

MÁSTER UNIVERSITARIO EN MARINA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
MECÁNICA DE BIOCOMPOSITES
REFORZADOS CON LINO Y MADERA.
APLICACIÓN PRÁCTICA EN UN MINI-
AEROGENERADOR EÓLICO**

Alumno	<i>Vallori Florit, Joan</i>
Director	<i>López Arraiza, Alberto</i>
Departamento	Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales
Curso académico	2017/2018

Bilbao, 10 de mayo de 2018

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Master se encuadra dentro del proyecto CbLino subvencionado por el Departamento de Sostenibilidad de la UPV/EHU. Se han desarrollado y fabricado nuevos biomateriales compuestos por una resina de origen natural (SUPER SAP®) reforzada por tejido de lino bidireccional y madera de roble.

Se han realizado ensayos de tracción y flexión normalizados observándose que el refuerzo de madera de roble en las capas exteriores otorga al biomaterial un gran acabado estético y un aumento del 2% en la rigidez a tracción frente al biocomposite de Lino. En cuanto a los resultados de flexión, el roble en el núcleo proporciona una mayor resistencia a la rotura siendo esta un 10% superior al biocomposite de Lino. Las Micrografías de SEM dan una idea de la buena adhesión entre fibra-matriz.

Por último, tanto la simulación por elementos finitos como la comprobación en el túnel del viento, ha validado mecánicamente la utilización de los biomateriales desarrollados en la fabricación de palas para mini-aerogenerador.

Palabras clave: Biocomposite, Fibra de lino, Roble, Elementos Finitos

LABURPENA

Master amaierarako lan hau CbLino izeneko proiektutik sortu zen. Proiektua UPV/EHUko Iraunkortasunaren arloko zuzendaritzak diru-laguntza eman zuen. Biomaterial konposatu berriak landu ziren eta horretarako, SUPERSAP® izeneko erretxina naturala bai liho zuntzez, bai haritzzez indartu zen.

Trakzio nahiz flexio saiakuntzak burutu ziren. Haritz-xaflek kanpoko geruzetan piezaren akabera bikaina ematen dute eta gainera, zurruntasuna %2 gehitzen da lihozko biomaterialekin konparatuta. Flexio emaitzei dagokienez, haritz-xaflek erdigunean apurtzeko erresistentzia handitzen dute, %10a hain zuzen. Mikroskopia elektronikoen hartutako irudiek zuntza eta erretxinaren arteko atxikidura egokia nabarmentzen dute.

Bukatzeko, *elementu* finituen bidezko simulazioan zein benetako haize-tunel batean mekanikoki frogatu ziren biomaterialak. Aerosorgailu txikien besoak ekoizteko egokiak direla ondorioztatzen zen.

Hitz gakoak: biokonposita, liho zuntza, haritzekoa, elementu finituak

ABSTRACT

This Master's degree final project is part of the CbLino project, supported by the Sustainability Department of the University of the Basque Country (UPV/EHU). New biomaterial composites were developed and manufactured. A resin from natural resources (SUPER SAP ®) was reinforced by a bidirectional flax and oak wood laminates.

Normalized tensile and three-point bending tests were carried out and it was observed that the oak wood laminates in the outer layers give a great aesthetic finish and the tensile stiffness increases 2% compared to the Flax reinforced biocomposite. Regarding the results of three-point bending, the oak laminates in the core provide a greater flexure breaking strength, which now is a 10% higher than the flax reinforced biocomposite. The SEM micrographs show an idea of the good fiber and matrix adhesion.

Finally, both finite element analysis and a real wind tunnel test have mechanically validated the use of the developed biomaterials in the manufacture of blades for mini-wind turbines.

Key words: biocomposite, flax fiber, oak, finite elements.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Materiales compuestos	4
2.2. Matrices poliméricas de los materiales compuestos	6
2.2.1. Matrices poliméricas termoestables	6
2.2.2. Refuerzos de las matrices termoestables	9
2.3. Procesos de fabricación de piezas de composite en la industria	14
2.3.1. Procesos de moldeo por contacto	16
2.3.2. Moldeo asistido por vacío	18
2.3.3. Moldeo por vía líquida	20
2.4. Aplicaciones de los composites	22
2.5. Biocomposites	24
2.6. Diseño por elementos finitos	27
2.7. Análisis Crítico del Estado del Arte	29
3. OBJETIVOS	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS	31
4.1. Matriz	31
4.2. Refuerzos	31
4.3. Proceso de fabricación de biocomposites reforzados con fibras de lino y madera	32
4.4. Caracterización mecánica	35
4.4.1. Ensayo a Tracción	36
4.4.2. Ensayo de Flexión	38
4.5. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1. Fabricación de Biocomposites	40
5.2. Resultados de Tracción	40
5.3. Resultados ensayos de Flexión en tres puntos	43

5.4. Microscopia Electrónica de Barrido.....	46
6. APLICACIÓN PRÁCTICA. MINI-AEROGENERADOR ..	51
6.1. Modelado por elementos finitos (FEM).....	51
6.2. Validación mecánica en el túnel del viento	57
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	59
7.1 CONCLUSIONES.	59
7.2 Líneas futuras.....	60
REFERENCIAS	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de refuerzos	5
Figura 2 Paneles Sándwich	6
Figura 3 Proceso curado resinas termoestables	7
Figura 4 Tipos fibra de vidrio	10
Figura 5 Porcentaje de refuerzos	15
Figura 6 Emisiones COV	16
Figura 7 Laminado manual.	17
Figura 8 Proyección simultanea	18
Figura 9 Laminado asistido por vacío	19
Figura 10 Proceso RTM	21
Figura 11 Porcentaje composite aeronáutica	22
Figura 12 Mini-aerogenerador en embarcación	23
Figura 13 Cementerio palas aerogenerador	24
Figura 14 Vivienda biocomposites	27
Figura 15 Bicicleta bambo	27
Figura 16 Ejemplo Elementos finitos	28
Figura 17 a) Fibra de Lino b) Roble	31
Figura 18 Refuerzos de lino	33
Figura 19 Refuerzo de Roble	33
Figura 20 Colocación cinta selladora	33
Figura 21 Colocación bolsa de vacío	33
Figura 22 Proceso de impregnación de los refuerzos	34
Figura 23 Proceso de Infusión Finalizado	34

Figura 24: Ensayo de Tracción	36
Figura 25 Plano probetas de Tracción	37
Figura 26 Probetas de tracción	37
Figura 27: Ensayo de Flexión	38
Figura 28 Plano probetas de Flexión	38
Figura 29 Microscopio Electrónico SEM	39
Figura 30 Curvas de tracción Lino	41
Figura 31 Curvas tracción Roble Lino Roble	42
Figura 32 Curvas tracción Lino Roble Lino.....	42
Figura 33 Curvas Flexión Lino	44
Figura 34 Curvas Flexión Roble Lino Roble	44
Figura 35 Curvas Flexión Lino Roble Lino.....	45
Figura 36 Micrografía Lino	46
Figura 37 Micrografía Lino	47
Figura 38 Micrografía Lino	47
Figura 39 Micrografía Roble Lino Roble	48
Figura 40 Micrografía Roble Lino Roble	49
Figura 41 Micrografía Lino Roble Lino	49
Figura 42 Micrografía Lino Roble Lino	50
Figura 43 Plano pala Mini-aerogenerador	51
Figura 44 Condiciones de contorno y mallado	52
Figura 45 Estado tensional pala de aluminio	53
Figura 46 Deformación pala de aluminio	53
Figura 47 Estado tensional de la pala de Lino	54

Figura 48 Deformación de la pala de Lino	54
Figura 49 Deformación de la pala de Roble-Lino-Roble	55
Figura 50 Deformación de la pala de Lino-Roble-Lino.	55
Figura 51 Túnel del viento con mini-aerogenerador.....	57
Figura 52 Mini-aerogenerador con palas de biocomposite.....	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades fibra de vidrio	11
Tabla 2 Propiedades fibra de carbono	14
Tabla 3 Propiedades fibras naturales	26
Tabla 4 Propiedades del Nogal.	27
Tabla 5 Propiedades del Iroko	27
Tabla 6 Propiedades Matriz Super Sap®.	31
Tabla 7 Propiedades del Lino (16)	32
Tabla 8 Propiedades del Roble Europeo.	27
Tabla 9 Biocomposites fabricados mediante el proceso de infusión al vacío	40
Tabla 10 Resultados Tracción Biocomposites.....	41
Tabla 11 Resultados Flexión Biocomposites	43
Tabla 12 Resultados pala de Aluminio	56
Tabla 13 Resultados Biocomposite de Lino.....	56
Tabla 14 Resultados Biocomposite Roble-Lino-Roble	56
Tabla 15 Resultados Biocomposite Lino-Roble-Lino	5

1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Máster se enmarca dentro del proyecto **CBLino** - *Valoración sostenible de las fibras naturales para el diseño y la fabricación de elementos constructivos de uso potencial en el campus universitario*, subvencionado dentro de la convocatoria de proyectos CAMPUS BIZIA LAB (CBL) 2017/18. Dicha convocatoria es una iniciativa derivada del Proyecto Erasmus University Educators for Sustainable Development1 (540051-Ilp-1-2013-1) en el que participó la UPV/EHU entre 2013-2016 que pretende desencadenar un proceso colaborativo entre el alumnado de grado y posgrado, el Personal Docente e Investigador (PDI) y el Personal de Administración y Servicios (PAS) para la integración de la sostenibilidad en los Campus de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Este programa se desarrolla por iniciativa del Vicerrectorado de Innovación, Compromiso Social y Acción Cultural de la UPV/EHU bajo la dirección y organización de Dirección de Sostenibilidad, con la colaboración del Servicio de Asesoramiento Educativo. CBL se alinea de manera significativa con las líneas prioritarias del Plan Estratégico 2012-2017 así como con el modelo Educativo IKD3 (aprendizaje cooperativo y dinámico) de la UPV/EHU.

En el proyecto CBLino, dentro del cual se integra el presente TFM, se colabora con los profesores Dr. Gustavo Vargas Silva y Dra. Ana Isabel Boyano Murillo de los Departamentos de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa y de Vitoria-Gasteiz respectivamente. Como personal de Administración y Servicios, se cuenta con la colaboración de Nieves Lorenzo, responsable de la Biblioteca Universitaria del Edificio de Portugalete de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

En el presente trabajo se pretenden desarrollar nuevos materiales sostenibles y alternativos a los actuales, basados en resinas termoestables bioepoxi reforzados con fibras naturales, en particular fibra de lino y también introduciendo madera como elemento tanto estructural como estético.

En relación con el lino textil (del que se extraen fibras), que es la única fibra vegetal originaria del continente europeo, se conoce que desde la Edad Media hasta bien

entrado el siglo XX en los caseríos vascos se explotaba dicha planta para abastecimiento propio, ya que el clima húmedo de nuestro territorio es favorable para su cultivo.

Así, el proyecto CBLino busca ayudar a recuperar y a valorizar dicha fibra natural como refuerzo de materiales compuestos medioambientalmente sostenibles. Igualmente, se plantea el uso de madera autóctona como refuerzo mecánico y acabado estético de los nuevos desarrollos que se realizan.

Los materiales compuestos llevan años utilizándose en muchas aplicaciones industriales sustituyendo a los materiales tradicionales como el acero, aluminio, etc. ya que presentan unas muy buenas características tanto de resistencia mecánica, química como de mantenimiento, además presentan la ventaja de poder realizar piezas de cualquier tamaño y diseños complejos, así como fabricarlos para cada tipo de esfuerzo a la que van a estar sometidos.

Pero a pesar de todas las ventajas que presentan los materiales compuestos, existe la problemática de que dependen del petróleo y su fin de vida, ya que representa una amenaza para el medioambiente.

Debido a esta problemática, se han fabricado resinas de origen natural no dependientes del petróleo y refuerzos de fibras naturales, que representan una fuente renovable de materias primas para su fabricación y una reciclabilidad que no presentan los materiales compuestos tradicionales fabricados con fibras de vidrio o de carbono.

Para poder utilizar los nuevos composites de origen natural en la industria es necesario caracterizarlos mecánicamente, ya que sino su uso no se podrá extender a la industria.

Por ello, en este Trabajo Fin de Master se pretende desarrollar, validar y caracterizar nuevos biocomposites de resina de origen natural reforzados con fibras naturales de lino y láminas de roble. Para ello, se fabricarán laminados de biocomposite con diferentes distribuciones de refuerzos y se estudiará y caracterizará cada combinación para elegir la mejor solución de acuerdo a los distintos tipos de requerimientos.

Además, como aplicación práctica, se fabricarán palas de mini-aerogenerador y se ensayarán en un túnel de viento con el objetivo de validar los nuevos biomateriales tanto desde el punto de vista mecánico como aerodinámico en comparación con los álabes tradicionales de aluminio o fibra de vidrio.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se expondrán todos los conceptos necesarios para comprender y encuadrar el marco teórico en el que se encuentran los materiales compuestos o composites, explicando el concepto matriz-refuerzo, exponiendo los métodos más utilizados en su fabricación, así como sus campos de aplicación. Igualmente, se realizará una revisión detallada de los materiales compuestos con matrices y fibras de origen natural, es decir, de los biocomposites

2.1. Materiales compuestos

Un material compuesto es un sistema integrado por una combinación de dos o más constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí, y dan lugar a otro material con propiedades específicas diferentes. (1)

Los materiales compuestos se pueden clasificar de muchas maneras. La clasificación genérica más habitual es la siguiente:

- Materiales compuestos de matriz metálica.
- Materiales compuestos de matriz cerámica.
- Materiales compuestos de matriz polimérica

En el presente trabajo se ha centrado en estos últimos, es decir, los materiales compuestos de matriz polimérica. Estos materiales, también se pueden clasificar según el tipo de refuerzo en:

- Materiales compuestos reforzados con partículas. Dichas partículas son de un material duro y frágil, normalmente cerámico, dispersas discreta y uniformemente, rodeadas por una matriz más blanda y dúctil. El tamaño de las partículas es de un diámetro de entre 100 y 2500 micrómetros.
- Materiales compuestos reforzados con fibras: el agente de refuerzo es una fibra, que proporciona al material su resistencia mecánica. Dicha fibra puede ser corta y aleatoria (figura 1a) larga y orientada (figura 1b), o en forma de

tejido trenzado (figura 1c). Las propiedades físico-mecánicas finales del material compuesto difieren de acuerdo a la orientación, forma, tamaño y origen del refuerzo. Por ejemplo, si se fabrica un material compuesto de matriz polimérica de forma que todas las fibras queden paralelas entre sí, el material será muy resistente en la dirección de las fibras, pero muy poco en sentido perpendicular. Estas propiedades constituyen un reto importante a la hora de diseñar estructuras a las que se apliquen fuerzas multidireccionales, por ello las distintas disposiciones de fibra permite conseguir materiales con propiedades mecánicas muy específicas que se adaptan a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño, es decir, se pueden fabricar materiales a la carta.

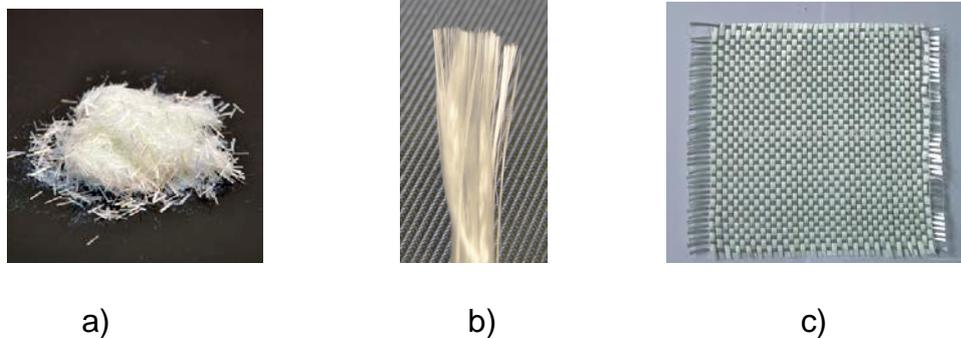


Figura 1 Material compuesto reforzado con fibra(a) corta (b) larga unidireccional y (c)tejido trenzado (2)

- Materiales compuestos estructurales tipo sándwich: las estructuras sándwich consisten en dos capas de material resistente entre las que se interpone un material ligero. En núcleo aumenta el espesor, reduce el peso y aporta una gran rigidez a la pieza. La estructura está compuesta por tres elementos (figura 2): las capas exteriores, el núcleo y la unión entre núcleo y pieles. Las capas exteriores son los elementos resistentes fabricados con materiales de buena calidad. El núcleo que es de material ligero, mantiene separadas las capas exteriores y transmite los esfuerzos de una capa a otra, además puede servir como aislamiento térmico o acústico. La unión suele ser un adhesivo que se encarga de mantener todo el conjunto unido. Dentro de los materiales de núcleo típicos de la industria naval se encuentran: la

madera balsa, el cedro rojo, las espumas sintéticas de PVC, de poliuretano, de poliestireno, espumas sintéticas y en contrachapado marino.

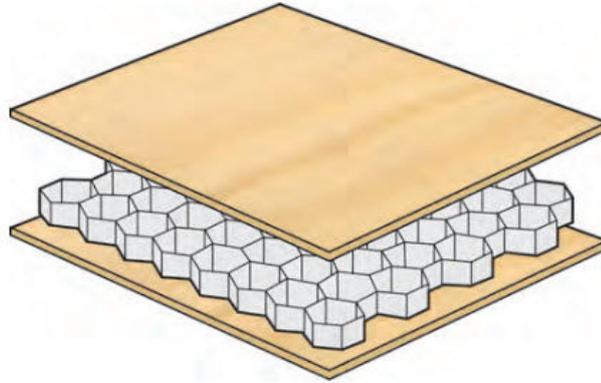


Figura 2 Paneles Sándwich (3)

2.2. Matrices poliméricas de los materiales compuestos.

Un polímero es un compuesto orgánico de origen natural o sintético con un alto peso molecular formado por numerosas unidades estructurales llamadas monómeros. Son macromoléculas formadas por enlaces covalentes de monómeros. Estos forman cadenas unidas entre sí por las fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas. (4) Los polímeros se pueden clasificar de diversas formas; según su origen, su mecanismo de polimerización, su composición química, etc. pero la más habitual para su utilización como matriz en los materiales compuestos es por su comportamiento a la temperatura, es decir, en termoplásticos y termoestables.

