finalmente fue de 4410 Pa. [14]

3.2.2 Propiedades del material

El material que se utilizó para fabricar el aspa es transversalmente isotrópico. Debido a que obtener las propiedades en la dirección del espesor es muy complejo, se realizó un modelo donde no se calcularon las tensiones en esta dirección, asumiendo que el material es elástico isotrópico. Algunas de las propiedades necesarias para el modelo fueron obtenidas de bibliografía usando valores de materiales similares a los utilizados en este proyecto. Por otro lado, los parámetros más sensibles se obtuvieron de los ensayos de tracción efectuados. Las propiedades del material se exhiben en la Tabla 3.2.

Parámetro	Origen	Propiedad (MPa)
E	Ensayo tracción	11500
ν	Referencia [15]	0.26
$\sigma_{rot\ tracción}$	Ensayo tracción	196
$\sigma_{rot\ compresión}$	Referencia [16]	104
τ_{rot}	$\tau_{1-2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$	150
ϵ_{rot}	Ensayo tracción	0.051

Tabla 3.2 – Propiedades del material.

ϵ_{rot} : elongación a la rotura

ν : módulo e Poisson

3.2.3 Criterios de Falla

Los criterios de falla utilizados para analizar los resultados fueron los siguientes:

- **Deformación máxima en tracción**
- **Tensión de rotura en tracción**
- **Tsai-Hill**

Este criterio de falla no distingue el tipo de falla ni cuál es la fase dominante en la fractura. En consecuencia no pueden tener en cuenta fenómenos que pueden pasar en la interface entre la matriz y la fibra. En esta categoría de criterios se pueden clasificar las distintas propuestas distinguiendo si el criterio de falla permite o no predecir la falla de la lámina pero no el modo de falla o la fase que rompe.

Para todos estos criterios de falla es necesario determinar parámetros mediante la experimentación en el laboratorio. Normalmente son necesarias pruebas de tracción y compresión uní axial. En dos direcciones perpendiculares y pruebas de corte. Algunos de estos criterios también necesitan de pruebas de tensión biaxial. En muchos de estos casos estos parámetros son términos que permiten formular una expresión cuadrática polinomial que define los estados de tensiones o deformaciones máximos que permite el material.

Tsai-Hill es un criterio basado en los criterios de falla polinomiales y es uno de los criterios más usados y con resultados más ajustados para el análisis de materiales compuestos. El resultado de la ecuación 3.2 debe ser menor a 1 para que el componente no falle.

$$\left(\frac{\sigma_1}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\tau}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\tau^2} < 1 \quad (3.2)$$

Esta formulación se obtiene gracias a que solo consideramos la tensión en el plano por lo tanto la tensión en la dirección del espesor es cero.

3.2.4 Simulación

Todos los análisis se realizaron utilizando *Abaqus* que es un paquete de programas de simulación de ingeniería basados en el método del elementos finitos. El modelo fue utilizado para llevar a cabo un análisis estático de la pala de un aerogenerador. En el mismo se calcularon los desplazamientos, las fuerzas de reacción y tensiones de la estructura para las cargas estáticas (cargas que no varían con el tiempo).

La siguiente lista resume las hipótesis generales formuladas para el análisis de elementos finitos.

1. Análisis lineal elástico (respuesta de la estructura es lineal y elástico) el material permanecen en la región elástica.
2. Las cargas aplicadas se mantienen constantes en dirección y magnitud.
3. El vínculo se supone que es rígido.
4. La fibra no toma carga en compresión, por lo tanto consideramos la tensión de compresión de la resina.

3.2.5 Elementos de cáscara

El elemento de cáscara es una representación bidimensional de un continuo de tres dimensiones. El elemento cáscara se utiliza para modelar estructuras donde una dimensión (espesor) es significativamente menor que las otras dimensiones y la tensión en la dirección del espesor es despreciable. Normalmente, si el espesor de la parte es menor que 1/10 de las dimensiones estructurales a nivel global, el uso del elemento de cáscara es aceptable.

Se utilizaron elementos de cáscara *Abaqus S4* con integración completa. El elemento S4 tiene tres grados de libertad (U1, U2, U3), y tres grados de libertad de rotación (UR1, UR2; UR3). De acuerdo con manual de *Abaqus*, el elemento tipo S4 posee 4 puntos de integración. El elemento de cáscara da soluciones precisas a problemas de flexión, no es sensible a la distorsión del elemento, y evita el bloqueo. El elemento S4 se puede utilizar para problemas en las áreas donde se requiere una mayor precisión de la solución, o para problemas en los que se espera flexión y grandes deformaciones. [17]

3.2.6 Validación

Para la validar los resultados del *Abaqus* se realizó un “ensayo de flexión” del material analizado, donde la misma fue sometida a una carga y a continuación se midió el desplazamiento de la punta de la misma como se ve en la Figura 3.4. Las dimensiones promedio de la probeta fueron 230 mm x 15 mm x 2.1 mm, la carga (plomada) fue de 177 g y se midió en una balanza electrónica.

Se realizó una línea transversal a 80 mm del extremo de la probeta y se alineó la misma con el borde de la mesa. Luego se colocó un sargento para mantener la probeta en posición y con una regla alineada mediante un plomo se realizó una marca sobre la regla que indicaba el estado inicial de la probeta.

El paso siguiente fue colocar la carga en el extremo de la probeta y realizar una nueva marca sobre la regla, la distancia entre las dos marcas, es decir el desplazamiento máximo de la probeta fue de 21 mm.



Figura 3.4 – Probeta en voladizo.

Luego se realizó un modelo con las dimensiones promedio de la placa. Para modelar el sistema físico se restringió el desplazamiento de los nodos en la dirección 3 en el extremo fijo y en las direcciones 1 y 2 a 80 mm del mismo. Mientras que el otro extremo de la probeta se dejó libre. La carga puntual aplicada fue de 177 gramos y se colocó centrada y a 2 milímetros del extremo libre. Se utilizaron elementos S4 y un mallado de 3526 elementos. El resultado del análisis fue un desplazamiento máximo de 22.7 mm (Figura 3.5).

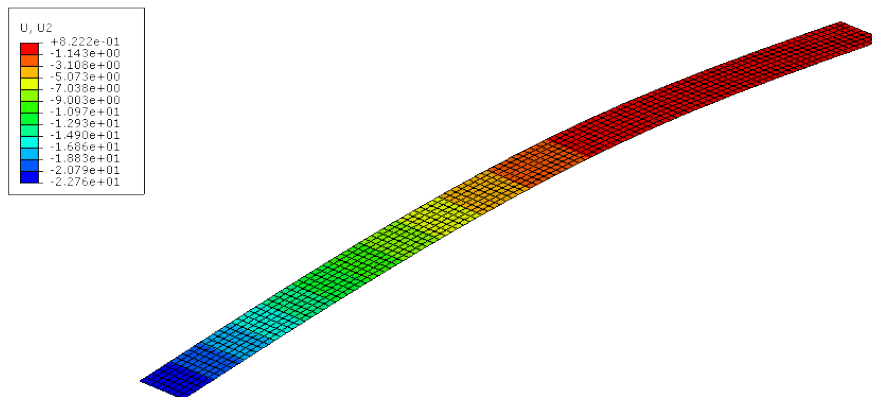


Figura 3.5 – Modelo de placa en flexión.

Para verificar que el mallado fuera el correcto se realizó un gráfico de desplazamiento máximo en función de la cantidad de elementos, donde se observa la convergencia de la solución a medida que aumentamos el número de nodos (Figura 3.6).

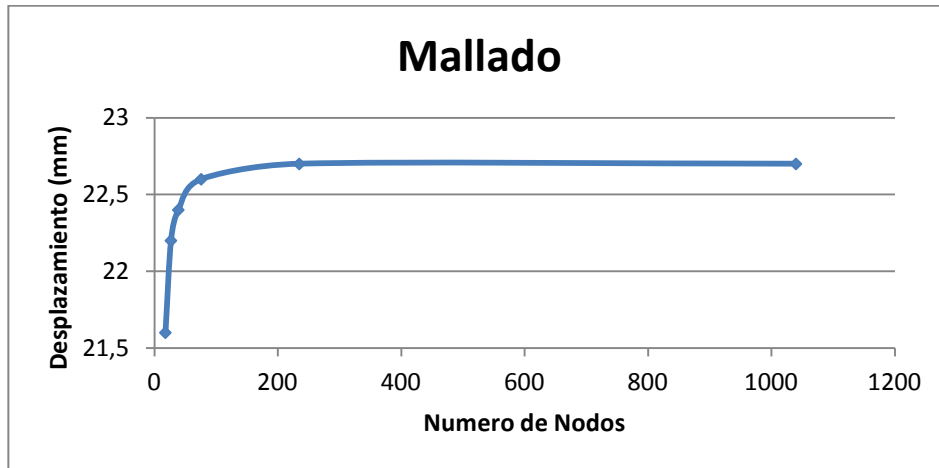


Figura 3.6 – Desplazamiento vs número de nodos.

La discrepancia entre el modelo y la experiencia fue del 8 % y se debe que las dimensiones de la probeta varían a lo largo de la misma, mientras que en el modelo la probeta es perfecta. Esta discrepancia es aceptable debido a que se encuentra por debajo de las tolerancias aceptables en la mayoría de los proyectos ingenieriles, donde los factores de seguridad suelen superar el 50% de los valores de diseño calculados.

3.2.6 Modelado mediante elementos finitos

El espesor del material se ajustó mediante prueba y error debido a que el mismo es un dato de entrada requerido para el cálculo numérico. La carga se distribuyó uniformemente a en la superficie del aspa como vemos en la Figura 3.7. Se restringió el movimiento en las tres direcciones de los nodos que forman una circunferencia en el final del aspa.

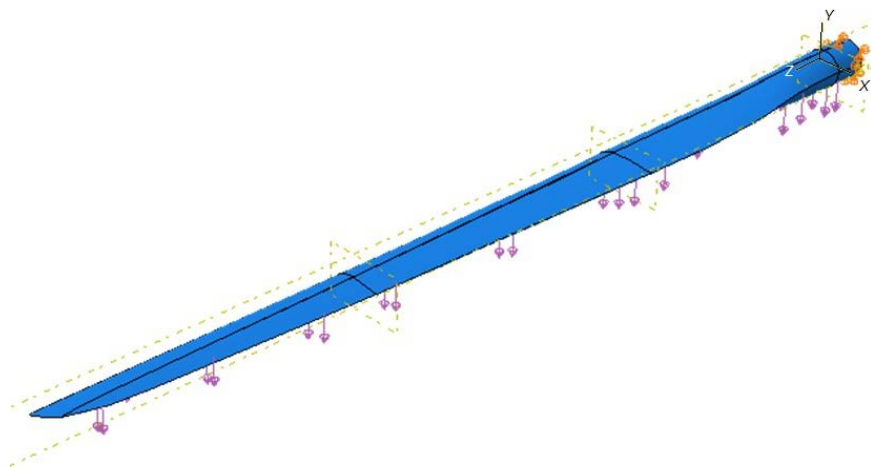


Figura 3.7 – Condiciones de borde.

Luego de realizar varias corridas con diferentes espesores, se llegó a la conclusión de que la distribución de espesor que cumple con todos los requisitos planteados en la sección 3.2.2 y 3.2.3, tanto para el refuerzo como para la cáscara del aspa es la Tabla 3.3:

Posición	Espesor
mm	mm
0-40	3.2
40-700	2.4
700-1370	1.8
1370-2040	1.2

Tabla 3.3 – Distribución del espesor de la cáscara.

Posición	Espesor
mm	mm
0-500	6
500-2040	2

Tabla 3.4 – Distribución del espesor de la viga central.

Para este caso se analizaron las tensiones y deformaciones en la dirección de la longitud al igual que el criterio de falla y el desplazamiento total. En la Figura 3.8 vemos la variación de la deformación en la dirección del eje Z (Figura 3.7) sobre la cara superior. Los picos abruptos corresponden al cambio en el espesor del material y las deformaciones se encuentran por debajo de 51×10^{-3} que es el valor de rotura.

En la Figura 3.9 se observa el gráfico del valor del criterio de falla de Tsai-Hill a lo largo de la cara superior del aspa donde se encuentran las tensiones más altas. En el mismo se observa que la zona crítica es la del empotramiento. También se graficó el desplazamiento a lo largo del aspa (Figura 3.10).

