



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

**Estudio de la utilización de fibras naturales en
materiales compuestos laminados para fabricación
de componentes de automoción**

Tesis Doctoral

Autor: Bernardo A. Oliver Borrachero

**Directores: Dr. Samuel Sánchez Caballero
Dr. Octavio Fenollar Gimeno**

Febrero de 2021

*A mis padres,
y a mi novia con cariño*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a Samuel Sánchez y a Octavio Fenollar, como directores de tesis, por su constante ayuda a la hora de resolver las dudas y problemas que han ido surgiendo, por la gran cantidad de tiempo dedicado para la elaboración de este trabajo y por su implicación a nivel docente y personal centrada en llevar a buen puerto este trabajo.

Al profesor dr. Maziar Ramezani, por sus valiosos consejos, ampliando horizontes en el ámbito de la caracterización y dando lugar al apartado de ensayos de tribología.

De forma general a los profesores de los distintos departamentos por haber compartido valiosos consejos y conocimientos conmigo, y por el buen trato que siempre me han mostrado.

A mis amigos y compañeros por la ayuda y apoyo prestado.

Finalmente a mis padres, por haberme dado una educación y unos valores en la vida.

Índice general

Agradecimientos	i
1 Introducción	1
1.1 Materiales compuestos	1
1.1.1 Introducción	1
1.1.2 Definición de material compuesto	3
1.1.3 Fase matriz	5
1.1.3.1 Matriz polimérica: resina sintética	6
1.1.4 Fibras de refuerzo: fase dispersa	7
1.1.4.1 Fibras. Generalidades	7
1.1.4.2 Fibras naturales: definición	10
1.1.4.3 Clasificación de las fibras naturales	13
Fibras de origen animal	13
Fibras de origen vegetal	14
Fibras de origen inorgánico	15
1.2 Métodos de fabricación	15
1.2.1 Procesos en molde abierto	16
Método de contacto manual (Hand lay-up)	16
Moldeo por infusión de resina	19
Método de proyección	23
Bobinado o filament winding	23
Proyección	24
Centrifugación	25
1.2.2 Procesos en molde cerrado	26
Pultrusión	26
Moldeo por prensado	27

RTM (Resin Transfer Moulding) moldeo por transferencia de resina.	29
1.3 Medios de movilidad personal	31
1.3.1 La tendencia evolutiva de los vehículos.	31
1.3.2 Evolución en el diseño de los automóviles	35
1.4 Criterios de fallo estático	36
1.4.1 Tensión máxima	38
1.4.2 Deformación máxima	40
1.4.3 Tsai-Hill	41
1.4.4 Tsai-Wu	43
1.4.5 Determinación del criterio de fallo estático	44
1.5 Software de Elementos Finitos	46
1.6 Estado del arte	51
1.6.1 Introducción	51
1.6.2 Fuentes de información	52
1.6.3 Fuentes de búsqueda	53
1.6.4 Revisión bibliográfica	58
2 Objetivos	63
2.1 Objetivos	63
2.2 Metodología empleada	65
2.3 Planificación de la investigación	68
2.4 Desviaciones en la planificación	69
2.5 Punto de partida de la investigación	72
3 Materiales y métodos	75
3.1 Ensayo de permeabilidad	75
3.1.1 Metodología	77
3.1.2 Ensayo de permeabilidad	79
3.1.3 Cálculo de la permeabilidad	80
3.1.4 Modelo CFD.	83
3.2 Obtención de las probetas	85
3.2.1 Método de fabricación	85
3.2.2 Materiales de estudio	88
3.2.2.1 Lino (Flax)	88

3.2.2.2 Yute	90
3.2.2.3 Basalto	92
3.2.2.4 Ramie	93
3.2.2.5 Bambú	93
3.2.2.6 Matriz de estudio	94
3.2.3 Equipos y herramientas auxiliares	95
3.2.4 Materiales fungibles	95
3.2.5 Proceso de fabricación	102
3.2.6 Datos geométricos de los materiales a estudiar	108
Datos iniciales obtenidos de los distintos tejidos:	110
Datos obtenidos de las distintas placas de material compuesto:	110
Probetas de tracción de los distintos materiales:	110
Datos obtenidos de las distintas placas de material compuesto:	111
Probetas de Flexión de los distintos materiales:	111
Probetas de compresión:	114
Probetas de Cortadura Iosipescu:	114
Probetas para tracción en el eje Z:	114
3.3 Obtención del colín	119
3.3.1 Obtención de la geometría en CAD del colín	119
3.3.2 Fabricación del colín	121
3.4 Obtención del estribo	123
3.5 Ensayos de caracterización mecánica	127
3.5.1 Ensayo de tracción	127
3.5.2 Coeficiente de Poisson	131
3.5.3 Ensayo de flexión	132
3.5.4 Ensayo de dureza	135
3.5.5 Ensayo de compresión	136
3.5.6 Ensayo de cortadura Iosipescu	138
3.5.7 Ensayo de tracción sobre el eje Z	141
3.5.8 Fatiga	142
3.5.8.1 Fatiga en materiales compuestos	144
3.5.8.2 Diseño y fabricación de un banco de ensayos para fatiga	146
3.5.8.3 Ensayos de fatiga	150
3.5.9 Estudio de Fatiga Multiaxial	153
3.5.9.1 Montaje sobre banco de ensayos	153

3.6	Modelo teórico de Elementos Finitos uniaxial	155
3.6.1	Modelado CAE	155
3.6.2	Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos para los ensayos de fatiga axial	161
3.7	Desarrollo de un Modelo de Elementos Finitos multiaxial	161
3.7.1	Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial estático. Colín	162
3.7.1.1	Análisis por elementos finitos.	163
3.7.2	Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial estático. Estribo	166
3.7.3	Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial a fatiga.	167
3.7.3.1	Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos.	168
4	Resultados y discusión	175
4.1	Permeabilidad	175
4.1.1	Discusión	181
4.2	Ensayo de tracción	181
4.3	Ensayo Poisson	188
4.4	Ensayo de flexión	189
4.5	Ensayos de dureza	191
4.6	Ensayo de compresión	194
4.7	Ensayo de cortadura Iosipescu	198
4.8	Ensayo de tracción sobre laminado en eje Z	200
4.9	Ensayos de fatiga	201
4.9.1	Ensayos previos: validación del equipo y selección del material	201
4.9.2	Estudio de fatiga uniaxial sobre fibra de bambú	203
4.9.3	Estudio de fatiga multiaxial	207
4.10	Modelo uniaxial por elementos finitos	208
4.10.1	Carbono sarga	209
4.10.2	Carbono UD	210
4.10.3	Lino	211
4.10.4	Yute	212
4.10.5	Basalto	213
4.10.6	Bambu	214
4.10.7	Discusión	214
4.11	Modelo estático por elementos finitos multiaxial	216
4.11.1	Simulación del colín	216

4.11.2	Discusión	217
4.11.3	Simulación del estribo frente a cargas estáticas.	218
4.11.4	Simulación del estribo para estudio de fatiga.	219
5	Conclusiones	223
6	Líneas de investigación futuras	229
	Bibliografía	231
	Índice de figuras	237
	Índice de tablas	247

Resumen

La evolución de la tendencia del pensamiento de la gente en los últimos años ha cambiado, llevándonos a adquirir nuevos valores enfocados en la sostenibilidad de los recursos naturales y el respeto hacia el medio ambiente. Con ello, la perspectiva de producto se ha visto afectada en todos los sectores, incluido el sector de la automoción. La aparición de nuevas normas medioambientales han establecido obligaciones sobre los fabricantes de vehículos respecto a la reducción de consumo y emisiones contaminantes por lo que cada vez es más habitual identificar materiales ligeros en vehículos de uso cotidiano con la finalidad de mejorar la eficiencia energética a partir de la reducción de masa.

El presente estudio pretende avanzar un paso más en la utilización de materiales compuestos centrandó su temática en el desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de componentes estructurales de vehículos que permitan la reducción de consumos desde un punto de vista sostenible. Para ello se plantea la aplicación de nuevos materiales compuestos basados en la utilización de fibras naturales, que sustituyan a los materiales utilizados tradicionalmente. En el estudio se plantea la utilización de una única matriz (epoxi) común a todos los tejidos naturales ensayados que permita realizar un estudio comparativo centrado en los tejidos, para obtener un material compuesto eficiente en su fabricación, uso y reciclaje buscando el equilibrio entre densidad, coste, resistencia y reciclabilidad.

El estudio ha consistido en la realización de ensayos de tracción, compresión, flexión, impacto, dureza, cortadura y fatiga, a partir de los cuales se han podido extraer las propiedades mecánicas necesarias para realizar un modelo MEF uniaxial en el software ANSYS ACP, comparando resultados con distintas orientaciones de fibras. Tras esto, se ha dimensionado un componente utilizando el modelo MEF uniaxial para un estudio multiaxial. Este componente ha sido fabricado y posteriormente ensayado en un banco de fatiga con la finalidad de contrastar los resultados del software con los obtenidos empíricamente, y a su vez validar la aplicación.

Resum

L'evolució de la tendència del pensament de la gent als últims anys ha canviat, portant-nos a adquirir nous valors enfocats a la sostenibilitat dels recursos naturals i al respecte cap al medi ambient. A causa d'això, la perspectiva de producte s'ha vist afectada en tots els sectors, inclòs al sector de l'automoció. L'aparició de noves normes mediambientals han establert obligacions sobre els fabricants de vehicles respecte a la reducció de consum i emissions contaminants pel que cada vegada és més habitual identificar materials lleugers en vehicles d'ús quotidià amb la finalitat de millorar l'eficiència energètica a partir de la reducció de massa.

El present estudi pretén avançar un pas més en la utilització de materials compostos centrant la seua temàtica en el desenvolupament de nous materials per a la fabricació de components de vehicles que permeten la reducció de consums des d'un punt de vista sostenible. Per a això es planteja l'aplicabilitat de nous materials compostos basats en la utilització de fibres naturals, que substituïsquen els materials emprats tradicionalment. En l'estudi es planteja la utilització d'una única matriu (epoxi) comú a tots els teixits naturals assajats que permeta realitzar un estudi comparatiu centrat en els teixits per obtenir un material compost eficient en la seua fabricació, ús i reciclatge, buscant l'equilibri entre densitat, cost, resistència i reciclabilitat.

L'estudi ha consistit en la realització d'assajos de tracció, compressió, flexió, impacte, duresa, tallant i fatiga, a partir dels quals s'han pogut extraure les propietats mecàniques necessàries per a realitzar un model MEF uniaxial al programa ANSYS ACP, comparant resultats amb diferents orientacions de fibres. Després d'això, s'ha dimensionat un component utilitzant el model MEF uniaxial per a un estudi multiaxial. Aquest component s'ha fabricat i posteriorment s'ha assajat en un banc de fatiga amb la finalitat de contrastar els resultats del programa amb els obtinguts empíricament, i alhora ha servit per validar l'aplicació.

Abstract

The evolution of the trend of people's thinking in recent years has changed, leading us to acquire new values focused on the sustainability of natural resources and respect for the environment. As a result, the product outlook has been affected in all sectors, including the automotive. The imposition of new environmental regulations has established obligations for vehicle manufacturers in terms of fuel consumption and polluting emissions, which is why it is increasingly common to identify lightweight materials in everyday vehicles, in order to improve energy efficiency through from mass reduction.

This study seeks to advance the use of composite materials, focusing its theme on the development of new materials for the manufacture of structural vehicle components. For this, it is proposed the development of new composite materials based on the use of natural fibers is proposed to replace the materials traditionally used. In the work is proposed a comparative study focused on fabrics, using a single matrix (epoxy) common to all the test specimens, to obtain an efficient composite material in its manufacture, use and recycling, seeking the balance between density, cost, resistance and recyclability.

During the development of the research, it has been necessary to perform tensile, compression, bending, impact, hardness, shear and fatigue tests to extract the mechanical properties necessary to make a uniaxial MEF model in the ANSYS ACP software, comparing results with different orientations fibers. After this, a component has been dimensioned using the uniaxial FEM model for a multiaxial study. This component has been manufactured and subsequently tested in a fatigue bench in order to compare the results of the software with those obtained empirically, and in turn validate the application.

1

Introducción

1.1 Materiales compuestos

1.1.1 Introducción

En los últimos años se ha incrementado la utilización de materiales compuestos en la fabricación de componentes debido a la demanda por parte de los consumidores de productos con mejores características y propiedades, especialmente centrados en la ligereza, resistencia y coste de fabricación en términos económicos y ecológicos. Por esta razón se muestra gran inquietud por parte de empresas e investigadores en el desarrollo de nuevos materiales con propiedades y características superiores a las de los materiales tradicionales.

Los materiales compuestos o composites son materiales formados a partir de la combinación de dos o más componentes para dar lugar

a un material final con propiedades superiores a las que tienen los constituyentes por separado.

En la naturaleza podemos encontrar como ejemplo de material compuesto los árboles, puesto que sus troncos y ramas se componen de una matriz de lignina con fibras de celulosa. En este caso las fibras son las encargadas de resistir los esfuerzos mecánicos derivados de las sollicitaciones a que se ven sometidos y la matriz de lignina mantiene unidas las fibras, dándoles su configuración y transmitiendo las tensiones derivadas de las cargas de forma distribuida. [1].

Otro ejemplo de material compuesto conocido puede encontrarse en nuestro propio cuerpo. Los huesos son una combinación de fibras de colágeno distribuidas en una matriz frágil de mineral de apatito [2].

A pesar de que los materiales mencionados cumplen con la descripción de un material compuesto por definición, no pueden considerarse como tal. Existe una premisa que los excluye de la lista, y es que estos no han sido creados por el hombre. Por esta razón, podemos considerar como uno de los primeros ejemplos de materiales compuestos los adobes reforzados con paja aplicados en la fabricación de las casas o chozas de los primeros pobladores. [3].

La ventaja de los materiales compuestos aparece cuando comparamos su rigidez específica (módulo de elasticidad por unidad de peso) y su resistencia específica (resistencia por unidad de peso) con los de otros materiales. En los materiales compuestos estos valores son muy elevados respecto a materiales tradicionales, con lo que constituyen un buen punto de partida para la reducción de consumo de combustible en la industria del transporte, puesto que suponen una mejora en cuanto al peso de los vehículos.

Gran parte de las actuales aplicaciones tecnológicas de materiales requieren de combinaciones de propiedades imposibles de hallar en materiales tradicionales. Un ejemplo de ello puede encontrarse en la industria aeronáutica, la cual demanda materiales de baja densidad con alta resistencia mecánica, alta rigidez, alta resistencia al impacto,

alta resistencia a la abrasión y alta resistencia frente a agentes corrosivos y degradantes. Esta combinación de características limita en gran medida el rango de elección, eliminando de la lista muchos de los materiales tradicionales, puesto que de forma generalizada los materiales más resistentes suelen ser más densos, y a su vez, un incremento de resistencia y rigidez implica una disminución de la resistencia al impacto.

Gracias a los composites, la combinación de las propiedades de los materiales y la gama de sus valores se ha visto ampliada, y se seguirá ampliando a partir del desarrollo de nuevos compuestos [4]. Es por esto que en la industria aeroespacial se considera imprescindible la utilización de estos materiales debido a su comportamiento ante los requerimientos de diseño implicados.

1.1.2 Definición de material compuesto

Materiales compuestos son aquellos constituidos a partir de la combinación a nivel macroscópico de dos o más constituyentes no solubles entre sí y con diferentes propiedades, para dar lugar a un nuevo material con propiedades no alcanzables por los materiales originales de forma individual. [5].

Los materiales compuestos suelen estar formados en la mayoría de los casos por una fase matriz isótropa y uniforme que envuelve a una fase dispersa que genera el refuerzo interno. Las propiedades mecánicas y resistentes de los materiales compuestos son producto de las cualidades y cantidades de sus constituyentes, es decir sus propiedades, proporciones relativas de la mezcla y de la geometría del refuerzo (fase dispersa).

La fase matriz soporta la fase dispersa como puede observarse en la figura 1.1 y transmite las tensiones producidas por cargas externas a las fibras (fase dispersa). Esta fase une las fibras entre sí, protegiéndolas del entorno y aportando al material compuesto su aspecto superficial.

La fase dispersa, en el caso de fibras continuas, es la encargada de soportar la mayor parte de la carga y dar al material compuesto mayor resistencia y rigidez, además de aportarle otras propiedades como el coeficiente de expansión térmica y la conductividad.[6]

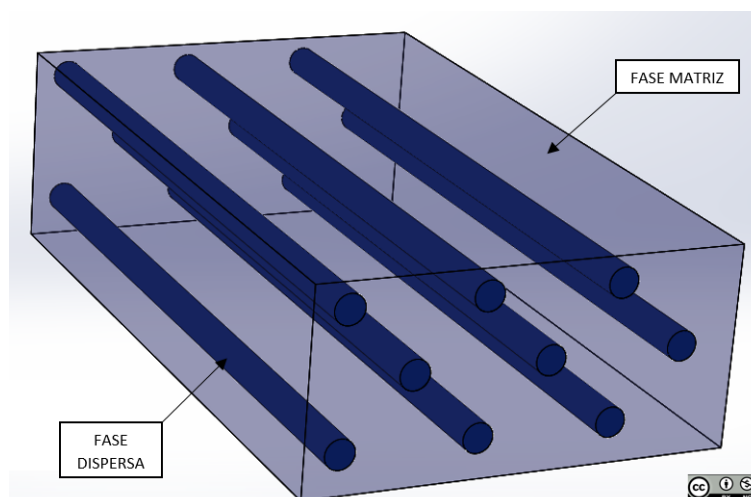


Figura 1.1: Fases de un material compuesto.

En la mayoría de materiales compuestos la fase dispersa tiene mayor dureza y resistencia que la fase matriz. No obstante, sin la fase matriz no se distribuirían las tensiones, puesto que al envolver al refuerzo, la fase matriz transfiere y distribuye la tensión derivada de un esfuerzo externo aplicado a las partículas o fibras, las cuales soportan una gran cantidad de la carga. El porcentaje de mejora del comportamiento mecánico de un material compuesto depende en gran medida de la fuerza de cohesión en la interfase matriz-refuerzo[7].

Para considerarse material compuesto, la cantidad de refuerzo presente en la mezcla debe alcanzar proporciones de al menos un 5 % del total y de igual forma la fase matriz.

Los materiales compuestos pueden clasificarse de forma global por el tipo de refuerzo, tal como se expresa en la tabla 1.1. De esta forma se distinguen tres grupos de elementos de refuerzo aplicables como fase dispersa.

Tipo de refuerzo	Tipología	Orientación
Partículas	Grandes	Dispersión
	Diminutas	Dispersión
Fibra	Continuas(largas)	Alineadas
	Discontinuas(cortas)	Alineadas
	Discontinuas(cortas)	Dispersión
Estructural	Laminado	Definida
	Panel sándwich	Definida

Tabla 1.1: Clasificación de los refuerzos en materiales compuestos.

- Refuerzo con partículas: Se trata de la dispersión aleatoria de partes de material con geometrías próximas a la de una esfera, pudiendo ser partículas de tamaño macroscópico (mecánica continua) o de tamaño microscópico (nivel atómico o molecular), siempre que no sean solubles con la matriz.
- Refuerzo con fibras: Dispersión ordenada o aleatoria de elementos en cuya geometría predomina una dimensión frente a las dos restantes.
- Refuerzos estructurales: Posicionamiento ordenado de tejidos de forma laminar con las orientaciones de capa requeridas en función del diseño de fabricación.

1.1.3 Fase matriz

Es el componente continuo del material, que rodea, protege y soporta la fase dispersa para distribuir las tensiones entre el refuerzo, protegerlo de los agentes externos y evitar el fallo por pandeo para los refuerzos con fibras o tejidos.

La matriz distribuye los esfuerzos mecánicos a través de la interfase y suele ser el elemento que determina el comportamiento a fractura ante los esfuerzos de compresión y de cizalladura. Además, la fase matriz suele ser la responsable de las limitaciones de temperatura de trabajo y por agentes químicos. Se distinguen tres grandes grupos de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

- Matriz metálica.
- Matriz polimérica.
- Matriz cerámica.

1.1.3.1 Matriz polimérica: resina sintética

Una resina es un polímero, y como tal está formado por cadenas moleculares en las que se repite una unidad básica denominada monómero, que no es más que una agrupación definida de átomos.

Las más utilizadas para la fabricación de materiales compuestos son las termoestables, entre ellas se podría destacar por su utilización las de poliéster para uso común por su coste, las epoxídicas por su alta resistencia mecánica y las fenólicas por su resistencia química.

Estas resinas se suelen encontrar en forma líquida o viscosa en su estado de reposo, hasta que se les adiciona un agente catalizante para hacerlas solidificar a partir de una reacción exotérmica. Una vez polimerizada, el proceso químico se vuelve irreversible, no siendo reciclables como tal, puesto que se descomponen al fundirlas, pero si en algunos casos siendo reutilizables como elementos dispersos o de relleno.

Por tanto, las resinas termoestables son polímeros constituidos por macromoléculas reticuladas, con un tiempo de vida limitado antes de la polimerización y sometidas a un estado de irreversibilidad una vez polimerizadas.

Características generales de las matrices termoestables:

- Viscosidad media-baja antes del curado
- Buena estabilidad térmica
- Alta estabilidad dimensional
- Baja densidad
- Alta rigidez

- Buena resistencia química (no aplicable a todas las resinas termoestables).
- Resistencia a la termofluencia y deformación bajo carga.
- Buena capacidad de impregnado y facilidad de fabricación.

1.1.4 Fibras de refuerzo: fase dispersa

1.1.4.1 Fibras. Generalidades.

Las fibras son los componentes que aportan en mayor medida las propiedades mecánicas y resistentes a un material compuesto. Se trata de elementos filamentosos que por sí solos presentan elevada resistencia a la tracción, pero combinados de forma correcta con la fase matriz soportan muy bien esfuerzos de otra naturaleza como por ejemplo los de flexión.