2.2.1. Matrices poliméricas termoestables.

Para conseguir que el polímero termoestable o resina inicie el proceso de polimerización o curado se le deben añadir sustancias como aceleradores y catalizadores. Dicho proceso de curado es fuertemente exotérmico e irreversible, donde se alcanza un pico de temperatura máxima a partir del cual el material se vuelve sólido (figura 3). Una vez que el material ha solidificado, puede someterse a un post-curado a temperatura constante durante un cierto tiempo para alcanzar las máximas propiedades mecánicas de la resina. (2)

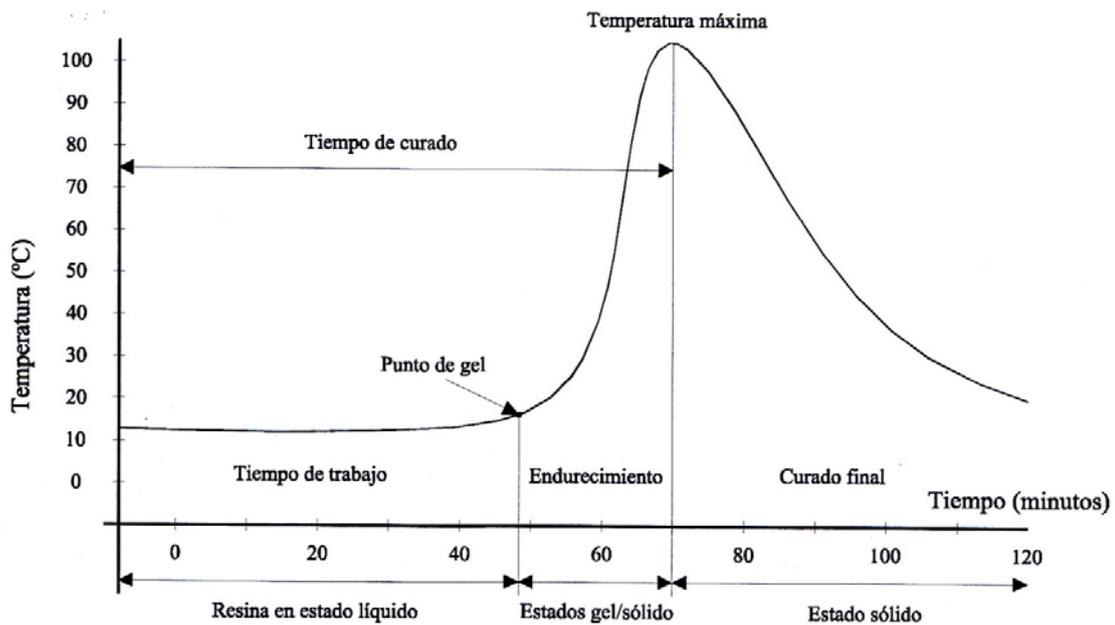


Figura 3. Proceso de polimerización o curado de las resinas termoestables (2)

Si el post-curado se realiza a temperatura ambiente, las propiedades finales de la resina pueden alcanzarse entre 24 y 48 horas, pero el curado total puede ser de varias semanas o meses después, debido a distintos factores como la temperatura ambiente, la humedad, la cantidad de catalizador y acelerador, y el espesor del laminado.

Las principales ventajas de las resinas termoestables son las siguientes:

- Baja viscosidad antes de la polimerización.
- Elevada rigidez de la resina final.
- Bajo peso - Alta estabilidad térmica.
- Elevada resistencia a los disolventes.
- Resistencia a la fluencia y a la deformación plástica.
- Buen aislante tanto térmico como eléctrico.
- Bajos costes de producción.

En cuanto a las desventajas de las resinas termoestables se pueden incluir:

- Baja reciclabilidad.
- Caducidad.
- Emisiones nocivas en el proceso de curado.
- Elevada dependencia del petróleo

Existen distintos tipos de resinas dependiendo de la composición química, como son: resinas poliéster, viniléster, epoxi, fenólicas o bismaleimida. Las dos primeras son las más ampliamente utilizadas para aplicaciones en sectores como el de automoción, aeronáutico, eólico o marítimo. La **resina poliéster** es la más utilizada y su coste es el más reducido de todas las matrices termoestables. Se producen a partir de reacciones de policondensación entre dos monómeros: el ácido dicarboxílico y diol. Este polímero se disuelve normalmente en estireno, que será el medio promotor de la estructura reticulada rígida una vez se inicia el curado.

Para facilitar la polimerización, se debe añadir catalizador y acelerador a la resina. Los catalizadores suelen ser peróxidos orgánicos y los aceleradores, sales de cobalto orgánicas. Es muy importante mezclar la cantidad correcta de catalizador, ya que mezclas con menos catalizador pueden parecer duras pero el curado puede no estar completo por lo que la resina no alcanza sus propiedades físicas teóricas, o, por lo contrario, si se añade demasiado catalizador, la resina producirá un gran aumento de temperatura hecho que puede provocar la evaporación del monómero reactivo. (5)

Uno de sus puntos débiles de estas resinas es la contracción durante el curado, hasta un 11 %, y, además, este tipo de resinas deben ser inhibidas para que no polimericen ellas solas.

Existen diferentes tipos de resinas de poliéster, que según la naturaleza de sus monómeros constituyentes:

- Ortoftálicas: Son combinación de anhídrido maleico y anhídrido ftálico con glicoles. Absorben agua en inmersiones prolongadas.
- Isoftálicas: En estas resinas se sustituye el anhídrido ftálico por ácido isoftálico. Esto aumenta la resistencia al agua y también tienen mejores propiedades mecánicas que las ortoftálicas.
- Isoftálica NPG. En estas resinas se sustituye el propilenglicol por neopentil glicol, lo que mejora su resistencia química
- Bisfenólicas: Son las resinas de poliéster con mejores propiedades mecánicas y químicas, pero su coste es mayor.

tanto dan lugar a piezas de materiales compuestos de gran calidad, utilizadas para estructuras que requieren una máxima resistencia con un mínimo peso como son las embarcaciones de regatas, embarcaciones militares, aplicaciones aeroespaciales, en depósitos, tuberías, etc. (5)

Se formulan a base de epóxidos, que curan por reacciones de poliadición al reaccionar con los iniciadores polifuncionales como fenoles aminas o poliácidos y se controla la reacción con los catalizadores.

El proceso de curado es similar al de las resinas de poliéster, aunque la mayoría de las resinas epoxi requieren de una aportación de calor externo para conseguir un curado completo. Para curados a temperatura ambiente es necesario añadir agentes catalíticos específicos.

Sus inconvenientes son: viscosidad elevada, lo que dificulta su aplicación y procesado, por lo que en ocasiones se deben utilizar diluyentes; y su elevado coste, lo que encarece la pieza final.

2.2.2. Refuerzos de las matrices termoestables

Como se ha comentado anteriormente, los refuerzos utilizados en los materiales compuestos de matriz polimérica pueden clasificarse en partículas, fibras y fibras trenzadas. En este trabajo fin de grado, se han utilizado fibras por lo que a continuación se hace una revisión bibliográfica de los tipos y características de las distintas fibras de uso habitual.

Las principales fibras que se utilizan en polímeros reforzados son de naturaleza cerámica (vidrio, carbono, basalto) y fibras orgánicas o naturales.

El material de refuerzo debe tener:

- Buenas características mecánicas: alta rigidez y alta tracción.
- Estabilidad frente a agentes químicos.
- Estabilidad al desgaste.
- Compatibilidad química y adherencia con la matriz polimérica.

El vidrio es un material cerámico que se obtiene mezclando por medio de calor dos silicatos, uno de ellos alcalino. La fibra de vidrio se obtiene haciendo fluir vidrio

fundido a través de agujeros muy finos que al solidificarse tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra (5). Se comercializa en varios tipos: tejido, MAT y Roving. (figura 4)

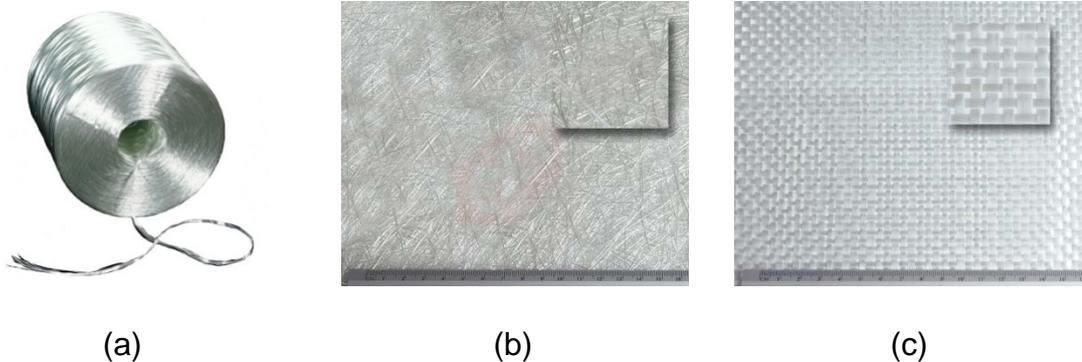


Figura 4: Fibra de vidrio tipo roving (a), MAT (b) y tejido (c) (6)

Las principales propiedades de la fibra de vidrio son:

- Excelente resistencia mecánica específica (resistencia a la tracción/densidad).
- Resistencia a la humedad.
- Resistencia a los agentes químicos.
- Buen aislante eléctrico
- Débil conductividad térmica
- Buena estabilidad dimensional
- Bajo alargamiento
- Propiedades isotrópicas
- Excelente adherencia a la matriz
- Incombustibilidad
- Imputrescibilidad

Estas propiedades combinadas con el bajo precio le han dado popularidad en muchas aplicaciones industriales. También puede ser usada para transportar laser y puede aplicarse como telecomunicador.

- Los fabricantes de la fibra de vidrio suelen clasificarla de acuerdo a la siguiente tipología [referencia a varios fabricantes]: A (alcalino): Es resistente frente ataques químicos y ácidos, debido a los grandes álcalis que contiene. Pero este elevado porcentaje de álcalis influye negativamente en su resistencia al agua, debido a ello ha sido sustituido por el vidrio E.

- B (boro): Excelente en propiedades eléctricas y gran durabilidad.
- C (Chemical): Es una fibra con elevada resistencia química y se utiliza en estructuras sometidas a atmosferas muy agresivas. Propiedades mecánicas entre el vidrio A y E.
- D (dieléctrico): Se utiliza en componentes electrónicos y de telecomunicaciones por sus altas propiedades dieléctricas (perdidas eléctricas muy débiles)
- E (eléctrico): Desarrollada para aplicaciones eléctricas, es la de coste más reducido. También se utiliza en la construcción de embarcaciones y es la más utilizada en la fabricación de fibras continuas. Está compuesto por borosilicato de calcio y aluminio con muy bajo o nulo contenido en potasio y sodio. Posee una buena resistencia a la humedad.
- R o S (Resistance en francés o Strength en inglés): es el tipo de fibra de mayor resistencia. Tienen una relación resistencia/peso más alta y son más caros. Se utilizan en aplicaciones militares y aeroespaciales. (7)

La siguiente tabla (tabla 1) muestra algunos valores teóricos de las propiedades mecánicas de las fibras más usuales.

Tabla 1. Propiedades fibra de vidrio (8)

Tipo	Vidrio E	Vidrio R/S	Vidrio C
Resistencia a la tracción (GPa)	3,4 - 3,5	3,5 - 4,6	3,1
Módulo elástico (GPa)	72 - 73	85 - 87	71
Densidad (Kg/m ²)	2600	2500- 2350	2450
Alargamiento a la rotura (%)	3,3 - 4,8	4,2 - 5,4	3,5
Resistencia específica (Gpa*cm ³ /g)	1,3 - 1,35	1,7 - 1,85	1,3
Módulo E específico (Gpa*cm ³ /g)	27,7 - 28,2	34 - 34,9	29
Coef de transmisión térmica (10e-6/K)	5	4, - 5,1	7,2
Diámetro del filamento(μm)	8,0 - 20	10	20

Las principales aplicaciones de la fibra de vidrio como refuerzo de resinas termoestables son: tuberías de plástico, recipientes, suelos industriales, carrocerías, cascos de embarcaciones.

Por otro lado, la **fibra de carbono** es una fibra sintética compuesta principalmente de carbono. Cada filamento de carbono es la unión de miles de fibras. Existen varios materiales que pueden ser utilizados como precursores de las fibras de carbono: el Poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y la celulosa. El más utilizado es el poliacrilonitrilo, que no es poliacrilonitrilo al 100%, sino un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico o cloruro de vinilo (8)

Para la obtención de fibras de carbono, las fibras de poliacrilonitrilo deben pasar por las siguientes fases:

- Estabilización y oxidación: las fibras son estiradas para alinear sus redes internamente, después se produce un calentamiento en atmosfera oxidante desde 200° hasta 250°C, manteniendo la tensión sobre las fibras.
- Carbonización: Las fibras son calentadas en una atmosfera inerte hasta 1500 °C, donde se eliminan el hidrógeno y el nitrógeno de la fibra original, transformándose en fibras de carbono.
- Grafitación: Calentamiento en una atmósfera no oxidante hasta 2500° - 3000°C, para obtener un módulo de elasticidad mayor.

Los productos primarios resultantes del proceso anterior son fibras de filamentos continuos con un contenido en carbono entre el 92 y el 100%, según sean las propiedades que se deseen conseguir.

Las fibras de carbono deben ser sometidas a un proceso de preparación superficial para poder ser utilizadas y mejorar la adhesión con las diferentes matrices.

Dependiendo de la temperatura de tratamiento podemos distinguir diferentes tipos de fibras de carbono (5):

- Fibras de alta tenacidad (HT) Su resistencia y tenacidad es superior a las de las fibras de vidrio, pero inferior del resto de fibras de carbono. Su coste es moderado y son adecuadas en muchas aplicaciones.
- Fibras de alto módulo (HM): Estas fibras tienen un módulo de elasticidad muy alto, coste elevado, bajo alargamiento a la rotura, pero debido a las diferencias de potencial en contacto con los metales, pueden provocar corrosión galvánica.

-
- Fibras de módulo intermedio (IM): Es una solución de compromiso entre las fibras HT y HM, son de un tipo de fibra que mejora tanto su resistencia como su rigidez.

Las mejores propiedades mecánicas de las fibras de carbono se obtienen al asociarlas con matrices epoxídicas. Una característica de las mismas es su coeficiente de expansión térmica negativa en la dirección de las fibras y positivo en el sentido transversal. Mediante una adecuada combinación de matrices y refuerzos, es posible obtener un material resultante que no sufra deformaciones térmicas en un amplio rango de temperaturas.

Además de estas características, otras propiedades importantes son (8)

- Elevada resistencia y rigidez
- Alta resistencia a la vibración
- Buen comportamiento a la fatiga
- Buena conductividad térmica
- Buena conductividad eléctrica
- Bajo coeficiente de dilatación térmica
- Resistencia a altas temperaturas
- Elevada resistencia química a ácidos disolventes y álcalis
- No se ve afectado por el contacto con el agua de mar.

La principal desventaja es su elevado coste.

En la siguiente tabla (tabla 2) se observan las principales propiedades de las fibras de carbono:

Tabla 2. Propiedades fibra de carbono (8)

Tipo	Carbono HT	Carbono HM	Carbono IM
Resistencia a la tracción (GPa)	2,6 - 5	2 - 3,2	3,4 - 5,9
Módulo elástico (GPa)	228 - 233	350 - 490	280 - 400
Densidad (Kg/m ²)	1740 - 1830	1790 - 1910	1730 - 1800
Alargamiento a la rotura (%)	1,2 - 2	0,4 - 0,8	1,1 - 1,9
Resistencia específica (GPa*cm ³ /g)	1,5 - 2	1,1 - 1,7	2 - 3,1
Módulo E específico (GPa*cm ³ /g)	127 - 134	190 - 260	160 - 200
Chef de transmisión térmica (10e-6/K)	entre -0,1 y -0,7	entre -0,5 y -1,3	--
Diámetro del filamento(μm)	6,9 - 8	6,5 - 8	20

2.3. Procesos de fabricación de piezas de composite en la industria

Existen numerosos métodos de fabricación con polímeros reforzados con fibras y pueden clasificarse de diversas maneras y la más común en la industria es la siguiente (8) (9):

- Moldeo por contacto
- Moldeo asistido por vacío
- Moldeo por vía líquida.

En todos los procesos de fabricación, uno de los puntos más significativos es la proporción de material de refuerzo en el laminado (figura 5). Obteniendo mayores propiedades cuanto mayor sea el porcentaje de refuerzo, todo entre unos límites, ya que las fibras resacas no se comportan como un material compuesto y fibras excesivamente impregnadas sólo añaden peso a la estructura sin aportar más resistencia.

Como se puede observar en la figura 5, entre los procesos que mayor porcentaje de refuerzo consiguen, están los preimpregnados utilizados para la fabricación de piezas con grandes solicitaciones mecánicas (piezas reforzadas de fibra de carbono para aeronáutica, automoción, etc.) o el proceso de Moldeo por

transferencia de resina o RTM. Por el contrario, la laminación manual o la proyección simultánea obtienen bajos porcentaje de refuerzo (<30%).

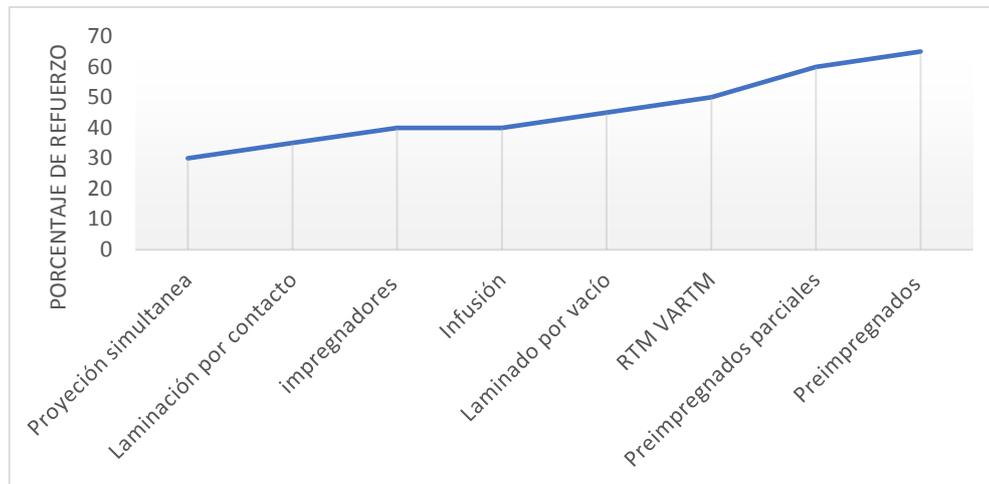


Figura 5: Porcentaje de refuerzo obtenido en distintos procesos de fabricación (1)

Otro factor muy importante a tener en cuenta en todos los procesos de fabricación son las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). La mayoría de resinas contienen COV, como el monómero de estireno. Estos compuestos tienden a evaporarse una vez se ha realizado el laminado y contaminan el ambiente de trabajo.

La contaminación por COV se produce en dos fases, una fase dinámica, que empieza desde que la resina está en estado líquido hasta que alcanza el punto de gel y la segunda fase, llamada fase estática, se produce cuando la resina se encuentra en forma sólida (figura 6). La primera fase es la más agresiva ya que en estado líquido la evaporación de los COV es más fácil.