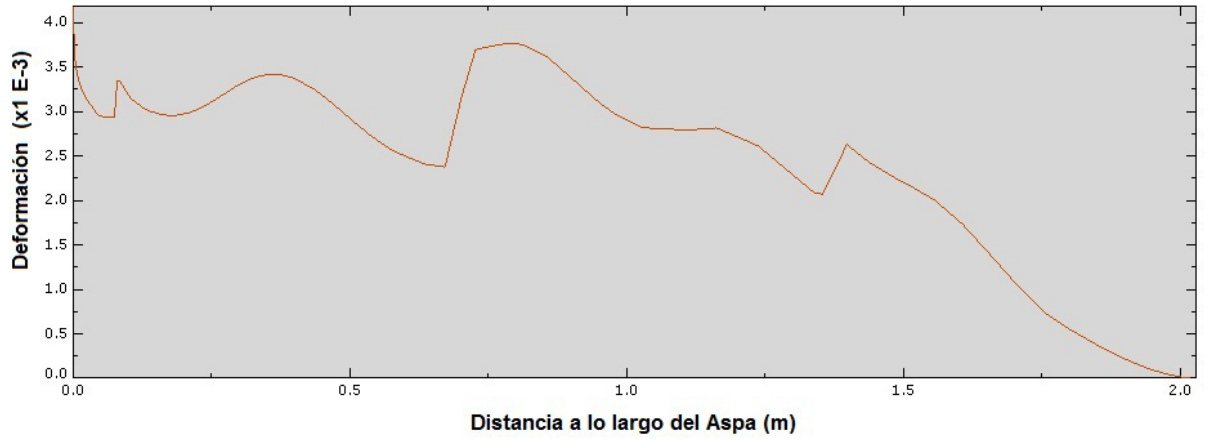


Figura 3.8 –Deformación cara superior.

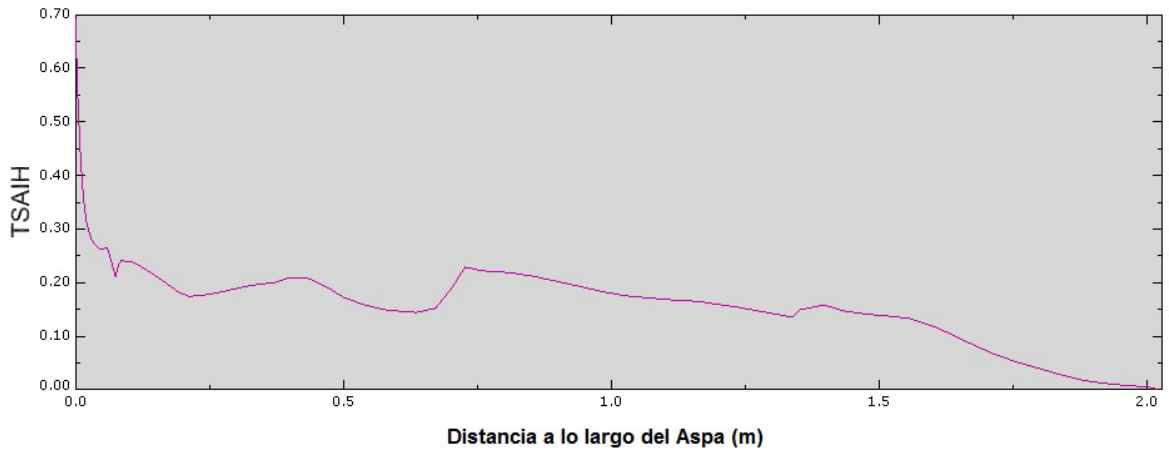


Figura 3.9 –Tsai-Hill.

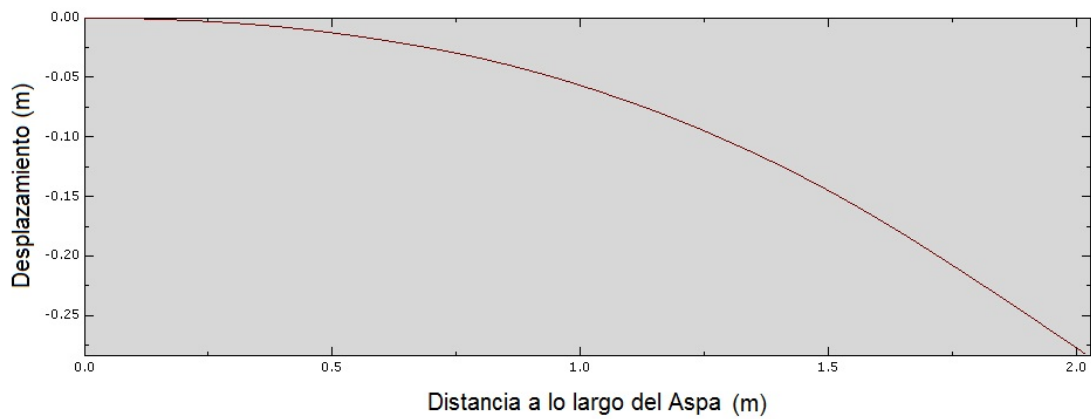


Figura 3.10 –Desplazamiento en la dirección de la carga.

En la Figura 3.11 se muestran superpuestas el aspa antes (malla negra) y después de aplicar la carga (verde). La deformación es la esperada ya que la carga está distribuida uniformemente a lo largo de la superficie del aspa en la dirección y.

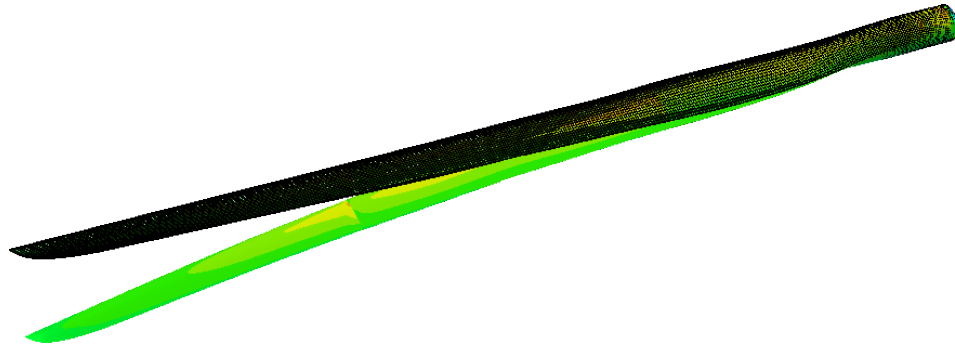


Figura 3.11 –Deformación del aspa.

En la Figura 3.12 vemos la variación de la tensión a lo largo del aspa. Es posible observar que los valores de tensión se encuentran por debajo de la tensión de rotura.

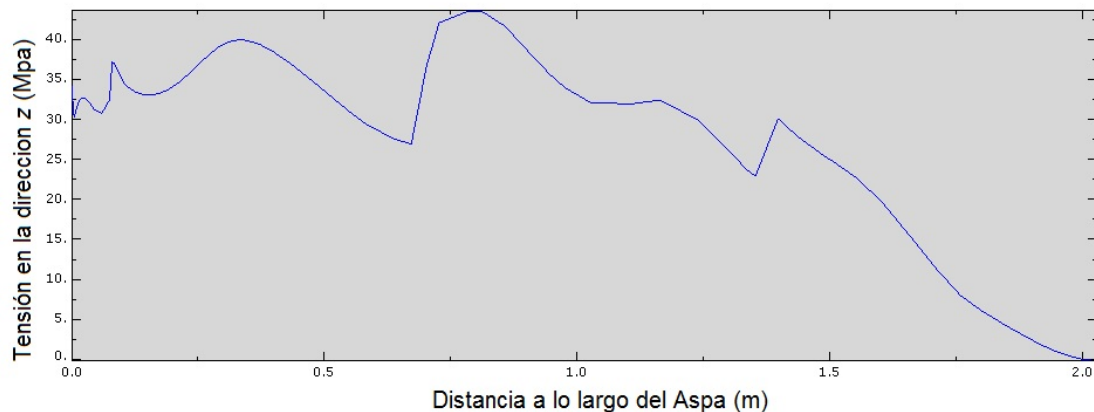


Figura 3.12 –Tensión a lo largo del aspa.

Para verificar la validez del mallado se realizaron cinco corridas del modelo con diferente cantidad de nodos y se observó el desplazamiento máximo en cada una de ellas. Finalmente se realizó el gráfico de la Figura 3.13 para demostrar la convergencia que resultado con el mallado utilizado.

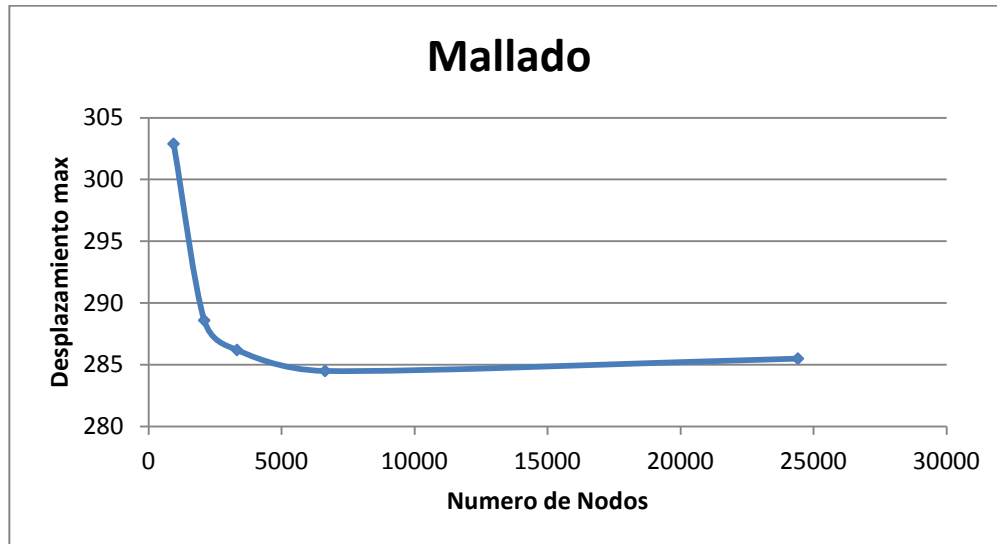


Figura 3.13 –Tensión a lo largo del aspa.

Esta etapa del trabajo fue crucial debido a que en la misma se obtuvo la geometría y el diseño estructural del aspa.

4- MODELADO DEL PROCESO DE INFUSIÓN

La Infusión de resina se está convirtiendo en una tecnología cada vez más importante en la industria de los materiales compuestos. Impulsada por la reducción de las emisiones de estireno, el aumento en la calidad y el control del proceso, la reducción de los costos laborales y la capacidad de realizar construcciones más ligeras y resistentes. El desarrollo de procesos de infusión de grandes estructuras no ha sido posible por un largo tiempo debido a los altos riesgos de fracaso, que implican un gran desperdicio de materiales y de tiempo de producción Sin embargo, los riesgos pueden ser considerablemente reducidos cuando se utiliza un software de análisis de flujo para diseñar la estrategia de inyección.

La utilización de un software de análisis de flujo para el proceso de infusión por vacío hace posible el ahorro de mucho dinero en comparación con el clásico método de prueba y error, este software permite a los ingenieros comprobar nuevas estrategias y optimizar las existentes. En este capítulo se utilizó *RTM-Worx* para diseñar el método de inyección del aspa. [18]

Los datos de entrada del programa fueron la permeabilidad de la fibra, la viscosidad de la resina, el ΔP y las dimensiones de la pieza. Inicialmente se realizó la infusión de una placa de 25 cm x 25 cm con 6 láminas de fibra de vidrio para calcular la permeabilidad de la misma. Se realizaron 5 líneas a 3 cm cada una, sobre la bolsa como vemos en la Figura 4.1 para determinar la posición del frente en fusión del tiempo.



Figura 4.1 – Infusión placa 1.

Los datos obtenidos se graficaron (Figura 4.2) para obtener la permeabilidad de la fibra mediante la ecuación descrita en el Capítulo 2. La medición de la viscosidad de la resina arrojó un valor de 509,6 cp y luego la porosidad que fue de 0.749. Una vez obtenidos estos valores se calculó la permeabilidad que fue de $K = 1.7 * 10^{-9} \text{ m}^2$.

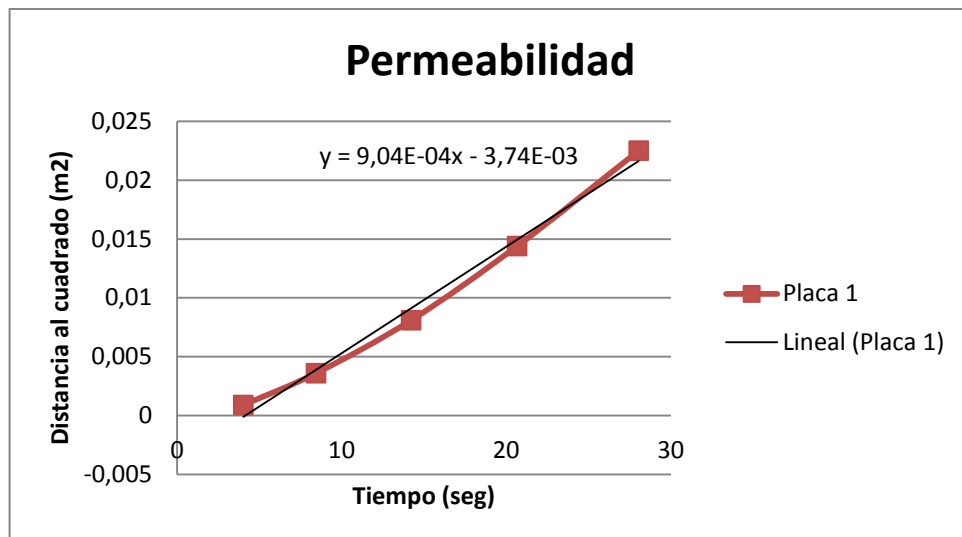


Figura 4.2 – Distancia en función del tiempo.