Normalmente, en los plásticos termoestables reforzados se utilizan fibras inorgánicas como el vidrio, o bien sintéticas como las de aramida. No obstante, también pueden utilizarse como refuerzo fibras obtenidas a partir de la naturaleza, como es el caso de los refuerzos utilizados en este trabajo.

La fuerza teórica de una fibra se determina por la fuerza de los enlaces atómicos que mantienen el material unido entre sí. Por tanto, se puede afirmar que los materiales más resistentes tienen enlaces químicos más fuertes, enlaces covalentes. Por esta razón, los mejores elementos de la tabla periódica para este tipo de aplicaciones se encuentran en la parte superior y presentan alta densidad de enlaces covalentes, de los cuales destacaría el carbono, boro y silicio. Estos elementos tienen menor distancia entre el electrón cargado negativamente y el núcleo cargado positivamente, por lo que la fuerza de atracción es alta, dando como resultado materiales con un módulo elástico elevado como puede verse en la tabla 1.2. [6]

Material	Densidad (g/cm ³)	Tensión rotura (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Temp. fusión (°C)	Módulo especif. (x10 ⁵ m ² /s ²)	Resistencia especif. (x10 ⁵ m ² /s ²)
Vidrio(E)	2,55	3.448	72,4	1.725	28	1,35
Vidrio(S)	2,50	4.483	86,9	1.725	35	1,79
Carbono(HS)	1,50	2.759	276	3.700	184	1,84
Carbono(HM)	1,50	1.862	531	3.700	354	1,24
Boro	2,36	3.448	379	2.030	161	1,46
Poliaramida	1,44	3.620	124	500	86	2,51
Polietileno	0,97	2.586	119	147	122	2,67
Poliamida	1,14	3.620	124	500	86	2,51

Tabla 1.2: Resumen de propiedades en fibras de materiales compuestos.

Para realizar un estudio comparativo, la propiedad más significativa de las fibras es su módulo elástico, valor del cual define su rigidez. Normalmente se utilizan fibras con valores de módulo elástico superiores al valor del módulo de la matriz, puesto que de esta forma la resina transmite y reparte la tensión sobre las fibras, proporcionando tenacidad y ductilidad al material, mientras las fibras se encargan de soportar la parte principal de los esfuerzos aplicados.

Las fibras orgánicas e inorgánicas tienen diferentes modelos de comportamiento en relación a su módulo transversal frente al módulo longitudinal. Por su estructura molecular, las fibras orgánicas tienen un bajo módulo transversal y alto módulo longitudinal, por lo que son muy anisótropas, mientras que las fibras inorgánicas tienen una relación de módulo longitudinal/transversal más próxima en valores, el cual forma una pendiente como se puede observar en la figura 1.2. [8]

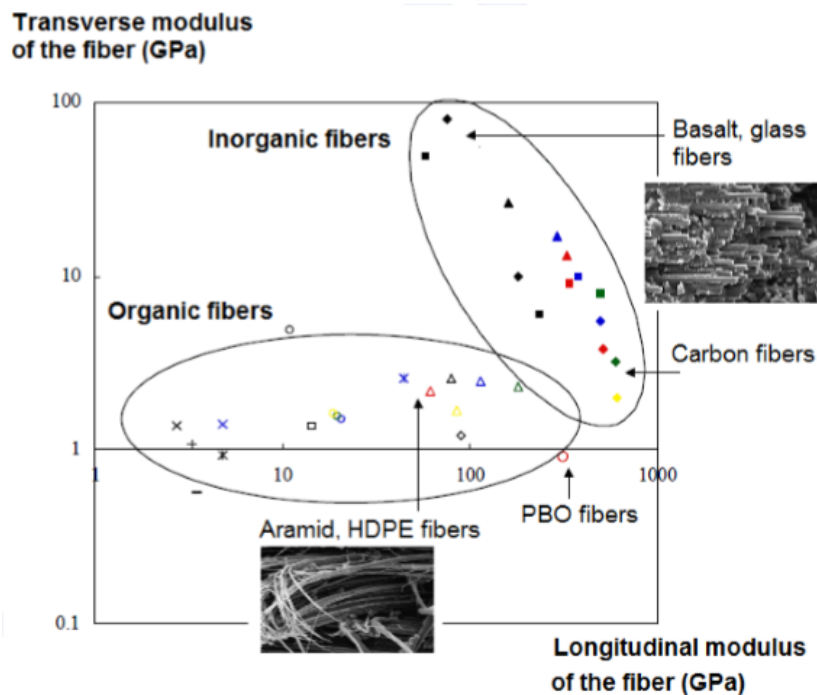


Figura 1.2: Módulo transversal vs módulo longitudinal de fibras por su naturaleza.

Por otro lado, cabe destacar que la fibra de carbono no se encuentra del todo ubicada en esta clasificación. Su materia prima, su precursor en el proceso, es de origen orgánico, el poliacrilonitrilo (PAN), pero el

resultado final carece de átomos de oxígeno e hidrógeno, lo que da lugar a un material inorgánico, considerado como una fibra de transición con propiedades anisotrópicas.[6]

1.1.4.2 Fibras naturales: definición

Se denomina fibra natural a los fragmentos filamentosos, hebras o pelos originados en un medio natural con o sin ayuda del hombre, independientemente de su naturaleza vegetal, animal o inorgánica, que pueden hilarse para dar lugar a filamentos o cuerdas. [9]

Las fibras y tejidos naturales se llevan utilizando desde los albores de la civilización en gran cantidad de aplicaciones y se siguen utilizando en la actualidad. Los restos más antiguos registrados datan del Paleolítico superior, aproximadamente del 30.000 a.C. y corresponden a fibras de lino silvestre. Su principal aplicación ha sido la formación de cuerdas de trabajo y tejidos para la fabricación de ropa, sacos, redes de pesca y cestas, además de refuerzos en la fabricación de casas o chozas de barro.

Con la evolución de los materiales se fueron sustituyendo las aplicaciones de fibras naturales por materiales sintéticos más fáciles de producir y controlar en serie, con lo que en poco tiempo este tipo de materiales quedaron obsoletos o relegados a productos de artesanía frente a las ventajas que aportaban los materiales sintéticos.

Con el tiempo la sociedad se ha dado cuenta que es necesario formar parte del cambio hacia un modelo más ecológico y sostenible que cuide el entorno, por lo que cada vez son más demandados productos fabricados con materiales respetuosos con el medio ambiente, materiales como las fibras naturales, y prueba de ello es la producción anual de estos materiales, tal como que se muestra en la tabla 1.3.

Cada día encontramos una sociedad más implicada y concienciada en valores enfocados hacia el cuidado y respeto del medio ambiente, bajo premisas relacionadas con el desarrollo sostenible y los productos eco-friendly, razón por la cual ha aumentado la demanda de productos

Fibra	Producción mundial (10 ³ Tons)
Bambú	30.000
Yute	2.300
Kenaf	970
Lino	830
Sisal	378
Cáñamo	214
Coir	100
Ramie	100
Abaca	70

Tabla 1.3: Cantidad de fibras naturales que se fabrican al año[10]

naturales que implican nuevamente la utilización de estas fibras para las mismas aplicaciones que tenían en sus inicios.

Además, este nuevo cambio de valores está generando un interés socio-económico que ha derivado en un aumento de las investigaciones de los materiales compuestos con fibras naturales centradas en el estudio de la obtención de nuevas propiedades y aplicaciones que den lugar a la fabricación de productos con materiales más eficientes en su relación peso-costos y con mejores propiedades mecánicas.

Tipo de fibra	Energía (MJ/kg)
Fibras naturales (lignocelulosicas)	4 - 15
Fibra de vidrio	30 - 50
Fibra de carbono	130
Mat de fibras naturales	9,7
Mat de fibra de vidrio	55

Tabla 1.4: Cantidad de energía utilizada en la producción de fibras. Fuente: [6]

De forma generalizada, es posible decir que las fibras naturales tienen buenas propiedades mecánicas, baja densidad, coste competitivo y buenas propiedades aislantes, pero donde realmente marcan la diferencia es en el bajo impacto medioambiental que causan durante su

proceso de fabricación como se aprecia en la tabla 1.4, en su ciclo de vida y reciclaje.

En la mayor parte de los casos, este tipo de fibras son biodegradables, reciclables y reutilizables, por lo que se considera que forman parte de una economía circular, la cual tiene por objetivo reducir tanto el volumen de utilización de materia prima como la producción de residuos, afectando de forma positiva sobre la huella de carbono de los productos finales.

Es por ello que en la actualidad se está despertando cierto interés económico por parte de empresas, principalmente en el sector del transporte, sector de la construcción y sector agrícola. Este interés empresarial resulta fruto de la demanda por parte de usuarios cada vez más educados y concienciados en valores que fomentan la protección de los recursos naturales mediante campañas y plataformas activas destinadas a detener el cambio climático y mejorar el medio ambiente. Prueba de ello son la multitud de artículos de uso común que cada vez más incluyen datos de fabricación para demostrar una trazabilidad más limpia en su proceso de creación, centrados en captar la atención de un sector de consumidores cada vez más numeroso en busca de los denominados productos Eco-friendly, ya sea fabricando ropa a base de fibras naturales, cosméticos naturales o bien vehículos menos contaminantes, pasando por multitud de sectores.

Para que un producto sea considerado Eco-friendly debe aportar alguna mejora para el medio ambiente, es decir, deben ser productos diseñados y fabricados pensando en los beneficios en relación con el medio ambiente. Por tanto, han de ser productos que minimicen la huella de carbono, libres de componentes tóxicos, con buena racionalidad, económicos en su fabricación y procedentes de fuentes naturales no finitas como las de cultivo agrícola.

Por esta razón las fibras naturales tienen cada vez más cabida en nuestro día a día, puesto que resultan de interés para empresas y usuarios, siendo directamente beneficiosas para la protección del medio ambiente por las cualidades Eco-friendly que presentan, siendo igualmente

válidas a nivel tecnológico para muchas aplicaciones como lo son las fibras sintéticas, siempre con sus ventajas e inconvenientes 1.5.

Ventajas	Inconvenientes
Buenas propiedades mecánicas	Adsorción de agua
Coste moderado	Calidad variable en función de la climatología
Bajo coste de producción	Precio fluctuante
Biodegradable y fácilmente reciclable	Anisotropía alta
Buen aislante térmico y acústico	Temperatura de procesado limitada

Tabla 1.5: Ventajas e inconvenientes de las fibras naturales [6]

1.1.4.3 Clasificación de las fibras naturales

Las fibras naturales se caracterizan por tener su origen en la naturaleza, pudiendo agruparse en fibras de origen animal, fibras de origen vegetal y fibras de origen mineral, según se muestra en la tabla 1.6.

Fibras de origen animal

Las fibras de origen animal se obtienen directamente de animales, generalmente de la extracción de folículos pilosos de diversas especies (lana de oveja, cachemir de cabra, crin de caballo, etc), secreciones (seda, seda salvaje, tejido de araña, etc) y cueros.[9]

Las fibras de origen animal consisten en proteínas estructurales de queratina resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos, a la acción de ciertos ácidos minerales como el ácido sulfúrico en ciertas condiciones, pero por el contrario, las bases o álcalis poco agresivos pueden dañarlas.

Grupo	Origen	Producto
Animal-Proteico	Glándulas sedosas	Seda
Animal-Proteico	Folículo piloso	Lana
Animal-Proteico	Folículo piloso	Pelo
Vegetal-celulósico(natural)	Madera	Frondosas
Vegetal-celulósico(natural)	Madera	Coníferas
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tallo	Hierva
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tallo	Cascara cereal
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Semilla/fruto	Algodón
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Semilla/fruto	Cuero
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Semilla/fruto	Capoc
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Semilla/fruto	Coco
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tronco	Lino
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tronco	Bambú
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tronco	Cáñamo
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tronco	Yute
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Tronco	Kenaf
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Hojas	Palmera
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Hojas	Plátano
Vegetal-celulósico(de cultivo)	Hojas	Sisal
Mineral-inorgánico	Natural	Palmera
Mineral-inorgánico	Transformada	Vidrio, basalto

Tabla 1.6: Clasificación de las fibras naturales.

Fibras de origen vegetal

Las fibras vegetales se obtienen de la vegetación en sus distintas formas, ya sean semillas, tallos, hojas, frutos o raíces. Posteriormente son procesadas para obtener los tejidos que serán usados en las distintas aplicaciones, gracias entre otras cosas, a sus propiedades mecánicas como puede observarse en la tabla 1.7.

Químicamente, las fibras vegetales son en su mayor parte celulosa, que en contrapartida a la proteína de las fibras de origen animal, resiste muy bien la exposición frente a sustancias alcalinas y a su vez frente a gran parte de los ácidos orgánicos. Por otro lado, pueden verse dañadas por ácidos minerales fuertes. [11]

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Tensión rotura (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Elongación de rotura (%)
Abaca	1,5	400	12	3-10
Bagazo	1,25	290	17	-
Bambú	0,6-1,1	140-230	11-17	-
Lino	1,5	345-1.035	27,6	2,7-3,2
Cáñamo	1,48	698	70	1,6
Yute	1,3	393-773	26,5	1,5-1,8
Kenaf	-	930	53	1,6
Sisal	1,5	511-635	9,4-22	2,0-2,5
Ramie	1,5	560	24,5	2,5

Tabla 1.7: Resumen de propiedades de fibras de materiales naturales. [10]

Fibras de origen inorgánico

Las fibras de origen inorgánico se obtienen a partir del procesado de minerales y rocas. La fibra de este tipo más utilizada en el ámbito industrial es la fibra de vidrio, formada a partir de finos filamentos de sílice extruidos en caliente. Años atrás se utilizaba en gran volumen la fibra de amianto por sus propiedades aislantes e ignífugas, prohibida actualmente por ser precursora de distintas enfermedades, siendo sustituida por lana de roca entre otros materiales.

1.2 Métodos de fabricación

Existen muchos métodos de fabricación de materiales compuestos y todos ellos tienen como premisa fundamental dar forma a la pieza y generar una buena unión entre la matriz de resina y la fibra de refuerzo.

Es posible clasificarlos en dos grandes grupos: procesos de molde abierto y procesos de molde cerrado. Ambos grupos se caracterizan por tener la misma finalidad constructiva, reproducir una geometría a partir de una superficie negativa (molde), diferenciándose por el uso de un contra-molde.

En este trabajo solo se explicarán, y de forma contenida, los procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica termoes estable más empleados en la actualidad.

A continuación se explica cada uno con más detalle.

1.2.1 Procesos en molde abierto

Los procesos de fabricación en molde abierto se caracterizan por no emplear contra-moldes en la fabricación de piezas, con lo que se simplifica el molde al eliminar los sistemas de sellado y apertura. Por esta razón, la fabricación de componentes con estos sistemas resulta más simple y económica, siendo preferible en los casos de aplicabilidad. Por contra, en este sistema solo se obtiene una cara con buen acabado superficial, la cara en contacto con el molde [12, 6].

Método de contacto manual (Hand lay-up):

Este el método se caracteriza por su sencillez en cuanto a moldes y utillajes, repercutiendo directamente en un bajo coste de ejecución por ser el método más sencillo para la fabricación de componentes poliméricos reforzados con fibra. Este método se aplica a multitud de refuerzos y resinas obteniendo buenos resultados, siempre teniendo en cuenta que si se busca un buen acabado estético y dimensional, este solo se dará en la cara en contacto con el molde.

El proceso de fabricación empieza con la impregnación del refuerzo con resina sobre el molde, es decir, el primer paso consiste en posicionar la fibra sobre el molde como se observa en la figura 1.3 y verter o esparcir sobre ella la cantidad requerida de resina para conseguir la saturación. Para esta operación se suele utilizar brochas o rodillos si la superficie es muy grande. En algunos casos se busca el acabado estético de la fibra como en el caso del carbono visto o carbono-aramida, mientras que en otros como la fibra de vidrio se prefiere disponer de una superficie protectora de color uniforme. El proceso para generar esta superficie consiste en aplicar en primera instancia el recubrimiento deseado (gel coat) sobre la superficie del molde y seguidamente realizar el laminado

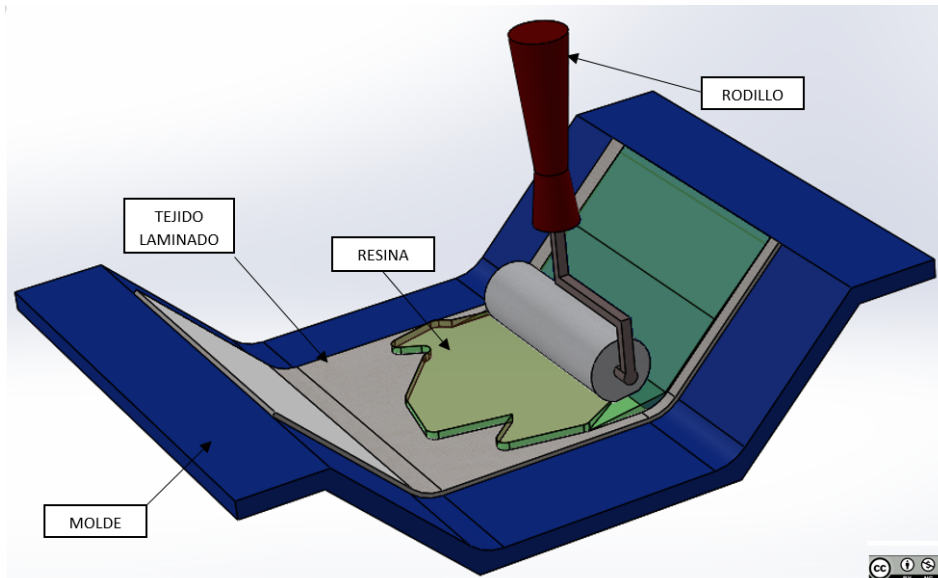


Figura 1.3: Método de laminado manual.

e impregnación de las fibras como se ha descrito anteriormente. Para obtener buenos resultados de adhesión recubrimiento-laminado, es necesario esperar a que el gel coat quede prácticamente curado antes de proceder a realizar el laminado.

El siguiente paso del proceso consiste en adaptar el material a la superficie del molde a partir de la aplicación de presión mediante algún útil como un rodillo, como puede observarse en la figura 1.4. Es conveniente presionar las esquinas para adaptar el tejido al molde y pasar la brocha o rodillo por toda la superficie cada vez que se añada una capa para evitar problemas de delaminación por bolsas de aire.



Figura 1.4: Moldeo por laminado manual.

La última fase del proceso consiste en el curado del material compuesto y posterior desmoldeo. Para este proceso de fabricación se parte de una resina en estado líquido, la cual, mediante la aplicación de aditivos cambia a estado sólido de forma irreversible, pasando por un estado intermedio de gelificación. Cada formulación tiene su tiempo de aplicación o tiempo de gel especificado por el fabricante a una determinada temperatura, durante el cual la resina será fluida y fácil de combinar con el tejido.

Una variante del proceso consiste en posicionar directamente sobre el laminado creado un tejido pelable, sangrador, fieltro y una bolsa de vacío. De esta forma, al generar vacío el tejido se adapta mejor a la geometría del molde por la presión generada, siempre antes de que la resina alcance el tiempo de gelificación. Debido a la presión generada, el exceso de resina pasa a través del tejido pelable (peel ply) y del sangrador hasta el fieltro, donde queda atrapada.

Con esta variante, los componentes tienen una mayor calidad, menor cantidad de aire atrapado y mejor relación fibra-resina. Además, una vez curada la pieza es posible retirar el tejido pelable, con lo que el acabado de la cara que no se encuentra en contacto con el molde mejora sustancialmente. A este proceso se le puede añadir un post curado en autoclave.



Figura 1.5: Horno autoclave para control de la presión y temperatura.

Un autoclave 1.5 es un recipiente hermético que permite el curado con alta presión y a una temperatura controlada. Con este post proceso,

se obtienen piezas de mayor calidad en cuanto a propiedades físicas y químicas puesto que la aplicación de presión mejora la adhesión inter-laminar, y el curado a alta temperatura acelera el proceso de endurecimiento de la resina y aumenta el rango térmico útil del componente hasta llegar a la temperatura de transición vítrea, con lo que la pieza puede trabajar a mayor temperatura.

La resina utilizada en este proceso de fabricación suele encontrarse en estado líquido y requerir de la mezcla con un agente químico catalizador o endurecedor para solidificar, de lo contrario, el curado puede llevar días o incluso semanas. Es importante realizar las mezclas en la proporción correcta de catalizador para obtener las propiedades esperadas. Las proporciones varían sustancialmente dependiendo del tipo de resina, por lo que se debe respetar los rangos especificados en la ficha técnica de cada producto.

Otra variante del proceso de laminado manual es el método de proyección. En este método se lanzan fibras cortas y resina de forma simultánea sobre un molde utilizando un equipo de proyección por aire a presión. Previamente, el molde debe haber sido preparado con algún producto antiadherente y cubierto de gel coat para obtener un acabado uniforme. Una vez cubierto el molde con la cantidad de resina-fibra requerida se pasará el rodillo (antes de que la resina finalice el tiempo de gel). En este caso, el curado debe seguir el mismo proceso que el método anterior, pudiéndose añadir el subproceso de bolsa de vacío y el curado en autoclave, aunque no es lo habitual puesto que este método se emplea para fabricar piezas de muy grandes dimensiones en fibra de vidrio y sin excesiva responsabilidad mecánica.

Moldeo por infusión de resina.

Desde sus inicios a finales de los '80 la infusión de resina es uno de los procedimientos más utilizados, con una empleabilidad al alza en los últimos años entre diferentes sectores por su bajo coste de utillaje y las buenas prestaciones mecánicas que se alcanzan. De forma habitual se utiliza en componentes de gran tamaño y componentes de series cortas en los que solo se requiera una cara con acabado estético (cara vista).

Este proceso es más competitivo que el de laminado manual a nivel de eficiencia, obteniéndose relaciones resina-fibra próximas al 50%, lo que repercute además en piezas con mejores propiedades mecánicas y resistentes.