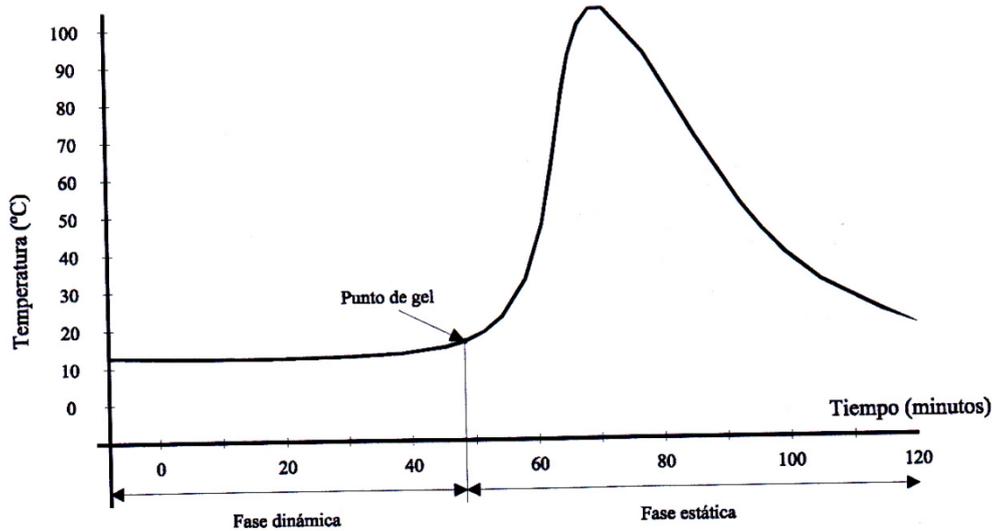


Figura 6. Emisiones de COV durante el curado de la resina (1)

2.3.1. Procesos de moldeo por contacto

En los procesos de moldeo por contacto, la habilidad del operario es importante para conseguir un material con las mejores cualidades mecánicas, pero dicho operario se encuentra expuesto directamente a los compuestos orgánicos volátiles, por lo que debe protegerse con mascarillas de filtros adecuados.

En estos procesos el ambiente de trabajo debe cumplir con unas condiciones determinadas para conseguir unos resultados óptimos. La condición clave es la temperatura ambiente, que tiene un gran efecto en el proceso de curado y afecta también a la viscosidad de la resina. Lo recomendable es trabajar con temperaturas de entre 15°C y 25°C, pero siempre siguiendo las recomendaciones o especificaciones del fabricante.

Las ventajas del proceso de moldeo por contacto a mano son:

- Equipos más sencillos y económicos que otros procesos
- Materias primas económicas
- Se pueden obtener piezas de gran tamaño
- Suelen curar siempre a temperatura ambiente
- No requiere una habilidad especial del operario para poder desarrollar el proceso correctamente.

Los inconvenientes:

- La productividad no suele ser muy elevada
- Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles son mayores, solo se controla en mayor medida en los Impregnadores.
- Se produce un gran número de desperdicios
- El contenido de refuerzo no es muy elevado
- Los laminados pueden sufrir irregularidades
- Mayor número de operarios que en otros métodos de fabricación.

Dentro de los métodos de contacto a mano, están el laminado manual (hand lay-up) y la proyección simultánea (spray-up)

El laminado manual consiste en aplicar sobre el molde capas de material de refuerzo e ir impregnándolas de resina con la ayuda de una brocha y un rodillo metálico (figura 7).

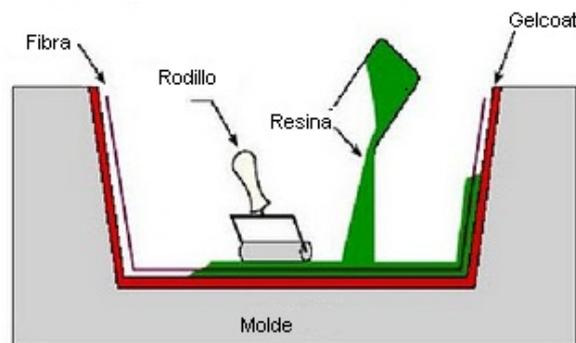


Figura 7. Laminado manual. (10)

Es el proceso de fabricación más difundido en la industria naval por su bajo coste tanto de equipos como en materiales, por la sencillez del proceso y por poder fabricar piezas de muy gran tamaño sin dificultades.

En la proyección simultánea se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina sobre un molde, luego se repasa toda la superficie con un rodillo metálico antes de que la resina endurezca para eliminar posibles burbujas de aire y compactar mejor material (figura 8).

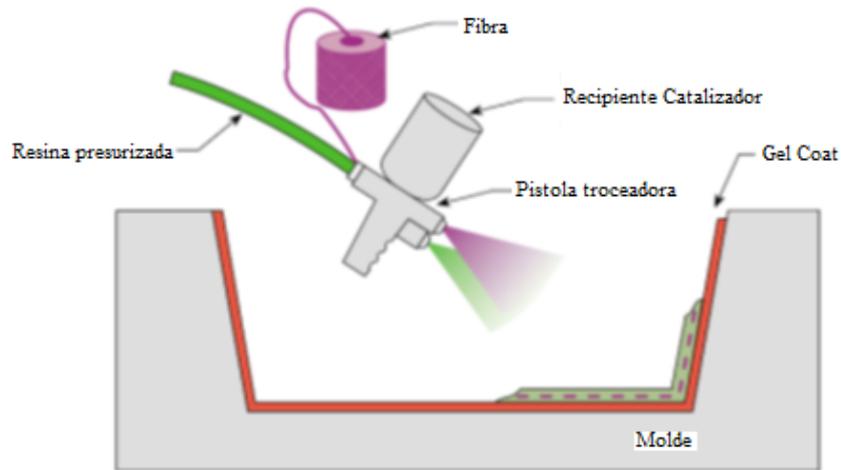


Figura 8. Proceso de proyección simultánea (10)

2.3.2. Moldeo asistido por vacío

Las técnicas de moldeo asistido por vacío permiten mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos en comparación con los moldeos por contacto (11). Esto es debido a que el laminado sufre una presión externa, que optimiza el contenido de matriz y la adhesión entre capas, por lo que se obtiene un laminado de mayor porcentaje de fibra de refuerzo y resistencia mecánica.

Para crear esta presión externa se sella todo el laminado y se produce el vacío en su interior. Estos procesos requieren de materiales consumibles que permitan sellar el laminado, absorber los excesos de resina y ser despegados de la superficie del laminado. Para ello se utilizan las bolsas de vacío de nylon, los “peel plies” o tejidos pelables y las mantas de absorción.

En estos procesos el ambiente de trabajo debe ser como en los procesos anteriores, a una temperatura entre 15° y 27°C y con una humedad relativa que no supere el 75%.

Algo a destacar en estos procesos es que las emisiones de compuestos orgánicos volátiles se ven reducidas, ya que el laminado se encuentra encerrado en una bolsa hermética.

Sin embargo, el coste del proceso es algo superior, debido a la necesidad de equipos más caros y por la utilización de materiales fungibles.

Entre los procesos asistidos por vacío tenemos:

Laminado manual asistido por vacío: Este proceso es una evolución del laminado manual, que difiere de este por el hecho de aplicar una presión extra al laminado durante su tiempo de curado. Esta presión extra ayuda a sacar el aire atrapado entre las capas de refuerzo además de compactarlas entre sí, ayuda a mejorar las relaciones refuerzo- matriz, proporciona laminados más uniformes y reduce la humedad durante el curado. El proceso de fabricación es idéntico al del laminado por contacto manual solo que cuando ya se ha aplicado toda la resina y el refuerzo, se procede a cerrar el molde con una bolsa estanca y se extrae todo el aire del interior de la bolsa con una bomba de vacío. Además, se aplican sobre el laminado antes de cerrarlo los tejidos pelables (peel-plies) y film separador, estos tejidos ayudan a extraer los excesos de resina y evitar que estos materiales queden adheridos a la pieza además de ayudar al desmoldeo (figura 9).

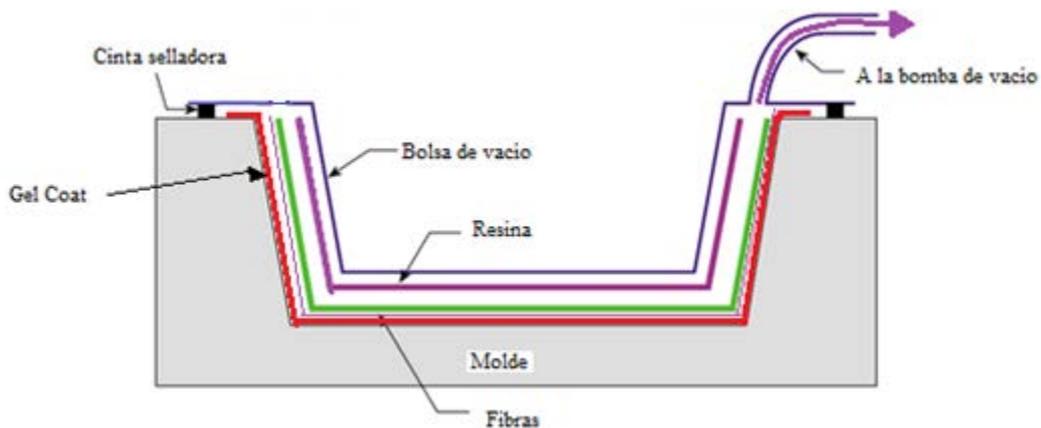


Figura 9. Laminado manual asistido por vacío (10)

Laminado por pre-impregnados: Los materiales preimpregnados son tejidos impregnados de resina, a los cuales se les ralentiza el proceso de curado almacenándolas a baja temperatura. Estas fibras son impregnadas con resina por máquinas, las cuales aseguran una mezcla y porcentaje de refuerzo-matriz muy precisa. El proceso de fabricación consiste en cortar los materiales preimpregnados descongelados y colocarlos a capas sobre un molde. Una vez colocadas todas las capas, el molde se somete a un aumento programado de presión y temperatura. Dependiendo del tipo de preimpregnados elegido, el proceso de curado puede ser mediante vacío, en cambio sí se necesitan presiones elevadas, se utilizan autoclaves y prensas, aunque el autoclave asegura una presión en toda la

superficie, aunque la geometría de la pieza sea complicada. Este proceso de curado lo hace poco viable para la industria naval, solo para embarcaciones de competición o militares y para piezas específicas ya que los costes son muy elevados.

2.3.3. Moldeo por vía líquida

Estos procesos de fabricación se caracterizan en que la resina entra en contacto con las fibras cuando ya está dentro del molde cerrado.

El laminado se encuentra sometido a una presión de compactación, que puede ser producida por contramoldes o por vacío.

La mayor ventaja de todos estos procesos remite en que las emisiones por compuestos orgánicos volátiles se ven reducidas casi al mínimo, razón que lo hace muy adecuado para tener un ambiente de trabajo más limpio y saludable.

Entre estos procesos, los más utilizados son los siguientes:

- RTM (Moldeo por transferencia de resina): Este proceso consiste en colocar fibras de refuerzo en el interior de un molde previamente pintado con Gelcoat, que una vez se ha sellado y sometido a presión mediante un contramolde, se le inyecta resina catalizada que impregna las fibras de refuerzo, una vez se han impregnado por completo, se corta el suministro de resina y se deja curar (figura 10). Para evacuar el aire atrapado en el interior, se colocan drenajes asistidos por vacío, la colocación de los cuales es muy importante para conseguir unos resultados óptimos.

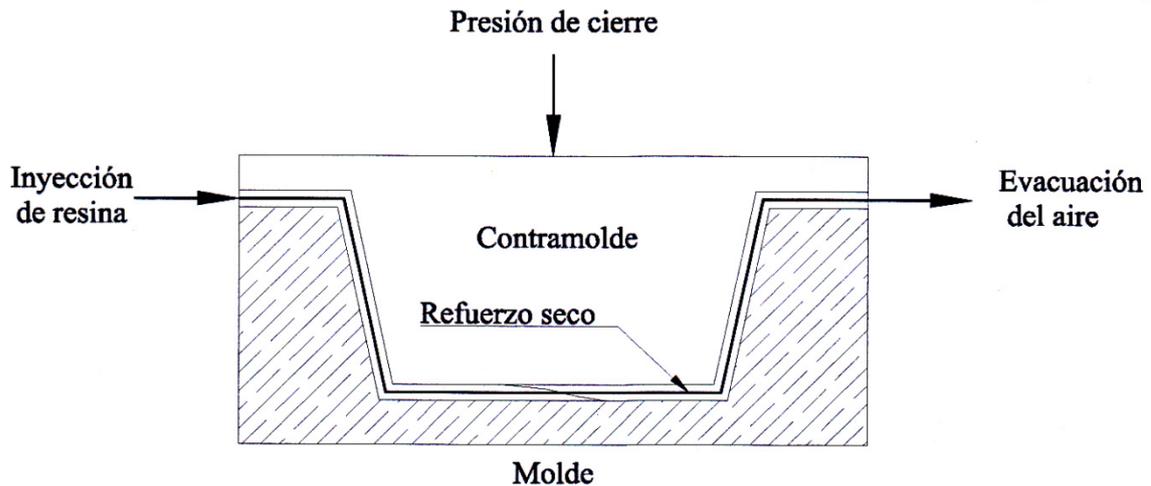


Figura 10. Proceso RTM [1]

VARTM (Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío). Es un proceso muy similar al RTM a diferencia de que la resina es inyectada desde la parte baja del molde mediante vacío. En la parte alta del molde se colocan las tomas de vacío, así la resina va impregnando todo el laminado desde abajo hasta arriba. Este proceso exige una gran estanqueidad, para ello se suelen colocar en los bordes del molde una doble junta con un espacio interior, que es sometido a vacío y garantiza la estanqueidad de la junta.

Infusión de resina: El proceso de infusión consiste en colocar fibras de refuerzo sobre un molde previamente encerado con desmoldeante y pintado con Gelcoat. Posteriormente, se sella el molde con una bolsa de vacío y se somete a todo el conjunto a vacío para extraer todo el aire que haya podido quedar atrapado en el interior. Cuando el conjunto se encuentra bajo vacío y estanco, se procede a dejar pasar la resina catalizada por unos tubos hasta el laminado que es impregnado por la resina ayudada por una malla de distribución colocada en la última capa del laminado. Una vez la resina ha alcanzado toda la superficie y se observa que ha salido todo el aire, se corta el suministro de resina y se deja curar el molde al vacío a temperatura ambiente. La distribución de la resina es muy importante ya que de ello dependerá el acabado final del producto y sus características mecánicas.,. En el caso de piezas de gran tamaño, como los cascos de barcos, se deben colocar varias tomas de alimentación de resina de acuerdo a las geometrías de las piezas. Este proceso de infusión de resina ayudado por vacío se caracteriza por su bajo coste, la alta calidad del producto final, las buenas propiedades mecánicas que se

obtienen y por la seguridad que ofrece al operario que no entra en contacto con las emisiones (COV) que se producen en el proceso de curado de las resinas.

En el presente Trabajo Fin de Master se ha utilizado este proceso para la obtención de las distintas láminas de biocomposite.

2.4. Aplicaciones de los composites

Debido a sus ventajas frente a los materiales convencionales, los composites están presentes en muchos sectores de la ingeniería, como la construcción naval, obra pública, aeronáutica, aerogeneradores, fabricación de cables de fibra óptica, fabricación de prótesis, etc.

Debido a su bajo coste de mantenimiento frente a los aceros, son muy utilizados en el sector náutico para la fabricación de cascos de embarcaciones, cubiertas, mástiles, etc.

En el sector de la aeronáutica se utilizan debido a su gran ligereza y resistencia mecánica, esto aporta una reducción del consumo de combustible muy importante, ya que hoy en día el empleo de fibras de carbono puede reducir el peso de una aeronave en un 20%

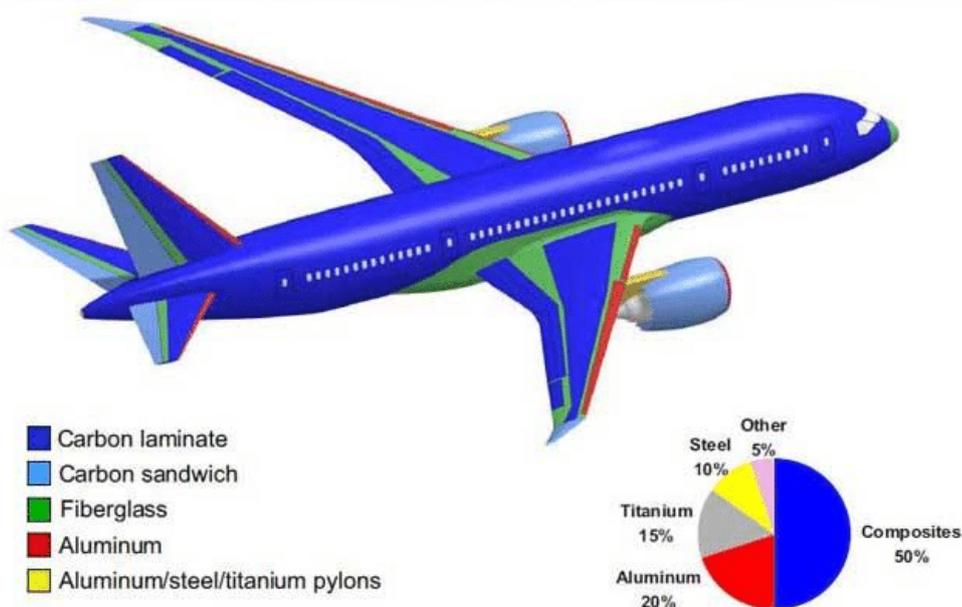


Figura 11 Porcentaje de composite y otros materiales utilizados en la fabricación del Boing 787 (12)

En el sector eólico, los composites se utilizan para la fabricación de palas de aerogenerador. Dichas palas se fabrican generalmente con resina epoxi reforzada con fibra de vidrio.

Por otro lado, dentro del mismo sector, están los mini-aerogeneradores que se aplican para la generación de energía eléctrica en muchos campos y se pueden encontrar en viviendas particulares, estaciones de telecomunicaciones aisladas, estaciones de riego agrícolas, náutica recreativa, etc. Tienen las ventajas de fácil instalación, poco mantenimiento, durabilidad y fiabilidad.



Figura 12 Mini-aerogenerador instalado en un mástil de embarcación.

A pesar de las innumerables ventajas que tiene el uso de los composites uno de los problemas que tienen es el fin de vida del producto, debido a la dificultad de su reciclado. En el caso de los composites de matriz termoestable reforzado con fibras sintéticas (vidrio, carbono, etc.) el reciclado pasa por la incineración del material o su troceado para la incorporación como refuerzo en otros materiales compuestos (13)

Por lo tanto, tanto la comunidad científica como industrial buscan alternativas medioambientalmente más sostenibles que puedan sustituir a los actuales. Se estima que solo el 10% de las palas son tratadas en su fin de vida, el resto acaban en cementerios ilegales.



Figura 13 Cementerio de palas de aerogenerador. (14)

2.5. Biocomposites

En las últimas décadas, la comunidad científica está realizando un importante esfuerzo por conseguir materiales medioambientalmente más sostenibles. Entre dichos materiales se encuentran las **bio-resinas reforzadas con fibras naturales** para sustituir a las resinas y fibras sintéticas con mayor dependencia del petróleo y su generación de residuos tras su fin de vida.