A partir de estos datos se realizó el modelo de una placa de 25 cm x 25 cm con el mismo diseño de inyección de la placa real. Como vemos en la Figura 4.4 y 4.5 el frente de avance es recto y se completa el llenado de la pieza en 1,84 minutos.

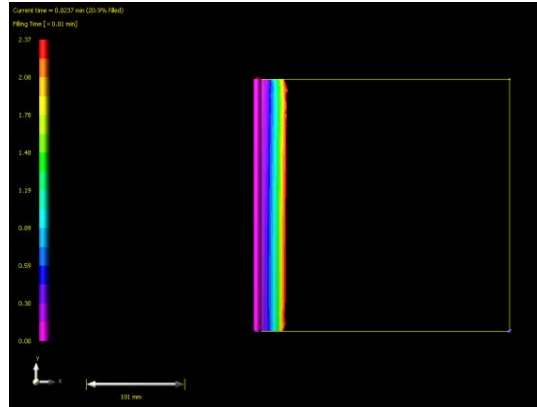


Figura 4.4 – Infusión $t = 1$ segundo.2

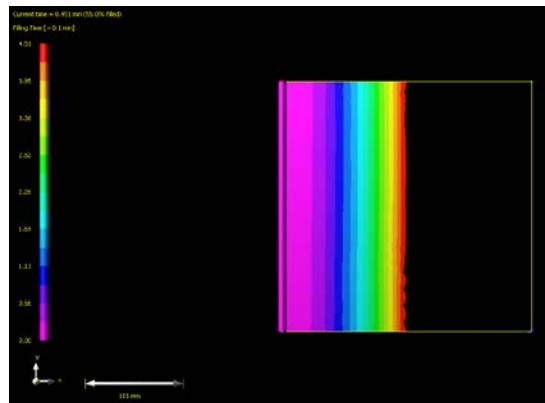


Figura 4.5 – Infusión $t = 27$ segundos.

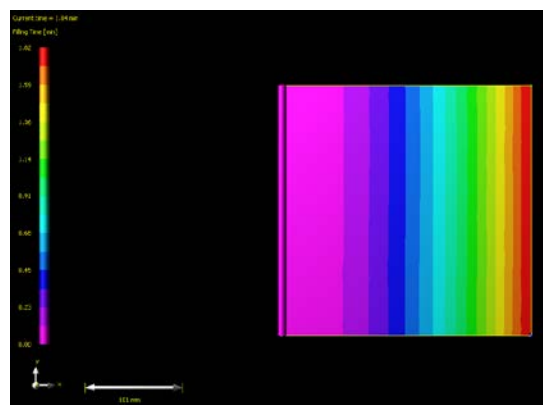


Figura 4.6 – Infusión $t = 110$ segundos.

Luego se realizó la infusión de la placa número 2 de para verificar el funcionamiento del software. La misma presento un frente plano y la infusión se completó en 98 segundos (Figura 4.7).

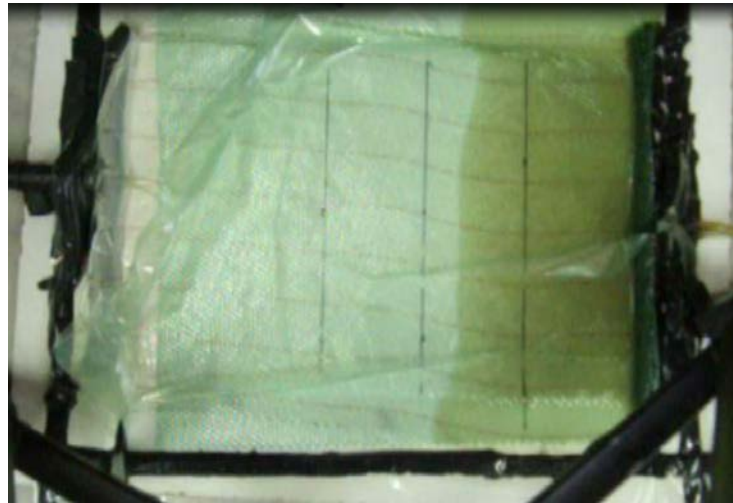


Figura 4.7 – Infusión placa 2.

El error entre el modelo y la realidad fue del 12 % y se debió posiblemente a la falta de calibración del manómetro con el que se midió el ΔP en la infusión, a que las dimensiones de la placa no son perfectas. También sucedió que la manguera que se utilizó para inyectar la resina no tenía la rigidez necesaria y al hacer vacío la misma se estranguló evitando que resina ingresara libremente al molde. Pueden haber existido diferencias tanto en las propiedades de la resina como en la fibra de vidrio ya que las propiedades pueden variar con respecto a los datos proporcionados por el fabricante.

Una vez verificado el funcionamiento del software, comenzó el diseño de la inyección del aspa. Para el modelo numérico de la misma se utilizó la geometría 3D del aspa. A partir del mismo se modelaron dos posibles estrategias de inyección.

La primera con la entrada de resina en el vértice superior derecho. La siguiente secuencia de figuras se obtuvo a partir de los resultados de la simulación. La Figura 4.8 muestra el ingreso de la resina en el molde del aspa.

Como podemos observar el modelo se ajusta a la realidad ya que lo primero en llenarse es el canal espiralado, debido a que el mismo no tiene resistencia alguna al flujo de la resina. La etapa de llenado se completa luego de 16 minutos.

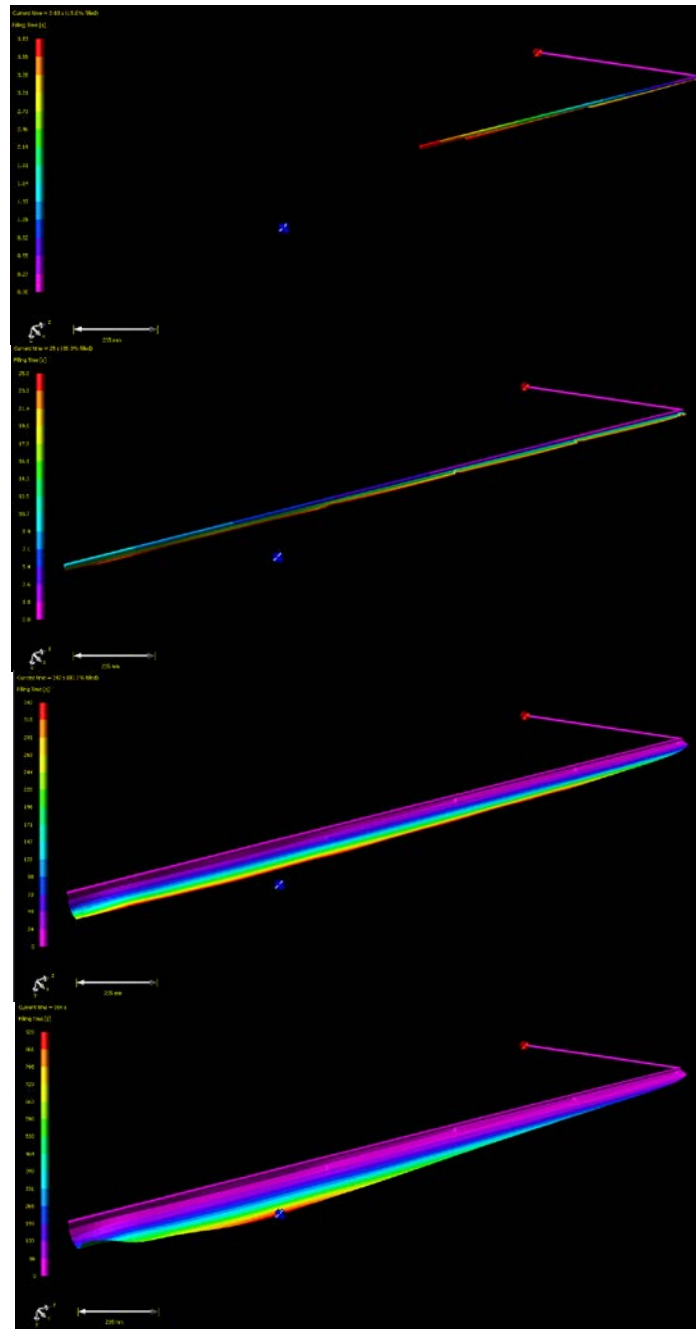


Figura 4.8 – Diseño de inyección desde el borde superior. Porcentaje de llenado en función del tiempo para $t = 3.8$ segundos, $t = 25$ segundos, $t = 6$ minutos, $t = 16$ minutos respectivamente.

Como podemos observar el modelo se ajusta a la realidad ya que lo primero en llenarse es el canal espiralado, debido a que el mismo no tiene resistencia alguna al flujo de la resina. La etapa de llenado se completa luego de 16 minutos.

El tiempo de curado de la resina se midió catalizando 20 cm^3 en un vaso de aluminio y tomando el tiempo de gel, el resultado fue de 18 minutos a temperatura ambiente. El tiempo de inyección se encuentra muy próximo al tiempo de curado de la

resina, lo que puede dar lugar a lo que se denomina “short shot”. Este fenómeno se da cuando la resina gelifica antes del llenado del molde.

Para la segunda estrategia de inyección se colocó la entrada de resina en el centro del canal ingreso para optimizar el tiempo de llenado del molde (Figura 4.9). En la Figura vemos que el ingreso de resina es más uniforme por lo tanto se reduce el tiempo de llenado del molde a 4 minutos.

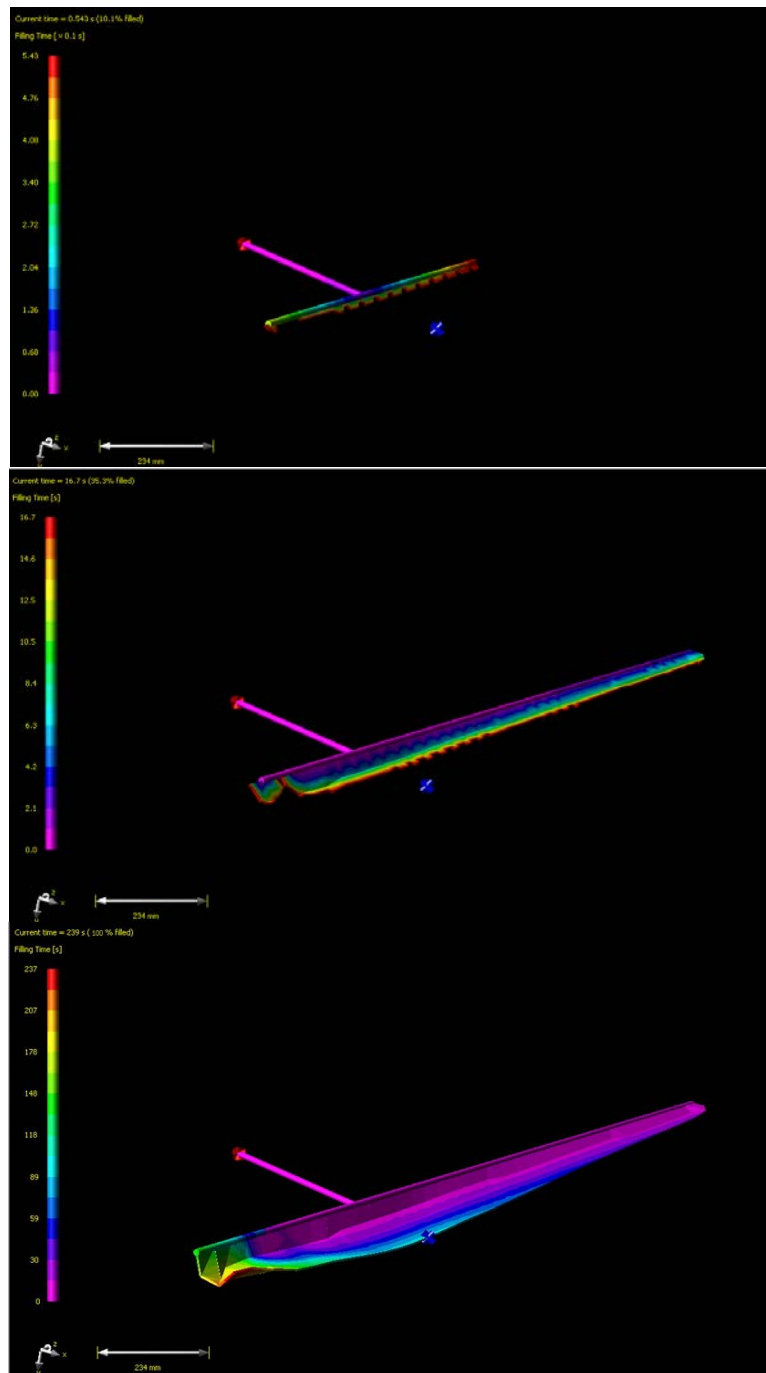


Figura 4.9 – Diseño de inyección desde el centro. Porcentaje de llenado en función del tiempo $t = 0.54$ seg, $t = 16$ seg, $t = 4$ min respectivamente.