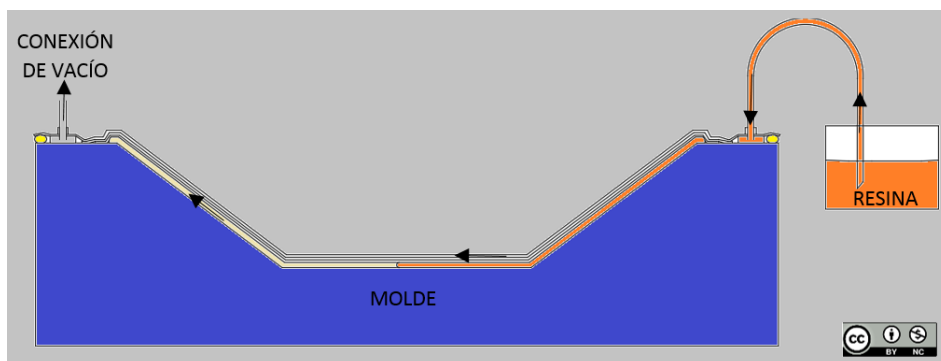


Figura 1.6: Moldeo por infusión de resina.

Los costes en este proceso se reducen a un molde con la geometría inversa a replicar y materiales auxiliares, en su mayoría fungibles. Es un método aplicable a prácticamente la totalidad de resinas y refuerzos del mercado, pudiendo fabricarse piezas con componentes embebidos y estructuras tipo sándwich.

El proceso de infusión estándar sigue los siguientes pasos, según se puede ver en las figuras 1.6 1.7:

- Impregnación del molde con desmoldeante y aplicación de gel coat si se requiere.
- Posicionado sobre el molde de los tejidos en seco cortados con la forma requerida en cada superficie formando el laminado.
- Posicionado del peel ply (tejido pelable) sobre el laminado.
- Posicionado de la malla de difusión (membrana permeable para facilitar la difusión de la resina).
- Posicionado del tubo helicoidal de extracción de la resina de forma perimetral para una entrada de resina central o en un lateral para un avance lineal.

- Posicionado de la toma o canal de entrada.
- Aplicación perimetral de la masilla de cierre para generar el sellado y posicionado de la bolsa de vacío.
- Conexión del equipo de vacío para realizar la compactación del refuerzo e introducir la resina en el molde desde el recipiente conectado al extremo del conducto de entrada. Como el recipiente con resina se encuentra a presión atmosférica y el molde a una presión inferior se produce un trasvase de la resina por diferencia de presión. Entre el conducto de vacío y la bomba se instala un depósito de almacenamiento de resina para evitar que esta acceda a la bomba y la dañe.
- Curado de la resina bajo condiciones determinadas.
- Desmoldeo y mecanizado de excedentes.

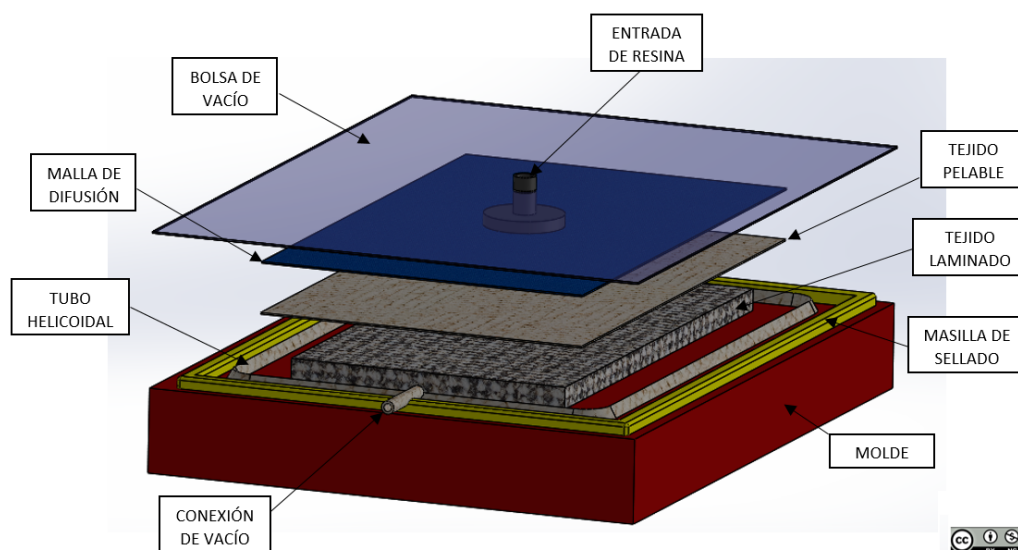


Figura 1.7: Moldeo por infusión de resina.

Durante la fabricación de un componente por esta técnica, el paso más decisivo para obtener buenos resultados es el sellado del conjunto. De este paso depende que no existan inclusiones de aire y que se impregne la totalidad del tejido no quedando zonas secas como las de la figura 1.9, aunque sobre este problema existen más variantes decisivas como

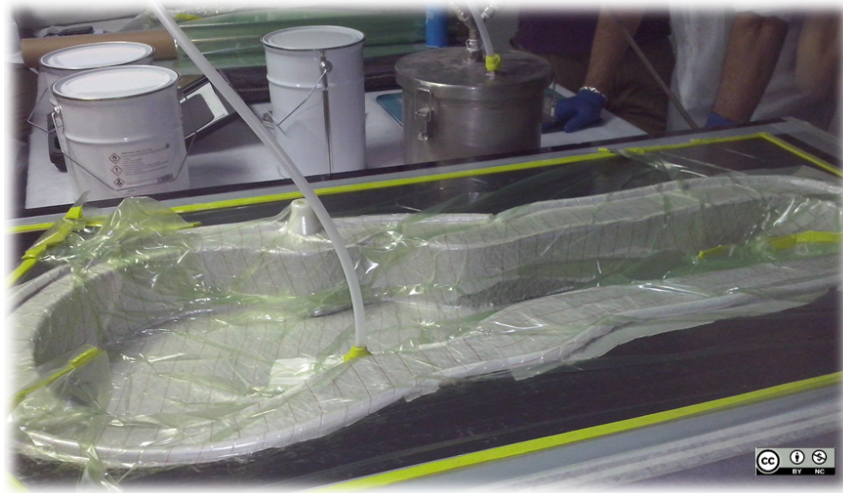


Figura 1.8: Infusión de resina preparada para la entrada de resina.

las presiones de trabajo o la ubicación de los canales de entrada y salida.



Figura 1.9: Problema zona seca en infusión de resina.

Método de proyección.

Este proceso es uno de los más rápidos en la industria de los materiales compuestos por lo que es ampliamente utilizado en componentes de gran tamaño. El proceso consiste en proyectar hilos de fibra corta y resina activada por un agente catalizador sobre un molde previamente preparado. Normalmente es necesaria la aplicación de rodillos de púas para eliminar el aire y posteriormente rodillos de prensado para mejorar la calidad del laminado. Por contra, esta técnica presenta malas propiedades mecánicas debido a que los refuerzos consisten en fibras cortas que se alinean de forma arbitraria.

Bobinado o filament winding.

Este método permite fabricar piezas de cuerpos de revolución de distintos tamaños y formas con elevados porcentajes de fibra, próximos al 65%. El proceso consiste en enrollar sobre un mandril monofilamentos continuos, bandas de fibra o rovings previamente impregnados de resina y guiados de forma precisa para ser orientados en las direcciones necesarias para cada capa. Normalmente se utiliza para fabricar depósitos y piezas tubulares en que no se requiera un acabado estético de la cara exterior.

Durante el proceso el mandril gira mientras el carro en que se ubica la bobina de fibra se mueve en sentido horizontal, lo cual provoca el enrollado de las fibras con la orientación deseada. El sistema es accionado por un sistema de control numérico por computadora (CNC) para generar los patrones según los diseños obtenidos en softwares de cálculo a partir de la variación del ángulo de entrada de la fibra, velocidad del carro, velocidad de giro del mandril y tensión de la fibra.

El proceso de enrollamiento filamentario sigue los siguientes pasos:

- Impregnación del mandril con desmoldeante y recubrimiento con film anti-adherente.
- Fase de enrollamiento: En esta fase se inicia el enrollamiento de las fibras sobre el mandril. La línea de refuerzo pasa por un

deposito con resina y es impregnada. A continuación el cabezal ubicado en el carro distribuye la fibra en función del laminado diseñado.

- Curado de la resina bajo condiciones determinadas, al aire o en horno.
- Mecanizado de excedentes.
- Desmoldeo en prensa.

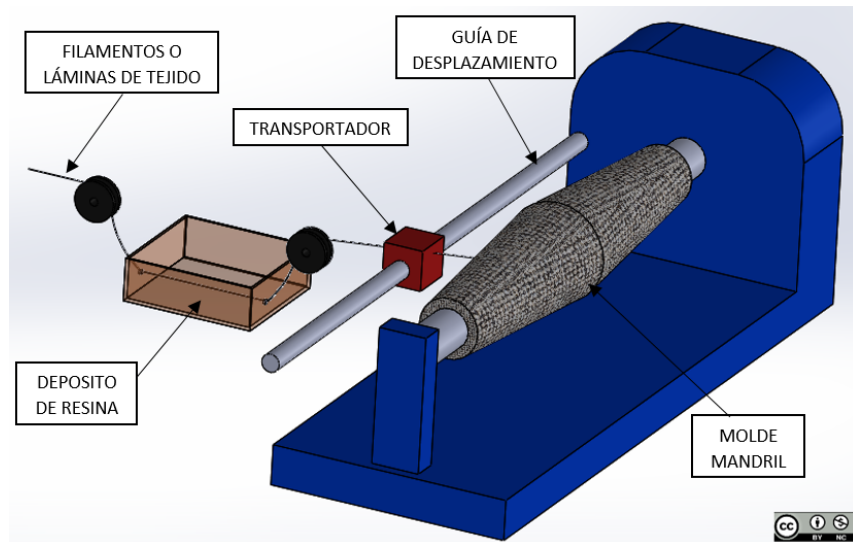


Figura 1.10: Moldeo por método de bobinado filament winding.

Proyección

Este método permite fabricar componentes grandes reduciendo el tiempo empleado. El proceso empieza con la aplicación de antiadherente sobre la superficie del molde. Seguidamente, se aplica sobre este el gel coat (si se requiere). Una vez preparado el molde, es posible proyectar las fibras trituradas junto con la resina y el catalizador sobre la superficie a replicar. Finalmente, utilizando un rodillo se realiza el prensado del material para extraer las inclusiones de aire.

La pistola de proyección se encarga de dividir en fracciones los filamentos y de añadir la resina y el agente catalizante en su justa medida, tal como se observa en la figura 1.11.

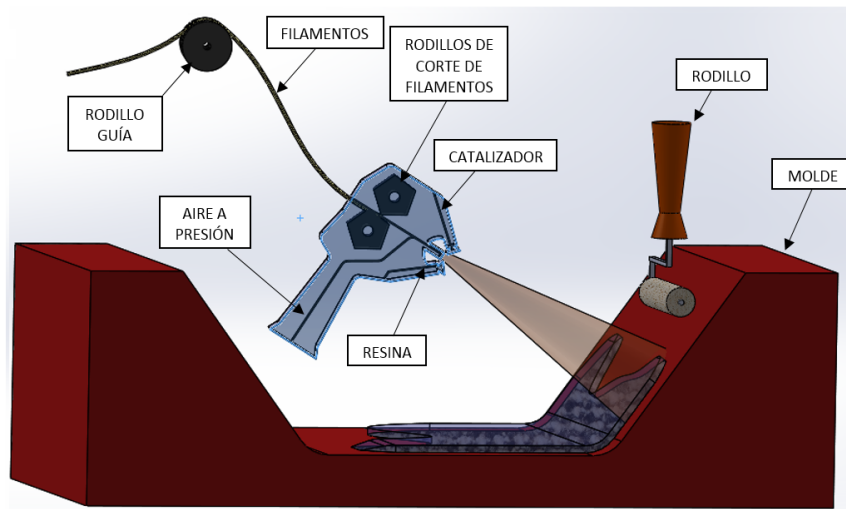


Figura 1.11: Método de proyección.

Centrifugación

Este proceso permite fabricar cuerpos cilíndricos huecos a partir de los principios que rigen la fuerza centrífuga, lo cual facilita la distribución y adhesión del laminado sobre el molde, disminuyendo la probabilidad de que queden atrapadas burbujas de aire de forma proporcional al radio y a la velocidad de giro. A su vez, esta fuerza oprime el material hacia la cara del molde, generando la presión suficiente para distribuir de forma uniforme la resina y obtener una buena unión entre capas. En este método se lamina directamente sobre un molde cilíndrico o troncocónico que se encuentra en rotación. La aplicación de la fibra y la resina se realiza desde el centro del molde de forma continua y simultánea. Es un proceso que no requiere excesiva mano de obra ni personal altamente cualificado, pero sí un gran coste de inversión en equipos, moldes y utillajes.

El proceso a seguir durante la fabricación de un componente por este método sigue el esquema siguiente:

- Limpieza del molde y aplicación del agente desmoldeante.
- Aplicación del gel-coat si se requiere. En procesos industriales se suele utilizar gel-coat con el código de color (RAL) del acabado para de esta forma evitar el proceso de recubrimiento posterior.

- Aplicación/proyección de la fibra impregnada con resina.
- Centrifugación para generar presión interlaminar.
- Curado de la resina
- Desmoldeo

1.2.2 Procesos en molde cerrado

[12]

Pultrusión.

La pultrusión es un proceso de fabricación de componentes en molde cerrado con materiales compuestos para fabricar perfiles longitudinales de forma continua. Se trata de uno de los procesos de fabricación más competitivos por su nivel de automatización y la diversidad de secciones que es posible fabricar, siempre siendo secciones continuas longitudinalmente. Además, en esta técnica se pueden emplear casi la totalidad de fibras y resinas existentes en el mercado. La mayor ventaja de este proceso frente al resto es la automatización que permite la fabricación continua de piezas con poca mano de obra.

Este proceso puede asemejarse a la extrusión en termoplásticos con la diferencia que en este caso el material no se empuja sino que se tira de las fibras de refuerzo. El refuerzo con la orientación seleccionada pasa a través de una zona de impregnación de resina mediante inmersión o proyección con inyectores. A continuación, el refuerzo impregnado de resina pasa por una zona de pre-conformado y seguidamente por el molde donde es conformado con la forma de la sección final. A su vez, en esta fase se aplica calor y presión en el molde, lo cual favorece la polimerización de la resina. Cuando el perfil sale del molde es cortado a la longitud requerida de forma automática y se almacena para que se atempere.

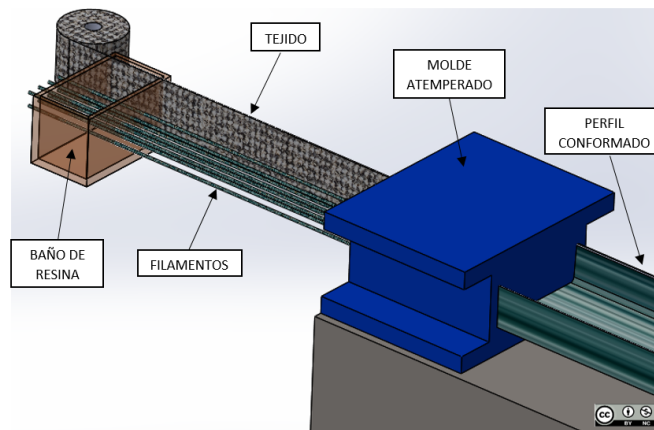


Figura 1.12: Moldeo por método de pultrusión.

Moldeo por prensado.

- Prensado en frío:

Se trata de un proceso de fabricación a baja presión y a temperatura ambiente para componentes en que se busca un buen acabado superficial de las dos caras a bajo coste y sin excesiva responsabilidad mecánica, normalmente series de piezas de entre 1.000 y 10.000 por año. Se trata de un proceso que necesita baja inversión debido a que las presiones utilizadas permiten emplear prensas de reducida fuerza y moldes de materiales económicos.

En este proceso el refuerzo se distribuye sobre el molde y se impregna con resina. A continuación, utilizando la prensa se actúa en la superficie del molde generando una presión que comprime el material entre ambas superficies. La polimerización de la resina se realiza a por la adición de un agente catalizador a temperatura ambiente que genera una reacción exotérmica, calentando ligeramente el molde de igual forma que en el proceso de laminado manual pero obtenido un producto de calidad superior.

- Prensado en caliente:

Se trata de un proceso basado en el de prensado en frío con la diferencia que en este proceso se calienta el molde mediante una fuente de calor externa. Debido a esta diferencia sustancial, los moldes deben ser

buenos conductores térmicos y soportar grandes presiones, por lo cual se suelen emplear materiales metálicos. Además, estos moldes deben soportar fuertes compresiones.

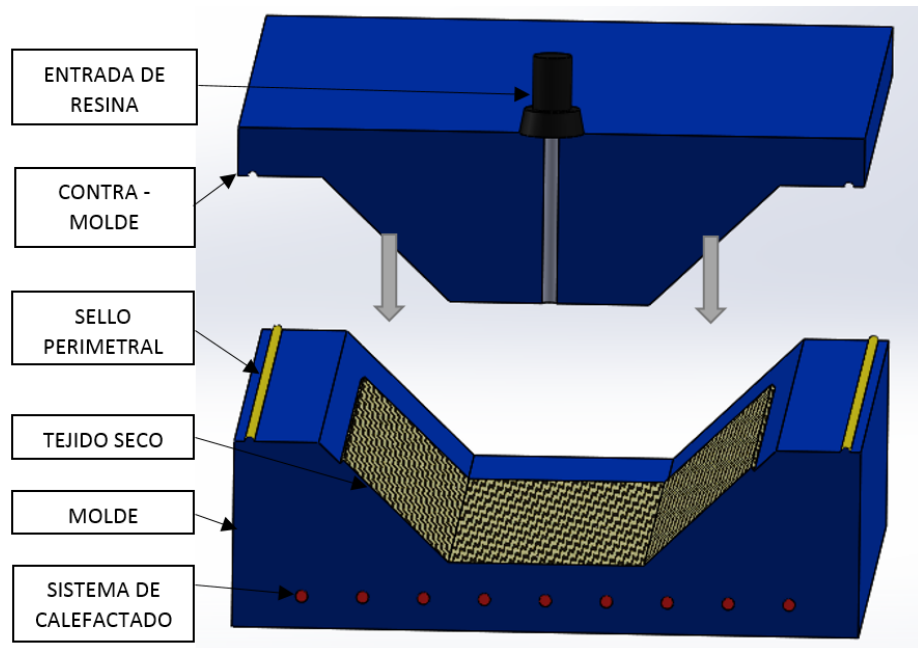


Figura 1.13: Moldeo por compresión en caliente.

El procedimiento es similar al descrito en el punto anterior. El tejido se distribuye en el molde con las orientaciones especificadas en el diseño y se impregna con la resina. A continuación, el molde atemperado se cierra y con la presión que ejerce la prensa, la resina es distribuida por toda la pieza. El curando de la pieza se realiza a la temperatura especificada por el fabricante. El tiempo de ciclo suele variar en función de la temperatura del molde y de la formulación de la resina. Este proceso permite la utilización de resinas de alta viscosidad puesto que la aplicación de calor al molde favorece su fluidez, y esto junto con la alta presión da lugar a componentes con baja porosidad.

- -Moldeo por compresión de prepeg (SMC):

El proceso de SMC (sheet molding compound) consiste en el moldeo de componentes de materiales compuestos a partir de la compresión en un molde caliente de tejidos preimpregnados con resina termoesta-

ble (prepregs). Se trata de un método muy utilizado en componentes con alta responsabilidad mecánica en que se requiera buenas propiedades mecánicas y resistentes, y a su vez buenos acabados a nivel dimensional y estético. Por esta razón, sumada a su alta capacidad de producción y automatización es el método más utilizado en fabricación de componentes en materiales compuestos, en concreto componentes y equipos para deportes y competición.

En este proceso se coloca el tejido preimpregnado en la superficie del molde. A continuación se cierra aplicando calor y presión al material para favorecer el conformado de la pieza, manteniendo las condiciones de presión y temperatura hasta que se complete el curado. En este método es posible generar piezas huecas como los chasis de las bicicletas de competición a partir de la utilización de vejigas inflables de silicona.

Para este tipo de piezas el laminado se realiza intercalando la vejiga entre las capas pertinentes de refuerzo, aplicando la presión sobre el molde, presión en el interior de la vejiga para comprimir el refuerzo hacia las paredes del molde y calor para facilitar el curado.

RTM (Resin Transfer Moulding) moldeo por transferencia de resina.

El RTM estándar (Resin Transfer Molding) es un proceso a baja presión en molde cerrado por el cual se pueden fabricar piezas complejas en materiales compuestos obteniendo buenos acabados superficiales en las dos caras de la pieza y buenas propiedades resistentes.

En este proceso se posiciona el tejido de refuerzo en seco sobre la superficie del molde según las orientaciones especificadas en diseño. A continuación se cierra el molde y se inyecta una resina con baja viscosidad y a baja presión (4 bar). En este proceso, la resina empuja al aire hacia los canales de salida y va ocupando su lugar, impregnando el tejido de refuerzo por completo. El molde, normalmente metálico, incorpora un sistema de calentamiento que favorece la polimerización de la resina dando lugar al curado de la pieza.



Figura 1.14: Moldeo por compresión en caliente del bastidor de una bicicleta de fibra de carbono.

En algunos casos se incorpora en el proceso un sistema de vacío perimetralmente exterior a la pieza, por lo que se facilita la entrada de resina, la adhesión inter-laminar y se minimiza la probabilidad de que quede aire atrapado. Este método se denomina VA-RTM o Vacuum-RTM.

Una variante de este proceso es la transferencia de resina en alta presión o HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding). En este caso el proceso es el mismo que el RTM estándar pero a alta presión (120 bar), con lo que se consiguen piezas con porcentajes mayores de fibra (65%), por tanto con mejores características mecánicas y resistentes. Además, el proceso es mucho más rápido gracias a la utilización de inyectores de alta presión tipo jet, lo cual favorece su industrialización y utilización en el sector de la automoción. Todo este incremento tecnológico supone un considerable aumento de coste en el utillaje y moldes por lo que solo es amortizable para grandes partidas de piezas.