Actualmente, existen en el mercado distintas resinas termoestables de origen renovable utilizadas para sustituir a las tradicionales resinas poliéster y epoxi. Entre ellas se encuentran: “Super Sap®”, “Alpas Green Resin®”, “CreyFour® 100”. [10]

En este Trabajo Fin de Master se ha utilizado una bio-resina Super Sap® resina epoxídica proveniente de coproductos o subproductos industriales como la producción de papel, y con un control exhaustivo que verifica el contenido renovable. (15) En cuanto a las **fibras naturales** se encuentran el sisal, el yute, el kenaf, el lino o el cáñamo, que poseen gran potencial para reemplazar a la fibra de vidrio como materiales de refuerzo en la fabricación de piezas de composite.

Tabla 3 Propiedades fibras naturales [11]

Propiedades	Yute	Lino	Yute	Cáñamo
ρ (g/cm ³)	2.55	1.4	1.46	1.48
σ_T (MPa)	2400	800-1500	400-800	550-900
E (MPa)	73	60-80	10-30	70
E/ ρ (MPa/(g/cm ³))	29	26-46	7-21	47
ϵ (%)	3	1.2-1.6	1.8	8

ρ : densidad; σ_T : resistencia a tracción; E: módulo elástico o de Young, ϵ : elongación a rotura

Entre las propiedades que hacen atractivas las fibras naturales, destacan su elevada rigidez, resistencia a impacto y flexibilidad específicas (11). Igualmente, proporcionan aislamiento térmico, acústico y ligereza estructural, lo que da lugar a una reducción de peso y, por tanto, menor consumo de combustible y menores emisiones de CO₂.

Además, se trata de un recurso natural abundante, renovable y biodegradable, es decir, se minimiza la dependencia del petróleo. De hecho, las fibras naturales en el análisis de su ciclo de vida (LCA) necesitan alrededor de un 30 a 40% de la energía requerida para producir un MAT de fibra de vidrio (16)

Por otro lado, a diferencia de la fibra de vidrio, las fibras naturales en su manipulación no generan problemas de irritación respiratoria ni epidérmica al operario y tampoco causan abrasión a los equipos mecánicos de producción (17).

Por otro lado, otro material ampliamente conocido y utilizado, sobre todo en construcción, es la madera; dadas sus elevadas características mecánicas específicas. Como material de refuerzo de matrices poliméricas se ha utilizado serrín con termoplásticos pero poca bibliografía hace referencia a la madera como refuerzo de matrices termoestables. (18)

Tabla 4 Propiedades del Nogal (19)

Densidad media	680 kg/m^3
Resistencia de rotura a la flexión	1140 $kg/c m^2$
Resistencia de rotura a la compresión	610 $kg/c m^2$
Resistencia de rotura a la tracción	950 $kg/c m^2$
Resistencia al impacto	90 $kg/c m^2$
Dureza de Brinell Perpendicular a las fibras	225 $kg/m m^2$
Dureza de Brinell paralela a las fibras	580 $kg/m m^2$

Tabla 5 Propiedades del Iroko

Densidad media	650 kg/m^3
Resistencia de rotura a la flexión	960 $kg/c m^2$
Resistencia de rotura a la compresión	535 $kg/c m^2$
Resistencia de rotura a la tracción	810 $kg/c m^2$
Módulo de elasticidad	107000 $kg/c m^2$

En lo que respecta a las aplicaciones de los biocomposites, en la última década, los composites de matriz termoplástica o termoestable reforzados con fibras naturales, se están introduciendo en sectores industriales como el de Automoción para la fabricación de piezas tales como paneles para puertas, respaldos de asientos, salpicaderos y otras partes internas de vehículos. (20)

También los encontramos en la industria aeronáutica ya que su bajo peso es un factor muy a tener en cuenta para esta industria. En la construcción ya se están fabricando viviendas ecológicas con biocomposites (Figura 14)



Figura 14: Vivienda ecológica fabricada con biocompuestos (21)

También, cabe destacar la fabricación en el sector marítimo de pequeñas embarcaciones con fibras naturales y, además, existen otras aplicaciones en el sector náutico como, tablas de surf y piezas de interiores [15]

En el campo mobiliario, los biocomposites reforzados con fibras naturales tipo “mat” aportan propiedades como: aislamiento acústico, buenas propiedades mecánicas específicas y un diseño ecológico en la fabricación de mesas, sillas, paneles o pies de lámparas (22) (23)

En el sector de ocio se están introduciendo las resinas y las fibras naturales para fabricar bicicletas, cascos, esquís o raquetas y también carcasas de móviles [19].



Figura 15 Bicicleta de Bambú Bamboo Koa Pamplona (24)

Sin embargo, las limitadas propiedades mecánicas de dichos biocomposites están frenando su utilización en la fabricación de piezas con mayores sollicitaciones técnicas. De ahí, que la comunidad científica esté realizando un esfuerzo importante de investigación para conseguir: mayor homogeneización de las propiedades mecánicas de las fibras, mayor resistencia al fuego, reducción de la absorción de humedad y mejora de la adhesión fibra-matriz. (25)

2.6. Diseño por elementos finitos

Actualmente, el método de elementos finitos (MEF) se utiliza en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales como paso previo a la definición y fabricación final de los productos. (24). Los análisis ingenieriles que permiten estudiar los MEF son entre otros:

- Análisis estáticos para el estudio de estructuras sometidas a diferentes cargas y presiones
- Análisis de vibración cuando el material está sometido a distintas vibraciones e impactos
- Análisis de fatiga para predecir la vida de la estructura sometida a distintos ciclos de carga.
- Análisis de transferencia de calor cuando los materiales están sometidos a distintas temperaturas
- Análisis fluido-dinámico cuando se estudia el comportamiento de la estructura en diferentes situaciones de flujos aerodinámicos o hidrodinámicos.

Estos métodos se implementan en distintos programas informáticos como ANSYS REF, Nastran Patran, cosmos, etc. y también los programas de diseño 3d tradicionales como solid Works, solid Edge permiten la posibilidad de realizar estudios por elementos finitos.

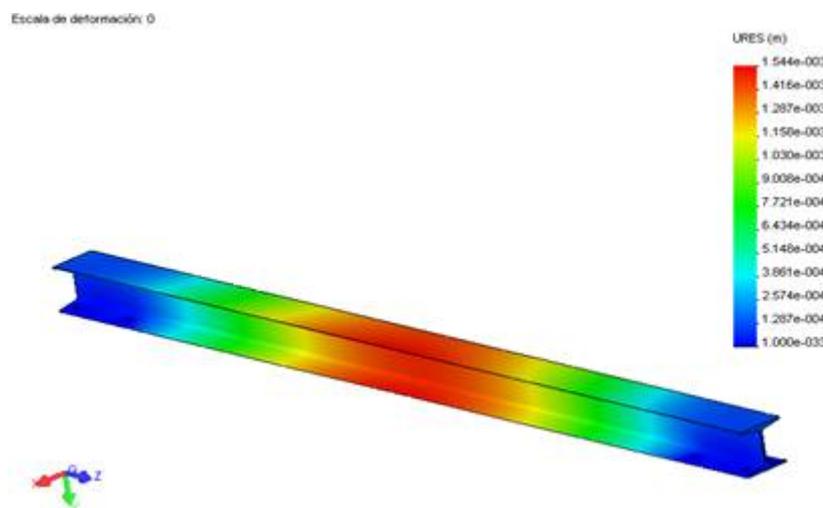


Figura 16: Ejemplo Estudio Elementos Finitos

En lo que respecta al diseño de estructuras con materiales compuestos de matriz polimérica, el uso de elementos finitos es de gran importancia, ya que permite predecir el comportamiento del material, la pieza o estructura fabricada con dichos materiales compuestos antes de su fabricación y montaje. (26)

En el presente Trabajo Fin de Master se ha utilizado el programa Solid Edge versión st10 con paquete de simulación de elementos finitos (25) que dispone la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

2.7. Análisis Crítico del Estado del Arte

Tras el Análisis del Estado del Arte y como aportación novedosa, se decide plantear el presente Trabajo Fin de Máster en tres bloques principales:

- En el primero se realiza la fabricación y caracterización de biocomposites de matriz bio-epoxi reforzada con distintas combinaciones de fibras naturales y madera de roble. Se utiliza un tejido bidireccional de fibra de lino [21] impregnado con un aditivo que mejora la adhesión con la resina epoxídica. Para mejorar las propiedades mecánicas y estéticas del biocomposite de lino, se han introducido igualmente láminas de madera de roble tanto en las pieles como en el núcleo del biocomposite, estudiando el comportamiento a tracción y flexión, así como la adhesión fibra-matriz mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).
- En la segunda parte, una vez caracterizados los distintos biomateriales se ha realizado la simulación por elementos finitos de los alabes de mini-aerogenerador sometidas a distintas velocidades de viento
- En la tercera parte del trabajo y como aplicación práctica, se realiza la validación mecánica y funcional de un mini-aerogenerador con álabes fabricados con dichos biocomposites en un túnel de viento.

3. OBJETIVOS

A partir de la revisión del estado del arte se establecen los siguientes objetivos:

- Fabricar materiales compuestos cuya matriz y refuerzos sean de origen natural y renovable.
- Caracterización mecánica de los materiales mediante ensayos de tracción y flexión tres puntos normalizados.
- Analizar la superficie de rotura con el microscopio electrónico de barrido (SEM).
- Estudiar el comportamiento mecánico del material mediante programas de elementos finitos.
- Aplicación práctica y validación mecánica de los nuevos biomateriales para la fabricación de palas de mini-aerogenerador con ensayo en túnel del viento.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Matriz

Se ha optado por la utilización de la resina bioepoxídica SUPER SAP® CLR INF, resina de origen natural en la que se reemplaza el carbono procedente del petróleo por un carbono de origen vegetal obtenido de coproductos y subproductos industriales, normalmente de la industria papelera y de la producción de biofuel (26). La relación resina-catalizador es de 100 partes de resina por 33 de catalizador, y el ciclo de curado es de 24 horas a una temperatura ambiente de 25°C. también se puede aplicar un postcurado de 2 horas a 50°C para obtener unas mejores propiedades mecánicas.

Tabla 6: Propiedades Matriz Super Sap® (26)

Propiedad Mecánica	Valor
Módulo a tracción (Gpa)	4.3
Resistencia a la tracción (Mpa)	70
Módulo de flexión (Gpa)	3.8
Resistencia a la flexión (Mpa)	110
Alargamiento a la rotura (%)	2
Tg (°C)	115

4.2. Refuerzos

Tejido de lino trenzado balanceado al 0/90 con un peso de 300 g/m², con un aditivo para mejorar la adherencia con la matriz.



a)



b)

Figura 17: a) Fibra de Lino b) Roble

Tabla 7: Propiedades del Lino (16)

Propiedades	Valor
Densidad (g/cm^2)	1,4 – 1.52
Resistencia a la tracción (Mpa)	700
Módulo de elasticidad E (Gpa)	70
E específico (E/Dens)	43-57
Elongación a la rotura (%)	3
Absorción de humedad (%)	7

Tabla 8 Propiedades del Roble Europeo. (19)

Densidad media	720 kg/m^3
Resistencia de rotura a la flexión	950 kg/c m^2
Resistencia de rotura a la compresión	570 kg/c m^2
Resistencia de rotura a la tracción	980 kg/c m^2
Resistencia al impacto	60 kg/c m^2
Dureza de Brinell Perpendicular a las fibras	310 kg/m m^2
Dureza de Brinell paralela a las fibras	560 kg/m m^2

4.3. Proceso de fabricación de biocomposites reforzados con fibras de lino y madera.

La fabricación de laminados se ha realizado mediante el proceso de infusión por vacío por los siguientes motivos:

- Reducción de exposición del operario a los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)
- Proceso económico y sencillo
- Buenas relaciones fibra-matriz
- Limpieza del proceso

Para este trabajo fin de master se han fabricado tres laminados diferentes, todos con matriz bioepoxídica, pero reforzados de diferente forma.

Se ha fabricado un material reforzado con 6 capas de lino, un material con cuatro capas de lino y dos capas de roble en los extremos y un último material fabricado

con 4 capas de roble y una capa de lino en cada extremo. todos ellos fabricados de igual forma, lo único que varía es la colocación de los refuerzos.

El proceso es el siguiente:

En cualquier trabajo a realizar la mejor opción es preparar todo el material necesario antes de comenzar a trabajar.

En primer lugar, se cortarán las láminas de fibra de Lino y madera a la medida deseada. Seguidamente se procederá a cortar la bolsa de vacío en función del tamaño y la forma del composite y también los tubos en espiral y los tubos de vacío.

Una vez preparados todos los materiales, se procederá a encerar el molde, en nuestro caso, una lámina de acero inoxidable pulido. Para ello se darán y pulirán cinco capas de cera desmoldante antes de colocar los materiales. Esta cera nos permitirá sacar fácilmente la pieza de la mesa de trabajo y le proporcionará un buen acabado superficial.

Seguidamente se procede a colocar las capas de fibra y madera en la disposición deseada.



Figura 18 refuerzo de Lino

Figura 19 Refuerzo de Roble

Cuando todas las láminas de fibras están colocadas se puede empezar a cerrar el conjunto. Para ello se envolverá el perímetro de la pieza a fabricar con cinta adhesiva sellante, se colocarán los tubos en espiral y de vacío para poder extraer el aire e inyectar la resina. Cuando ya están todos los elementos colocados, solo falta cubrir la pieza con la bolsa de vacío y pegarla a la cinta para crear una bolsa.



Figura 20 Colocación cinta Selladora

Figura 21 Colocación Bolsa de vacío

Antes de proceder a la inyección de la resina es conveniente comprobar que hay estanqueidad en la bolsa, es decir, se pone en marcha la bomba de vacío cerrando el tubo de entrada de resina para validar la situación de vacío estanco entre la mesa de trabajo y la bolsa. Igualmente es importante observar que los pliegues permiten una correcta compresión de todas las formas de la pieza sin que queden arrugas.

Ahora es cuando se procede a preparar y mezclar la bio-resina (“Super Sap ® “100/1000) con su catalizador (“Hardener”), la proporción de resina y catalizador es de 100 gramos de endurecedor por 33 de catalizador.

En este momento se pone en marcha la bomba de vacío y se empieza a introducir la bioresina. Esta fluye por toda la superficie del laminado, impregnando las fibras y arrastrando las burbujas de aire que hayan podido quedar hacia el tubo de aspiración de la bomba.



Figura 22 Proceso de impregnación de los refuerzos



Figura 23 Proceso de Infusión finalizado

Cuando se observa que todo el laminado está completamente impregnado y que no queda ninguna burbuja de aire, se procede a cerrar el tubo de entrada de resina y el de salida hacia la bomba, manteniendo el vacío sobre la pieza hasta el curado total de la pieza.

El proceso de curado a temperatura ambiente es de 24 horas, tras las cuales se procede al desmoldeo de la pieza final.

Si se desea producir otra pieza en la misma zona de la mesa, sólo es necesario limpiar la superficie con un trapo impregnado en acetona y después con otro trapo seco, por si queda algún tipo de residuo tanto de la cinta de sellado como de resina polimerizada y posteriormente aplicar una o dos capas de cera desmoldeante y pulirlas, ya que el molde lleva otras 5 capas aplicadas anteriormente, lo que será suficiente para que la pieza se desmolde sin dificultades.

4.4. Caracterización mecánica

Los factores que influyen en el comportamiento mecánico de los materiales compuestos son la matriz utilizada, el refuerzo, la disposición de las fibras, el sistema de fabricación y la adhesión fibra-matriz.

En nuestro caso sea se ha optado por una matriz de bioresina epoxídica, un refuerzo de lino con una disposición de 90^a, lámina de roble 0,5mm y se ha elaborado mediante el proceso de infusión.

Los principales factores que influyen en las propiedades de los materiales compuestos son las fibras de refuerzo, su orientación y la adhesión interfacial. (27)

El porcentaje de fibra en el composite es un factor que nos indicará también la calidad, ya que, si encontramos mucho porcentaje de fibra, posiblemente está no haya absorbido toda la resina posible y el composite sería de menor calidad, en cambio si encontramos poco porcentaje de fibra, el composite no estará suficientemente reforzado por las fibras. (28)

4.4.1. Ensayo a Tracción

En ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un estiramiento uniaxial y registrar la deformación en función de la carga aplicada. Es un ensayo destructivo, ya que se deforma la pieza hasta su rotura.

Con ello se obtiene la curva de tensión deformación del material y de ella se sacan sus propiedades mecánicas. Las más importantes son:

Límite elástico: máxima tensión que puede soportar el material deformándose de manera elástica

Tensión de rotura: tensión de tracción en el momento de la rotura de la probeta

Módulo de Young: relación entre la tensión realizada y la deformación unitaria en la zona elástico-lineal del material

Coefficiente de Poisson: indica la relación entre la deformación longitudinal en dirección perpendicular a la fuerza aplicada y la deformación longitudinal en la dirección de la fuerza

Elongación. Incremento de longitud del material producido por la tensión

Para el ensayo a tracción se ha utilizado un equipo INSTRON 5967 con una capacidad de 30kN y un espacio vertical de ensayo de 1212mm. Tiene una exactitud en la medición de carga de $\pm 0.5\%$ de lectura hasta $1/500$ de capacidad de célula de carga. La velocidad de adquisición de datos es de hasta 1kHz y las velocidades de ensayo van de 0,001 a 3000 mm/min [27] en nuestro caso en ensayo se ha realizado a una velocidad de 1mm/min



Figura 24 Ensayo de tracción

Probetas:

Se mecanizaron 5 probetas de cada biocomposite con las dimensiones requeridas por la norma UNE-EN ISO 527 Plásticos. Determinación de las propiedades a tracción, las Dimensiones son las siguientes:

- Longitud: 200mm
- Ancho: 25mm
- Espesor: 4mm

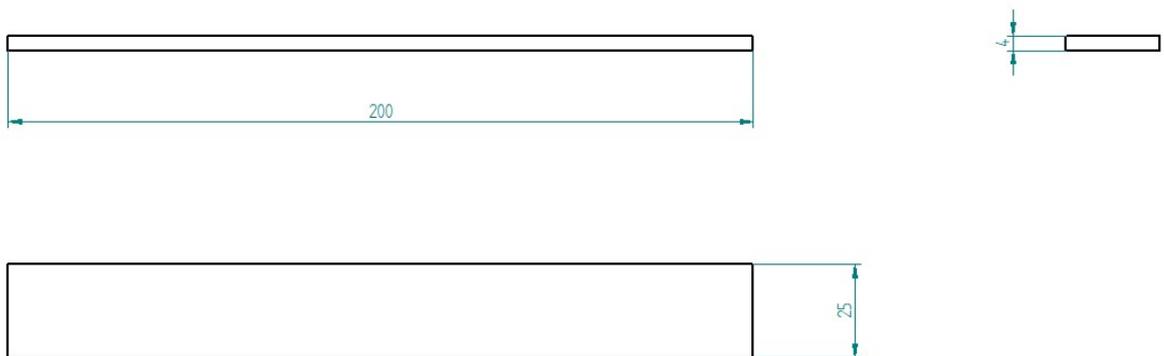


Figura 25 Dimensiones Probetas de tracción

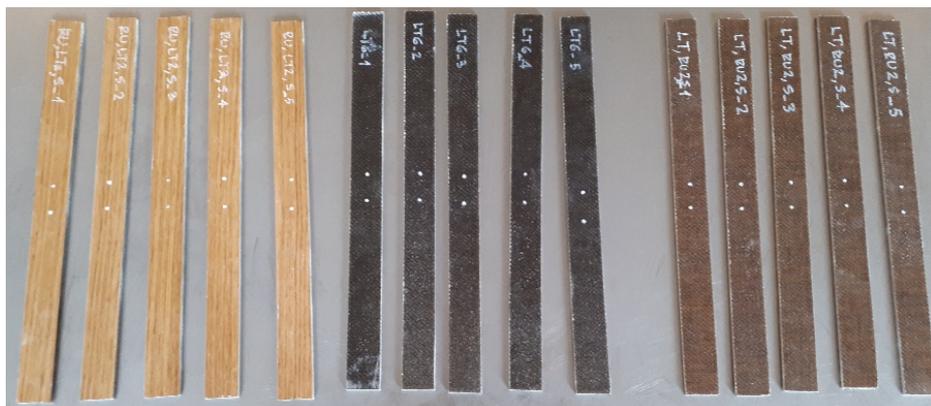


Figura 26 Probetas preparadas para ensayo de tracción

4.4.2. Ensayo de Flexión

El ensayo de Flexión por 3 puntos, consiste en apoyar una probeta en dos puntos y aplicar sobre su centro una carga para que esta flexione. De ella obtenemos datos como:

Tensión a flexión (MPa): Es la tensión a flexión que soporta el material hasta el momento de su rotura

Módulo de elasticidad a flexión (MPa): capacidad de un material de sección específica, para resistir la flexión cuando tiene una carga bajo tensión y define la relación entre un esfuerzo a flexión y la tensión resultante.