Gracias a esta primera aproximación obtuvimos una aproximación del tiempo de llenado del molde y de cuál es la mejor forma de posicionar el ingreso de resina.

5- CONSTRUCCIÓN DE MOLDES

El proceso de inyección de resina asistida por vacío requiere de un molde para poder fabricar la pieza deseada. En este capítulo se describe la fabricación de los mismos para poder cumplir con este requisito del proceso.

La geometría del aspa es bastante compleja y además carece de simetría por lo tanto nos vimos obligados a fabricar un molde para cada una de las caras de la pala. Para obtener cada molde se realizó un contramolde.

5.1 Contramolde

A partir del modelo 3D del aspa se realizaron 18 cortes transversales con respecto a la dirección longitudinal. Estos cortes se hicieron con láser sobre fibrofácil de 3mm. Se obtuvieron 18 perfiles y estos a su vez fueron cortados por la mitad para fabricar el molde superior e inferior. Luego se posicionaron todos los perfiles en base al plano del Anexo II, sobre una madera contrachapada de 30 cm x 210 cm x 0.6 cm, (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Costillas contra-molde 1.

La madera contra chapada fue atornillada a otra madera de melamina de 230 cm x 50 cm para poder generar un plano inclinado progresivo en la superficie de apoyo de las costillas. Cada costilla fue alineada con a la vertical y adherida mediante cola vinílica a la madera contrachapada aun en el mismo plano que la melamina. Una vez que las costillas estaban firmes se procedió a colocar tacos entre la madera contra chapada y la melamina para generar el ángulo correspondiente en función de la distancia (Figura 5.2).

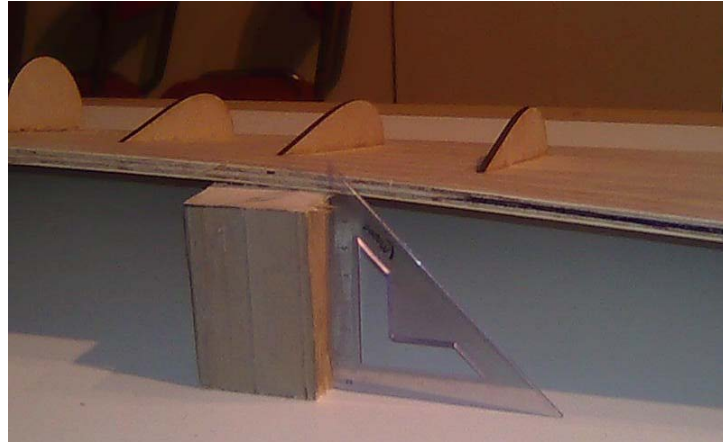


Figura 5.2 –Tacos contra-molde 1.

El objetivo fue generar una pieza con el menor número de detalles superficiales posibles ya que si la superficie del contra molde poseía defectos estos se transferirían al molde y luego a la cara externa de la pieza. En principio se aplicó yeso a los huecos entre cada costilla, pero el resultado no fue bueno (Figura 5.3), ya que el centro del yeso no llegó a secarse por completo y además la superficie obtenida era muy rugosa, quebradiza, difícil de lijar, etc. Esta técnica fue desechada y se reinició la construcción del contramolde.



Figura 5.3 – Contra-molde 1 recubierto con yeso.

La zona más relevante del contramolde era la cara superficial, por lo tanto se optó por rellenar los huecos entre costillas con espuma de poliuretano en aerosol y luego

colocar masilla de poliéster en la superficie del molde para poder alcanzar un buen acabado superficial (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Contra-molde 1 recubierto con espuma de poliuretano.

El siguiente paso fue quitar el excedente de la espuma de poliuretano con un cúter, cuidando de no dañar o despegar las costillas (Figura 5.5).



Figura 5.5 – Corte de la espuma, contra molde 1.

Una vez que se quito todo el exceso de espuma, se preparó la masilla poliéster y se aplicó a toda la superficie mediante una espátula. Cuando la masilla curó por completo comenzó el proceso de lijado, partiendo de una lija grano 60 hasta una grano 400. Debido a que el corte de la espuma se realizó al mismo nivel que las costillas, al lijar algunas de las zonas del contramolde se hacía visible la espuma de poliuretano. Este problema se resolvió aplicando masilla en estas zonas y lijando nuevamente (Figura 5.6).



Figura 5.6 – Remasillado del contra molde 1.

Una vez que la superficie quedó libre de defectos comenzó la construcción del molde. El mismo se realizó mediante el proceso de *hand lay up*.

5.2 Moldes

La técnica de *hand lay up* consiste en la fabricación de piezas de material compuesto haciendo el uso de pinceles y rodillos para favorecer la impregnación de las fibras de refuerzo con resinas termorígidas (Figura 5.7). Esta técnica de fabricación es la que requiere menor inversión y menor calificación del operario y debido a esto es la más extendida de todas. Este método no permite control de espesores y depende mucho de la habilidad del operario. Para asegurar una calidad mínima es muy importante que la salida del aire ocluido en los refuerzos sea forzada mediante rodillos metálicos. Este aspecto es fundamental para obtener piezas con buenas propiedades mecánicas. Esta técnica fue utilizada para la fabricación de los moldes.

Para facilitar el desmolde y evitar que la resina se introduzca en los poros de la madera se colocó un film de teflón autoadhesivo en los bordes del contramolde (Figura 5.8). Luego se procedió a colocar tres capas de cera desmoldante (Meguiar's Mold Release Wax) dejando secar entre capa y capa.

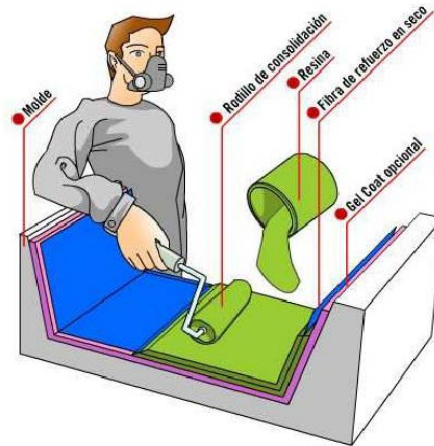


Figura 5.7 –Esquema de la técnica de *hand lay up*.



Figura 5.8 – Film de teflón.

El siguiente paso fue catalizar la resina vinil éster con 0.8% en peso de butanox (MEKP) y 0.2% de acelerador (naftanato de cobalto). Este sistema catalítico permite que la resina vinilester reaccione a temperatura ambiente, permitiendo obtener un grado de curado que otorgue buenas propiedades mecánicas al laminado. Inmediatamente después colocamos un mat fibra de vidrio 150 gr/m² y lo adaptamos a la superficie (Figura 5.9). Luego aplicamos la resina con un rodillo hasta que quedó totalmente impregnado.



Figura 5.9 – Mat de 150 g/m²(izquierda), aplicación de la resina (derecha).

Una vez que adaptamos e impregnamos el mat se procedió a pasar el rodillo metálico para eliminar las burbujas de aire. Posteriormente se dejó curar a temperatura ambiente (Figura 5.10), así aseguramos la calidad superficial del molde evitando las distorsiones provocadas por el “*print through*” (marcado) de las fibras.

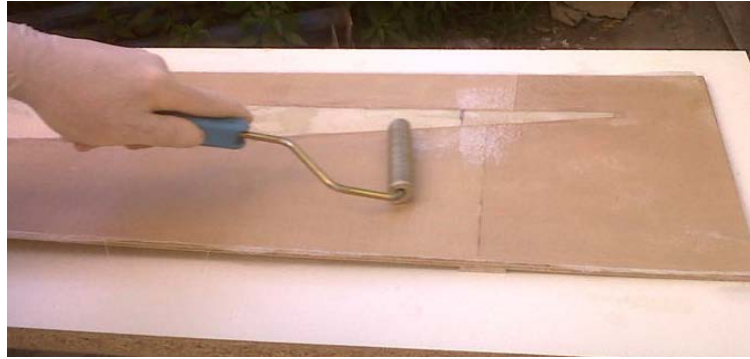


Figura 5.10 – Eliminación de burbujas de aire.

El siguiente paso fue colocar 6 láminas de mat de fibra de vidrio de 300 g/m² (Figura 5.11). Esta técnica nos obliga a impregnar una a una las capas de refuerzo y entre capa y capa debemos aplicar el rodillo metálico para eliminar el aire atrapado en el refuerzo.



Figura 5.11 – Eliminación de burbujas de aire.

Una vez impregnadas las fibras de vidrio se dejó curar a temperatura ambiente durante 24 horas y luego se desmoldó la pieza (Figura 5.12).

Cuando se desmoldó la pieza, partes de contramolde quedaron adheridas al molde, debido a la falta de cera desmoldante y a que el contramolde no tenía buenas propiedades mecánicas. El molde carecía de rigidez ya que poseía bajo espesor y era una placa aproximadamente plana. Para darle estructura y evitar el pandeo del mismo durante la infusión se vinculó la lámina de material compuesto a un marco realizado con listones de

pino de 2”x1” (Figura 5.13). También se colocó teflón sobre los bordes del mismo para facilitar el desmolde de la pieza final.



Figura 5.12 – Fibras completamente impregnadas con resina.



Figura 5.13 – Molde 1 terminado.

Para la construcción del molde número 2 se utilizó exactamente el mismo proceso tratando de no cometer los mismos errores que en el primero. Una de las modificaciones fue quitar mayor cantidad de espuma de poliuretano para evitar que esta salga a la superficie durante el lijado. También se amplió la superficie a ambos lados de la pieza y se colocó teflón a toda la extensión para evitar que la masilla se pegara al molde (Figura 5.14).



Figura 5.14 – Izquierda – Contramolde 2 (izquierda), molde 2 (derecha).

Para aumentar la rigidez del molde se colocaron mangueras de ½” a lo largo y a lo ancho del molde y fueron recubiertas con nuevas capas de fibra y resina (Figura 5.15).



Figura 5.15 – Refuerzos del molde.

Gracias a la utilización de teflón en toda la superficie del contramolde 2, el acabado superficial del molde 2 fue muy superior al del molde número 1 (Figura 5.16).



Figura 5.16 – Superficie molde 2.

Una vez obtenidos los dos moldes, se procedió a realizar la pieza mediante el proceso de infusión de resina asistida por vacío.

6- PROCESAMIENTO

La infusión consiste en la fabricación de piezas de material compuesto haciendo uso de la ayuda del vacío para favorecer la impregnación de las fibras de refuerzo con resinas termorígidas de baja viscosidad (Figura 6.1).

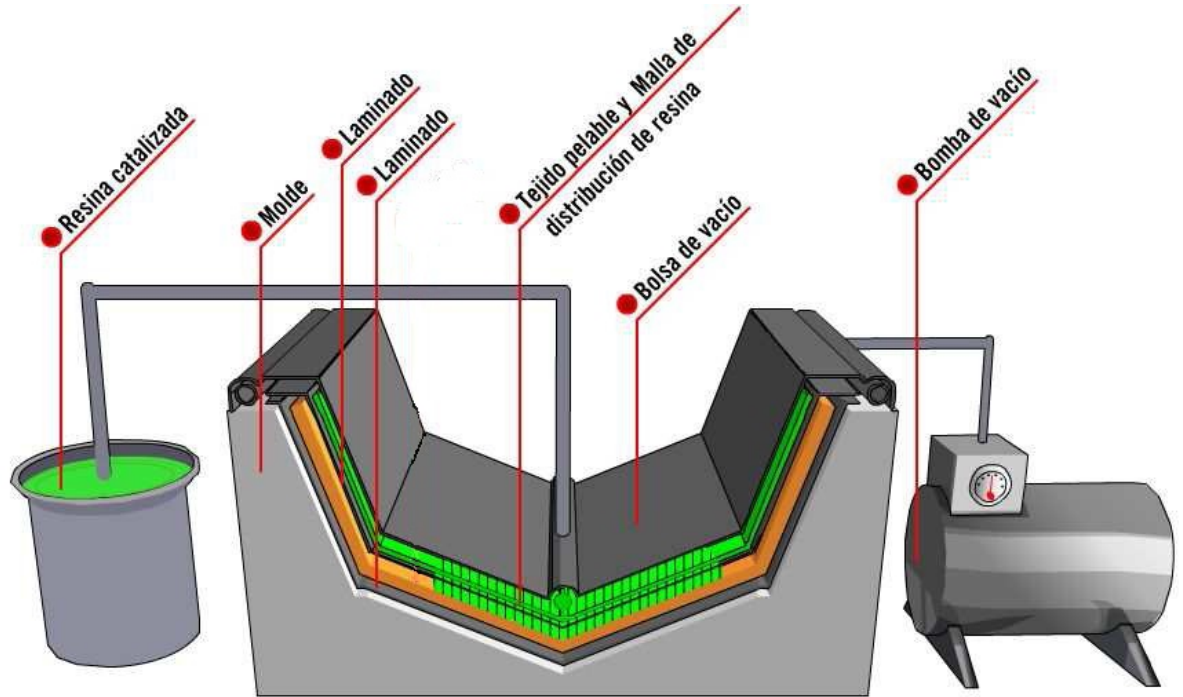


Figura 6.1 –Proceso de infusión.