Por el contrario, existe una versión de RTM mucho más económica y simple en cuanto a utillajes, se trata del proceso denominado LIGHT-RTM. Este método de fabricación se utiliza para series cortas y a baja presión (1bar). Los moldes en este caso suelen ser, el inferior de acero o composite reforzado con acero y de material compuesto el superior. La resina en este proceso entra al molde de forma perimetral, por lo que se sitúa una toma de vacío en el centro de la pieza con lo que en algunas ocasiones no se utiliza la inyección con presión. De esta manera, el proceso descrito se asemeja al proceso de infusión pero con la diferencia que se obtienen dos caras con buen acabado superficial y un espesor uniforme controlado a partir del espacio entre caras de molde.



Figura 1.15: Fabricación de un componente por método de moldeo RTM en molde cerrado.

1.3 Medios de movilidad personal

1.3.1 La tendencia evolutiva de los vehículos

Desde los inicios de la humanidad los seres humanos hemos buscado y desarrollado medios para facilitarnos la vida. Sin duda, uno de los aspectos más relevantes ha sido y sigue siendo la capacidad para desplazarnos largas distancias en periodos de tiempo cada vez más cortos. Esta búsqueda ha dado lugar a multitud de inventos que nos han acercado a alimentos, bienes y personas desde sus inicios.

El término automóvil se refiere a un vehículo auto-propulsado destinado al transporte de personas o mercancías sin necesidad de carriles. Existen diferentes tipos de automóviles, como camiones, autobuses, furgonetas, motocicletas, motocarros o cuatriciclos.[13]

Atendiendo a la definición, el primer automóvil de la historia podría considerarse el Fardier del inventor francés Nicolas-Joseph Cugnot (1725-1804). Cugnot construyó un vehículo impulsado por un motor de vapor que le permitía transportar piezas de artillería y objetos pesados de un lugar a otro, pero este invento pronto se vio circulando por las calles de París en 1769 con la finalidad de autotransporte. Aquel vehículo consistía en un triciclo con un motor bicilíndrico impulsado por una caldera de vapor que proveía de tracción la rueda delantera, siendo a la vez motriz y directriz, por lo que resultaba complicada su maniobrabilidad.



Figura 1.16: Fardier, primer automóvil con motor a vapor.

Por otro lado, para muchos la invención del primer automóvil es la del modelo Benz Patent-Motorwagen de Karl Friedrich Benz en 1886, puesto que se trata del primer automóvil con motor de combustión interna.

El vehículo de Benz era un automóvil que supuso un gran avance para la técnica. El vehículo se basaba en un chasis de tubo de acero y paneles de madera. Las tres ruedas del Benz se componían de llantas de acero y neumáticos macizos de caucho. El movimiento se producía a partir de la tracción de las ruedas traseras y el control de la dirección tenía lugar a través de un sistema un piñón cremallera. La trans-

misión era fija, no disponía de cambio de velocidades ni era posible actuar sobre la velocidad de giro del motor. La regulación de la velocidad se realizaba a partir de la actuación manual sobre su sistema de embrague.



Figura 1.17: Benz Patent-Motorwagen, primer automóvil con motor de combustión interna.

Es evidente que la evolución de la sociedad en el último siglo ha llevado consigo el desarrollo de los automóviles desde un punto de partida conciso, centrado en facilitar el transporte de personas y mercancías, hasta el actual estado enfocado en gran medida hacia aspectos relacionados con el confort y la seguridad de los ocupantes.

Es por ello, que solo con echar la vista atrás 30 años, es posible apreciar una gran evolución en los vehículos, en cuanto a aspectos de confort y seguridad. Se trata de la incorporación paulatina de sistemas y equipos que hoy consideramos imprescindibles como el aire acondicionado, sistemas de asistencia para el aparcamiento, sistemas de control, airbags, pretensores, GPS, reproductores de música, etc. lo que pone de manifiesto un aumento considerable de la masa a transportar. Sin ir más lejos, para el caso de un vehículo utilitario pequeño como Renault

Clio, su masa se ha visto incrementada en un 27%, pasando de 839 kg en 1990 a 1065kg en 2019.

Por un lado se encuentra afán de desarrollar vehículos más confortables y seguros, pero por otro lado existe la necesidad de desarrollar vehículos más eficientes y menos contaminantes, lo cual resulta a veces difícil a la par que contradictorio. Observando la evolución de la masa de la berlina de lujo A8 de Audi se aprecia un gran incremento desde su versión de 1994 con una masa de 1.435 kg a la de 2017 con 1.920 kg, pero más llamativo si cabe para la versión híbrida de 2019 con sus 2.305 kg, lo que supone un incremento de un 60% (870kg) respecto su versión inicial como puede observarse en la figura 1.18 .

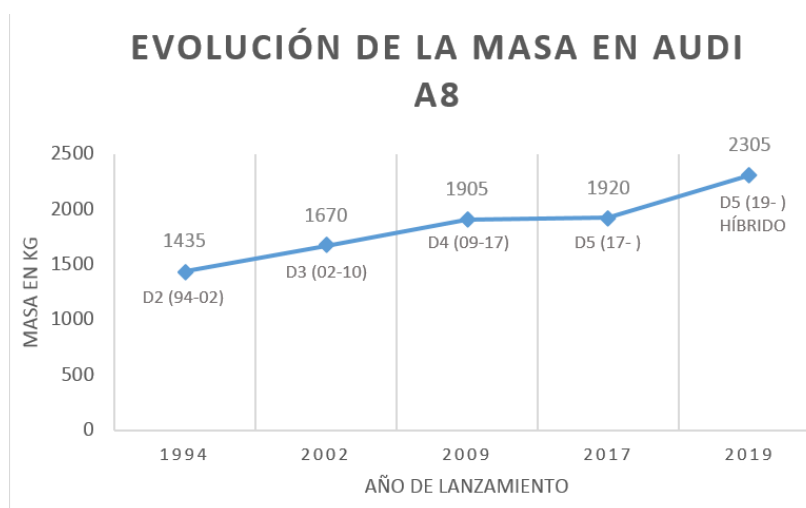


Figura 1.18: Evolución de la masa en berlina de lujo de AUDI.

Por esta razón, resulta determinante para el sector el desarrollo de componentes de vehículos con materiales más ligeros a fin de obtener vehículos con mejores relaciones potencia/peso.

1.3.2 Evolución en el diseño de los automóviles

En los últimos tiempos, la industria de la automoción se ha visto forzada a evolucionar y adaptarse a una nueva situación de mercado determinada por las imposiciones medioambientales establecidas en protocolos internacionales, a las actuales circunstancias de crisis que han derivado en reducción de ventas y a la creciente tendencia de los potenciales clientes a seleccionar vehículos menos contaminantes en su uso y fabricación.

Este estado de cambio ha generado una situación de inestabilidad y a su vez una oportunidad para el desarrollo de nuevos materiales y procesos de fabricación más eficientes y limpios, promovido por legislaciones internacionales cada vez más exigentes en cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂, la reciclabilidad y seguridad.

Las normas sobre emisiones encaminan el diseño hacia la reducción de peso de los vehículos como principal objetivo. Por otro lado, respecto a la reciclabilidad de los vehículos, la Unión Europea ha establecido mediante lo especificado en La Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre de 2000 (end-of-life vehicle ELV), los valores de reciclabilidad y revaloración de los vehículos tras su vida útil, además de definir los porcentajes de materiales reciclados que deben formar parte de los nuevos vehículos.

Ha comenzado una carrera entre las empresas del sector automotriz para posicionarse en la nueva concepción industrial asociada a los denominados coches limpios. Para afrontar las circunstancias actuales del mercado, las marcas se están centrando en el desarrollo de estrategias enfocadas a reducir los costes de fabricación de los nuevos modelos híbridos y eléctricos, lo cual supone un factor clave para incentivar las ventas de vehículos de coste sostenido con la finalidad de renovar el parque móvil con vehículos limpios, ampliando así la oferta de modelos más allá de los vehículos eléctricos de alta gama.

A su vez, esta competencia persigue el aumento de la autonomía de los vehículos a partir de la mejora de su eficiencia. Para ello es nece-

sario adoptar estrategias enfocadas a mejorar el diseño de piezas en busca de mejores relaciones potencia-peso que no impliquen sobrecostes y mantengan intactos aspectos referentes a la seguridad, calidad y confort del mercado actual.

Por esta razón, en los últimos años se ha visto incrementado el uso de materiales compuestos de matriz polimérica que aportan a los fabricados beneficios en cuanto a la reducción de masa, cosa que repercute en la mejora de relación potencia/peso y por tanto conlleva la reducción de consumo de combustible y emisiones.

Esta nueva situación plantea una oportunidad inmejorable para el lanzamiento de líneas de I+D+i en el campo de los materiales compuestos con fibras naturales, en lo relativo a sus procesos de transformación, con la finalidad de desarrollar técnicas de procesado que favorezcan su incorporación en las cadenas productivas. También líneas de investigación en lo relativo al desarrollo de nuevos materiales, diseñados a la medida de las necesidades de aplicación, de manera que material y técnica de procesado incidan de forma positiva en la cadena de valor del producto.

Además, como ventajas adicionales ligadas a las nuevas tendencias de mercado, se puede decir que las fibras naturales tienen un bajo coste, se obtienen de una fuente sostenible, son biodegradables, presentan buenas propiedades mecánicas, resistentes y una baja densidad, lo cual les confiere un elevado módulo específico.

1.4 Criterios de fallo estático

[14, 15, 16, 17]

Se puede decir de forma generalizada que los materiales compuestos son anisótropos en la mayoría de los casos puesto que las fases de refuerzo formadas a partir de fibras o tejidos orientados, aportan al conjunto distintas propiedades en cada una de sus direcciones. Además, también es posible definir a la gran mayoría como quebradizos, debido al carácter frágil de las matrices comúnmente empleadas. Estas

características definen los diferentes modos de fallo de los materiales compuestos en función del tipo de aplicación del esfuerzo, separando los fallos de los constituyentes y los fallos de la interfase.

Atendiendo a las gráficas tensión-deformación de un ensayo normalizado de tracción, se puede decir que las fibras no presentan plasticidad, pues en la mayoría de los casos su tensión de rotura coincide con su límite de elasticidad. En los casos en que se aprecia un ligero cambio de pendiente, el fallo puede estar relacionado con un fenómeno de redistribución de esfuerzos a fibras colindantes o a la rotura progresiva de filamentos. Por otro lado, respecto a los esfuerzos de compresión, se puede considerar las fibras como elementos esbeltos, por tanto su rotura viene inducida por fenómenos de micro pandeo progresivo.

El principal modo de fallo de la matriz de materiales compuestos es la microfisuración. Este modo de fallo genera la aparición de grietas paralelas a la dirección de la fibra sobre todo el espesor de la lámina, causando una disminución de la resistencia en la dirección transversal. Este fenómeno es más acusado en aquellas láminas en que la fase dispersa no está orientada en la misma dirección que se aplica la carga. Estas fisuras son generadas mayormente por esfuerzos de cortadura o flexión, pudiendo aparecer también en esfuerzos de tracción o compresión.

El despegado o "debonding" es el modo de fallo habitual de la interfase entre fibra y matriz. Este fallo consiste en una pérdida de adhesión y un posterior deslizamiento de la fibra respecto a la matriz generando una gran pérdida de energía por fricción. Este fallo suele estar provocado por esfuerzos cortantes de deformación en la interfase. Una vez dañada la pieza de esta forma, la fase matriz no puede transmitir y distribuir las tensión correctamente a la fase dispersa, con lo que el material acusa una notable pérdida de propiedades resistentes que deriva en la rotura total.

El modo de fallo más común de la interfase fibra-fibra es la delaminación. Este fallo consiste en una pérdida de adhesión entre las capas de

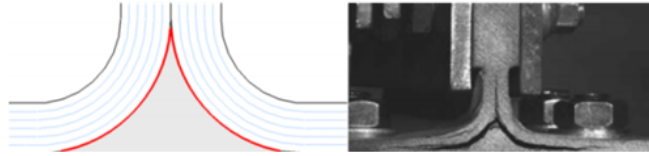


Figura 1.19: Ejemplo de fallo por despegado "debonding".

tejido que deriva, como el caso anterior en una mala distribución de las tensiones por parte de la fase matriz y en la posterior rotura.

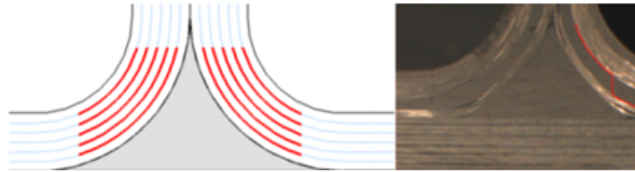


Figura 1.20: Ejemplo de fallo por delaminación.

Para valorar la bondad de los criterios de fallo aplicables a materiales compuestos suele ser necesario realizar estudios independientes de cada método a partir de la comparación de los resultados obtenidos empíricamente frente a los resultados del mismo caso. De esta manera es posible comparar distintos métodos frente a una hipótesis con resultado conocido.

Se ha postulado gran cantidad de criterios para predecir los fallos de un material. Muchos de los criterios asumen en sus cálculos linealidad de la tensión en función de la deformación hasta la rotura. En la mayor parte de los casos, estas teorías son adaptaciones de las teorías utilizadas para materiales isotrópicos homogéneos. Las teorías de cálculo más utilizadas habitualmente son la de tensión máxima, deformación máxima, teoría de fallo Tsai-Hill y teoría de fallo Tsai-Wu.

1.4.1 Tensión máxima

Este es uno de los criterios de más simple aplicación. Centra su resultado en predecir la rotura de la lamina a partir del nivel de tensiones generado en la misma en comparación con la tensión máxima soportable por el material, es decir, que la lamina causará fallo si la tensión dentro de la misma es igual o superior a la tensión máxima admisible

por el material en los ejes que coincidan con la dirección de aplicación del esfuerzo.

Como principal inconveniente, este método condiciona el cálculo de las tensiones de forma individual, no siendo posible prever fallos derivados de la interacción de esfuerzos aplicados en distintas direcciones. Este método sobrestima la carga de rotura al no considerar la interacción de más de un mecanismo de fractura.

Los resultados para los casos uniaxiales son bastante aproximados y permite el cálculo de matriz y fibra por separado, no obstante no es un método de aplicación para casos multiaxiales puesto que no permite una correlación entre tensión normal y cortante.

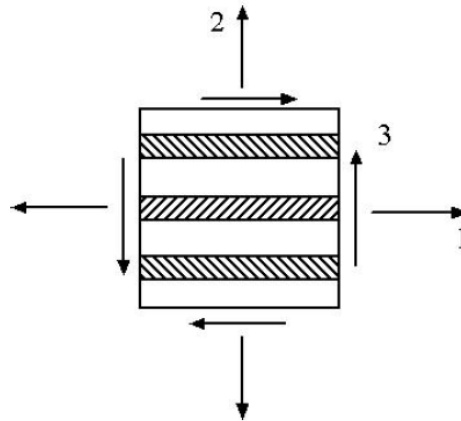


Figura 1.21: Criterio tensión máxima.

Para la hipótesis de una probeta sometida a tracción, caso de ensayo de tracción, según el criterio de tensión máxima la probeta no fallará si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\sigma_1 < X_t \quad (1.1)$$

$$\sigma_2 < Y_t \quad (1.2)$$

$$|T_{max}| < S \quad (1.3)$$

1.4.2 Deformación máxima

Este criterio tiene gran similitud con el de tensión máxima pero con la discrepancia que la variable de estudio pasa a ser la elongación en lugar de la tensión.

Para predecir la rotura de la lámina, este método compara la deformación alcanzada por la aplicación de un esfuerzo externo en la dirección del esfuerzo frente a la deformación máxima admisible por el material en esa dirección, es decir, que la lámina causará fallo si la deformación en una dirección es superior a la deformación máxima admisible por el material en esa misma dirección.

Como principal inconveniente, este método condiciona el cálculo de las deformaciones de forma individual, no permitiendo el análisis de esfuerzos aplicados simultáneamente en distintas direcciones. Este método distingue entre fallos de fibra y matriz, en la dirección de la fibra, en la dirección transversal y para deformación al cortante.

Los resultados para los casos uniaxiales son bastante aproximados y permite el cálculo de matriz y fibra por separado teniendo en cuenta como sucede, no obstante no es un método de aplicación para casos multiaxiales puesto que no permite una correlación entre tensión normal y cortante.

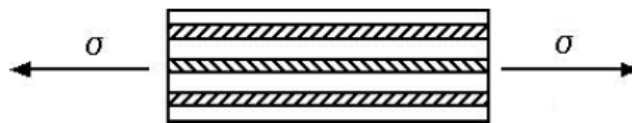


Figura 1.22: Criterio deformación máxima.

Para la hipótesis de una probeta sometida a tracción, caso de ensayo de tracción, según el criterio de deformación máxima la probeta no fallará si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\varepsilon_1 < X_\varepsilon \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_2 < Y_\varepsilon \quad (1.5)$$

$$|\gamma_{max}| < S_\varepsilon \quad (1.6)$$

Donde las deformaciones son producto de:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_2 = -\nu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (1.8)$$

$$|\gamma| = 0 \quad (1.9)$$

1.4.3 Tsai-Hill

Este es uno de los criterio más utilizados para el cálculo de componentes de materiales compuestos. Este método guarda gran similitud con el de Von Mises para materiales ortótropos. Esta fundamentado en los criterios de fallo polinomiales y es uno de los que ofrece mejores resultados.

Hill estableció un criterio de plastificación basado en el método de Von Mises pero aplicado a materiales anisótropos. En este criterio interviene distintos parámetros de plastificación, como se puede extraer de Su expresión general:

$$(G + H)\sigma_x^2 + (F + H)\sigma_y^2 + (F + G)\sigma_z^2 - 2H\sigma_x\sigma_y - 2G\sigma_x\sigma_z - 2F\sigma_y\sigma_z + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1.10)$$

Por otro lado, Tsai supuso que la lámina se veía afectada por estados de carga simples. Estableció una relación entre los parámetros de plastificación (F, G, H, L, M, N) y las tensiones admisibles en la dirección

de las fibras (X), en la dirección transversal transversal a las fibras (Y), de la resistencia de la lámina en la dirección perpendicular a la misma (Z), de la resistencia a cortadura plana (S), y de la resistencia de unión entre láminas S_{xz} y S_{yz} .

Esta teoría permite la predicción de fallo para situaciones con interacción de esfuerzos, lo cual resulta ventajoso frente a las teorías anteriormente mencionadas. Atendiendo a su ecuación podemos observar que todos los esfuerzos se ven involucrados respecto a cualquier estado de carga.

En comparativa, esta teoría facilita resultados más próximos a los obtenidos experimentalmente frente a esfuerzos combinados, no obstante, del resultado no se deducen directamente los modos en que se producirá el fallo, aunque es cierto que es posible extraerlos por comparación de magnitudes a partir de los términos de la ecuación. Aunque resulta interesante la posibilidad de interaccionar en el cálculo distintos esfuerzos e involucrar distintos modos de fallo, puede resultar en un sobredimensionamiento de los componentes debido a que no todos los modos de fallo contemplados aparecen de forma simultánea en un laminado con lo que serán considerados en la ecuación y tal vez no estén contribuyendo al fallo.

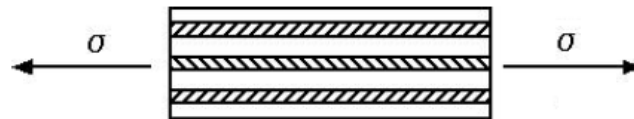


Figura 1.23: Criterio Tsai-Hill.

Para el caso de tensiones uniaxiales (ensayo de tracción), se solo el primer polinomio de la formula, tal como se indica a continuación:

$$(G + H)\sigma_x^2 = 1 \quad (1.11)$$

1.4.4 Tsai-Wu

La teoría de fallo de Tsai-Wu emplea una notación tensorial que toma como punto de referencia el criterio de Tsai-hill. Puede expresarse de la forma manera:

$$f(\sigma_k) = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (1.12)$$

Donde los índices repetidos indican la suma, y $i, j, k = 1, 2, \dots, 6$.

La tensión plana en materiales ortotropicos para el caso de un elemento 3D puede expresarse segun se indica en la siguiente ecuación:

$$F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + 2F_{12}^* \sqrt{F_{11} F_{22}} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (1.13)$$

Donde:

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{\sigma_{t1} \sigma_{c1}} \\ F_{22} &= \frac{1}{\sigma_{t2} \sigma_{c2}} \\ F_{66} &= \frac{1}{\tau_t^2} \\ F_1 &= \frac{1}{\sigma_{t1}} - \frac{1}{\sigma_{c1}} \\ F_2 &= \frac{1}{\sigma_{t2}} - \frac{1}{\sigma_{c2}} \end{aligned}$$

El coeficiente F_{12} introduce la interacción entre dos tensiones normales. Este coeficiente debe obtenerse a partir de un ensayo empírico de tipo biaxial por lo que en algunos casos resulta difícil su obtención debida a la complejidad de la prueba. Por otro lado, este valor puede aproximarse a partir de datos extraídos del ensayo de tracción, mediante la aplicación de fórmulas matemáticas. Este parámetro suele estimarse con la ecuación F_{12} según:

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad (1.14)$$

donde: $-0,5 < F_{12}^* < 0$

A diferencia de los anteriores, este criterio distingue entre los esfuerzos de comprensión y de tracción. Además, contempla para la predicción del fallo los valores de energía de deformación total, es decir la energía distorsión y la energía de dilatación.

1.4.5 Determinación del criterio de fallo estático

Como se ha podido observar, los criterios de rotura descritos van aumentando en complejidad a la par que en eficacia en cuanto a estudios multiaxiales. Este avance progresivo en el estado de la técnica es resultado de estudios comparativos y adaptativos con ensayos empíricos de componentes.