Los ensayos se han llevado a cabo con el equipo marca MTS Modelo 569329-04 con una sensibilidad de 2.396mV/V con una carga máxima aplicable de 10kN.

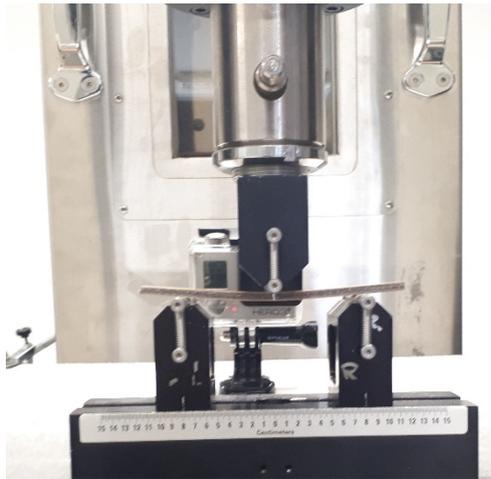


Figura 27 Ensayo de Flexión

Probetas:

Según la norma UNE-EN ISO 14125 Compuestos Plásticos reforzados con fibras. Determinación de las propiedades a flexión, las probetas tienen que tener las siguientes medidas:

- Longitud: 90mm
- Ancho: 15mm
- Espesor: 4mm

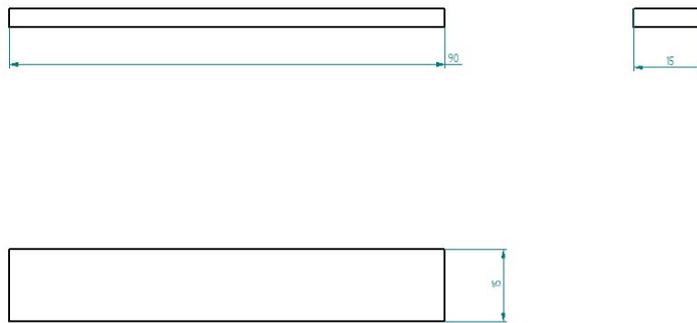


Figura 28 Dimensiones probetas de Flexión

La distancia entre apoyos ha de ser de 80 mm

4.5. Microscopio Electrónico de Barrido SEM:

Para observar la zona de fractura de las probetas tanto de tracción como de flexión se recurrió al microscopio electrónico de barrido JSM-6400.

Este microscopio está especialmente indicado para la observación de la superficie de materiales. Dispone de un cañón de electrones de cátodo termiónico con filamento de tungsteno y detector de electrones secundarios.

Su resolución de imagen a 25KV es de 3.5nm a 8mm de distancia de trabajo o 10nm a 39 mm de distancia de trabajo.

Para poder observar las muestras en el microscopio electrónico, estas previamente se han de metalizar con oro.



Figura 29 Microscopio Electrónico SEM

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Fabricación de Biocomposites.

Se ha fabricado tres biomateriales distintos, el primero con un refuerzo de 6 capas de lino, la segunda disposición de las fibras por la que se ha optado ha sido la de poner un núcleo de 4 capas de lino con una lámina de roble en las caras exteriores, que nos dará un composite con un gran acabado estético y la tercera disposición es lo contrario, es decir, un núcleo de 4 láminas de madera y una capa de lino en cada cara exterior.

Los resultados de espesores, densidades y porcentaje en peso de refuerzo se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 9: Biocomposites fabricados mediante el proceso de infusión al vacío

Matriz	Refuerzo	Capas	Espesor	Densidad	% en Peso de Fibras
Super Sap	Lino	6	4.1mm	1280.5 kg/m^3	45
Super Sap	Roble-Lino-Roble	6	4	1150.5 kg/m^3	47
Super Sap	Lino-Roble-Lino	6	3.7 mm	998 kg/m^3	53

5.2. Resultados de Tracción

En la siguiente tabla se pueden observar los valores del Módulo elástico (E), la tensión de rotura (σ_R) y la deformación de rotura (ϵ_r) de las distintas probetas ensayadas a tracción según la norma UNE-EN ISO 527 Plásticos. Determinación de las propiedades a tracción.

Se han ensayado cinco probetas de cada material y se han eliminado del estudio las probetas con mejores resultados y peores resultados en cada caso, por lo que la media de los valores se ha obtenido de las 3 probetas restantes

El Módulo de Young se ha calculado sacando la pendiente del tramo donde la deformación es del 0,005 hasta el 0,025%

Tabla 10 Resultados Tracción Biocomposites

Biocomposite	E (MPa)	σ_R (MPa)	ϵ_r (%)
Lino tejido 6 capas	9956,33±385	98,1±0,890	1,60±0,023
Roble-Lino-Roble	10153±863	92,27±2,84	1,08±0,032
Lino-Roble-Lino	12743±821	120,54±4,69	1,08±0,016

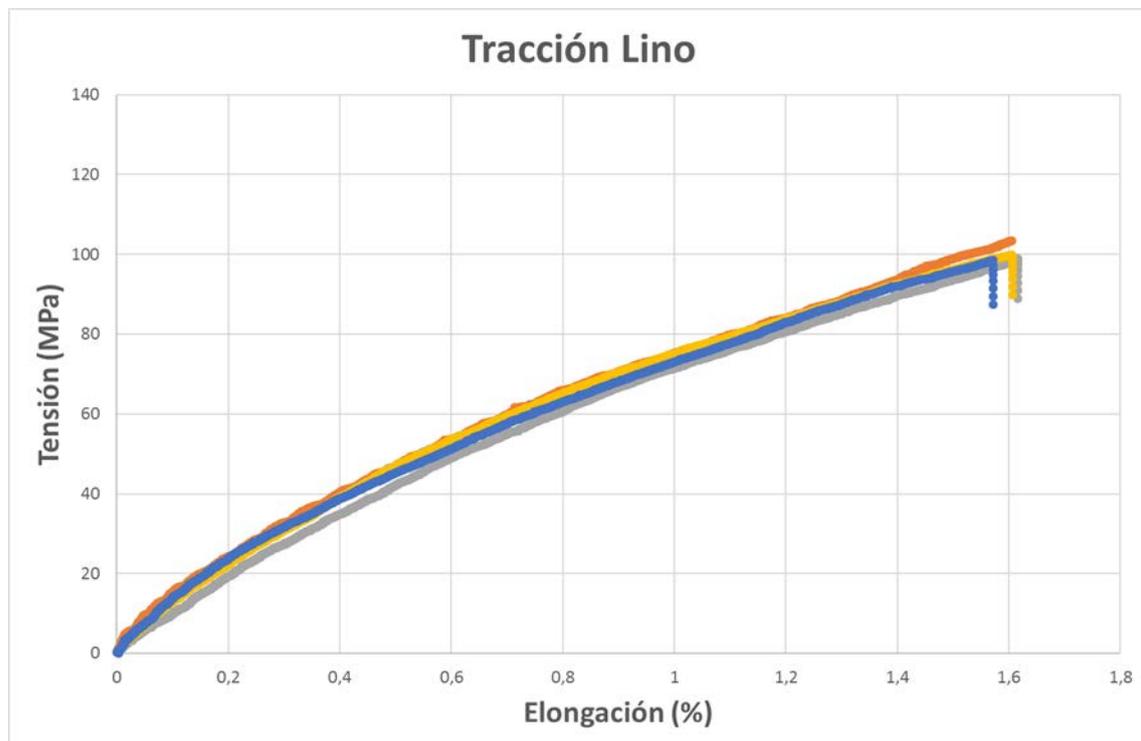


Figura 30: Curvas de tracción del biocomposite de Lino

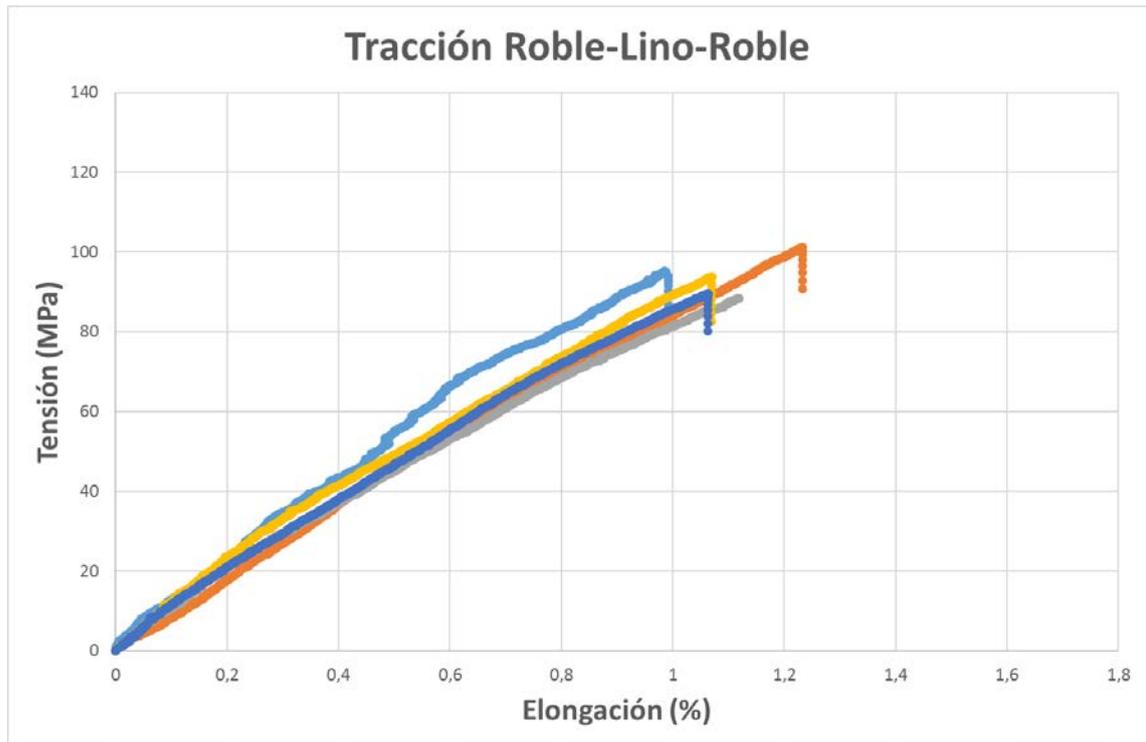


Figura 31 Curva de tracción biocomposite Roble-Lino-Roble

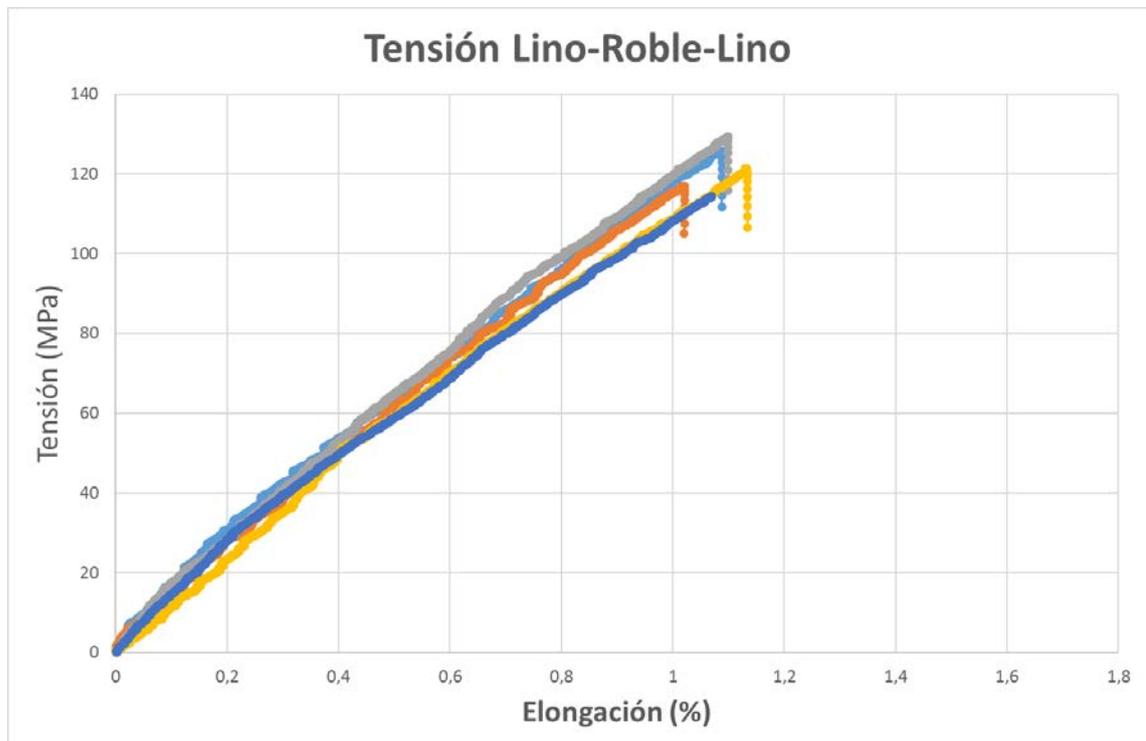


Figura 32: Curvas de Tracción biocomposite Lino-Roble-Lino

Como se puede observar, comparando las figuras 30 y 31, el roble aumenta significativamente la rigidez del biocomposite. Este aumento de rigidez se refleja numéricamente en la tabla de resultados donde el módulo de Young de

biocomposite de Lino ($E=9956$ MPa) aumenta con el roble en las caras exteriores un 2%. A su vez, la elongación a rotura disminuye de 1,60% a 1,08%.

Si se fabrica el biocomposite con cuatro láminas de roble en el núcleo se observa que tanto la rigidez como la resistencia a tracción son mayores respecto a el biocomposite de Lino y al de Roble en las caras exteriores. Se produce un aumento del 28% en la rigidez frente al biocomposite de Lino y de un 25% frente al biocomposite con roble en las caras exteriores.

5.3. Resultados ensayos de Flexión en tres puntos:

En la siguiente tabla se pueden observar los valores del módulo de Flexión (E_f), tensión a flexión máxima (σ_f) y deformación máxima (ϵ_r) obtenidos tras los ensayos de flexión en tres puntos según la norma “UNE-EN ISO 14125: Compuestos Plásticos reforzados con fibras” de los diferentes biocomposites fabricados.

Igual que en el ensayo de tracción, se han ensayado cinco probetas de cada material y se han eliminado del estudio los valores extremos, obteniendo la media y desviación estándar de las 3 probetas restantes.

Tabla 11 Resultados Flexión Biocomposites

Biocomposite	E_f (MPa)	σ_f (MPa)	ϵ_r (%)
Lino tejido 6 capas	8780 ± 221	133,9 ± 0,36	2,56 ± 0,0427
Roble-Lino-Roble	11260 ± 324,76	140 ± 1,99	1,724 ± 0,07
Lino-Roble-Lino	8921,6 ± 245,3	145,8 ± 3,91	2,774 ± 0,066