Gracias al aporte de una presión constante en toda la pieza (vacío) se logra optimizar el espesor final de la misma. Además, el vacío facilita la salida del aire ocluido en los refuerzos, por lo que las piezas fabricadas mediante esta técnica tendrán excelentes propiedades mecánicas con un mínimo riesgo de delaminación del compuesto.

Otra de las ventajas de la infusión radica en que el proceso se realiza sobre un molde cerrado con un contra molde flexible (bolsa de vacío), por lo que las emisiones de volátiles se reducen de forma considerable. Además la bolsa es de muy bajo costo comparado con los contramoldes rígidos de procesos como el RTM o el RTM light.

Entre las pocas desventajas que presenta la infusión están las siguientes:

- Sólo podemos obtener una de las dos caras con buen acabado.
- Es necesario tener cuidado con las posibles exotermias provocadas por la polimerización de laminados de alto espesor.

- Es necesario contar con una serie de materiales consumibles además de la resina y la fibra, tales como: bolsa de vacío, flow mesh (malla de distribución de resina, peel ply (tejido), canales de infusión y de vacío, conexiones para tubos, tacky tape (masilla de cierre), cintas doble cara, cera desmoldante. Este aumento de costo se compensa con la reducción de tiempos de laminado y el menor número de operarios necesarios.
- Debemos contar con un equipo de profesionales calificados.

6.1 Infusión de las caras

La infusión de la cara superior se realizó a partir del molde 1 descrito en el capítulo anterior. La resina utilizada fue Derakene 411-350 y las fibras de refuerzo fueron mats de 300 gr/m². El procedimiento comenzó colocando cera desmoldante sobre el molde y luego el arreglo de laminas de mat de fibra de vidrio (Figura 6.2) según la Tabla 6.1. La misma se construyó a partir de la distribución de espesores calculada en el capítulo 3. Gracias a la experiencia que aportó la fabricación de dos láminas para el cálculo de la permeabilidad, se pudo indagar que si colocamos 6 capas de fibra de vidrio de 300 gr/m² obtenemos un material de aproximadamente 2 mm de espesor.

Posición mm	Espesor mm	Cantidad de laminas de fibra
0-40	3.2	10
40-700	2.4	7
700-1370	1.8	5
1370-2040	1.1	3

Tabla 6.1 – Distribución de fibra láminas de fibra de vidrio.



Figura 6.2 – Distribución de la fibra de vidrio.

Luego se fijaron los canales espiralados con masilla de cierre. Los mismos poseen 10 mm de diámetro y se utilizan para la extracción del aire y el ingreso de resina. Sobre este arreglo se colocó el peel ply (tela poliéster) para que sea factible separar la pieza curada del sistema de infusión. Además el mismo debe abrazar los tubos espiralados para evitar que la bolsa de vacío se meta en los huecos y bloquee el vacío o se corte la bolsa (Figura 6.4).



Figura 6.4 – Peel ply sobre los canales y las fibras.

El paso siguiente fue posicionar la malla de distribución para aumentar la permeabilidad del sistema y así permitir que la resina impregne el refuerzo. Como vemos en la Figura 6.5 la malla de distribución fue colocada únicamente en la zona más ancha del molde. Finalmente se posicionó la entrada de resina, la salida de aire y se colocó la bolsa de vacío con cinta selladora en los bordes de la misma (Figura 6.6).



Figura 6.6 – Malla de distribución.



Figura 6.6 – Sistema de infusión.

El área de la bolsa debe ser mayor o igual a la superficie del molde para que la misma compacte el refuerzo contra el molde. Por lo tanto se generan pliegues en los

bordes del molde como se observa en la Figura 6.7. Estas son las zonas de mayor riesgo de entrada de aire y, consecuentemente, las de mayor riesgo de pérdida de vacío.



Figura 6.7 – Pliegues en la bolsa.

Luego se conectó la salida de aire a la trampa de resina que cuenta con un manómetro que nos permite monitorear el nivel de vacío alcanzado que en este caso fue de -98 kPa. La misma se encontraba acoplada a la bomba de vacío (Figura 6.8). Antes de comenzar con la inyección se debe verificar que el sistema este completamente sellado, por eso mientras no inyectamos la resina, la manguera de ingreso debe permanecer cerrada con una pinza. De existir alguna fuga, la presión negativa se disminuye rápidamente y por ende se disminuye la compactación del laminado.



Figura 6.8 – Trampa de resina.

Una vez que se logró mantener el vacío durante aproximadamente 20 min se procedió a catalizar la resina. Es muy importante darle el tiempo necesario a la resina a eliminar las burbujas producidas durante la mezcla de la misma con el catalizador. De lo contrario el aire atrapado en la resina entra en el refuerzo y debilita la pieza. Como vemos en la Figura 6.9 en este caso no se tuvo en cuenta este detalle.

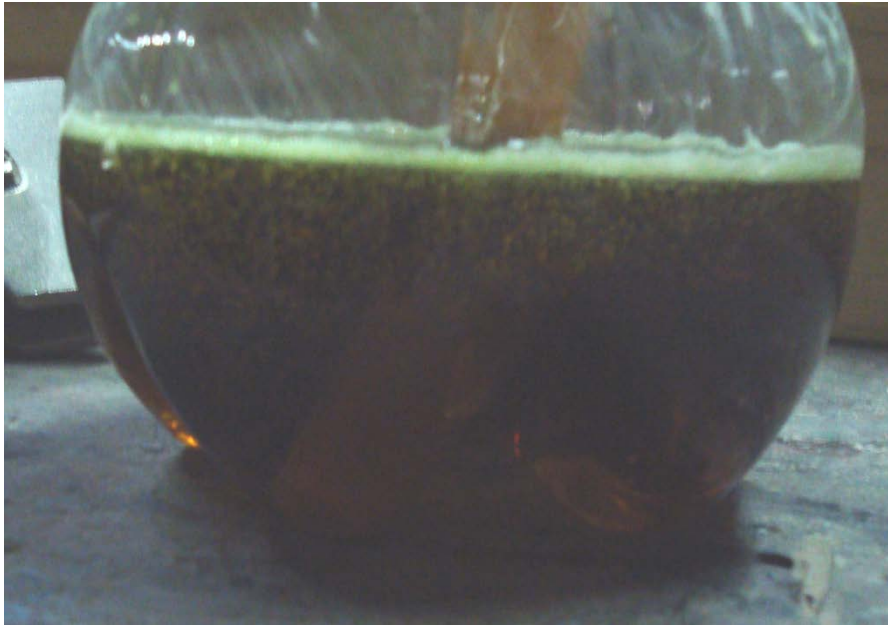


Figura 6.9 – Burbujas en la resina.

El frente de avance fue muy irregular y el avance de la resina extremadamente lento. Luego de aproximadamente 25 minutos la resina geló y no se completó el llenado del molde. Por lo tanto el primer intento de producir la pieza fue fallido.

Las causas del short shot fueron varias, entre ellas se encuentra la disposición de la malla de distribución de flujo, que produjo que el llenado sea irregular y extremadamente lento. En la Figura 6.10 las zonas claras corresponden al refuerzo seco, mientras que las zonas ámbar corresponden al refuerzo impregnado con resina. La malla de distribución de flujo debería haberse colocado sobre los canales de infusión para promover el avance de la resina, en la Figura 6.10 se observa claramente que la malla de distribución de resina se encuentra alejada del canal espiralado. En las zonas donde no se colocó la misma la evolución del llenado del molde fue prácticamente nula (Figura 6.11).



Figura 6.10 – Frente irregular.



Figura 6.11 – Zonas sin malla de distribución.

Otra de las causas fue que la temperatura de la resina era menor a 25 °C, por lo tanto la viscosidad de la misma era más baja que con la obtenida en los ensayos de viscosidad. En las Figura 6.12 podemos ver los defectos de la pieza terminada.



Figura 6.12 – Defectos de la pieza terminada.

Luego de analizar las causas que produjeron el short shot se realizó un nuevo intento de realizar la pieza. Los pasos para armar el sistema de infusión fueron exactamente los mismos que en primer caso, con la diferencia que la malla de distribución de resina se colocó en toda la superficie del molde como se ve en la Figura 6.13.

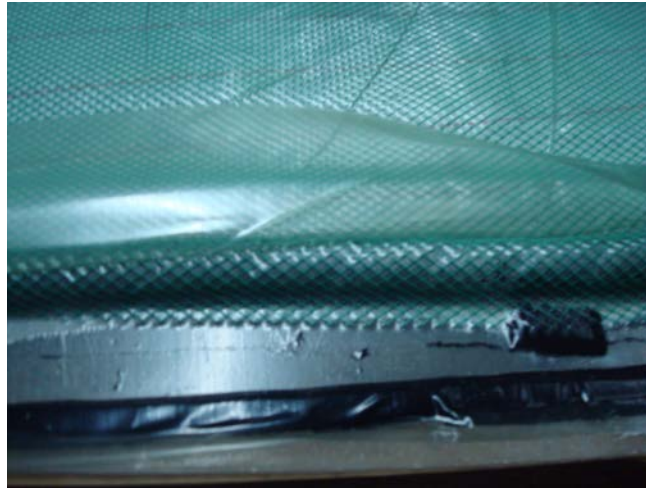


Figura 6.13 – Canales cubiertos con malla de distribución.

La Figura 6.14 vemos el sistema utilizado para la infusión. En la Figura 6.15 se observa la secuencia del llenado del molde 1. En la misma se ve que el frente de flujo es uniforme, lo que favoreció el llenado del molde.

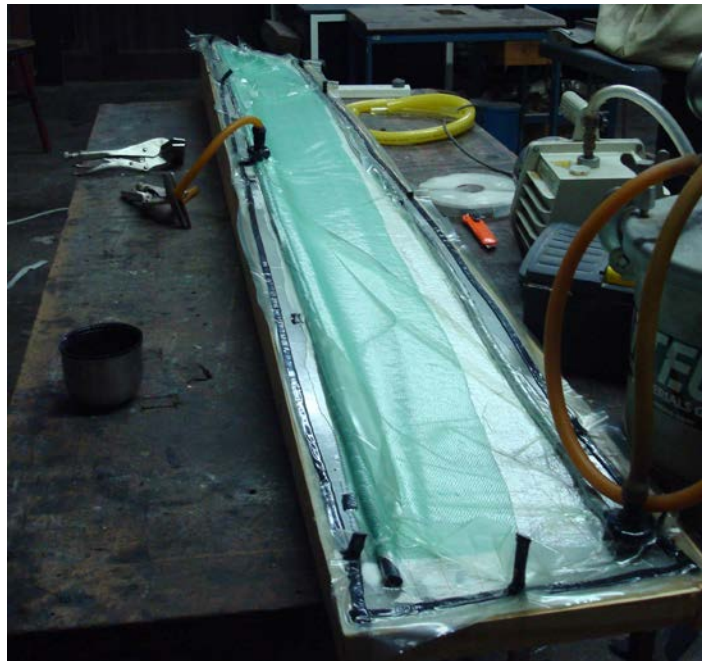


Figura 6.14 – Sistema de infusión.



Figura 6.15 – Llenado del molde.

En apenas 5 minutos la resina impregno la fibra de vidrio y la pieza quedó terminada. Se mantuvo el vacío durante unos minutos, hasta que la resina gelificó y luego dejamos curar la pieza unas 24 horas. Esto fue posible gracias a que la malla de distribución fue ubicada en todo el molde. Además la temperatura de la resina fue de

25°C, por ende su viscosidad fue más baja que en el caso anterior. Luego que la resina curó fue posible desmoldar la pieza (Figura 6.16).