Todas las teorías descritas son válidas y presentan buenos resultados en función de su campo de aplicación. La teoría del esfuerzo máximo y la teoría de deformación máxima ofrecen buenos resultados sobre materiales frágiles sometidos a esfuerzos de tracción, mientras que la teoría de Tsai-Hill y la teoría de Tsai-Wu son más aptas para materiales dúctiles anisótros en sollicitaciones de cortante o compresión.[14]

Atendiendo a las cifras de utilización [14], cerca del 17% de los técnicos que diseñan componentes en materiales compuestos coinciden en utilizar el criterio de fallo de Tsai-Hill frente a un 11% de técnicos que prefiere el criterio de Tsai-Wu. Esto es debido a que resultan relativamente fáciles de usar (respecto a otros criterios polinomiales) y obtener los parámetros de cálculo, además de que ofrecen buenos resultados. Aunque con este método es posible predecir el fallo de la lámina, no es posible identificar el modo o componente de fallo. Muchos de los criterios polinomiales tienen en cuenta la anisotropía del material pero no el carácter heterogéneo del composite ni su influencia en la rotura.[14]

Como solución al problema planteado se utilizan criterios que tienen en cuenta el tipo de fallo, de los cuales destacan por su sencillez el criterio de tensión máxima y el de deformación máxima. En estos

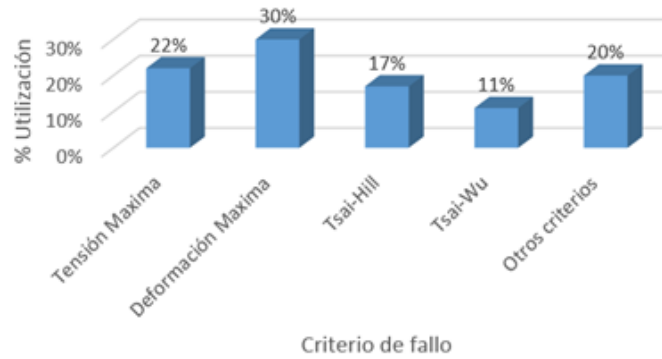


Figura 1.24: Porcentaje de aplicación de cada método por los diseñadores de componentes del sector.

Los criterios se tratan de forma separada los fallos de la fibra de los de la matriz y además se considera como sucede. Se trata de los criterios más utilizados por los técnicos de diseño de componentes en materiales compuestos, destacando el criterio de deformación máxima con un 30% y seguido del criterio de tensión máxima con un 22%. Como inconveniente estos criterios podría destacar el hecho de que no permiten una correlación entre la tensión normal y tensión cortante.[14]

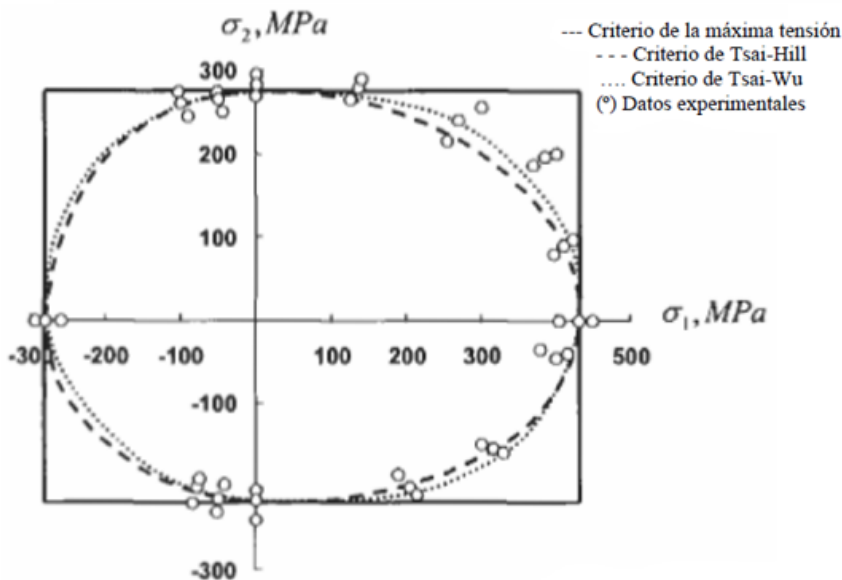


Figura 1.25: Envoltente de falla para un composite de fibra de vidrio con resina epoxi.

Es posible determinar que no hay un criterio que destaque sobre el resto, más bien dependiendo del tipo de material a analizar, tipo de

tejido, entramado, matriz o sollicitación, hay un criterio que aproxima con más exactitud los resultados teóricos a los experimentales. Por otro lado, con la estandarización de programas de cálculo por elementos finitos específicos para materiales compuestos resulta relativamente fácil aplicar criterios como Hoffman, Puck o LaRC, además de los descritos, siempre que se empleen materiales de la base de datos del software o se disponga de las propiedades y parámetros necesarios para su aplicación.

1.5 Software de Elementos Finitos

El conjunto de programas informáticos enfocados a la simulación y análisis de diseños de modelos de componentes informatizados se denomina ingeniería asistida por computadora o CAE (*Computer Aided Engineering*).

Mediante la utilización de estos software es posible simular estados de cargas y predecir roturas o deformaciones sobre modelos informatizados, es decir, modelos creados en programas de diseño asistido por ordenador (CAD) o modelos informatizados a partir de la aplicación de ingeniería inversa sobre componentes reales. De este modo, con la aplicación de los software CAE, es posible optimizar componentes de forma mucho más rápida y exacta aumentando la rentabilidad del proceso por la reducción costes de fabricación de prototipos que implica y reducción de ensayos necesarios para la obtención del producto final.

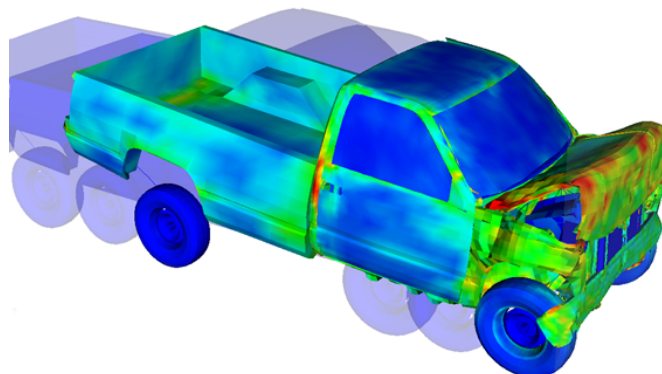


Figura 1.26: Simulación de accidente mediante programa CAE.

En esta tesis doctoral, las simulaciones se han realizado utilizando distintos módulos de cálculo del software ANSYS WORKBENCH, programa de simulación que trabaja con el método de elementos finitos MEF (FEM en inglés). Se trata de un método numérico muy utilizado para aplicaciones de ingeniería que permite la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas.

Este método ha sido diseñado para ser utilizado en ordenadores debido a la cantidad de iteraciones que necesitan para obtener un resultado. Se usa habitualmente en el desarrollo de productos, procesos y aplicaciones de todo tipo a nivel industrial. La tipología de campos de aplicación ha aumentado enormemente, llegando a emplearse en simulación de sistemas biológicos complejos. Como requisito de aplicación, es necesario conocer las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema de antemano.

A menudo, por la complejidad de los problemas de ingeniería asociados a geometrías o estados de carga resulta difícil encontrar la soluciones analíticas, por lo que se recurre cada día con más frecuencia a los métodos de cálculo por elementos finitos como principal alternativa.



Figura 1.27: Simulación FEM de una biela.

Con la aplicación de este método es posible obtener soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales o integrales que caracterizan el comportamiento físico de un modelo, ya sea un cuerpo, estructura o dominio, dividiendo este comportamiento en un gran número de subdominios que no intersectan entre sí denominados «elementos finitos». Al conjunto de elementos finitos que forma una partición del dominio se le denomina discretización.

En el interior de cada elemento es posible distinguir una serie de puntos denominados «nodos». Se consideran adyacentes dos nodos si pertenecen a un mismo elemento finito. Un nodo puede pertenecer a varios elementos si se encuentra sobre la línea media que los separa. El conjunto de nodos adyacentes se denomina malla.

El programa realiza los cálculos sobre la malla de puntos, que sirven de base para la discretización del dominio en elementos finitos. En estos software la generación de la malla se realiza habitualmente con herramientas integradas denominadas generadores de malla, que realizan de forma automática el mallado permitiendo retoques y afinado a gusto del diseñador. Suele realizarse el mallado durante la etapa de pre-procesado, etapa previa a los cálculos. En función del número de nodos y su adyacencia se define el conjunto de incógnitas aplicadas en cada nodo, denominadas grados de libertad. Las relaciones entre variables y nodos define en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de agrupación de este sistema de ecuaciones se define como matriz de rigidez, donde el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos del sistema.

Es importante destacar, que si para el cálculo se consideran divisiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Si no existe convergencia no existirá solución.

Las simulaciones que se han realizado durante la tesis se establecen dentro de los problemas de mecánica de medios continuos. De forma general, para este tipo de problemas de mecánica de sólidos deformables el proceso programado de un software MEF calcula el rango de

desplazamiento y posteriormente las deformaciones y tensiones usando las relaciones cinemáticas y constitutivas.

Este método de cálculo es muy utilizado por su amplio rango de aplicación y por la simplicidad de introducción de nuevos dominios de cálculo complejos, tanto en 2D como en 3D, fácilmente aplicable a problemas de transferencia, fluidos, electromagnetismo, etc.

A continuación se expresa de forma simplificada el proceso de análisis por el método MEF:

1. El modelo geométrico se divide mediante en un número de elementos (superficies) finitos en líneas. Este hito se desarrolla durante la etapa de pre-procesado mediante herramientas (algoritmos) incorporados al software.
2. Para el estudio se suponen los elementos conectados entre sí mediante un número finito nodos situados en sus contornos. Las incógnitas del problema serán los desplazamientos de estos nodos. El principio es el mismo el de análisis de estructuras por el método matricial.
3. Se genera conjunto de funciones que define de forma única el campo de movimiento de cada elemento finito como función del desplazamiento de sus nodos. Para el caso de dos nodos podría definirse como: $u = N_1 \cdot u_1 + N_2 \cdot u_2$, siendo N_1 y N_2 las funciones de geometría y u_1 y u_2 el desplazamiento de los nodos.
4. Las funciones de desplazamiento definen por tanto el estado de deformación del elemento analizado a partir del desplazamiento de los nodos. A partir de las deformaciones y conociendo las propiedades del material se definirá el estado de tensional de todo el elemento finito (incluido el contorno).
5. A continuación, en los nodos se genera un sistema de fuerzas que equilibren las tensiones del contorno frente a cualesquier carga repartida sobre el elemento. Esta relación entre fuerzas y desplazamientos puede definirse como $F = k \cdot u$.

6. A partir del resultado del sistema anterior se obtienen los desplazamientos de los nodos y el campo de desplazamiento en el elemento finito.
7. En la etapa de post-procesado se suelen mostrar las gráficas de resultados para su análisis.

El modelo de elementos finitos desarrollado en esta tesis emplea el software Ansys para llevar a cabo las simulaciones. ANSYS, Inc. (Swanson Analysis Systems, Inc.) es una empresa fundada en 1970 que actualmente da trabajo a aproximadamente 1700 empleados.

Esta compañía desarrolla, comercializa y presta soporte a las empresas de ingeniería a través de su software de simulación por elementos finitos que permite predecir el funcionamiento, resistencia y la reacción de un determinado componente frente a una hipótesis real de funcionamiento. ANSYS desarrolla tecnología propia enfocada a la simulación y además, con el paso del tiempo ha ido adquiriendo nuevos softwares provenientes de otras empresas absorbidas, lo cual permite una mayor movilidad entre programas, cosa que se agradece en estudios de problemas complejos.

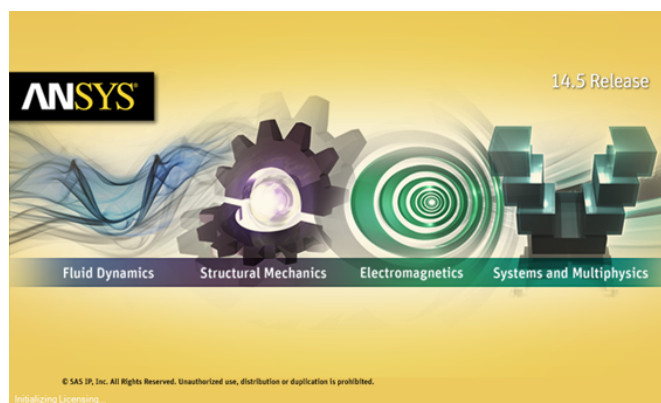


Figura 1.28: Cabecera software ANSYS.

Dentro del ANSYS WORKBENCH, el módulo de cálculo utilizado para la simulación de estados de carga ha sido el de estructuras y sistemas por elementos finitos. Este módulo ha servido como precursor o plataforma para el cálculo en el modulo ACP (Ansys composite prepost), específico de materiales compuestos.

El módulo ACP está diseñado de forma específica para el cálculo de materiales compuestos por lo que presenta como principales ventajas frente al static structural la posibilidad de generar tejidos, orientar laminados y capas, aplicar criterios de fallo sobre láminas, etc.

Además de los módulos mencionados también se han realizado simulaciones de llenado de moldes mediante la mecánica de fluidos, para ello se ha empleado el CFD FLUENT, también de ANSYS, el cual trabaja con volúmenes finitos (MVF) en lugar de con elementos.

1.6 Estado del arte

1.6.1 Introducción

Antes de empezar un trabajo científico, siempre es conveniente conocer la relevancia y el estado de desarrollo en que se encuentra el tema, de cara a discernir las posibilidades de completar los objetivos planteados con éxito.

El presente trabajo centra su temática en temas sobre materiales compuestos principalmente de fibras naturales. Dentro de la temática descrita se genera información sobre diseño y fabricación de componentes y útiles, ensayos de caracterización mecánica, desarrollo de herramientas para la caracterización de ciertas propiedades, aproximación de un modelo matemático por elementos finitos, métodos de fabricación y aplicación de composites con fibras naturales en automoción.

Todos y cada uno de los apartados incluidos en la tesis tiene su relevancia dentro de la investigación, por esta razón ha resultado imprescindible emplear tiempo al estudio del estado de la técnica, considerándolo tiempo de calidad.

1.6.2 Fuentes de información

Gracias a los avances tecnológicos, hoy en día es más sencillo y rápido realizar búsquedas de información científica gracias a plataformas destinadas a tal fin que operan por internet buscando multitud de bases de datos de distintas instituciones.

A día de hoy, se podría decir que existe una base de datos documental que destaca por su volumen de registro y larga trayectoria, se trata del grupo integrado en "Science Citation Index (SCI)". Esta plataforma de almacenamiento empezó su andadura en 1960 con el fin de ofrecer una novedosa forma de localizar información bibliográfica. El SCI cubre tres ramas: ciencias sociales, humanidades y artes. En su base de datos se pueden encontrar todas las contribuciones publicadas en revistas técnicas, ya sean de ciencia, tecnología, ciencias sociales, humanidades o arte.

Toda esta información almacenada es suministrada por el Institute for Scientific Information (ISI) se encuentra al alcance de los investigadores a través de su servicio en línea "Web of Knowledge" el cual facilita la consulta en las siguientes plataformas de búsqueda y bases de datos bibliográficas:

- "Web of Science": Base de datos con información registrada desde 1945 que permite la búsqueda de artículos.
- "Journal Citation Report on the web": ofrece información sobre la calidad de las publicaciones.
- "ISI proceedings": Base de datos de simposios, conferencias, seminarios, coloquios, talleres y convenciones.
- "Current Contents Connect": Bibliografías y resúmenes.
- "Derwent Innovation Index": base internacional de registro de patentes.

A nivel de registro nacional, el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) puso en funcionamiento en 2001 la base de datos "ICYT" donde existen de encuentran registrados artículos editados en

España para revistas técnicas de ciencia y de tecnología. Además, en esta línea también existe una base de datos gestionada por el Ministerio de Ciencia Educación y Cultura en que se recoge toda la información sobre tesis doctorales defendidas en universidades nacionales desde 1976, denominada "Teseo".

Otra base de datos a tomar muy en cuenta es Scopus por su imparable crecimiento desde sus inicios en 2004. Se trata a día de hoy, según indican ellos mismos es su sitio web, de la mayor base de datos de citas y resúmenes de bibliografía revisada por pares: revistas científicas, libros y actas de conferencias, resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Esta plataforma de búsqueda incluye herramientas para facilitar el trabajo de análisis de datos ofreciendo resúmenes de los resultados de la investigación mundial en los campos de la ciencia, tecnología, artes y humanidades, ciencias sociales y medicina [18].

Respecto a las plataformas de búsqueda de patentes se podría destacar "Espacenet" por la cantidad de registros que contiene, más de 90 millones y por la facilidad de libre acceso.

Las búsquedas realizadas durante la redacción de este documento se iniciaron en la base de datos "Web of Science" de la plataforma "Web of Knowledge" donde se localizó gran cantidad de información relacionada con la temática del trabajo. No obstante, las actualizaciones de información siguientes se realizaron a partir de los resultados de la base de datos de Scopus hasta la finalización del documento. La razón principal es la facilidad y rapidez que muestra la plataforma en cuestión respecto a la acotación de búsquedas.

1.6.3 Fuentes de búsqueda

La información se ha recopilado a partir de búsquedas en artículos de revistas, resúmenes de conferencias, libros y tesis doctorales con la finalidad de trabajar un amplio espectro de fuentes de búsqueda.

El primer paso antes de comenzar las búsquedas consistió en definir las palabras clave que encaminasen los resultados hacia la temática de

nuestro trabajo de investigación. Este paso es muy importante puesto que los resultados de nuestra búsqueda dependen directamente de ello.

A priori, las búsquedas se han realizado de forma independiente utilizando cada una de las diferentes palabras. Posteriormente se ha ido acotando el rango de de resultados a partir de la incorporación de más de una palabra clave en la misma búsqueda mediante la utilización del operador booleano "and". De esta manera se ha conseguido reducir la cantidad de resultados aproximándolos al máximo a nuestros criterios de búsqueda.

Las búsquedas se han efectuado teniendo en cuenta la fecha de inicio y de fin de este trabajo, dividiéndose en dos periodos. El primer periodo de búsqueda comprende el rango de años acotado desde 2006 a 2016, tomado a modo de antecedentes. El segundo periodo comprende el rango de años de desarrollo de esta tesis doctoral, desde 2016 a 2020 y tiene como finalidad valorar la tendencia de estudio de la temática elegida.

En la tabla 1.8 pueden observarse las palabras clave para la búsqueda bibliográfica respecto de los principales temas de desarrollo de la tesis.

Tema	Palabras clave
Materiales compuestos de fibras naturales	Green composite green fiber Flax Jute composite Basalt composite Ramie composite Bambooo composite
Caracterización de materiales compuestos	assay composite traction composite Fatigue composite shear composite
Cálculo MEF en materiales compuestos	FEM composites finite elements composite
Aplicación en automóviles	Automobile

Tabla 1.8: Palabras clave de búsqueda según los principales temas de la tesis.

En la tabla 1.9 se muestran los resultados obtenidos en la búsqueda de las palabras clave de forma individual. A partir de análisis los datos obtenidos en los dos periodos de búsqueda se puede observar que el número de resultados encontrados muestra una tendencia creciente en los últimos años puesto que el primer periodo corresponde a 10 años mientras que el segundo a solo 4 años. Este patrón creciente se repite en todas las búsquedas de palabras clave realizadas por lo que se puede considerar que el tema de estudio resulta de interés en la actualidad.

Palabra	2006-2016	2016-2020
Green composite	6.197	8.202
Green fibers	8.787	5.947
flax	4.547	3.376
Jute composite	984	1.127
basalt composite	959	1.388
ramie composite	233	183
bamboo composite	1.156	1.142
Epoxy	49.105	33.867

Tabla 1.9: Resultados de la búsqueda de palabras clave relacionadas con materiales compuestos de fibras naturales.

La tabla 1.10 muestra los resultados obtenidos en la búsqueda de los artículos relacionados con la caracterización de materiales compuestos.

Palabra	2006-2016	2016-2020
assay composite	3.489	3.707
traction composite	885	724
fatigue composite	7.933	5.586
shear composite	22.416	17.645

Tabla 1.10: Resultados para la búsqueda de palabras clave relacionadas con búsqueda de caracterización materiales compuestos.

La tabla 1.11 muestra los resultados obtenidos en la búsqueda de los artículos relacionados con el cálculo por método de los elementos finitos de componentes de materiales compuestos.

Para finalizar las búsquedas de palabras clave individuales en la tabla 1.12 se muestra los datos obtenidos en la recerca de resultados respecto a las palabras clave del tema restante, automóviles.

Palabra	2006-2016	2016-2020
fem composite	4.371	3.044
finite elements composite	25.745	18.524

Tabla 1.11: Resultados de búsqueda MEF.

Palabra	2006-2016	2016-2020
Automóviles	85.749	50.712

Tabla 1.12: Resultados de búsqueda de automóviles.

Para acotar nuestros resultados se han incorporado palabras a las búsquedas realizadas mediante el operador booleano "and". Para estas búsquedas nos centramos en tres campos de búsqueda diferenciados dentro del mismo ámbito de estudio de esta tesis. El primer campo de búsqueda se condujo hacia el apartado de ensayos y caracterización de materiales compuestos con fibras naturales y modelos de elementos finitos. El segundo grupo se encaminó hacia resultados referidos a la aplicación de materiales compuestos con fibras naturales para la fabricación de partes de automóviles. En el tercer grupo se buscó relacionar cada tipo de fibra utilizado con las palabras clave referidas a la caracterización y la aplicación en automoción.

En la tabla 1.13 se muestra la cantidad de resultados encontrados para la acotación orientada hacia el apartado de ensayos y caracterización de materiales compuestos con fibras naturales.

De este primer grupo de búsqueda 1.13 es posible destacar por una mayor cantidad de entradas las palabras clave referidas a artículos relacionados con la tensión cortante y la fatiga en materiales compuestos.