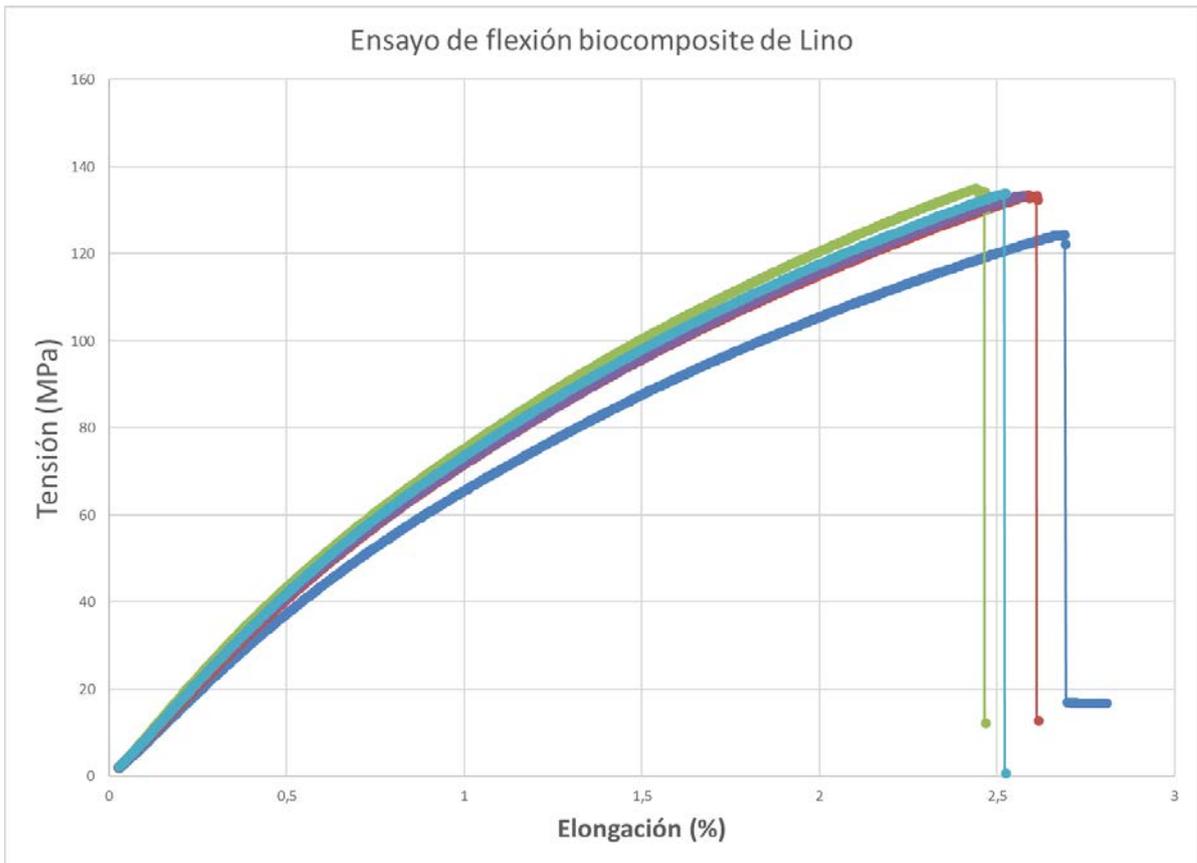


Figura 33 Curvas Flexión Biocomposite de Lino

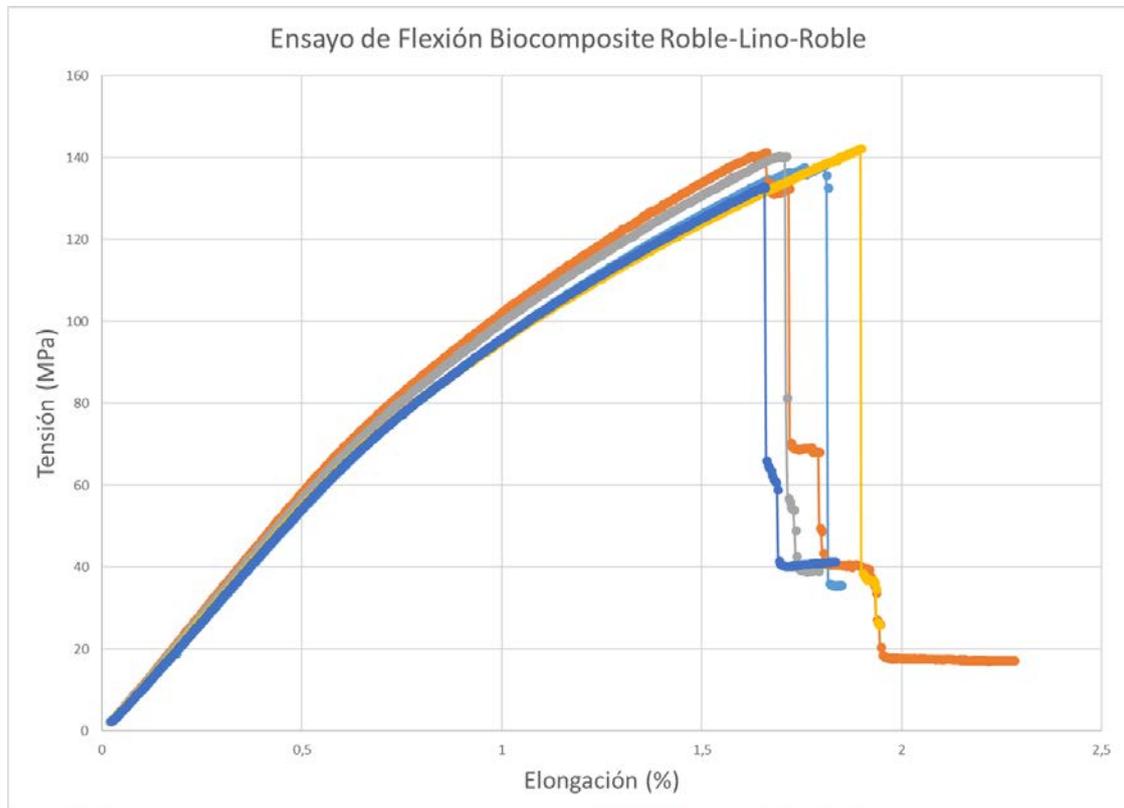


Figura 34 Curvas Flexión Biocomposite Roble-Lino-Roble

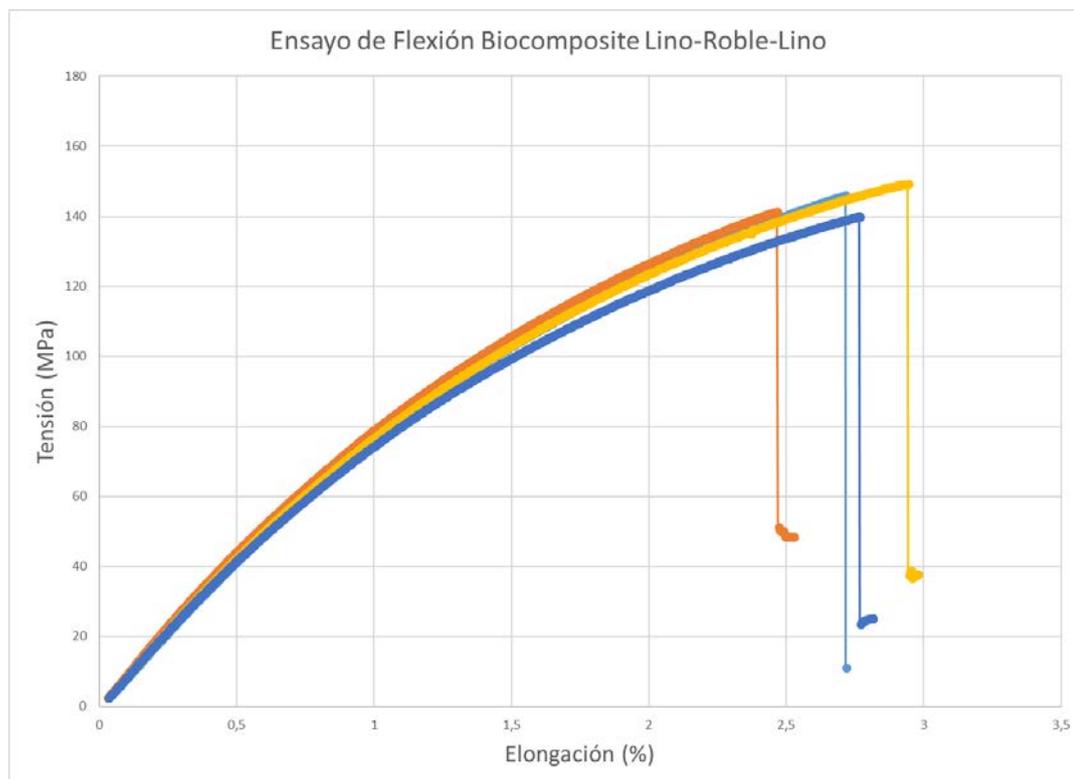


Figura 35 Curvas Flexión Biocomposite Lino-Roble-Lino

Se observa claramente que la combinación de roble-lino-roble es la más resistente a flexión, un 22% superior al biocomposite de Lino y un 20% al biocomposite con el núcleo de roble. Esto nos indica que el roble en las caras exteriores del biocomposite aumenta la rigidez disminuyendo la elongación a rotura.

El biocomposite con núcleo de roble presenta los mayores valores de resistencia a flexión y elongación a rotura, es decir, es un biocomposite con mayor plasticidad. La tensión de rotura aumenta un 10% y un 3% frente a los biocomposites de Lino y Roble-Lino-Roble respectivamente.

5.4. Microscopia Electrónica de Barrido

Se realizaron micrografías SEM con unos aumentos de X25, X150 y X500 en las superficies de rotura de las probetas ensayadas a tracción.

Debido que se ha realizado en la zona de rotura, las fibras y la matriz aparecen rotas y permite observar el grado de adhesión entre los refuerzos y la matriz.

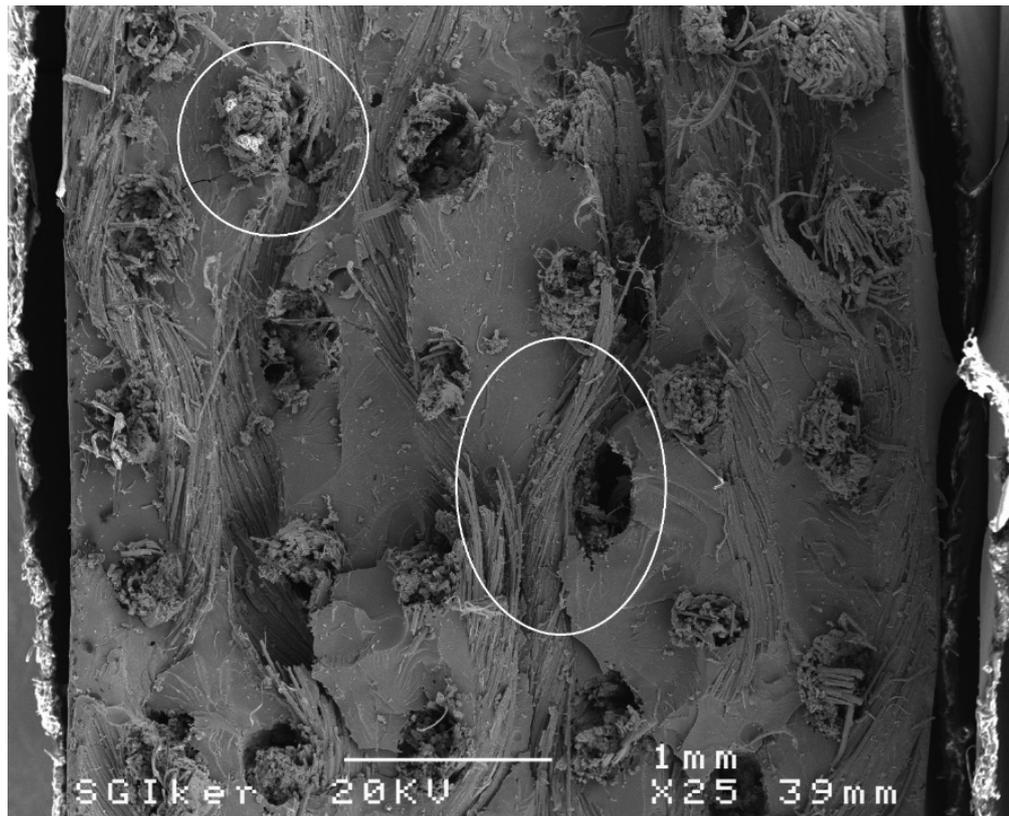


Figura 36 Micrografía biocomposite de Lino

En la figura 36 con un aumento de X25, podemos observar la distribución de las fibras a 90 grados. Viendo unas en sentido longitudinal y otras en el sentido trasversal. Se observa también una distribución homogénea de la matriz, indicando que el proceso de infusión se ha llevado a cabo correctamente.

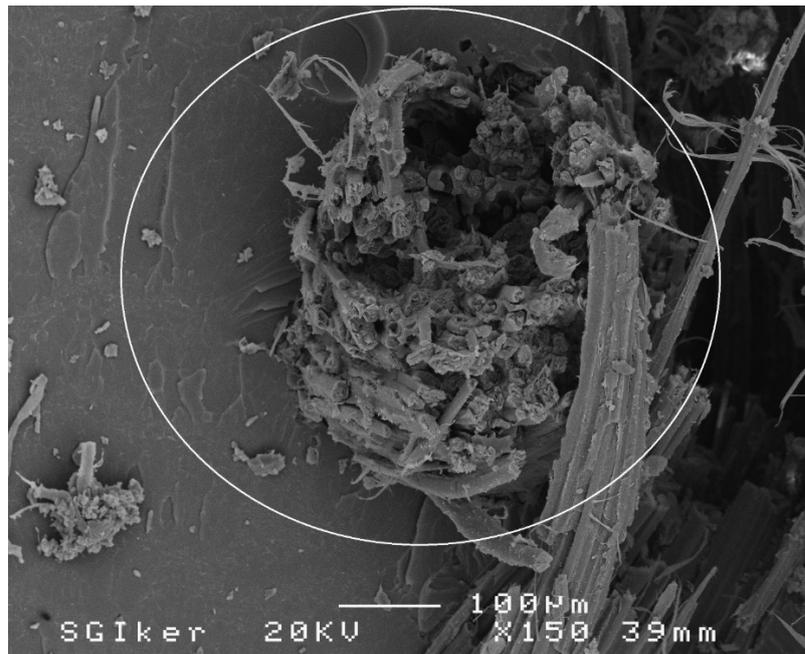


Figura 37 Micrografía biocomposite de Lino

En la figura 37 con un aumento de X150, se observa claramente la rotura de un hilo de la urdimbre formado por mini hilos. Dicha rotura es frágil y se corresponde con los datos obtenidos en el ensayo de tracción, es decir, la elongación antes de la rotura es pequeña.

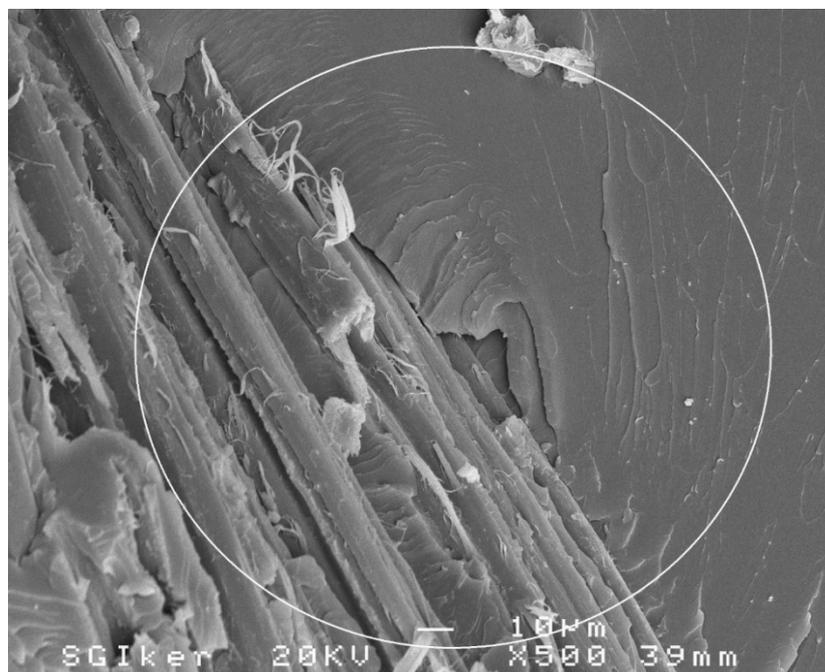


Figura 38 Micrografía biocomposite de Lino

En la figura 38 con un aumento de X500, se observa la interfase fibra-matriz. Se puede decir que existe una buena adhesión entre las fibras de lino y la bioresina, ya que no se observan huecos ni cavidades entre ambas fases.

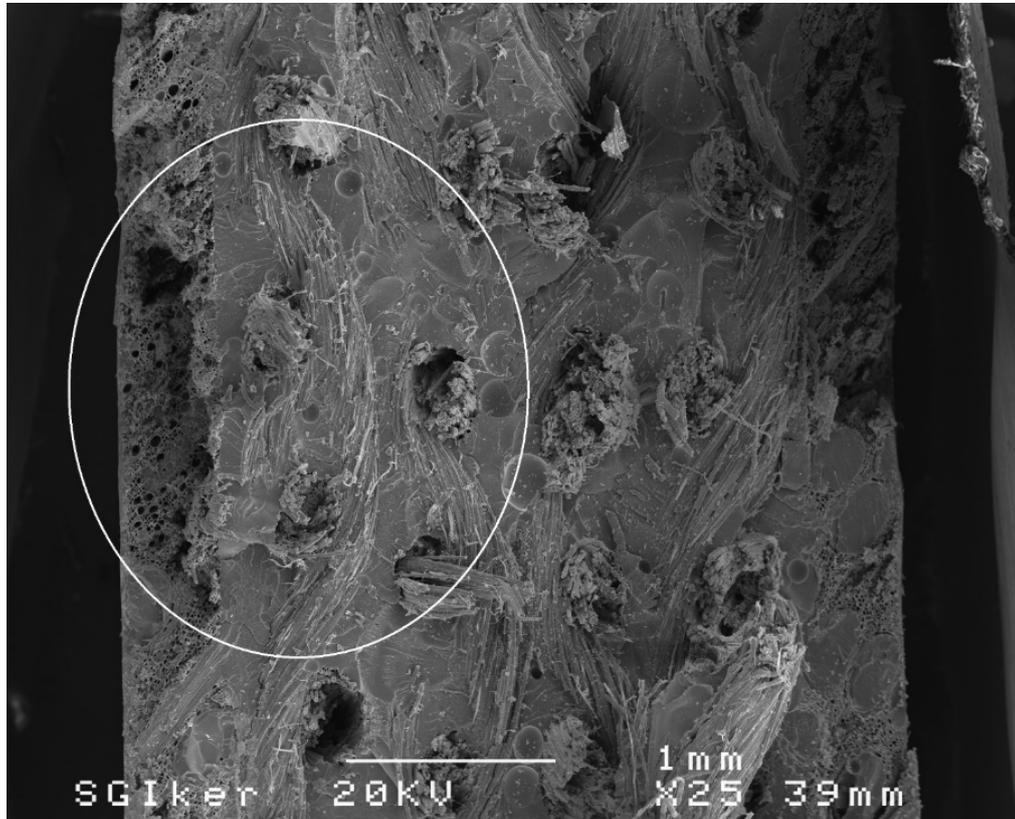


Figura 39 Micrografía biocomposite Roble-Lino-Roble X25

Se observa claramente la estructura interna de la madera formada por celdas de tamaño micrométrico en los extremos de la probeta. La rotura es frágil ya que no se observa elongación ni de las fibras de lino ni de la madera. Este hecho justifica la elevada rigidez de este biocomposite.

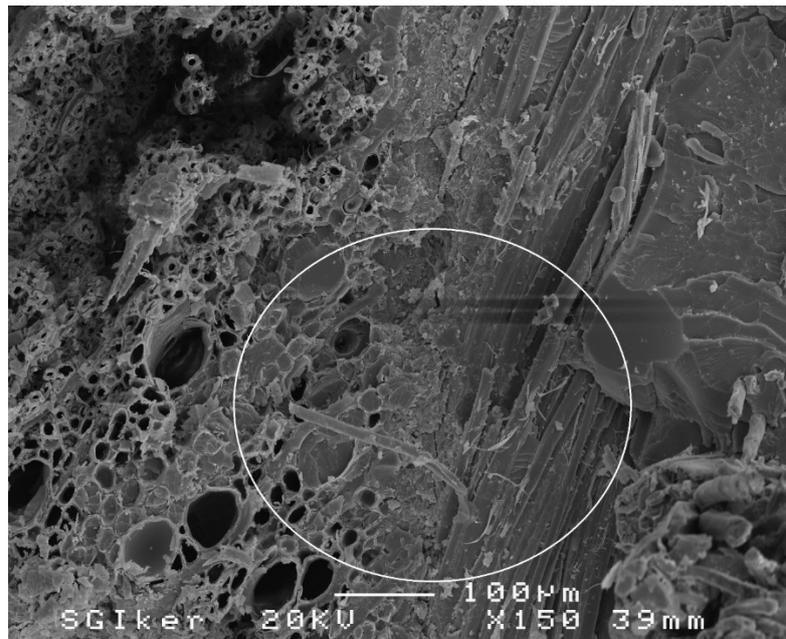


Figura 40 Micrografía biocomposite Roble-Lino-Roble X150

En la figura 40 se puede observar con mayor detalle la interfase entre el Lino, el roble y la resina. Al no apreciar un límite definido entre los distintos refuerzos y la matriz se puede decir que la impregnación de los refuerzos por parte de la resina ha sido adecuada, dando lugar a un material compuesto con un elevado módulo de Young.