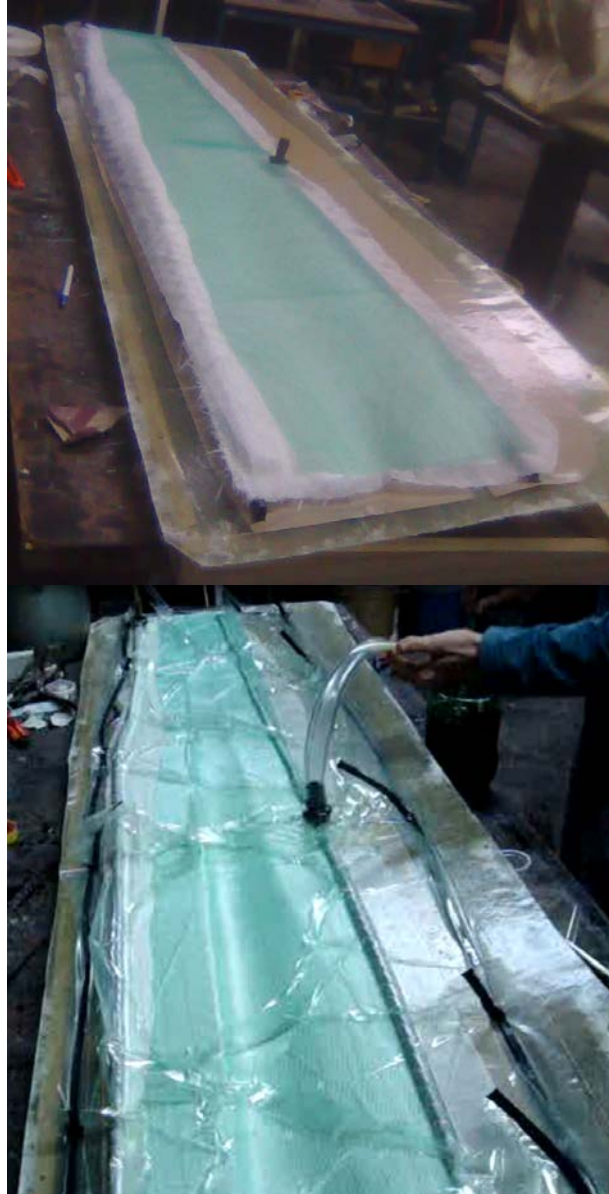
Figura 6.16 – Desmolde.



Figura 6.17 – Pieza terminada.

La cara inferior del aspa se realizó de la misma forma, como podemos ver en la siguiente secuencia (Figura 6.18). En la misma se observa que el frente de avance es

uniforme y que la pieza se llana por completo. El tiempo de llenado del molde fue de 6 minutos.



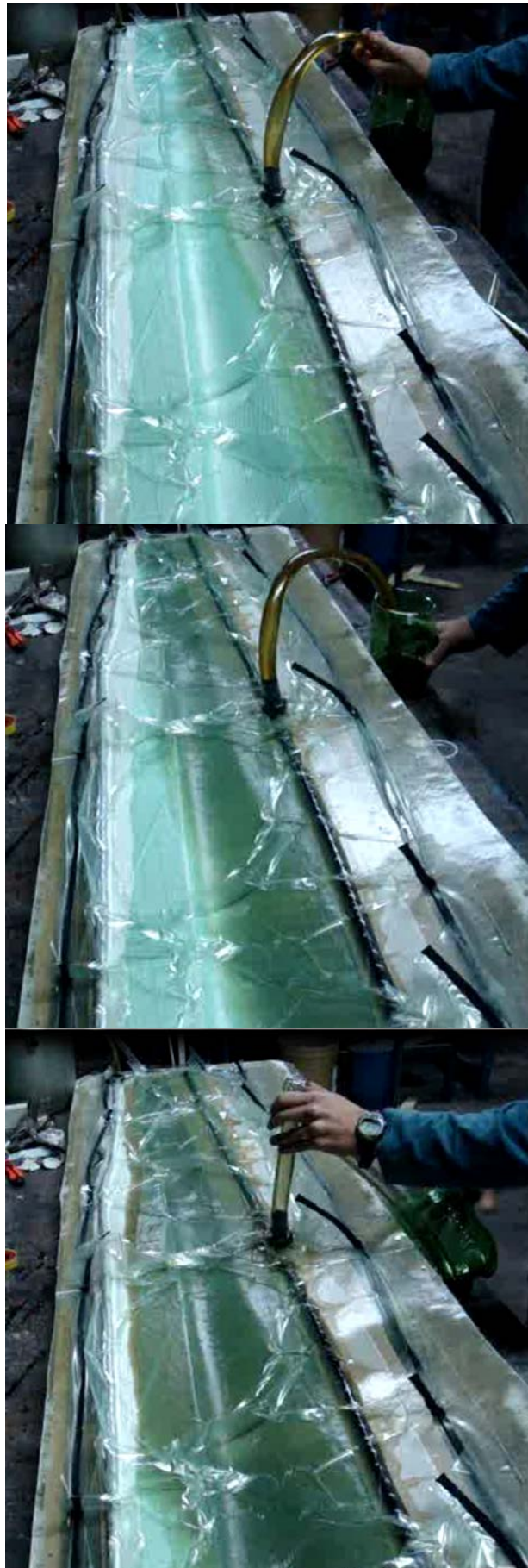




Figura 6.8 – Secuencia de fabricación de la cara inferior.

6.2 Fabricación de la viga interna

La viga interior del aspa se realizó mediante la técnica de *hand lay up*. La cantidad de láminas de fibra de vidrio se obtuvieron con el patrón de espesores calculado en el Capítulo 3 (Tabla 6.2).

Posición mm	Espesor mm	Cantidad de laminas de fibra
0-500	6	18
500-2040	2	6

Tabla 6.2 – Distribución del espesor de la viga central.

El material utilizado fue resina poliéster y *mats* de fibra de vidrio de 300 g/m². Debido a que la geometría de la viga es plana se colocó el arreglo de fibras sobre una mesa cubierta con un film de polietileno (Figura 6.10). El mismo fue cubierto con cera desmoldante, se catalizó la resina y se impregno la fibra.



Figura 6.10 – Distribución de láminas de refuerzo.

Como primera aproximación de la geometría de la viga se imprimió en escala 1:1 el modelo de la misma (Figura 6.11). Se marco esta figura y se corto la geometría con una amoladora de mano.

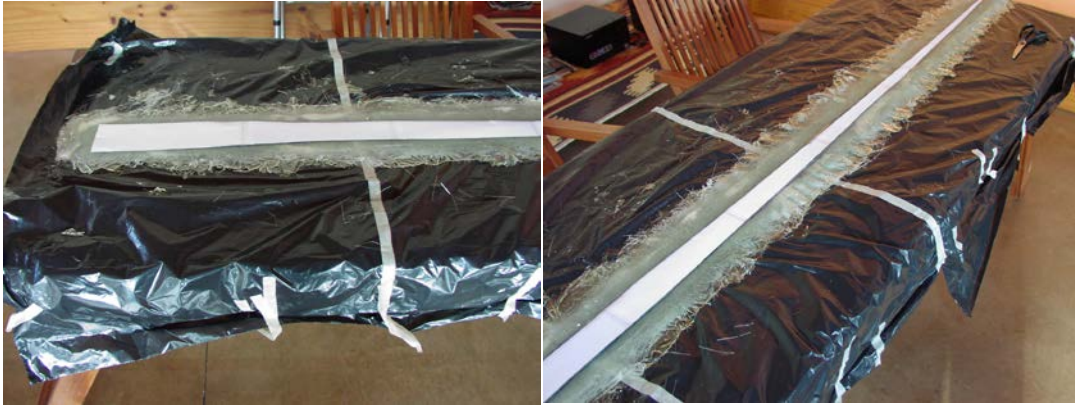


Figura 6.11 – Geometría preliminar de la viga central.

A continuación se presentó la pieza en las cáscaras del asa, pero existía una diferencia de entre 1 y 2 centímetros. Por lo tanto se fue ajustando la misma hasta que los bordes de las cáscaras se acoplaban perfectamente (Figura 6.12).

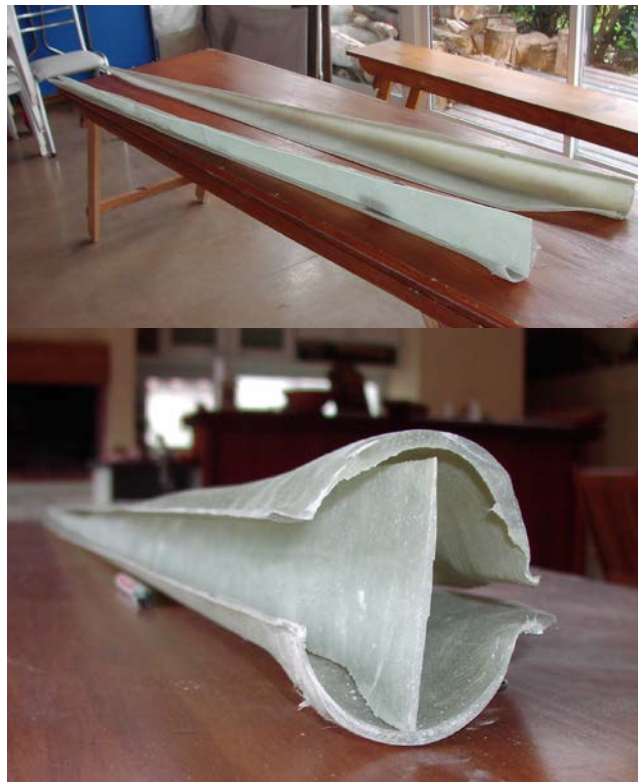


Figura 6.12 – Geometría preliminar de la viga central.

El paso siguiente fue colocar la viga en posición con cinta adhesiva y fijarla en algunos puntos con resina y fibra de vidrio (Figura 6.13 y 6.14).



Figura 6.13 – Posición de la viga.

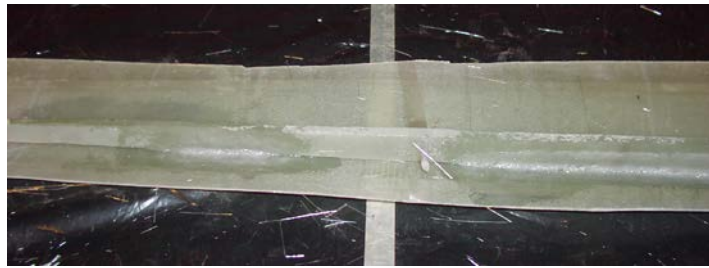


Figura 6.14 – Fijación provisoria de la viga.

Luego de la que la resina curo la viga quedo lo suficientemente soportada como para poder aplicar sobre la misma la técnica de *hand lay up* a lo largo de toda la misma (Figura 6.15).

Para adherir la viga central a la cáscara superior se impregnaron fibras de vidrio solo en los laterales (Figura 6.16). Una vez que esta zona curo, se colocó fibra y resina en los bordes de las cáscaras, se impregno la fibra de vidrio colocada en la viga central y se colocó espuma de poliuretano para luego colocar la cáscara superior y prensarla (Figura 6.17).



Figura 6.15 – Fijación de la viga.



Figura 6.16 – Fijación de la viga.





Figura 6.17 – Fijación de la viga.

Finalmente se llevo la pala a un taller de pintura donde la misma fue pintada con poliuretano (Figura 6.18).



Figura 6.18 – Aspa terminada.

7 CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible procesar correctamente materiales compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio por la técnica que se utiliza a escala industrial para la fabricación de las palas de los molinos eólicos. Un punto fundamental fue la puesta en punto de la técnica, identificando los parámetros críticos de la misma. Se determinó que uno de los parámetros críticos cuando se trabaja con “infusión en vacío” es el correcto sellado del molde con la bolsa para generar el vacío y así obtener una pieza sin defectos.

Se determino la permeabilidad del sistema.

- Se modelo la estrategia de inyección
- **Se calculó el espesor del aspa**
- **Se fabrico el componente**

Anexo 1

Product Information



DERAKANE 411-350
Epoxy Vinyl Ester Resin

The Industry Standard for a Epoxy Vinyl Ester Resin

DERAKANE® 411-350 Epoxy Vinyl Ester Resin is based on bisphenol-A epoxy resin and has become an “industry standard” due to its wide range of end-use applications and ability to be used in a wide range of fabrication techniques. DERAKANE 411-350 Resin provides resistance to a wide range of acids, alkalis, bleaches, and organic compounds for use in many chemical processing industry applications.

Typical Liquid Resin Properties

Property ⁽¹⁾	Value
Density, 25 °C / 77 °F	1.046 g/mL
Dynamic Viscosity, 25 °C / 77 °F	370 mPa·s
Kinematic Viscosity	350 cSt
Styrene Content	45 %
Shelf Life ⁽²⁾ , Dark, 25 °C / 77 °F	7 months

(1) Typical property values only, not to be construed as specifications.

(2) Unopened drum with no additives, promoters, accelerators, etc. added. Shelf life specified from date of manufacture.

Applications and Fabrication Techniques

- FRP storage tanks, vessels, ducts, and on-site maintenance projects, particularly in chemical processing and pulp and paper operations.
- The resin is designed for ease of fabrication using hand lay-up, spray-up, filament winding, compression molding and resin transfer molding techniques, pultrusion and molded grating applications.
- An alternative viscosity, optimized for some vacuum infusion processes, is available as DERAKANE MOMENTUM 411-100 Resin.
- An alternate for low styrene (HAP) content is available as DERAKANE 441-400 Resin.

Benefits

- Provides resistance to wide range of acids, alkalis, bleaches, and solvents. This resin holds up in corrosive environments, postponing the need for equipment replacement.
- Tolerates heavy design loads without causing failure due to resin damage. This facilitates working with large weight-bearing equipment with confidence.
- Superior elongation and toughness provides FRP equipment with better impact resistance and less cracking due to cyclic temperature, pressure fluctuations, and mechanical shocks providing a safety factor against damage during process upsets or during shipping and installation.
- When properly formulated and cured, complies with FDA regulation 21 CFR 177.2420, covering materials intended for repeated use in contact with food.