En la tabla 1.14 se muestra la cantidad de resultados encontrados para la acotación orientada hacia el apartado de simulaciones por elementos finitos de materiales compuestos con fibras naturales aplicadas a componentes de automoción.

Palabra	2006/16	2016/20
Green fiber, assay, FEM	0	0
Green fiber, assay, finite elements	1	0
Green fiber, traction, FEM	2	0
Green fiber, traction, finite elements	4	0
Green fiber, fatigue, FEM	14	1
Green fiber, fatigue, finite elements	26	1
Green fiber, shear, FEM	15	2
Green fiber, shear, finite elements	40	15
Green composite, assay, FEM	0	0
Green composite, assay, finite elements	0	0
Green composite, traction, FEM	2	1
Green composite, traction, finite elements	5	3
Green composite, fatigue, FEM	17	1
Green composite, fatigue, finite elements	27	3
Green composite, shear, FEM	22	15
Green composite, shear, finite elements	69	51

Tabla 1.13: Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.

- (TITLE-ABS-KEY(green composite)) AND (((shear)) AND (finite elements))

Palabra	2006/16	2016/20
Green fiber, automobile	68	60
Green fiber, automobile, FEM	1	0
Green fiber, automobile, Finite elements	10	0
Green fiber, automobile, Finite elements, epoxy	2	0
green composite, automobile	70	82
green composite, automobile, FEM	3	0
green composite, automobile Finite elements	16	0
green composite, automobile, Finite elements, epoxy	2	0

Tabla 1.14: Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.

De la búsqueda de resultados centrada en la aplicación de materiales compuestos de fibras naturales y cálculos MEF, sobre partes de automóviles cabe destacar y centrarse en el estudio de los artículos

encontrados con la secuencia de búsqueda que más se ajusta a lo relacionado en este trabajo:

- (TITLE-ABS-KEY(green fiber) AND (((automobile)) AND (finite elements)) AND (epoxy)

- TITLE-ABS-KEY(green composite) AND (((automobile)) AND (finite elements)) AND (epoxy)

Puesto que se han encontrado las mismas entradas haciendo referencia a los mismos artículos.

Se encuentra necesario también el estudio de las entradas publicadas en 2016 referidas a:

- (TITLE-ABS-KEY(green composite) AND PUBYEAR > 2005) AND (((automobile)) AND (finite elements))

En la tabla 1.15 se muestra la cantidad de resultados encontrados para la acotación orientada hacia ensayos de caracterización y aplicaciones de automoción para las fibras naturales trabajadas en esta tesis.

De la búsqueda de resultados centrada en el tipo de material concreto de estudio destacan sobre la relación con ensayos la fibra de bambú con 148 entradas en el periodo 2006-2016 y 132 entradas en el periodo 2016-2020. En cuanto a estudios de aplicaciones en automóviles el yute ha sido el más trabajado en el último periodo con 70 publicaciones entre 2016 y 2020.

1.6.4 Revisión bibliográfica

De la cantidad de entradas mencionadas, una vez analizadas en mayor profundidad solo unas cuantas se adaptan de manera significativa a la temática de este trabajo. A continuación se detallan resumidos los artículos más relevantes divididos en función de los dos periodos de estudio, anteriores al inicio de esta tesis y contemporáneos con la investigación.

Artículos relevantes del periodo anterior al inicio de esta tesis doctoral:

Palabra	2006-2016	2016-2020
Flax, assay	105	110
Flax, traction	10	3
Flax, fatigue	32	59
Flax, shear	135	138
Flax, automobile	60	44
Jute, assay	27	12
Jute, traction	3	1
Jute, fatigue	20	35
Jute, shear	92	105
Jute, automobile	54	70
Basalt, assay	20	14
Basalt, traction	7	5
Basalt, fatigue	71	98
Basalt, shear	568	585
Basalt, automobile	14	30
Ramie, assay	15	6
Ramie, traction	1	1
Ramie, fatigue	2	5
Ramie, shear	41	15
Ramie, automobile	14	8
Bamboo, assay	148	132
Bamboo, traction	7	4
Bamboo, fatigue	49	31
Bamboo, shear	245	229
Bamboo, automobile	28	22

Tabla 1.15: Resultados de búsqueda en función del tipo de fibra empleada, tras adhesión de palabras clave.

- Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermo-set polymer composites [19].

Este artículo centra su temática en el procesado y caracterización de fibras naturales de celulosa, mostrando que este tipo de materiales naturales están empezando a aplicarse en distintos campos como la automoción o la biomedicina entre otros. Este trabajo de revisión aporta un análisis sobre el campo de las fibras naturales de celulosa, siendo su objetivo mostrar la evolución de sus aplicaciones.

Este artículo, pese a no relacionarse con la tesis directamente en cuanto a un material concreto, es un trabajo que muestra como semejanza la aplicabilidad de un material natural en usos actuales.

- Hybrid carbon-glass fiber composite for the door electric car application [20].

Este artículo realiza un estudio a partir de propiedades mecánicas de un composite de fibra de vidrio y fibra de carbono aplicado a la fabricación de una puerta de un coche eléctrico con la finalidad de reducir el coste de fabricación manteniendo la resistencia frente a impactos. En este trabajo se realizaron los estudios mediante simulaciones por elementos finitos actuando sobre la variación de carga de impacto y el espesor del laminado, tomando como propiedades de entrada los resultados de los ensayos empíricos. Se observó que al disminuir la cantidad de fibra de carbono en favor de fibra de vidrio el coeficiente de seguridad era menor. Manteniendo valores de seguridad aceptables, utilizando espesores de 4-5mm, se producía un aumento de densidad del laminado, pero aun así los costes de material, eran menores.

Este artículo guarda relación con nuestro trabajo en cuanto a la realización de simulaciones MEF aplicadas a componentes de automoción. aunque en este caso para la aplicación de fibras de uso más generalizado.

- Light-weighting design of eco-power automobile chassis made from green composite and its topology optimization in FEA.[21]

Design of an eco-power automobile body made from green composite and its structural optimization in FEA.[22]

Los dos trabajos mencionados hacen referencia a un mismo estudio con ligeras variaciones. El artículo en cuestión estudia la fabricación de un chasis de un vehículo ecológico utilizando un material compuesto de fibra de ramie con una matriz de partículas de polipropileno moldeado por termo-compresión. Las propiedades mecánicas del material se ensayaron a tracción (MTS-810) en

las direcciones principales por separado de manera uniaxial. A partir de los resultados del ensayo se dimensionó la geometría del bastidor en el software MEF, respecto a la cantidad de capas de fibra y orientación del laminado. Este artículo guarda relación con nuestro trabajo en cuanto al dimensionado de un componente de automoción con un composite de fibra natural a partir de la obtención de las características mecánicas resistentes del ensayo de tracción y del posterior estudio realizado por elementos finitos.

Artículos relevantes del periodo contemporaneo al desarrollo de esta tesis doctoral:

- A comprehensive review on light weight kenaf fiber for automobiles [23].

Este documento ofrece una descripción general del desarrollo de compuestos basados en kenaf considerando varios factores como, secuencia de apilamiento (capa por capa), relación de volumen de fibras a matriz, orientación angular de fibras y modificación química de la superficie de la fibra para mejorar la adhesión de la fibra a la matriz, etc., las propiedades mecánicas y diversas aplicaciones del compuesto híbrido de kenaf. También se discuten varios temas relacionados con la mejora de las propiedades del compuesto para obtener un compuesto híbrido sostenible aplicable a componentes de automoción.

- A FEA Model to Predict Mechanical Properties of Laminated Bamboo Composites[24].

En este estudio, se analizó un modelo de análisis de elementos finitos (FEA) con el software ABAQUS FEA. La simulación se realizó para comparar los resultados de la simulación con los resultados experimentales de los compuestos de bambú laminado en términos de respuesta a la tracción. Se obtuvieron los valores de tensión máxima y mínima para compuestos hipotéticos de bambú laminado en capas y se compararon con los resultados experimentales.

La carga de falla, la resistencia a la tracción, el comportamiento elástico y otras propiedades de las placas laminadas bajo carga axial se determinan a partir de las curvas de tensión-deformación. La simulación se realiza con el material, teniendo ángulos de orientación de 0° para todas las capas. La simulación se llevó a cabo con éxito y los resultados obtenidos de la simulación se comparan con los resultados obtenidos del experimental.

- A Strong, Tough, and Scalable Structural Material from Fast-Growing Bamboo[25].

Este trabajo demuestra que es posible el desarrollo de una producción potencial a gran escala de materiales estructurales sostenibles, ligeros y fuertes a partir de fibra de bambú, por su abundancia y rápido crecimiento.

2

Objetivos

2.1 Objetivos

El objetivo de la presente tesis doctoral es el estudio de diversos tejidos de fibras naturales sobre una matriz de resina Epoxi con la finalidad de determinar su aptitud frente a aplicaciones en componentes de automoción.

A partir de los resultados de los ensayos sobre los distintos tejidos se podrá ajustar un modelo de simulación MEF uniaxial y elegir el material más idóneo (de entre los ensayados) para fabricar un componente estructural para una motocicleta, posteriormente ensayarlo a fatiga y comparar los resultados empíricos con los resultados obtenidos con el software de elementos para determinar su aplicabilidad en este sector, así como la bondad del método utilizado.

A continuación se muestra un cuadro resumen de objetivos:

- Caracterizar la propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos de fibras naturales con matriz epoxídica.
- Aumentar los conocimientos sobre distintos tipos de fibras, aportando datos sobre diferencias, ventajas e inconvenientes de cada una.
- Establecer una guía de procedimiento para la fabricación de materiales compuestos por el método de infusión, definiendo las variables que interfieren en la fabricación.
- Realizar ensayos de permeabilidad para generar un modelo por elementos finitos del proceso de infusión que permita optimizar el llenado del molde a partir del control de la línea de avance de la resina y de las presiones.
- Fabricar probetas para realizar los ensayos de caracterización mecánica a partir de placas de diferentes materiales compuestos con fibras naturales fabricados por método de infusión de resina.
- Realizar los ensayos de caracterización mecánica para obtener las principales propiedades mecánicas de los materiales. Fabricar útiles destinados a tal fin.
- Realizar un modelo computerizado del ensayo de tracción utilizando un software de elementos finitos con la finalidad de comparar los resultados y permitir el correcto diseño de componentes, tomando como datos de ajuste los resultados extraídos de ensayos en que la tensión esté orientada en la dirección de la fibra y a partir de ahí ajustar el modelo sobre los ensayos con los tejidos $\pm 45^\circ$.
- Diseñar y fabricar una máquina de ensayos de fatiga para composites. Posteriormente establecer una guía de procedimiento para la realización de los ensayos de fatiga en dicha máquina.
- Caracterizar a fatiga laminados seleccionados con el fin de elegir el más apropiado para la aplicación.

- Ensayar el material seleccionado a cortadura Iosipescu y comparar los valores obtenidos empíricamente con los obtenidos matemáticamente.
- Ensayar el material seleccionado a tracción respecto a su eje z a partir de un laminado de gran espesor.
- Diseñar un componente de tipo auxiliar en automoción y fabricarlo en función de los datos obtenidos para una determinada aplicación. Fabricar moldes y componentes auxiliares.
- Ensayar el prototipo sobre el banco de fatiga a diferentes niveles de carga y comparar los resultados con los obtenidos mediante el software de elementos finitos.
- Generar unas conclusiones sobre lo realizado en el proyecto a partir del análisis de los resultados.

Estos son algunos de los principales objetivos planteados para el desarrollo de la tesis. En la presente memoria se plasma de forma resumida lo que podría aportarse en una publicación científica futura, puesto que de cada apartado desarrollado, el trabajo realizado ha sido en muchos casos mayor a lo descrito por la cantidad de útiles mecánicos, moldes y elementos auxiliares que ha sido necesario diseñar y fabricar. Cada uno de los apartados podría ampliarse y extenderse hasta formar por sí solo una investigación individual focalizada en un tema concreto.

2.2 Metodología empleada

Los ensayos de caracterización se han realizado utilizando equipos calibrados para tal fin y siguiendo la normativa específica en cada caso. Existen algunos apartados para los cuales ha sido necesario desarrollar componentes auxiliares, soportes, moldes e incluso una máquina completa de ensayos de fatiga con la finalidad de dar respuesta a las distintas necesidades que han ido surgiendo.

A grandes rasgos, la metodología utilizada ha sido:

1. Revisión bibliográfica y Estado del Arte. En esta fase se han empleado herramientas para la búsqueda de artículos, trabajos técnicos, patentes y demás documentos ligados a la temática del trabajo. Se ha utilizado la Web of Science y Scopus como plataformas para el estudio de la bibliografía relevante para la ejecución del trabajo, así como bases de datos de patentes como Derwent Innovation Index o spacenet.
2. Fabricación y caracterización de los distintos laminados definidos previamente. Una vez definidos los tejidos y la resina a emplear se ha procedido a llevar a cabo la fabricación de probetas mediante sistemas de procesado por infusión de resina. A partir de los laminados se han obtenido probetas normalizadas cortadas por router CNC para la caracterización: mecánica (tracción, compresión, flexión, dureza, impacto, fatiga, cortadura, tribología, permeabilidad, etc.) y microestructural (microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, microscopía de fuerza atómica).
3. Caracterización inicial de los materiales. Previo al desarrollo del proyecto, se ha procedido a llevar a cabo una completa caracterización de los materiales de partida, resinas y fibras a través de la determinación de propiedades mecánicas.
4. Definición de combinaciones de fibras, orientaciones y disposición de las mismas para la mejora de las propiedades mecánicas. Teniendo clara la aplicación a que se pretende destinar el material final, se han planteado distintas combinaciones de fibras, orientaciones, resinas y espesores para el laminado.
5. Cálculo y simulación con software de elementos finitos. Se ha realizado un trabajo de diseño de componentes y moldes con software de modelado 3D, y posteriormente, con los datos obtenidos en la caracterización mecánica (Módulos de Young, Poisson, etc.) se ha generado la simulación en el software de elementos finitos ANSYS ACP. Se han llevado a cabo cálculos y simulaciones para obtener los materiales con mejor balance de propiedades. Se

han simulado los esfuerzos a que estará sometido el componente determinando las solicitaciones a lo largo de toda la geometría del mismo mediante elementos finitos. Además se han simulado los ensayos de tracción para ajustar el modelo a modo de retroalimentación. Por otro lado, se han realizado simulaciones del llenado del molde a partir de los resultados de los ensayos de permeabilidad.

6. Fabricación de útiles, moldes y prototipos. Una vez optimizada la composición de los laminados y caracterizado su comportamiento mecánico, se ha procedido a la fabricación de los distintos moldes y componentes auxiliares necesarios para obtener un prototipo completo. Posteriormente se ha fabricado el prototipo mediante el proceso de infusión de resina.
7. Ensayos de fatiga. Puesto que el componente se encontrará sometido a esfuerzos de fatiga, se ha ensayado en material elegido para obtener las gráficas de tensión-número de ciclos. Posteriormente se ha ensayado el componente de forma empírica a diferentes niveles de carga, permitiendo realizar la comparación de los resultados de la simulación con los del ensayo.
8. Análisis y síntesis de resultados. Redacción del documento. A lo largo de cada una de las fases se ha pretendido llevar a cabo tareas de análisis de los resultados obtenidos experimentalmente así como acciones de síntesis de los resultados para validar las hipótesis de partida. De manera simultánea se han redactando los trabajos ligados a cada una de las fases. De esta manera, ha sido posible identificar rápidamente las desviaciones en relación a los planteamientos iniciales y ha sido posible definir las medidas correctoras oportunas.
9. Difusión de resultados. Una tarea de gran relevancia en el marco del trabajo de investigación es la divulgación de los resultados obtenidos. Para ello, se ha pretendido llevar a cabo diferentes acciones de difusión que componen la participación en congresos internacionales de temática ligada al marco de la tesis, así como

la publicación de los resultados en revistas listadas en el JCR que aseguran procesos de revisión por pares de doble ciego.

Para el correcto desarrollo del trabajo se han empleado las últimas herramientas CAD-CAM-CAE para obtener los mejores resultados en cuanto a diseño, cálculo y fabricación, habiendo sido necesaria la re-adaptación a nuevas versiones de un mismo programa.

Los modelos geométricos han sido diseñados en 3D utilizando SolidWorks® y en algunos casos modificados mediante Design modeler de Ansys. Los modelos o simulaciones por elementos finitos se han realizado con los últimos programas específicos al alcance. Se ha empleado el módulo específico ACP (Ansys Composite Prepost) de Ansys Workbench para las simulaciones de los ensayos de tracción uniaxial y para el ensayo multiaxial del prototipo. Por otro lado se ha empleado el módulo CFD Fluent para la simulación de la infusión por método de volúmenes finitos (MVF). El tratamiento de los datos de fatiga se ha realizado con ayuda del software Matlab, en un inicio con scripts programados para tal fin y finalmente con una aplicación específica destinada a los ensayos de fatiga RAINFLOW. Estos son solo algunos de los programas más relevantes utilizados durante la presente tesis doctoral, pero corresponden a una pequeña parte de la totalidad de los utilizados para este trabajo.

2.3 Planificación de la investigación

La planificación del proyecto resulta un punto clave para el correcto desarrollo de cualquier trabajo de investigación. El hecho de disponer de unas metas establecidas de forma temporalmente ordenada ayuda al correcto desarrollo de la investigación y facilita una mejor distribución del tiempo dedicado a cada fase, aunque bien es cierto que en este tipo de trabajos es complicado cumplir un cronograma el pie de la letra puesto que durante el desarrollo de los distintos hitos se van añadiendo sub-temas que no estaban previstos, convirtiendo en cronograma establecido en un calendario vivo en el que van apare-

ciendo y desapareciendo apartados en función de ciertos resultados y decisiones.

En un primer momento, la planificación se estableció para un periodo de tres años según la tabla de la figura 2.1.

	Primer año	Segundo año	Tercer año
Definición de los objetivos	6M		
Revisión bibliográfica	6M		
Caracterización de materiales		9M	
Modelos matemáticos		9M	
Fabricación de prototipo			9M
Análisis de datos y redacción			12M
Difusión			6M

Figura 2.1: Planificación temporal

Dentro de esta planificación podemos distinguir claramente tres fases de la tesis:

- Fase teórica: Compuesta por un estudio del estado del arte basado en una búsqueda bibliográfica y análisis de datos.
- Fase práctica: Centrada en la fabricación de los laminados por infusión de resina, corte CNC de las probetas, caracterización mecánica y fabricación del prototipo.
- Experimental: obtención de modelos de elementos finitos y análisis de los resultados por comparación con los ensayos empíricos.

Durante el desarrollo de estas primeras etapas se han ido alternando los trabajos descritos, siendo necesario regresar en ciertos momentos a fases ya desarrolladas con la finalidad de ampliarlas, mejorarlas o simplemente mantenerlas actualizadas.

2.4 Desviaciones en la planificación

Por tratarse de una investigación de la que no puede predecirse un resultado certero de antemano, suele ocurrir que los cronogramas temporales establecidos no se cumplan según lo esperado por la aparición de dificultades que ralentizan el curso de los trabajos por causas ajenas a la voluntad del investigador o por el hecho de que atendiendo a los

resultados de cada fase puede resultar necesario dedicar más tiempo a cuestiones que a priori parecían meramente banales.

Durante el primer año de investigación se cumplió con el 90% de los objetivos marcados, puesto que no fue posible alcanzar la totalidad de los previstos sobre el apartado de caracterización debido a que en el transcurso de la tesis surgieron nuevos temas a desarrollar, ampliando los trabajos de caracterización.

Durante la segunda anualidad se completó prácticamente la totalidad de los objetivos marcados en la planificación inicial, pero esto ya no fue suficiente, puesto que a pesar de haber completado los trabajos previstos de caracterización, diseño y fabricación de moldes, no se tenía nada completado, pues habían surgido nuevas necesidades e inquietudes referentes a cada fase que hacían necesaria su ampliación.

En la tercera anualidad fue necesario pedir una prórroga y generar una nueva planificación ajustando los tiempos a las nuevas tareas según se indica en la tabla de la figura 2.2. De este periodo se podría destacar el hecho de haber completado el diseño, fabricación y montaje de una máquina para la caracterización de las propiedades a fatiga de los laminados, puesto que se trata de unos estudios de gran relevancia en el desarrollo de la tesis doctoral y no se tenía disponibilidad de equipamiento específico para estudios a fatiga de composites.

Se decidió implantar en la máquina un sistema de mordazas en el que se estudiaran cuatro probetas al mismo tiempo. El equipo está controlado por un Arduino y la adquisición de datos se realiza mediante el software Catman y un equipo HBM. La máquina está accionada por un equipo oleo-hidráulico con ventilación forzada para aportar movimiento al pistón lineal, siendo capaz de trabajar a más de 5 Hz.

En un primer momento se completaron las pruebas y ajustes de la máquina de fatiga en cuanto al equipo, protocolo de uso, programa de control y adquisición de datos. Pero cabe resaltar que este apartado se siguió desarrollando durante todo el proceso de realización de ensayos hasta la finalización de la tesis doctoral.

	Anualidad 2017				Anualidad 2018			
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
FASE 1. - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE LAS NUEVAS ACTIVIDADES.	■							
FASE 2. - MONTAJE Y AJUSTE DE LA MAQUINA DE FATIGA.		■						
FASE 3. - CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FATIGA DE LOS DISTINTOS LAMINADOS			■	■				
FASE 4. - SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DEL PROTOTIPO.				■	■			
FASE 5. - DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL COMPOSITE FINAL					■			
FASE 6. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO					■	■		
FASE 7. ENSAYOS Y PRUEBAS DE CAMPO. OBTENCIÓN DE CONCLUSIONES						■	■	
FASE 8. ANÁLISIS DE DATOS, DIFUSIÓN Y REDACCIÓN.						■	■	■

Figura 2.2: Planificación temporal: Prorroga

En la cuarta anualidad se completaron gran parte de los hitos previstos. No obstante, surgieron problemas en el proceso de fabricación de los moldes, quedando inservibles los prototipos fabricados por contener defectos. Los moldes se desecharon por contener aristas y geometrías demasiado complejas. Además, en el transcurso de la investigación surgió la necesidad de desarrollar nuevos referentes a la caracterización para los que se tuvo que fabricar distintas herramientas y útiles (ensayo de compresión ASTM D3410 y ensayo de cortadura ASTM D5379), lo cual supuso una merma de tiempo importante.