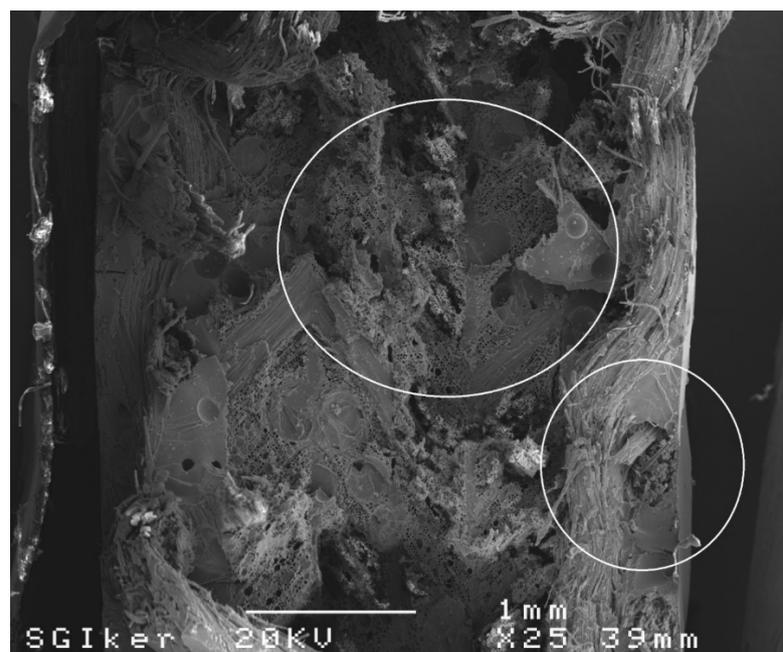


Figura 41 Micrografía biocomposite Lino-Roble-Lino a X25.

En la figura 41 se observa el núcleo de madera y los extremos de Lino, apreciando las fibras longitudinales y transversales. La matriz se introduce entre la fibra y la madera sin dejar zonas sin impregnar.

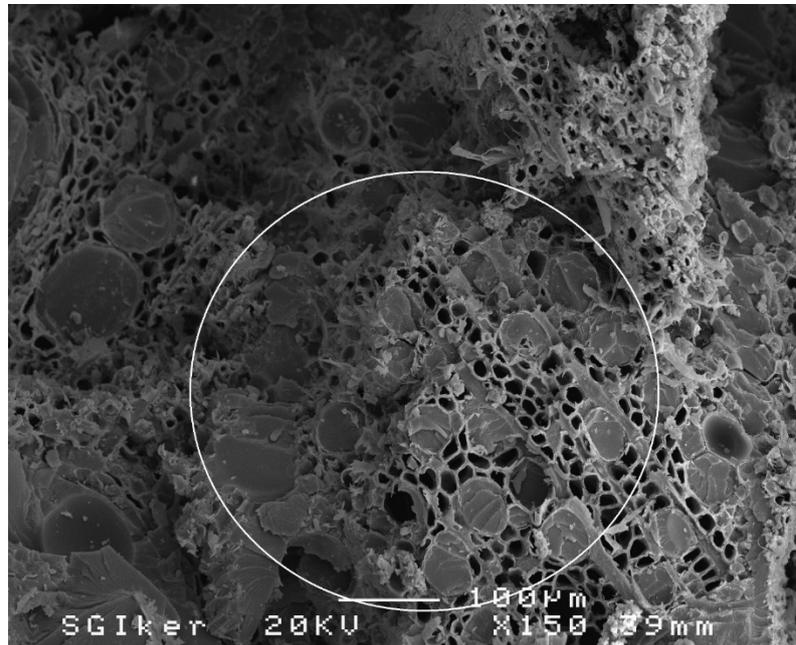


Figura 42 micrografía biocomposite Lino-Roble-lino X150

En la figura 42 se observa que no todas las celdas de la madera son rellenadas por la matriz, debido a su pequeño tamaño, esto justifica el elevado porcentaje en peso del refuerzo (53% en peso) y la elevada rigidez a tracción de este biocomposite.

Se puede concluir que la estructura de micro-celdas de la madera de roble influye en la penetración de la resina en su estructura, sin embargo, sí que hay una buena adhesión con la fibra de lino.

6. APLICACIÓN PRÁCTICA. MINI-AEROGENERADOR

Como aplicación práctica de los biocomposites, se han fabricado unas palas o álabes para el mini aerogenerador disponible en el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Vitoria/Gasteiz (UPV/EHU)

Previamente a la instalación de las palas en el mini-aerogenerador, se ha realizado un estudio por elementos finitos de la resistencia mecánica de los biocomposites a distintas velocidades del viento.

6.1. Modelado por elementos finitos (FEM)

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos mecánicos de los distintos biocomposites, se han podido introducir los datos en un programa de modelado por elementos finitos para poder observar el comportamiento del material cuando está sometido a esfuerzos.

En este Trabajo Fin de Master, se ha utilizado el paquete de simulación que tiene instalado el programa Solid Edge st10. Primeramente, se ha dibujado el álabes de acuerdo a las dimensiones que se pueden observar en la Figura 43.

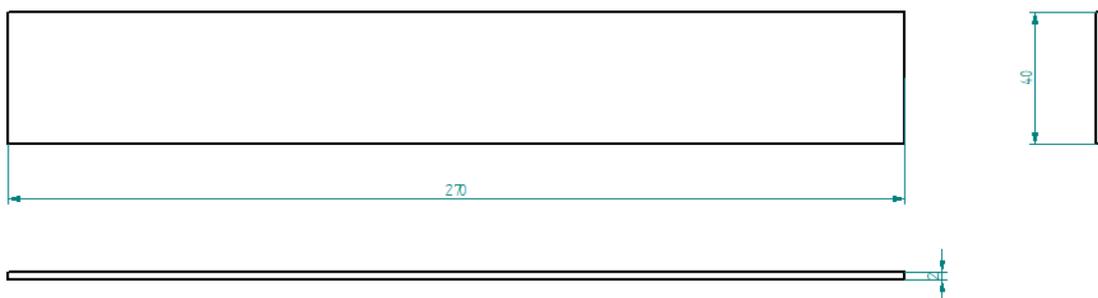


Figura 43 Dimensiones Pala Mini-aerogenerador

Posteriormente se realiza un mallado del alabe con malla tetraédrica de 3,47mm, el número de elementos totales es de 3628 y un número total de nodos de 7749. Como condición de contorno, se fija la pala por un extremo, considerando su comportamiento como una viga empotrada.

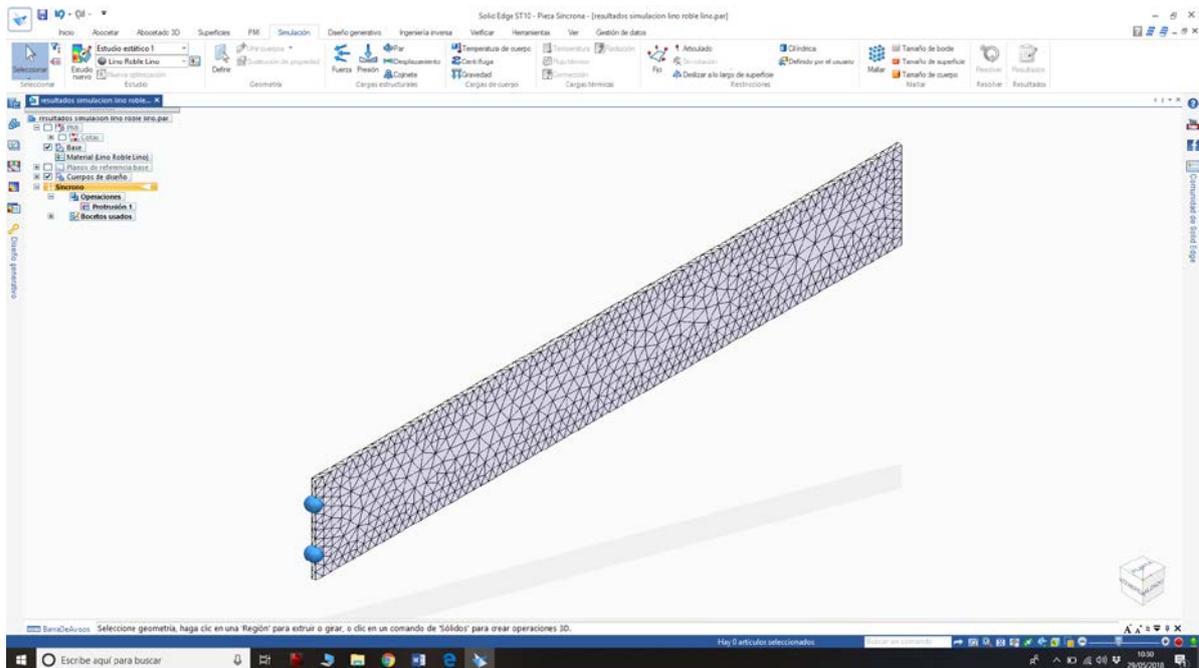


Figura 44 Condiciones de contorno y mallado pala mini-aerogenerador.

A continuación, se ha de introducir la presión a la que estará sometida la pala. Se han aplicado tres velocidades de viento distintas, 3m/s, 8m/s y 11m/s y sus presiones correspondientes se han calculado de acuerdo a la formula

$$P = 1,22 * V^2 \quad (X)$$

Por lo tanto, las presiones a estudio son:

$$P1 = 0,011\text{KPa}$$

$$P2 = 0,078 \text{ KPa}$$

$$P3 = 0,147 \text{ Kpa}$$

Se ha abierto una nueva biblioteca en el programa para introducir las propiedades mecánicas de los nuevos biocomposites de acuerdo al apartado 4 Resultados y Discusión del presente Trabajo Fin de Master.

Se realiza un estudio estático para cada material y a cada presión del viento considerando el estado tensional de Von Mises y el desplazamiento máximo. Como material de referencia, se ha utilizado el Aluminio 1060 (figuras 45 46) dado que es

el material actual de las palas del mini-aerogenerador del laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Vitoria.

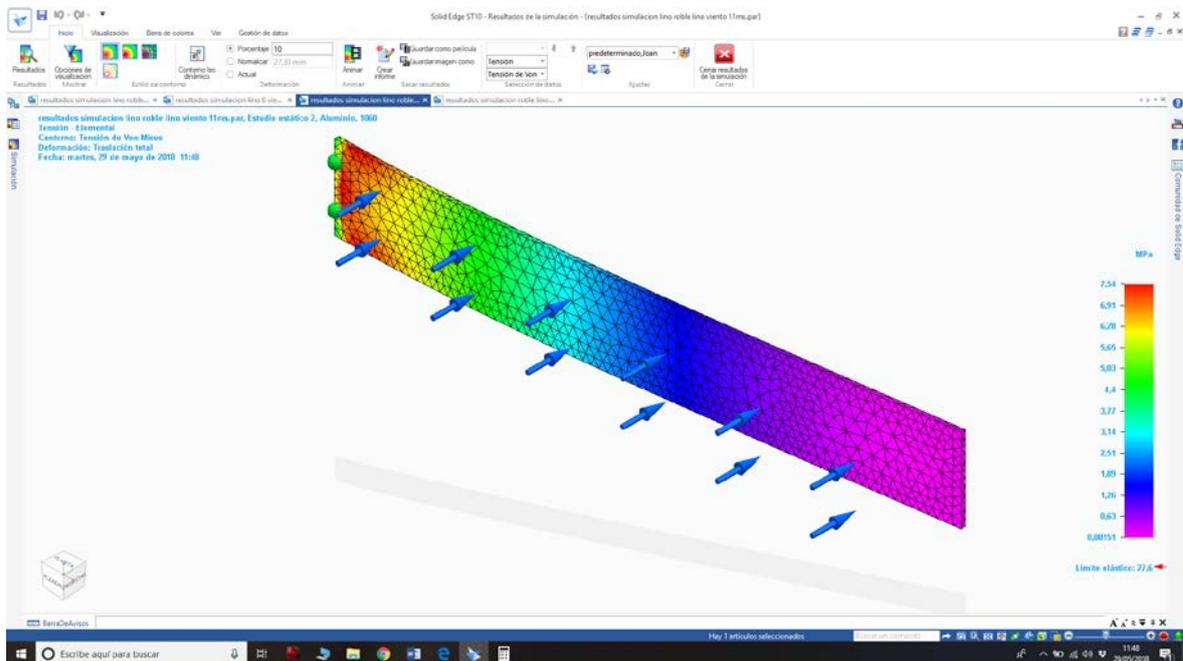


Figura 45 Estado tensional de la pala de Aluminio 1060 a $P=0,147\text{KPa}$

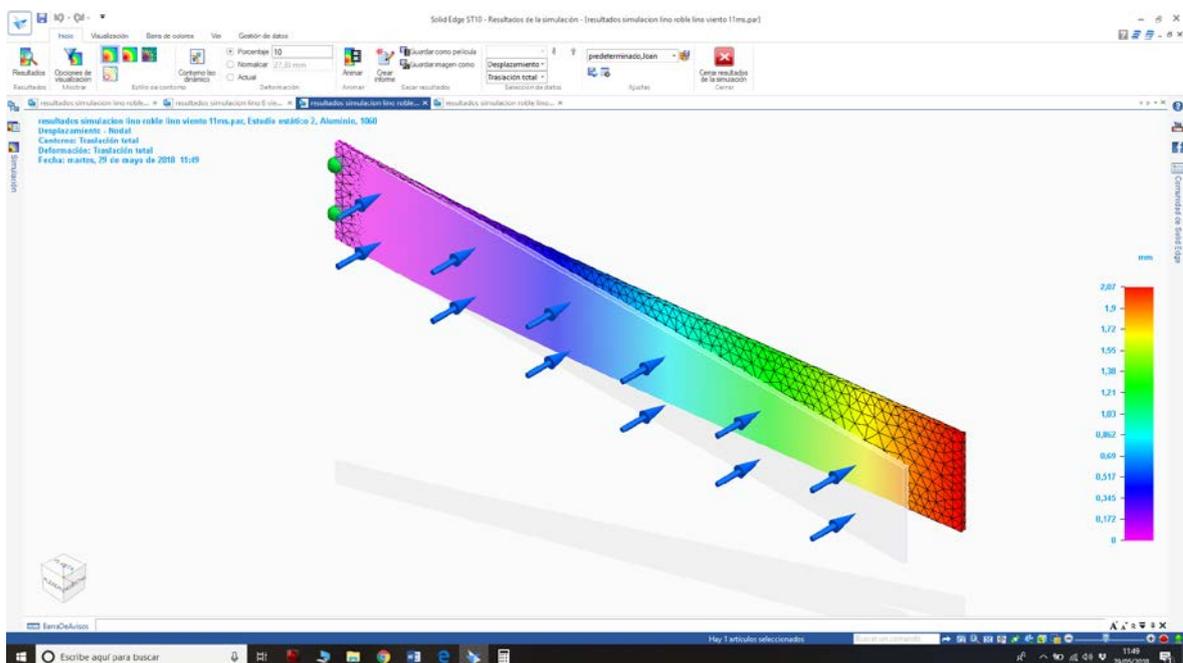


Figura 46 Deformación de la pala de Aluminio 1060 a $P=0,147\text{KPa}$

En la Figura 46, se puede observar el estado tensional de la pala de biocomposite de lino a $P=0,011\text{KPa}$

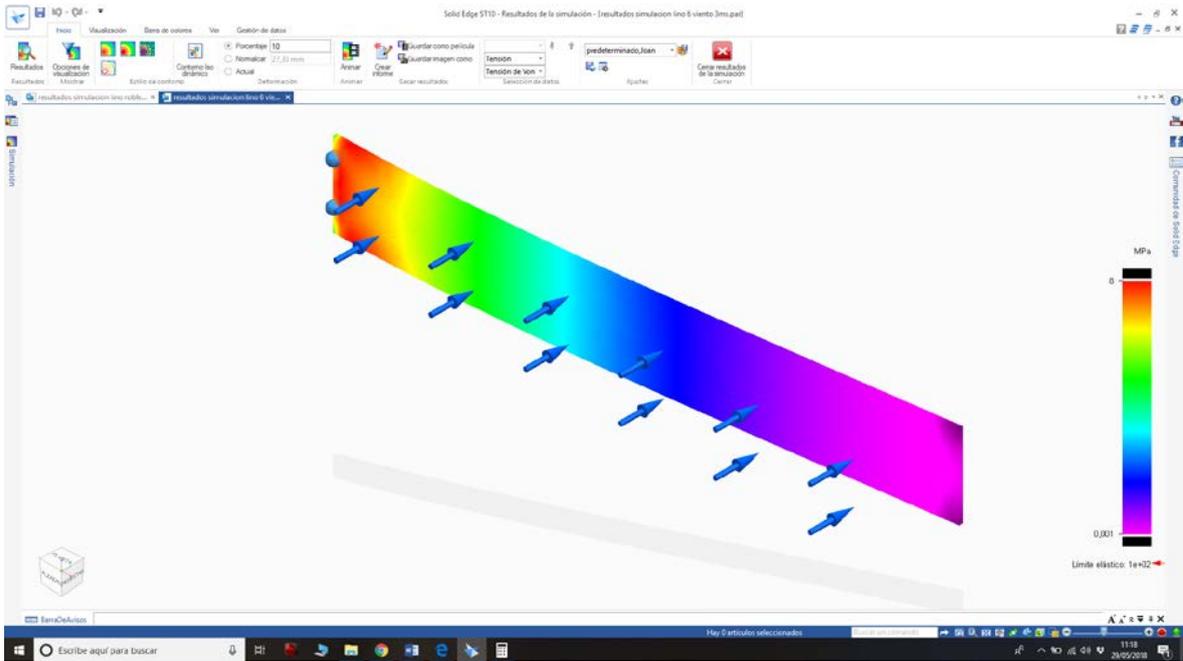


Figura 47. Estado tensional de la pala de Biocomposite de Lino a $P=0,011\text{KPa}$.