Gel Time Formulations

The following table provides typical gel times for MEKP. “Starting point” formulations for MEKP, non-foaming MEKP alternatives, and BPO peroxides are available in separate product bulletins. These and other information are available at www.derakane.com.

MEKP Gel Time Table

Typical Gel Times⁽³⁾ Using Norox MEKP-925H^(4, 5) and Cobalt Napthenate-6%⁽⁶⁾

Temperature	15 +/- 5 Minutes	30 +/- 10 Minutes	60 +/- 15 Minutes
15 °C / 59 °F	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.20 phr DMA	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.05 phr DMA	1.25 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.05 phr DMA 0.04 phr 2,4-P
20 °C / 68 °F	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.10 phr DMA	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.05 phr DMA 0.03 phr 2,4-P	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.05 phr DMA 0.06 phr 2,4-P
25 °C / 77 °F	1.25 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.05 phr DMA	1.25 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.02 phr 2,4-P	1.5 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.05 phr 2,4-P
30 °C / 86 °F	1.0 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.02 phr DMA	1.25 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.04 phr 2,4-P	1.25 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.06 phr 2,4-P
35 °C / 95 °F	1.0 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.02 phr 2,4-P	1.0 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.05 phr 2,4-P	1.0 phr MEKP 0.20 phr CoNap6% 0.08 phr 2,4-P

(3) Thoroughly test any other materials in your application before full-scale use. Gel times may vary due to the reactive nature of these products. Always test a small quantity before formulating large quantities.

(4) phr = parts per hundred resin

(5) Materials: Norox MEKP-925H Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) or equivalent low hydrogen peroxide content MEKP, Cobalt Napthenate-6% (CoNap6%), Dimethylaniline (DMA), and 2,4-Pentanedione (2,4-P). Use of other MEKP or other additives may result in different gel time results.

(6) Use of cobalt octoate, especially in combination with 2,4-P, can result in 20 to 30 % slower gel times.

Casting Properties

Typical Properties⁽¹⁾ of Postcured⁽⁷⁾ Resin Clear Casting

Property	SI	US Standard	Test Method
Tensile Strength	86 MPa	12,000 psi	ASTM D-638; ISO 527
Tensile Modulus	3.2 GPa	4.6 x 10 ⁵ psi	ASTM D-638; ISO 527
Tensile Elongation, Yield	5 to 6 %	5 to 6 %	ASTM D-638; ISO 527
Flexural Strength	150 MPa	22,000 psi	ASTM D-790; ISO 178
Flexural Modulus	3.4 GPa	4.9 x 10 ⁵ psi	ASTM D-790; ISO 178
Density	1.14 g/cm ³		ASTM D-792; ISO 1183
Volume shrinkage	7.8 %	7.8 %	
Heat Distortion Temperature, HDT ⁽⁸⁾	105 °C	220 °F	ASTM D-648 Method A; ISO 75
Glass Transition Temperature, Tg ²	120 °C	250 °F	ASTM D-3419; ISO 11359-2
Barcol Hardness	35	35	ASTM D-2583; EN 59

Laminate Properties

Typical Properties⁽¹⁾ of Postcured⁽⁹⁾ 6 mm (¼ in) Laminate⁽¹⁰⁾

Property	SI	US Standard	Test Method
Tensile Strength	150 MPa	22,000 psi	ASTM D-3039, ISO 527
Tensile Modulus	12 GPa	1.7 x 10 ⁶ psi	ASTM D-3039, ISO 527
Flexural Strength	210 MPa	30,000 psi	ASTM D-790, ISO 178
Flexural Modulus	8.1 GPa	1.2 x 10 ⁶ psi	ASTM D-790, ISO 178
Glass Content	40 %	40 %	ASTM D-2584; ISO 1172

(1) Typical property values only, not to be construed as specifications. SI values reported to two significant figures; US standard values based on conversion.

(7) Cure schedule: 24 hours at room temperature; 2 hours at 120 °C (250 °F)

(8) Maximum stress: 1.8 MPa (264 psi)

(9) Cure schedule: 24 hours at room temperature; 6 hours at 80 °C (175 °F)

(10) 6 mm (¼ in) Construction – V/M/M/Wr/M/Wr/M

V = Continuous veil glass; M = Chopped strand mat, 450 g/m² (1.5 oz/ft²);

Wr = Woven Roving, 800 g/m² (24 oz/yd²)

Safety and Handling Considerations

Material Safety Data Sheets: MSDS for DERAKANE[®] and DERAKANE[®] MOMENTUM[®] Epoxy Vinyl Ester Resins are available from Dow from the contact information below. The MSDS should be read and utilized to help users meet their own handling needs and those required by OSHA or other government agencies. The following comments pertain to all DERAKANE and DERAKANE MOMENTUM Resin products and are general guidelines only.

Personnel Protection: When using DERAKANE Resins, minimize human contact with resins, initiators, and other modifiers. Appropriate eye and skin/body protection should be worn to avoid contact as detailed in the MSDS. Use sufficient ventilation to control styrene monomer vapors below the applicable government regulated levels. For exposures above the regulated levels, air purifying respirators or self-contained breathing apparatus should be worn. DERAKANE Resins that are completely cured are considered to be toxicologically inert and to present no handling hazards. The finished parts may represent a health hazard from dust inhalation due grinding or machining, especially if they contain glass, silica or metal oxide powders and therefore appropriate respiratory protection should be used.

Spills: Trained personnel, properly protected from skin and eye contact and breathing vapors, should perform cleanup tasks. Prior to any cleanup, any possible sources of ignition should be removed. For smaller spills apply sand or other absorbent material onto the resin and shovel the mixture into a container. Larger spills should be contained with a dike and the excess resin collected in containers. Any residue resin should be removed from the floor with hot, soapy water. CAUTION: The use of solvents in the final cleanup can pose unnecessary hazards from breathing vapors and possible ignition.

Fires: DERAKANE Resins are classified as flammable materials under NFPA 30, so they must be stored and handled properly to prevent ignition. Fires can be extinguished by conventional means, including foam, dry chemical, and carbon dioxide but water is not normally effective.

NFPA Rating: Health=2 ; Flammability=3; Reactivity=1

Disposal: Any disposal practice must be in compliance with all federal, state/provincial, and local laws and regulations. State / provincial and local requirements for waste disposal may be more restrictive or different from federal laws and regulations. The preferred waste management option for unused, uncontaminated, unformulated, unaltered DERAKANE Resins is to send them to a licensed or permitted recycler, reclaimer, or incinerator. The same waste management options are recommended for used or contaminated material, although additional evaluation is required. DERAKANE Resins that are fully polymerized are considered to be toxicologically and ecologically inert and should be disposed of properly.

Resin Storage: DERAKANE Resins are stable for the shelf-life period stated on the label when stored in original, unopened containers at temperatures between 10-25 °C (50-75 °F) and in a dry place out of direct sunlight. Resins should be used within the shelf life stated on the drum label. Dow cannot honor any claims for credit on resin that has been stored beyond its stated shelf life or outside the recommended storage guidelines.

Customer Notice

Dow encourages its customers and potential users of Dow products to review their applications of such products from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested, Dow personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your Dow sales representative can arrange the proper contacts. Dow product literature, including Material Safety Data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. These may be obtained from the Dow sales representative, by writing The Dow Chemical Company, or by calling one of the numbers listed below.

Contact Information:

North America: 800-441-4369
989-832-1426
Fax: 989-832-1465
Mexico: 95-800-441-4369
Argentina: 54 11 439 0329
Brazil: 55 11 518 89367
Europe: +800 3 694 6367
+32 3 450 2240
Fax: +32 3 450 2815
Pacific: +800 7776-7776
+60 3-7958-3392
Fax: +60 3-7058-5598

<http://www.derakane.com>

Notice: No freedom from any patent owned by Dow or others is to be inferred. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. The information provided herein is presented in good faith and is based on the best of Dow's knowledge, information, and belief. Since use conditions at non-Dow facilities are beyond Dow's control and governmental regulations may differ from one location to another and may change with time, it is solely the Buyer's responsibility to determine whether Dow's products are appropriate for the Buyer's use, and to assure the Buyer's workplace, use, and disposal practices are in compliance with laws, regulations, ordinances, and other governmental enactments applicable in the jurisdiction(s) having authority over Buyer's operations. Consequently, Dow assumes no obligation or liability for use of these materials and makes no warranty, express or implied. The user of the information provided is solely responsible for compliance with any applicable federal, state, provincial, and local laws. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



fischer B3 Foam

Multi-Use Expanding Foam

Data Sheet

Characteristics

Technical Data		Remarks
Foam Yield	1000 ml yields 35-40 l	
Shrinkage	None	
Post Expansion	None	
Cellular Structure	Ca 70-80 %	closed cells
Specific Gravity	Ca 25 kg/m ³	Extruded
Temperature Resistance	-30°C until +80 °C	When Cured
Character of foam	Thixotropic	Does not slump
Fire Class	B3	DIN 4102 part 2
Insulation Factor	33mw / Meter Kelvin	U Value
Shear Strength	>17 N/cm ²	DIN 53427
Pressure Strength	>4 N/cm ²	DIN 53421
Bowing Strength	>7 N/cm ²	DIN 53423
Water Absorption	1% Vol.	DIN 53429
Acoustic Rating	57db	DIN 52210 part 3
Colour	Cream	

Curing Times

Cutable Time	Tack Free Time
30-60 min	8 min at 20°C

Load Bearing Time	Fully Cured
12-24 hrs	24 hrs

Application

- Aerosol can, shake thoroughly before application
- Application temperature should be between +5 to +30°C
- Substrate surfaces should be clean and free from dust and grease.
- Moistening of the surfaces improves adhesion, curing and cellular structure.

Examples of application

Edition 1/00
 Technical details subject to change without notice



Chopped Strand Mat

M123 chopped strand mat is made with chopped strands of E-glass bound with a powder binder soluble in styrene; this makes it suitable for use with polyester, vinylester and epoxy resins.

This mat has a good resistance to watering and chemical agents in anti-corrosion applications.

Identification

Example : M123 450-1040 1E

M123 : Saint-Gobain Vetrotex code
 450 : nominal mass per unit area (g/m²)
 1040 : roll width (mm)
 1E : one trimmed edge
 2E : two trimmed edges
 0E : no trimmed edges, greatest widths only

Technical characteristics (nominal values)

Mass (g/m ²)	Loss on Ignition (%)	Moisture (%)
225	4.5	
300	4.0	
450	3.5	≤0,20
600	3.5	


Refers to the Standard Product Specification for more precise information on the characteristics of the product.

M123


Technical Data Sheet

Properties

- good conformability
- very easy impregnation
- excellent clarity of the UP laminates
- very high tensile strength, suitable for filament winding or continuous laminating
- good resistance to watering and chemical agents in anti-corrosion applications



Chopped Strand Mat



Rooflight sheet

Standard Products Available

Mass (g/m ²)	Roll characteristics (nominal)			
	Width (mm)	Diameter (cm)	Length (m)	Weight (kg)
225			128	
300			96	
450	1040	27	64	30
600			48	

Mat width of 3000mm is available under request.