En la quinta anualidad, la dedicación al doctorado fue a tiempo parcial por la necesidad de reincorporación al mercado laboral para obtener una fuente de ingresos. Teniendo en cuenta esta nueva situación, se cumplió con los objetivos marcados en la planificación establecida en la tabla 2.3. Destacaría que se completó la fase de reparación del equipo de adquisición de datos de la máquina de ensayos de fatiga y se le instaló como mejora un sensor de desplazamiento de tipo láser, no obstante, no se pudieron completar los ensayos por un fallo en el pistón hidráulico.

Finalmente, en esta última anualidad a tiempo parcial, se ha completado con éxito el resto de tareas, cerrando así la tesis doctoral.

	2018		2019			
	T3	T4	T1	T2	T3	T4
FASE 1. REPARACION DE LA AVERIA DEL EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.						
FASE 2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FATIGA DE LOS LAMINADOS RESTANTES.						
FASE 3. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS.						
FASE 4. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL COMPOSITE FINAL.						
FASE 5. REDISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO Y MOLDES.						
FASE 6. ENSAYOS Y PRUEBAS DE CAMPO.						
FASE 7. ANÁLISIS DE DATOS, DIFUSIÓN Y REDACCIÓN.						

Figura 2.3: Planificación temporal: Tiempo parcial

2.5 Punto de partida de la investigación

La investigación parte de un proyecto realizado como trabajo final de carrera de los estudios de Ingeniería de materiales, en el cual se englobaba el diseño y la fabricación de un chasis en fibra de carbono para una motocicleta de competición.

Como premisas se partía del deseo de fabricar un vehículo de coste reducido y altas prestaciones. Lo cual dio lugar a un proyecto centrado en el sector de los materiales compuestos, profundizando en temas de cálculo, diseño y procesos de fabricación.

En el diseño del bastidor se trabajaron distintos parámetros que afectarían al manejo del vehículo como son el peso, ángulo de dirección, avance y distancia entre ejes, entre otros, conocimientos específicos del diseño de motocicletas, pero también, y como parte principal, este trabajo aportó grandes conocimientos y experiencia en cuanto al diseño de componentes en materiales compuestos, diseño de moldes, vejigas, cámaras atemperadas, útiles de conformado, procesos de fabricación, etc.

Además, todo ello aportó una formación práctica extra, puesto que se completo la fabricación del bastidor y para ello fue necesario desarrollar útiles y herramientas partiendo de los elementos que se disponía (vejigas hechas con cámaras de neumáticos, moldes en madera DM, un horno de curado casero, etc) para que se cumpliese con la premisa de tener un bajo coste.

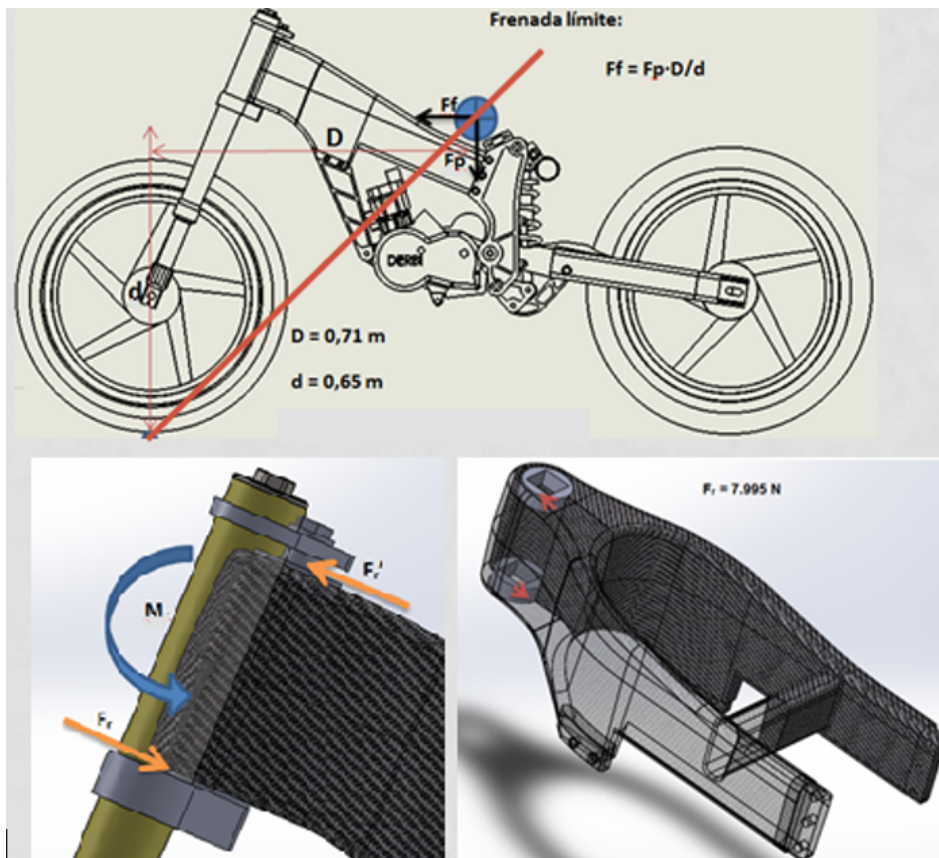


Figura 2.4: Proceso de diseño y optimización del bastidor.



Figura 2.5: Proceso de fabricación.

Con los medios al alcance, se completó con éxito el proyecto, cumpliendo las expectativas y dando pie a esta nueva investigación.

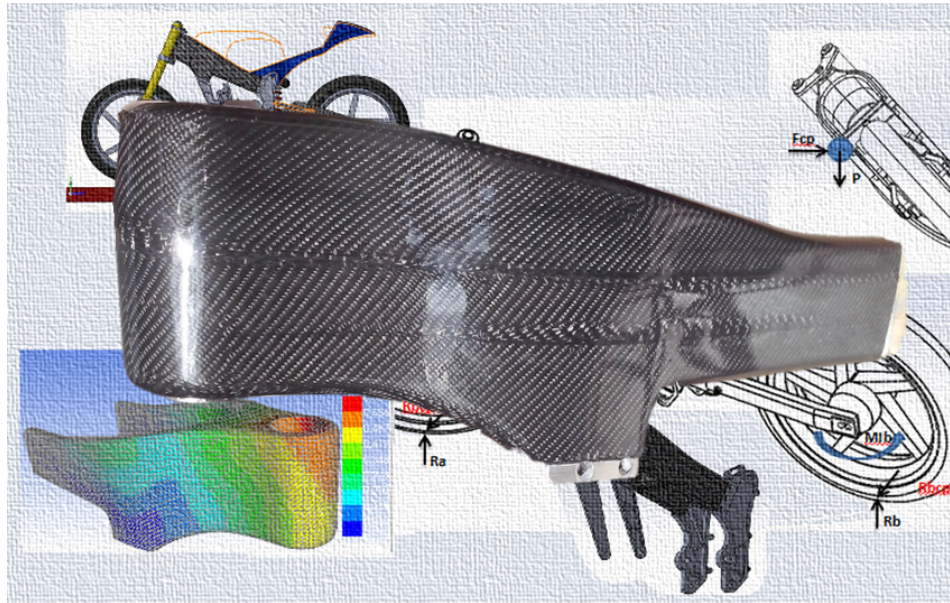


Figura 2.6: Bastidor terminado.



Figura 2.7: Bastidor terminado.

3

Materiales y métodos

En este capítulo se describe el proceso seguido para realizar la obtención de las probetas y prototipos, todos los ensayos realizados y los modelos teóricos de elementos finitos.

3.1 Ensayo de permeabilidad

Cada día existe mayor competitividad entre las empresas por fabricar componentes con el mejor acabado estético y calidad al menor coste posible. Para fabricar componentes con los niveles de calidad requeridos por los consumidores, cumpliendo las normas medioambientales y con una producción eficiente resulta imprescindible controlar todos los parámetros que intervienen en el proceso de fabricación [26]. El objetivo de este apartado es asegurar la correcta obtención de las distintas probetas y prototipos frente a defectos de fabricación debidos a parámetros de proceso a través del desarrollo de un modelo informatizado del proceso de llenado del molde.

Día tras día las empresas implantan nuevas medidas enfocadas a reducir costes de fabricación en sus líneas de proceso a partir del control de la materia prima y los diversos parámetros relacionados con la transformación de los productos. Se pretende definir con exactitud todo el proceso de fabricación, reduciendo la probabilidad de defectos o fallos no previstos. Es por ello que existe un gran interés por parte de investigadores y técnicos para optimizar los procesos de fabricación, automatizándolos y reduciendo al máximo la tasa de defectos.

La infusión de resina con bolsa de vacío es un método de fabricación en el cual la resina es aportada al conjunto por una canalización utilizando la diferencia de presión generada mediante una bomba de vacío conectada al molde. Este proceso de fabricación permite que el porcentaje de resina sea el estrictamente necesario para que el compuesto de fibras se encuentre en su límite de saturación.

Esta técnica presenta ventajas frente a otros métodos de fabricación de componentes con materiales compuestos aunque su implementación a nivel industrial resulta más compleja que otras técnicas. Para obtener buenos resultados es necesario controlar los parámetros de llenado del molde para minimizar la cantidad de defectos y reducir los tiempos de fabricación. Para ello deben estar bien definidas variables como el lugar, número y tipo de entradas de resina, lugar y número de salidas de aire o presiones de trabajo entre otros factores. El método es ampliamente utilizado en la fabricación de productos de pocas tiradas o gran tamaño, de los cuales se podría destacar la fabricación de embarcaciones medianas de recreo y partes de palas eólicas, puesto que al tratarse de infusiones sobre grandes áreas se vuelve más necesario el control de los parámetros de fabricación.

Normalmente las empresas que fabrican productos de materiales compuestos con estas técnicas recurren a asesores externos con experiencia empírica para el diseño de moldes y para la definición de las condiciones de proceso. Realizar la simulación del proceso de entrada y difusión de la resina sobre la geometría real del molde supone una ventaja sustancial en el proceso de fabricación que incide en una disminución de

costes de proceso por la reducción en el trabajo de desarrollo (pruebas empíricas) y de producto por el ahorro en materiales. Todo ello da como resultado una pieza más optimizada y con una tasa muy baja de defectos de llenado ligados a parámetros de control.

Para poder generar la simulación con el software de CAE es necesario disponer de las propiedades que definen como será el avance de la resina sobre el tejido. Aunque existen bases de datos de dónde encontrar estos valores, respecto a los materiales de estudio resultan muy limitadas. Por otro lado, los valores pueden ser distintos de un caso a otro en función del tipo de entramado del tejido, tipo de peel-ply o tipo de configuración, por lo que suele ser más acertado calcular los valores de estas propiedades en función de cada caso determinado.

En el caso concreto de fabricación que se describe se han utilizado dos láminas de tejido sarga de basalto, una lámina de peel ply y una de malla de difusión. Puesto que el flujo de resina pasa por todas las capas, estas definirán unos valores de porosidad y permeabilidad concretos del conjunto y en función de la oposición al avance de la resina que generen. Por razón es importante realizar una infusión radial y calcular los parámetros bajo condiciones reales. A partir de estos datos es posible simular el ensayo y aproximar los resultados del software a los valores empíricos para obtener un modelo más optimizado.

3.1.1 Metodología

Como ya se ha comentado, para simular el llenado del molde mediante un software de CAE es necesario disponer previamente de las variables del proceso. Por esta razón, el primer paso consiste en controlar y monitorizar una infusión radial con idénticos materiales a los de la fabricación de la pieza final, para obtener los valores de las presiones(entradas-salida) y velocidades de avance de flujo registradas en todo momento.

En bibliografía es posible encontrar datos de permeabilidad de estudios de distintos autores, aunque para generar unas simulaciones que

se ajusten a la realidad, resulta imprescindible utilizar valores concretos de nuestro caso. Por esta razón, a partir de los datos extraídos del vídeo de la infusión radial fue posible calcular el valor de la permeabilidad y generar una simulación MVF.

Al diseñar una infusión de resina, la consideración más importante es la de generar un sistema que reduzca al mínimo la posibilidad de que aparezcan zonas de aire atrapado, dando lugar a áreas no impregnadas[27].

Para lograr unas óptimas propiedades mecánicas y buen acabado, es indispensable garantizar el llenado del molde con una adecuada impregnación de la fibra, que solo es posible a través de un proceso correctamente diseñado. El tiempo que toma la resina en llenar completamente el molde está influenciado por la viscosidad, la permeabilidad del refuerzo, la presión de inyección, el número y localizaciones de los puntos de inyección y del tamaño de la pieza a fabricar. Estableciendo estos parámetros de forma adecuada a una herramienta de simulación por elementos finitos, es posible conocer el comportamiento de la infusión antes de realizarla, de lo contrario sería necesario realizar el ajuste por el método prueba y error, con el coste que ello implica.

Durante el proceso de difusión, la resina siempre avanza por la trayectoria con menor resistencia, por esta razón resulta imprescindible asegurar la inexistencia de canales entre el refuerzo y el molde que permitirían el avance rápido de la resina, fenómeno conocido como "race track", por el cual aparecen zonas donde el aire queda atrapado dejando zonas no impregnadas.[28] Por otro lado, es conveniente distribuir el material de forma que se trabaje con una permeabilidad homogénea en toda la pieza para asegurar un avance lineal. No obstante puede resultar beneficioso en algunos casos con moldes complejos posicionar zonas con mayor permeabilidad que el promedio para regular la velocidad de avance en ese punto concreto.

3.1.2 Ensayo de permeabilidad

La obtención de los valores de permeabilidad en el plano se pueden desarrollar a partir de dos métodos de ensayo, rectilíneo y radial, según se indican en la figura 3.1.

El ensayo rectilíneo se genera sobre un conjunto de capas normalmente distribuidas de forma rectangular en el que se introduce el fluido por una abertura en una de las aristas, haciéndolo avanzar por diferencia de presión hacia la arista del extremo opuesto. La principal ventaja de esta técnica es la simplicidad de la configuración y la facilidad con que se calculan los resultados, aunque como inconveniente presenta facilidad de fenómenos de *race tracking* en los extremos laterales del laminado y además solo permite caracterizar los valores en una dirección por ensayo realizado[28].

Para la prueba radial se utilizan tejidos cortados en forma circular. En este ensayo se posiciona la toma de entrada de resina en el centro de la zona circular para que el flujo sea divergente hacia la periferia, donde se encuentra la zona de extracción perimetralmente contigua al borde final de los tejidos. Como ventajas, este método permite simultáneamente obtener valores de permeabilidad de las dos direcciones principales y además, por su distribución de flujo radial se disminuye la posibilidad de que aparezcan fenómenos de *race tracking* [28].

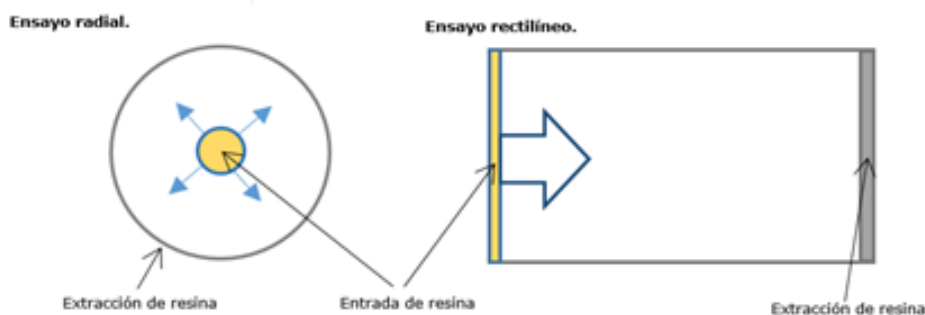


Figura 3.1: Tipos de ensayos de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad realizado 3.2 ha consistido en generar una infusión de resina con bolsa de vacío y monitorizar los valores de pre-



Figura 3.2: Ensayo radial de permeabilidad

sión y de avance de resina. Para realizar el ensayo mediante la técnica de infusión radial según la figura 3.3.

El molde debe ser plano y la toma de entrada de resina ha de posicionarse de manera que el avance del fluido se extienda del centro hacia la periferia circular. Para lograr este avance, posicionamos un tubo helicoidal en el perímetro del molde, separado un radio constante de la toma de entrada y en contacto con el tejido pelable que se encontraba dispuesto sobre el laminado. Sobre el peel ply se posicionó la malla de difusión y se cubrió todo con una bolsa de vacío.

El conjunto ha de ser hermético, por lo que el perímetro exterior fue sellado con masilla de cierre. Además de monitorizar el avance de la resina, se registró la presión a la entrada y salida del molde.

3.1.3 Cálculo de la permeabilidad

La permeabilidad (k) puede definirse como la resistencia que ofrece un medio poroso a ser atravesado por un fluido, es decir, en nuestro caso la resistencia que ofrece el conjunto de tejidos y elementos auxiliares al avance de la resina epoxi. [29]

Se considera que un tejido tiene una alta permeabilidad cuando el fluido avanza rápido a su través, generando por tanto poca resistencia.

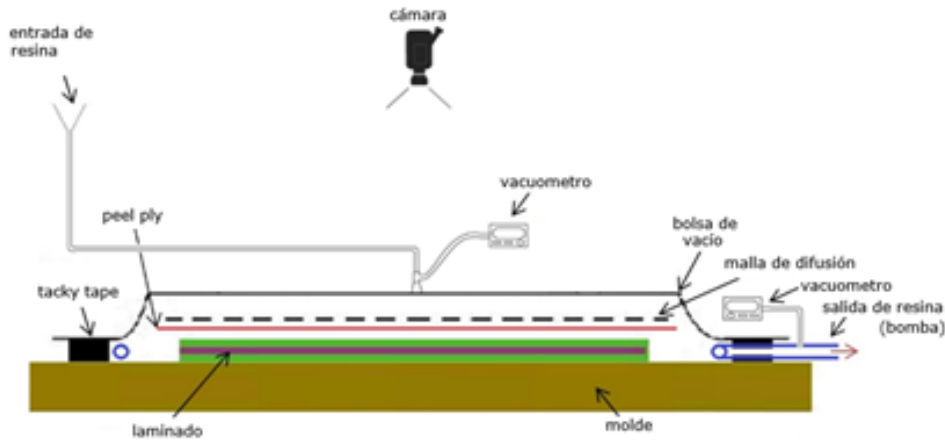


Figura 3.3: Proceso de ensayo radial de permeabilidad

El flujo de fluidos en medios porosos es un factor de gran relevancia, ampliamente investigado. Existe gran cantidad de aplicaciones en las que resulta imprescindible su estudio, sirviendo como ejemplo para estudios de elementos filtrantes y de depuración de fluidos, extracción de petróleo o optimización de equipos de generación de expresos.

La obtención de los valores de permeabilidad nos permite predecir el comportamiento de la resina sobre el molde, ayudándonos a definir mejor los puntos de entrada y salida, así como las presiones en geometrías complejas.

La velocidad de avance de la resina en el ensayo realizado se expresa mediante la ecuación de Darcy para flujo radial, sobre la cual se aplican las convenientes condiciones de contorno para dar lugar a la ecuación Ecuación 3.1, definida para el cálculo de la permeabilidad.[30]

$$k = \left\{ r_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\mu X}{4 \Delta P} \quad (3.1)$$

donde:

- k = Permeabilidad del medio del medio para un instante concreto
- r_f = Radio final de avance
- r_0 = Radio de inicio
- t = Tiempo hasta r_f
- μ = Viscosidad de la resina

X = Porosidad del medio
 ΔP = Diferencia de presión

A partir de la Ecuación 3.1 es posible el cálculo de la permeabilidad para un instante de tiempo puntual. Para obtener un valor constante de la permeabilidad en el caso concreto de dos capas de fibra de basalto, el peel ply y la malla de difusión es necesario calcular la pendiente de la línea de tendencia generada por varios puntos definidos a distintos instantes de tiempo (f_{iso}), a partir de la formula de Darcy para un instante de tiempo concreto Ecuación 3.2.[30]

$$K = f_{iso} \frac{\mu X}{4\Delta P} \quad (3.2)$$

donde:

K = Permeabilidad del medio
 f_{iso} = Valor de la pendiente
 μ = Viscosidad de la resina
 X = Porosidad del medio
 ΔP = Diferencia de presión

Otro parámetro importante a considerar es la porosidad del material. Esta puede definirse como la fracción de volumen vacío de un material sobre su fracción de volumen total. Como se puede apreciar en Ecuación 3.2, la permeabilidad depende de forma directa de la porosidad, razón por la que resulta necesario su cálculo a partir de la Ecuación 3.3

$$X = 1 - V_f = 1 - \frac{NW_f}{d\rho} \quad (3.3)$$

donde:

X = Porosidad del medio
 V_f = Fracción de volumen
 N = Número de capas
 W_f = Peso por unidad de área
 d = Profundidad de la cavidad
 ρ = Densidad

Puesto que la resina avanzará a través del tejido y de los materiales auxiliares, para el caso de estudio es necesario calcular la porosidad media de las dos capas de fibra de basalto, el peel ply y la malla de difusión a partir de la Ecuación 3.4.

$$X = 1 - \sum(V_f) \quad (3.4)$$

X = Porosidad del medio

V_f = Fracción de volumen

3.1.4 Modelo CFD

A partir de los valores calculados y de las presiones de entrada, el modelo ha podido ser simulado mediante el módulo Fluid Flow Fluent del software Ansys Workbench, previo diseño de la geometría en Solidworks.

Para generar la simulación el proceso se inició con el mallado de la geometría CAD del ensayo en Ansys workbench mechanical, dejando definidas las áreas de entrada y salida de la resina como se muestra en la figura 3.4.