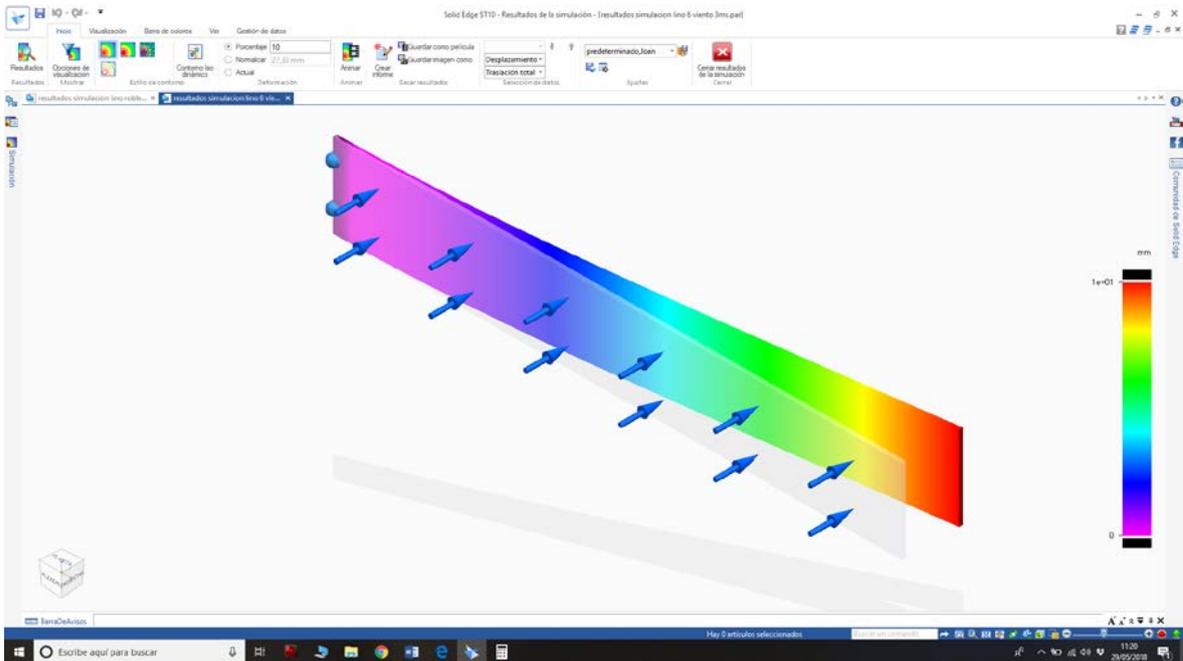
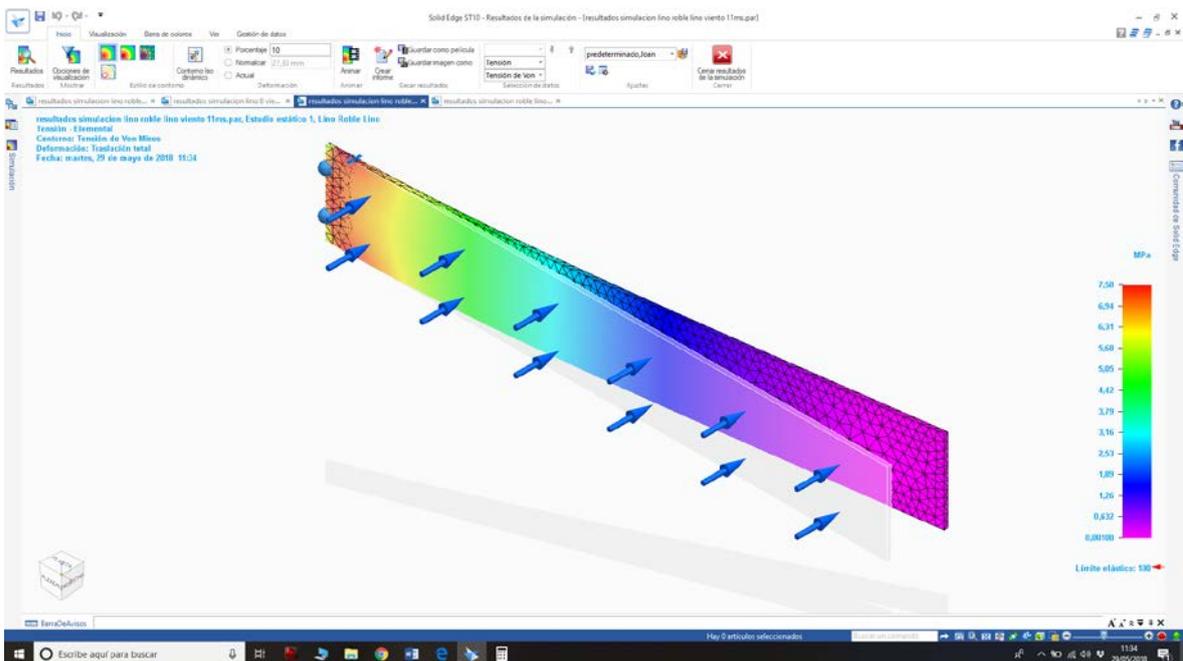
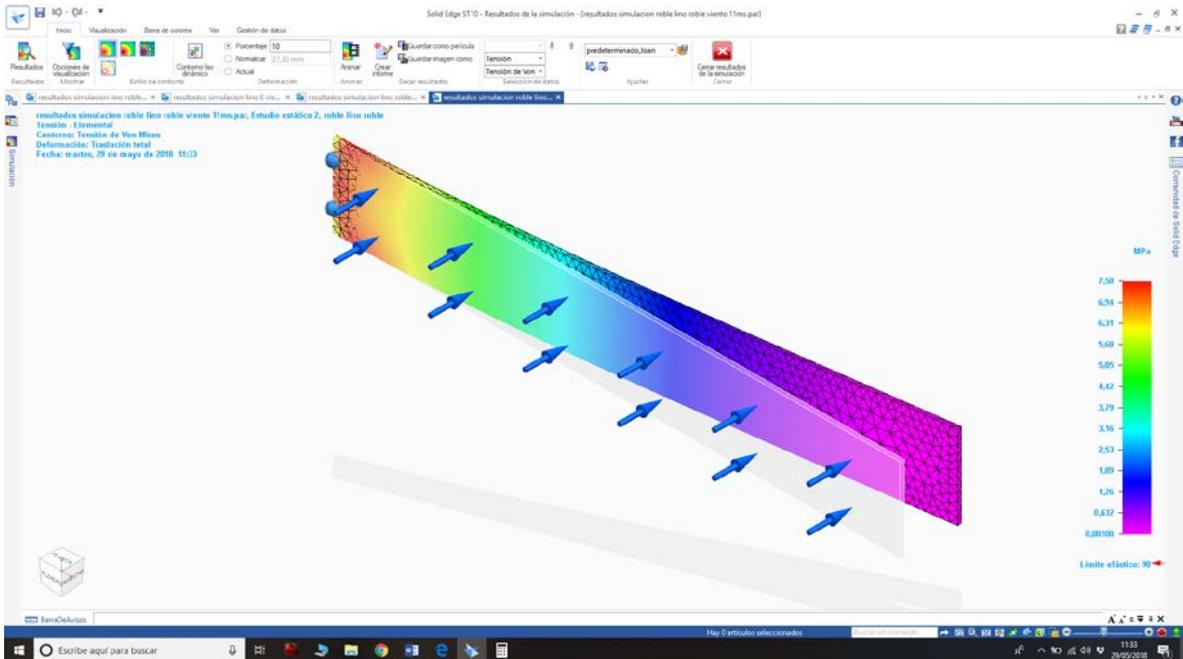


Figura 48. Deformación de la pala de Biocomposite de Lino a $P=0,011\text{KPa}$.



Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Tabla 12 Resultados pala de Aluminio 1060

Velocidad del viento	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
3 m/s	0,56	0,16
8 m/s	4,05	1,11
11m/s	7,54	2,07

Tabla 13 Resultados Biocomposite de Lino

Velocidad del viento	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
3 m/s	0,60	1,00
8 m/s	4,00	8,00
11m/s	8,00	10,00

Tabla 14 Resultados Biocomposite Roble-Lino-Roble

Velocidad del viento	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
3 m/s	0,56	1,07
8 m/s	4,02	7,58
11m/s	7,58	14,30

Tabla 15 Resultados Biocomposite Lino-Roble-Lino

Velocidad del viento	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
3 m/s	0,56	0,85
8 m/s	4,02	6,04
11m/s	7,58	11,40

Se puede observar que los tres biocomposites en cuanto a su estado tensional están lejos de su límite elástico y por lo tanto de su límite de rotura. Por tanto, se puede decir que mecánicamente pueden reemplazar a los materiales tradicionales en la fabricación de palas de aerogenerador.

En cuanto a desplazamiento, el biocomposite que sufre mayor deformación en la punta es el Roble-lino-Roble, ya que se desplaza 14,30 mm para una velocidad del viento de 11m/s frente a los 11,4 del biocomposite de Lino-Roble-Lino y 10mm del biocomposite de Lino.

Si se comparan los desplazamientos de las palas de biocomposite con las de aluminio, son considerablemente mayores, pero no comprometen la integridad estructural de la pala. La mayor deformación en la punta puede ser beneficiosa desde el punto de vista aerodinámico y de generación de electricidad. Este estudio

lo está llevando a cabo el departamento de mecánica de fluidos a través de programas CFD (fluidodinámica computacional).

6.2. Validación mecánica en el túnel del viento

Dicho mini-aerogenerador se encuentra instalado en el interior de un túnel del viento, (figura 51) que permite ensayar el equipo a distintas velocidades del viento, para así poder medir los resultados y observar su rendimiento frente a palas de materiales tradicionales como la fibra de vidrio o el aluminio.

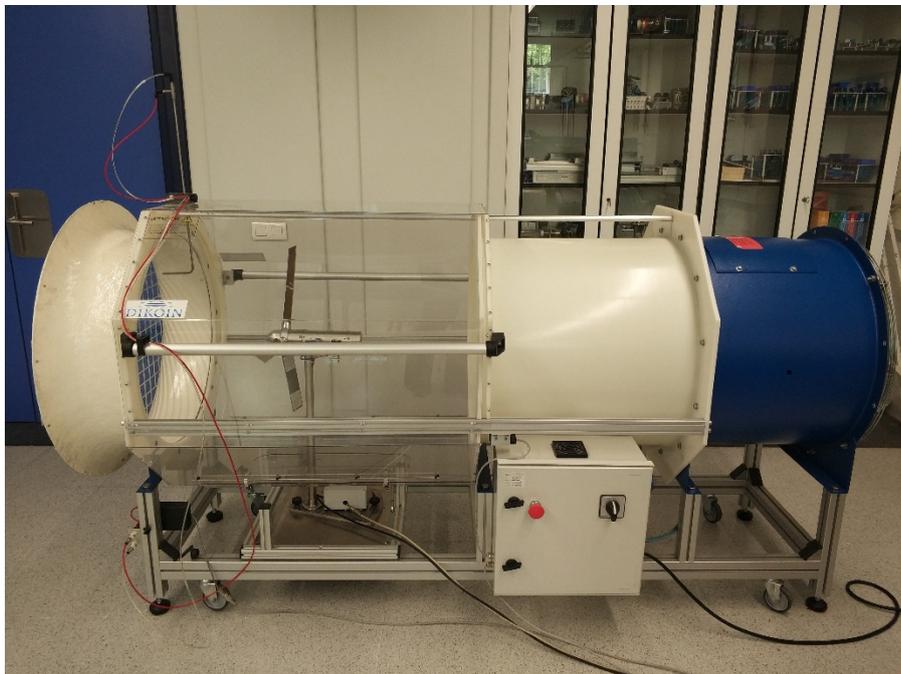


Figura 51: túnel del viento con mini-aerogenerador en su interior

Se instalaron las distintas palas de biocomposite en el mini-aerogenerador (figura 52) y se sometieron a las distintas velocidades del viento consideradas en el estudio por elementos finitos. Tal y como arrojaron los resultados del FEM, los álabes de biocomposite tuvieron un comportamiento mecánico óptimo generando la energía eléctrica esperada.

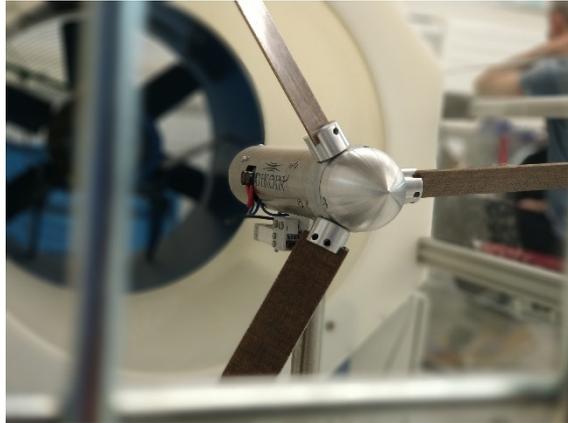


Figura 52 Mini aerogenerador con palas de biocomposite

Los resultados de Par y Potencia en el eje, forman parte de otro trabajo Fin de Master realizado en el Departamento de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Vitoria/Gasteiz.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES.

Las conclusiones del presente Trabajo Fin de Master son las siguientes:

- El proceso de infusión de resina es adecuado para la fabricación de biocomposites con resina bioepoxi reforzada con tejido bidireccional de lino y láminas de roble.
- Se han conseguido elevados porcentajes de refuerzo en el biocomposite, 45 y 50% de peso en fibra natural.
- Introduciendo láminas de madera de roble en las caras exteriores del biocomposite, se consigue un acabado con gran valor estético.
- En cuanto a las propiedades mecánicas, los nuevos biocomposites desarrollados pueden competir en propiedades específicas con laminados de fibra de vidrio
- La introducción de láminas de Roble en las caras exteriores del biocomposite, aumenta la rigidez a tracción del material, es decir, el módulo elástico o de Young, disminuyendo su elongación a rotura. Este aumento de rigidez, se hace más notable si las láminas de madera se colocan en el núcleo del biocomposite.
- En cuanto a flexión, la colocación de láminas de roble en el núcleo, aportan mayor resistencia a rotura frente al biocomposite de lino y al de roble en las capas exteriores.
- Mediante las micrografías SEM de las superficies de rotura, se ha comprobado la buena adhesión entre los refuerzos naturales y la matriz
- El modelado por elementos finitos permite validar el comportamiento mecánico de los nuevos biomateriales sometidos a diferentes velocidades del viento.
- En ensayo en túnel del viento ha confirmado la validez mecánica de los nuevos biomateriales para la fabricación de alabes de mini-aerogenerador.

En definitiva, los nuevos biomateriales desarrollados con resina bioepoxi (SUPER SAP®) reforzada con tejido de lino bidireccional y madera de roble son **mecánicamente adecuados** para la fabricación de palas de mini-aerogenerador, aportando el valor añadido de la sostenibilidad medioambiental.

7.2 Líneas futuras.

Entre las líneas futuras de trabajo, se plantean los siguientes estudios o validaciones:

- Ensayo de envejecimiento del material al medio ambiente, comprobando el efecto del clima sobre el material, viendo cómo afecta la humedad, el calor, la radiación ultravioleta, tanto en el aspecto estético del material como en su resistencia mecánica
- Ensayos de impacto de baja energía de los nuevos biocomposites
- Ensayo de cortadura interlaminar
- Análisis del ciclo de vida (LCA) del producto
- Mejora del diseño y fabricación de álabes aerodinámicamente más eficientes

REFERENCIAS

- (1). Dietrich., A. B. *Materiales Compuestos. Proceos de Fabricación de embarcaciones*. Barcelona : UPC, 2005.
2. Ramos, R. T. *Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Reforzados con Fibra de Vidrio*. Madrid : Cimbra, 2010.
3. Allthingslovelyaper. [En línea] [Citado el: 18 de Enero de 2018.] <http://allthingslovelyaper.co/paneles-aislantes-estructurales.html/paneles-sandwich-de-madera-qu-son-casas-restauradas-rehabilita-aislantes-estructurales>.
4. Barbero, E.J.: *Introduction to Composite Materials Design*. s.l. : CRC PRESS, 2010.
5. Hull, D. *Materiales Compuestos*. Barcelona : Editorial Reverté S.A., 2003.
6. feroqa. feroqa. [En línea] [Citado el: 2 de 3 de 2018.] www.feroqa.com.
7. web escolar. [En línea] [Citado el: 8 de Febrero de 2018.] <http://www.webscolar.com/clasificacion-de-la-fibra-de-vidrio>.
8. Callister, W.D. *Materials Science Enginnering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons Inc., 2007.
9. Flnk, J.K. *Reactive Polimers Fundamentals Applications*. s.l. : J. K. Fink Ed, 2013.
10. Gazechim. Gazechim. [En línea] [Citado el: 15 de Febrero de 2018.] www.gazechim.es.
11. Mazumdar, S.K. *Composites Manufacturing*. s.l. : CRC PRESS, 2002.
12. Gate, Research. reserchgate.net. [En línea] [Citado el: 20 de Febrero de 20018.] www.researchgate.net/figure/composite-materials-in-aerospace-field-a-Boing-787-50-composite-b-Eurofighter_fig1_314262959.
13. A. C. Meira Castro, M. C. S. Ribeiro, J. Santos, J. P. Meixedo, F. J. G. Silva, A. Fiúza, M. L. Dinis and M. R. Alvim. *Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry*. . s.l. : Constr. Build. Mater., 2013.
14. riojapolitica.com. [En línea] [Citado el: 3 de Marzo de 2018.] riojapolitica.com/2014/12/17/el-cementerio-de-aspas-se-traslado-al-parque-de-la-ciudad/.
15. hoenalu. hoenalu.com. [En línea] [Citado el: 25 de Febrero de 2018.] <http://hoenalu.com/info/nsp/tabla/coco-mat>.
16. G. Koronis, A. Silva and M. Fontul. *Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. Composites Part B: Engineering 44(1), pp. 120-127. . 2013.*

17. D.B. Dittenber, H.V.S. Gangarao. *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. Composites: Part A*; 43, 8: 1419–1429 . 2012.
18. S.V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora. *Are natural fibre composites environmentally superior to glass fibre reinforced composites? Composites: Part A* 35: 371–376 . 2004.
19. Castor. <https://www.castor.es>. [En línea] <https://www.castor.es/roble.html>.
20. J. M. Corum, R. L. Battiste and M. B. Ruggles-Wrenn. *Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites. Composites Sci. Technol.* 63(6), pp. 755-769. 2003.
21. Arxiexpo. [En línea] www.Arxiexpo.es.
22. Khan., J. A. Khan and M. A. "1 - the use of jute fibers as reinforcements in composites," in *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, . s.l. : O. Faruk and M. Sain, Eds., 2015.
23. Zhang., H. N. Dhakal and Z. "3 - the use of hemp fibres as reinforcements in composites," in *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, . s.l. : O. Faruk and M. Sain, Eds. , 2015.
24. bambookoa. bambookoa.com. [En línea] <http://bambookoa.com/modelos-bicicletas-bambu/>.
25. Y. Xie, C. A.S. Hill, Z. Xiao, H. Militz, C. Mai. *Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. Composites: Part A* 41,806–819 . 2011.
26. Entropy Resins. "Technical data sheet SUPER SAP® CLR Epoxy–Clear, general purpose liquid epoxy resin," , pp. 1-2-3. 2011.
27. Shah., D. U. *Natural fibre composites: Comprehensive ashby-type materials selection charts. Mater Des* 62pp. 21-31. 2014.
28. L. Marrot, A. Bourmaud, P. Bono and C. Baley. Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. *Mater Des* 62(0), pp. 47-56.. 2014.
29. creybioresins. www.creybioresins.com/. [En línea] www.creybioresins.com/.