Individual and bulk packaging

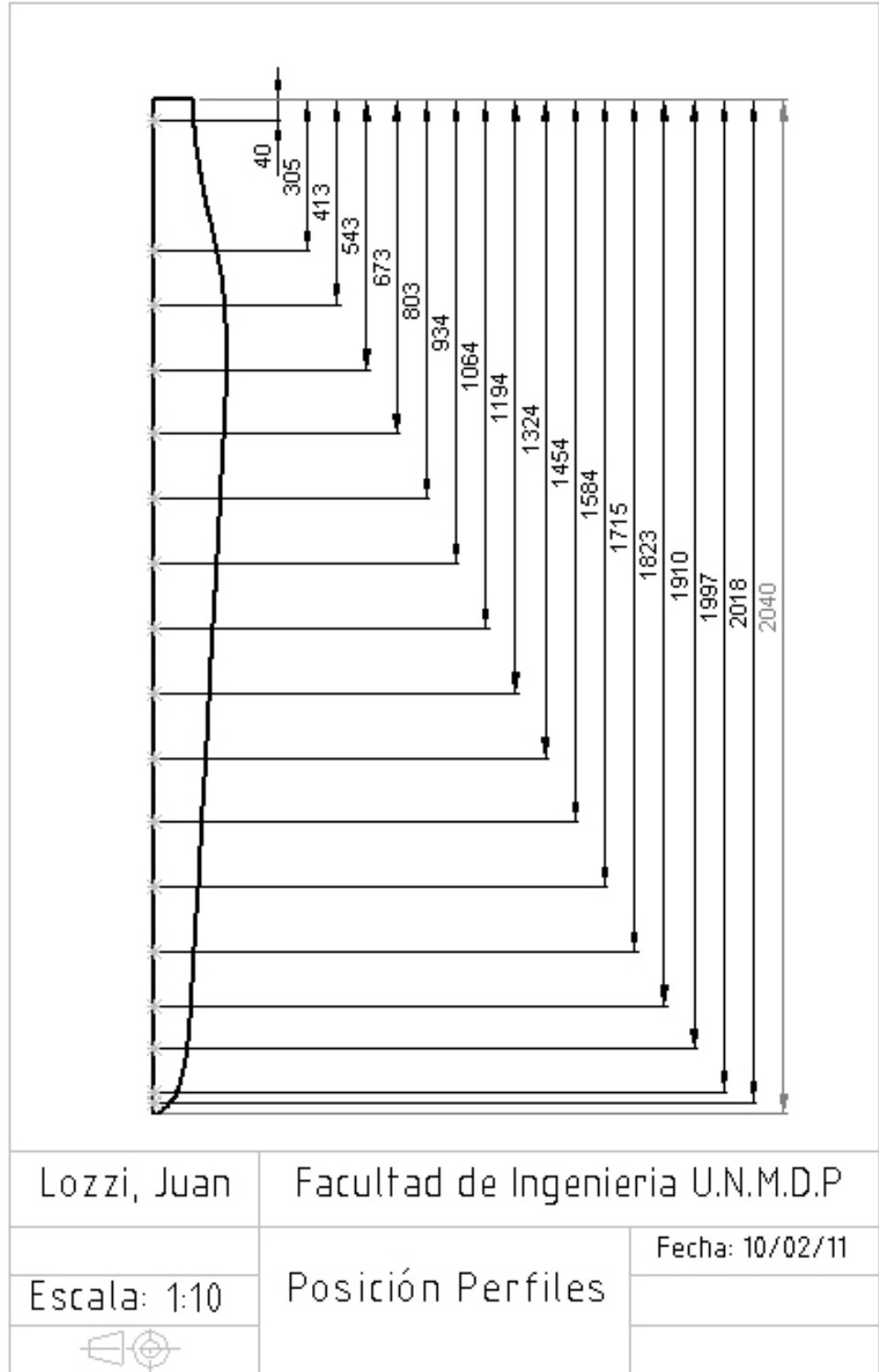
- Individual packaging :each roll is wound on a cardboard tube (internal diameter 76mm)
- Bulk packaging

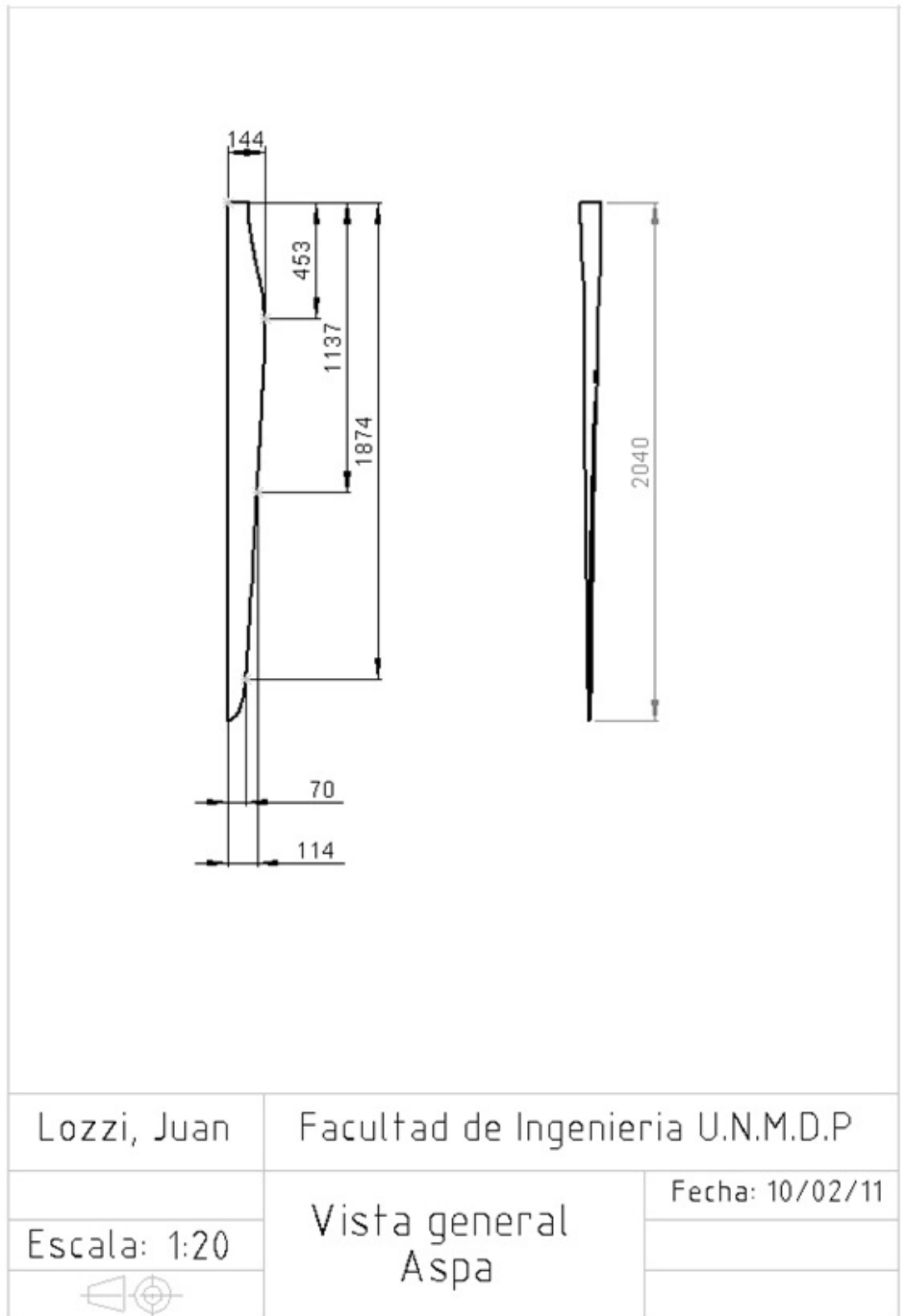
Width (mm)	Packaging type	Number of rolls	Pallet dimensions L x W x H (mm)	Net Weight (kg)
1040	4 x 4	16	1140 x 1140 x 54	480.0

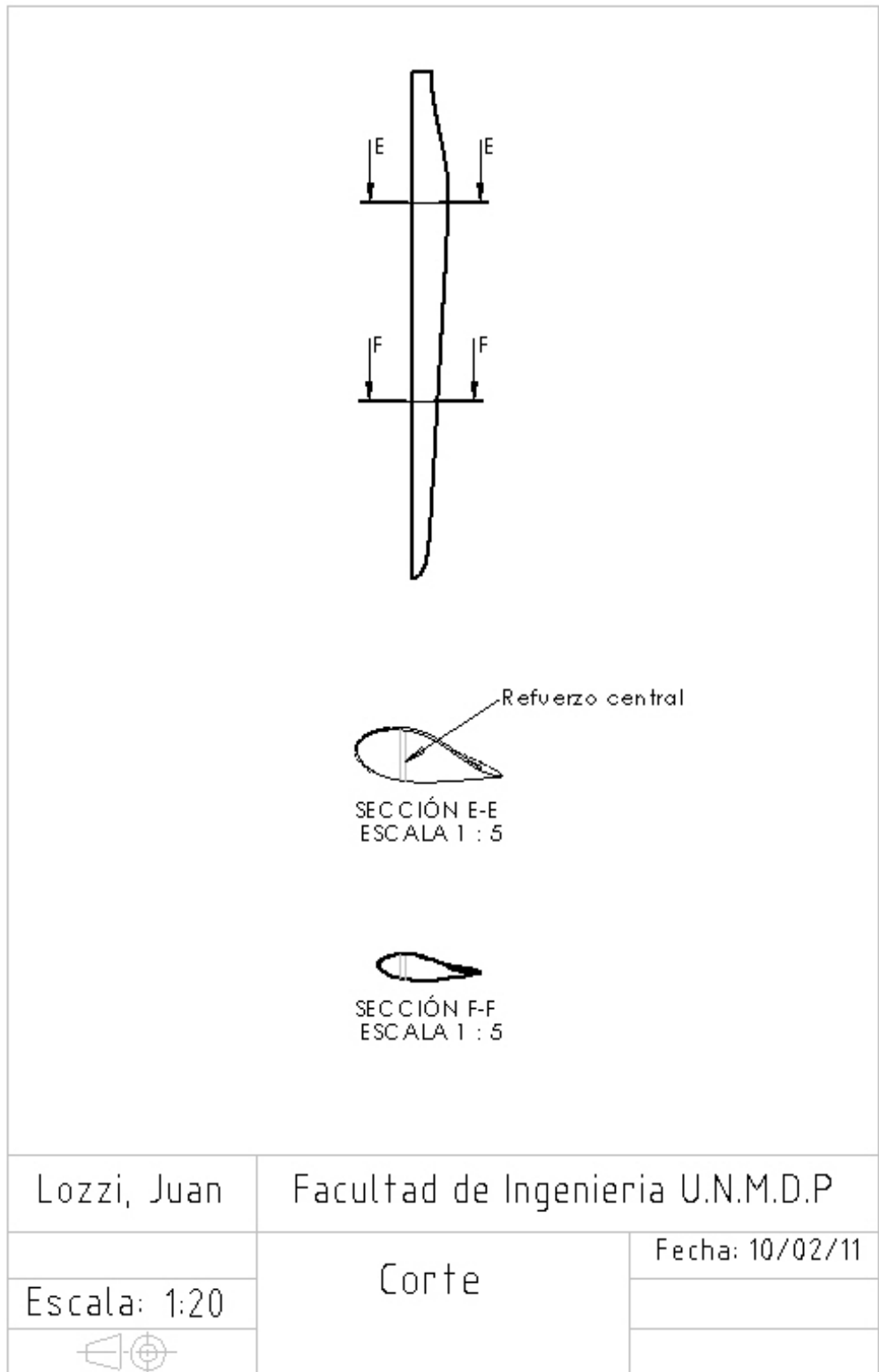
Storage

M123 mat should be stored in dry condition and in its original packaging. The best conditions are at temperatures between 15°C and 35°C and at a relative humidity between 35% and 85%. If the product is stored at lower temperature (below 15°C), it is advisable to condition the mat in the workshop for at least 24 hours before use, to prevent condensation.

Anexo II Planos







Anexo III

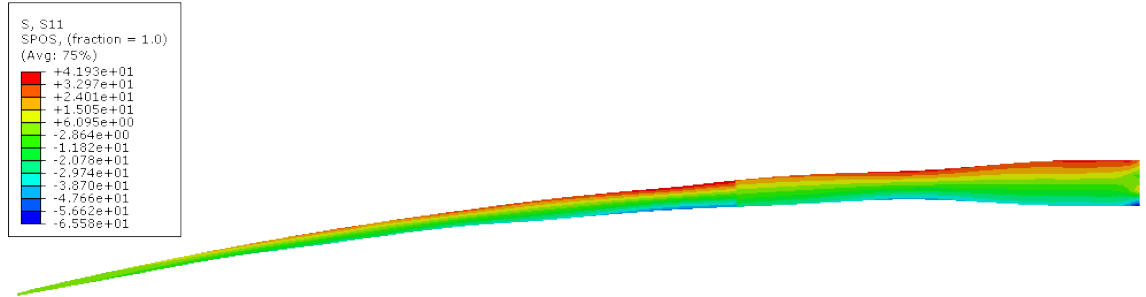


Figura 3.9 – Tensión del refuerzo en la dirección longitudinal.

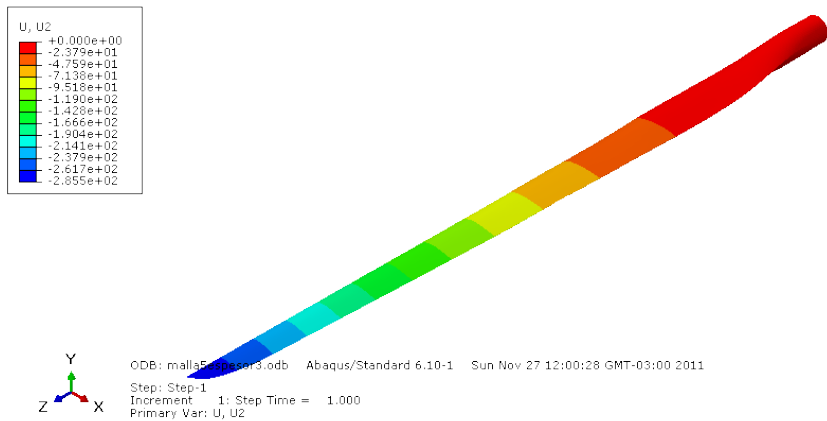


Figura 3. – Tensión del refuerzo en la dirección longitudinal.

Bibliografía

- **Estado de la Industria Eólica en la Argentina (informe CADER)**
- **Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades**
- **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE 1.5 kW**
- **Wind Turbines Fundamentals Technologies, Applications, Economics (Erich Hau)**
- **Turaj Ashuri, M.B. Zaaier, SIZE EFFECT ON WIND TURBINE**
- **BLADE’S DESIGN DRIVERS**
- **Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model**
- **1 WIND ENERGY, Vaughn Nelson**