A continuación en el módulo FLUENT se introdujeron los valores de presión de entrada, presión de salida y condiciones de trabajo obtenidos del ensayo, además de las propiedades de la resina (la viscosidad y densidad) y del medio (permeabilidad y porosidad para los tejido). El siguiente paso fue obtener los resultados de la simulación como se aprecia en la 3.5.

El tiempo de llenado del molde está directamente relacionado con los valores de permeabilidad y porosidad obtenidos por lo que resulta importante establecer una comparación a posteriori entre los tiempos de llenado experimentales y los obtenidos en el software para conocer la bondad del proceso. Por otro lado, a partir de ajuste de los tiempos es posible obtener un modelo más preciso de cara a simulaciones futuras con la misma configuración pero distinta geometría.

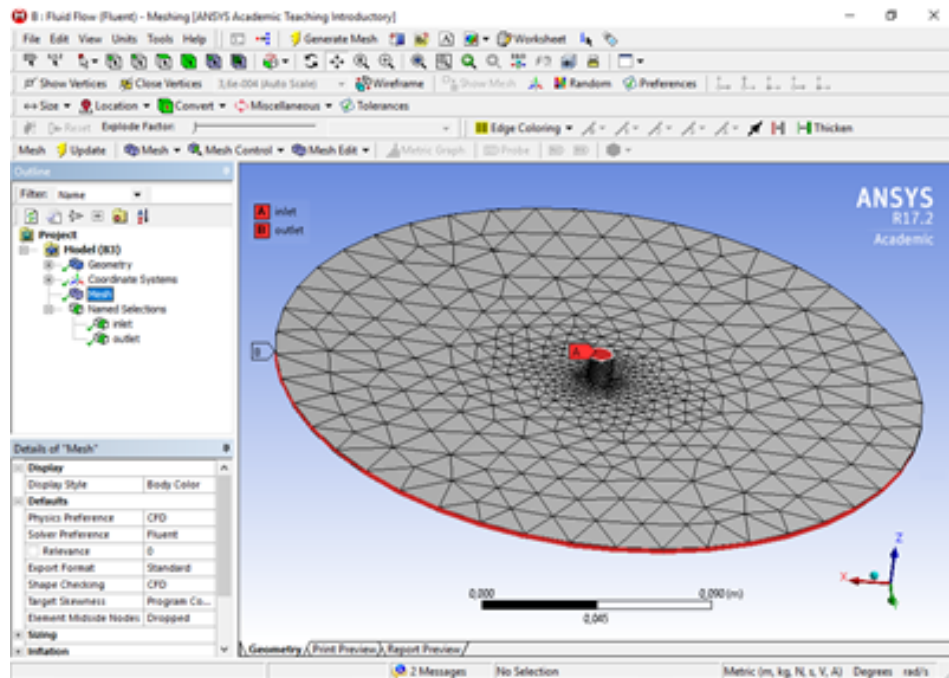


Figura 3.4: Mallado. Áreas de entrada y salida de resina.

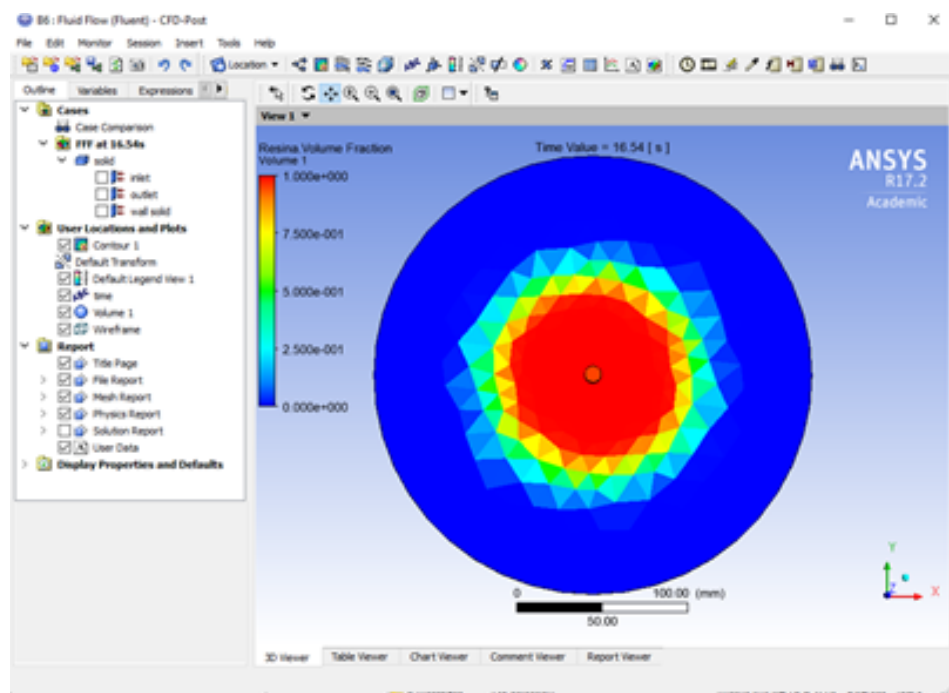


Figura 3.5: Fluid Flow (fluent). CFD-Post.

3.2 Obtención de las probetas

3.2.1 Método de fabricación

El método de fabricación que se ha utilizado en el desarrollo de las placas de material ha sido el de infusión de resina con bolsa de vacío. Posteriormente la geometría de las probetas ha sido cortada mediante un router CNC.

En este método la resina es introducida al conjunto por un conducto a partir de la diferencia de presión generada mediante una bomba de vacío conectada la periferia del tejido. Con este sistema la resina empleada se reduce respecto de los métodos de laminado manual, pasando a ser la cantidad necesaria para llegar al límite de saturación del tejido. Al cubrirse con la bolsa de vacío, la resina sobrante es extraída por la acción de la bomba.

El proceso común de este método de fabricación, descrito en la 3.6, consiste en posicionar las distintas capas de tejido sobre la superficie del molde previamente tratado con antiadherente. Seguidamente sobre estas se debe colocar el tejido pelable y la malla de difusión. En una posición centralizada se instalará la toma o tomas de entrada de resina y perimetralmente exterior al tejido se posicionará el tubo helicoidal donde se conectará con la bomba la toma de salida. A continuación se cubrirá todo con una bolsa de vacío y se sellará completamente con masilla de cierre. A la toma del conducto de entrada se le conectará el deposito de resina, la cual será introducida en el molde por la diferencia de presión generada por la bomba de vacío.

Este método se puede considerar de molde abierto puesto que no se utiliza ningún contra-molde rígido. Uno de los inconvenientes de este método es que solo es posible obtener un lado con acabado bien definido, puesto que solo dispone de un lado rígido en el molde, mientras que el otro es la bolsa de vacío.

Como ventajas de la utilización de la infusión de resina frente a otros compuestos laminados sin bolsa de vacío, se podría destacar [6]:

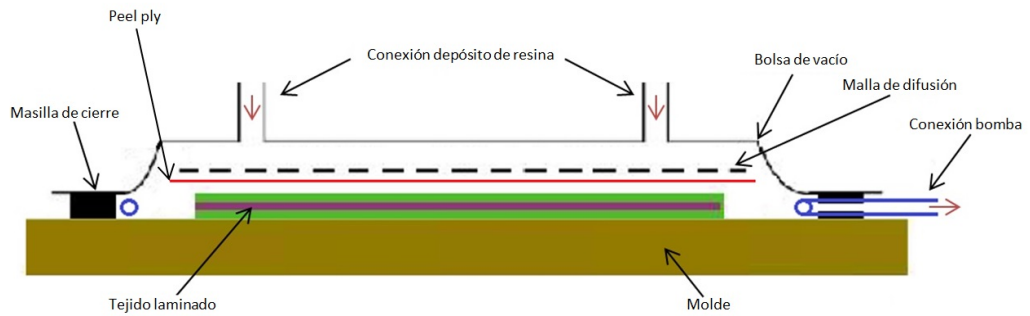


Figura 3.6: Método de fabricación.

- Optimización de la relación fibra-resina.
- Reducción del peso de la pieza en un 30%.
- Aumento de la resistencia del laminado en un 40%.
- Disminución del tiempo de exposición del operario a emisiones volátiles. El estireno en el caso de resina de poliéster se reduce en un 95%.
- Reducción del uso de resina debido a la pre-compactación de las fibras.
- Mayor productividad.

El proceso de obtención de las probetas comenzó fabricando las placas del material a caracterizar, para ello, se posicionaron las capas de tejido sobre la superficie del molde tratada con desmoldeante polivinílico UN 1992, una al lado de otra en función del tipo de material, con el correspondiente tejido pelable y la malla de difusión de resina. Se hizo de esta forma para obtener placas de distintos materiales en una sola infusión, optimizando de esta forma el tiempo y los materiales fungibles.

A continuación se posicionaron dos tomas de entrada. Perimetralmente externo al tejido se instaló el conducto helicoidal de vacío y la masilla de cierre. Finalmente se cubrió todo con una bolsa de vacío y se selló completamente con masilla de cierre. En un conducto auxiliar de acceso al molde se conectó al recipiente con resina, y mediante la

actuación de una llave de paso se inició la distribución de la resina por la diferencia de presión generada.

Durante el desarrollo de esta tesis se repitió este patrón de trabajo en distintas ocasiones para dar lugar a diferentes placas, por lo que se tomaron como referencia los valores de presión de vacío registrados en las primeras infusiones.

Posteriormente se empezaron a realizar infusiones con solo un tipo de tejido debido a que algunos fueron descartados y no se siguió su proceso de caracterización. En la imagen 3.7 se muestra el proceso de fabricación de forma esquematizada.

Una vez se dispone de la placa de material compuesto es necesario cortar probetas en los ángulos a caracterizar, en este caso una partida con las fibras alineadas a $0/90^\circ$ y otra a $45/-45^\circ$.

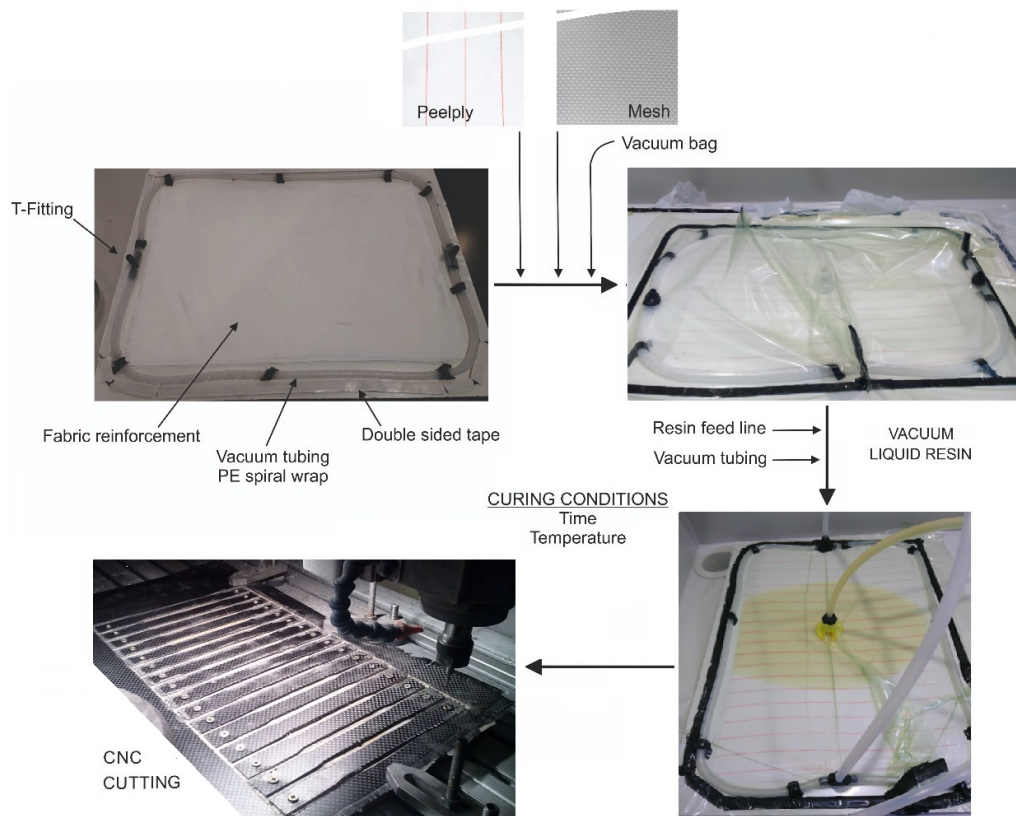


Figura 3.7: Proceso de fabricación.

Utilizando un router CNC, las probetas fueron cortadas con la forma específica normalizada para cada tipo de ensayo, de alterio para tracción y fatiga, con forma rectangular para los ensayos de compresión y con una entalla doble a 90° para el ensayo de cortadura, atendiendo a la norma ASTM-5379.

3.2.2 Materiales de estudio

Este estudio empieza con la selección y caracterización mecánica de fibras naturales embebidas en una matriz de resina epoxi 1050 con catalizador 1055. Los resultados del ensayo de tracción servirán a posteriori para adaptar y corregir el modelo matemático por elementos finitos, dando como resultado un modelo optimizado que permita dimensionar un componente de automoción con mayor exactitud.

En el inicio del proyecto, las fibras naturales de estudio fueron el lino y el yute de origen vegetal, mientras que atendiendo a un origen mineral se estudió la fibra de basalto. Como referencias comparativas y para el ajuste de modelo y equipos se utilizó la fibra de carbono en tejido Sarga y unidireccional por tratarse de un material con mayor difusión bibliográfica. Por otro lado, con el avance de la investigación fue posible incorporar al estudio fibras de ramie y bambú.

3.2.2.1 Lino (*Flax*)

El lino 3.8 es un tipo de planta dicotiledónea que pertenece a la familia de las lináceas. A partir de su tallo se confeccionan textiles y de su semilla se obtiene la harina y el aceite de linaza.

Esta planta se puede adaptar a prácticamente todo tipo de climas, por lo que esta presente en buena parte del mundo, aunque preferentemente en zonas templadas. En cuanto a sus características físicas, suele medir de 50 a 100 cm de altura y contener una media de 100 hojas por tallo. Sus flores de color azul o blanco contienen las semillas en unas pequeñas esferas formadas por cinco lóbulos.



Figura 3.8: Planta de Lino.



Figura 3.9: Tejido de Lino.

Los tejidos de lino 3.9 3.10 se forman a partir de las fibras extraídas de esta planta, que pueden llegar a medir hasta 60 cm y están compuestas principalmente de celulosa. Al igual que las fibras de yute y cáñamo, estas pertenecen al grupo de fibras liberianas. Se caracterizan por encontrarse en el floema, un tejido constituido los conductos que transportan la savia.

Los tejidos de lino sin tratar son higroscópicos, siendo capaces de absorber hasta un 20% de su masa en seco sin presentar humedad al tacto. En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia de las fibras está determinada por el diámetro de las mismas y su distribución dentro del tallo. Por esta razón existe gran variación en función de cada fabricante y cada partida de materia prima, aunque de forma



Figura 3.10: Tejido de Lino utilizado.

generalizada presenta buena resistencia a la tracción, por lo que se han empleado comúnmente en la fabricación de cuerdas.

3.2.2.2 Yute

Aunque existen más de 100 especies distintas, de forma general el yute 3.11 se caracteriza por ser un arbusto de tronco rígido y fibroso de entre 2 y 4 m de alto, con ramificaciones en la zona superior.



Figura 3.11: Plantación de Yute.

Las fibras que se extraen de la planta del yute resultan una de las más económicas por su gran producción a nivel mundial y su facilidad de cultivo, dando lugar a un tejido económico 3.12 3.13. Se trata de fibras de longitudes de entre 1 y 4 metros con aspecto liso y brillante.

Su principal campo de aplicación es la fabricación de sacos, cuerdas y en menor medida textiles, puesto que requieren de un tratamiento químico por su elevado porcentaje de lignina.

No obstante, debido a la estandarización de los materiales eco-friendly se empieza a mostrar como una alternativa más a las fibras sintéticas. En cuanto a las propiedades resistentes. Mecánicamente soporta peor los esfuerzos de tracción que la fibra de Lino y se muestra sensible frente a la interacción con agentes químicos ácidos.



Figura 3.12: Fibra de Yute.



Figura 3.13: Tejido de fibra de yute utilizado.

3.2.2.3 *Basalto*

El basalto es una roca de origen volcánico y color gris oscuro 3.14, rica en magnesio y hierro, característico de su composición máfica, aunque su contenido en sílice sea bajo.

Esta roca cubre gran parte de la superficie terrestre y es especialmente abundante en la corteza oceánica. Se trata de la roca ígnea más abundante en la corteza terrestre, superando en gran cantidad a cualquier otra roca volcánica.



Figura 3.14: Trozo de roca de Basalto.

La fibra de basalto 3.15 se obtiene a partir de la fundición en un horno a 1580° y el posterior proceso de estirado en caliente para formar los filamentos. Tanto en su proceso de fabricación como en su composición química esta fibra presenta semejanzas con la fibra de vidrio, aunque con mejores características de resistencia mecánica.

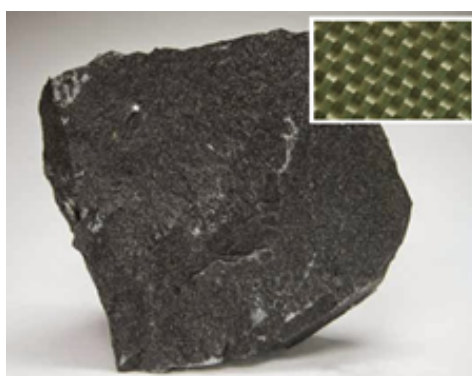


Figura 3.15: Tejido de Basalto.

Los tejidos de Basalto presentan un amplio rango de temperaturas de uso, superiores a carbono y a la aramida. Su temperatura de aplicación

se establece entre $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, encontrándose limitada como material compuesto por la matriz (limitada por la temperatura de transición vítrea de la matriz).

3.2.2.4 Ramie

La fibra de ramie o ramio, tiene su origen en la corteza de una planta de la familia de urticáceas, la *Boehmeria nivea*, planta que se extiende a lo largo de Asia.

Se trata de una fibra blanca de aspecto similar a la seda. Sus propiedades físicas y resistentes son comparables con las del cáñamo o el yute.

Su cultivo no ha sido explotado en gran medida debido al coste de operación y procesado que requiere la obtención de las fibras a partir del desgomado, por lo que tiene un coste más elevado que el de otras fibras vegetales. No obstante, esta planta está expandida por los trópicos americanos y en muchas áreas se propaga como maleza. Se utiliza en gran medida como fuente de alimentación animal. [31]

3.2.2.5 Bambú

El bambú es una de las plantas de más rápido crecimiento con una tasa de hasta de hasta 100 cm por día [32].

Este material revela una acusada abundante estructura fibrilar, que se observa fácilmente cuando se rompe una caña de bambú.

Es una planta maderable herbácea, que se encuentra presente en prácticamente todos los continentes, aunque existen dos zonas de mayor confluencia, el este/sudeste de Asia y el Neotrópico. Según algunos estudios, el bambú crece en los ecosistemas de forma natural a modo de cicatrizante para los daños del ecosistema (incendios, árboles caídos), extendiéndose rápidamente sobre la superficie libre debido a su facilidad de crecimiento .[32]

El bambú se densifica para la generación de tejidos mediante la eliminación parcial de lignina y hemicelulosa a partir de un prensado en caliente.

Las nanofibrillas de celulosa largas y alineadas contribuyen a su alta resistencia mecánica a la tracción, resistencia a la flexión y tenacidad. Además, la baja densidad de la lignocelulosa presente en el bambú le confiere una resistencia específica elevada.[25]

3.2.2.6 Matriz de estudio

Respecto a la matriz, en este estudio se ha utilizado una única resina para la fabricación de las probetas con los distintos materiales, con la finalidad de comparar solo los distintos tejidos.

La resina empleada ha sido la epoxi resoltech 1050, suministrada y envasada por el proveedor "Resinas Castro". En su ficha técnica se especifica que es una resina libre de sustancias CMR, tal como indican los criterios de la OMS.

Esta resina ha sido formulada para curar a temperatura ambiente (sin post-curado) con la mezcla de un agente catalizante en proporciones de masa 100:35 (resina:catalizador). En función del agente endurecedor que se elija, los tiempos de gel varían entre 10 minutos y 14 horas permitiendo un amplio rango de aplicación.

El endurecedor elegido ha sido 1056S, que establece 58 minutos de tiempo de gel para un espesor de 40 mm y 235 minutos para un espesor de 2 mm. La resina 1050 tiene una densidad de 1,14 kg/m³, mientras que la del catalizador 1056S es de 1,10 kg/m³.

Se ha elegido esta resina para fabricar los laminados porque según se especifica en la web del fabricante y en la ficha técnica del producto, ofrece buenas propiedades mecánicas, excelente resistencia a fatiga y sobretodo porque presenta excelentes propiedades de impregnación de los refuerzos [33].

En la ficha técnica se le define una resistencia máxima de tracción de 97 MPa, un módulo elástico de 3,35 GPa, una elongación del 5% y una dureza de 86 Shore D, todo ello pasados 14 días.

3.2.3 Equipos y herramientas auxiliares

A continuación se listan todos los equipos y herramientas empleados en la fabricación de las placas de material compuesto. Estos útiles se emplearán distintas veces para fabricar la totalidad de probetas, considerándose válidos durante toda su vida útil, a diferencia de los materiales fungibles descritos más adelante.

- Bomba de vacío (Figura 3.16).
- Cubo de evacuación de resina (Figura 3.17).
- Manguera de vacío (Figura 3.18).
- Clampas para cierre de los tubos (Figura 3.19).
- Medidor de temperatura (Figura 3.20).
- Medidor de fugas (Figura 3.21).
- Tijeras de Corte especiales (Figura 3.22).



Figura 3.16: Bomba de vacío.

3.2.4 Materiales fungibles

En este apartado se listan y describen los materiales fungibles empleados para la fabricación de las placas por el método de infusión de resina con bolsa de vacío.



Figura 3.17: Cubo de resina.



Figura 3.18: Tubo PEBD.



Figura 3.19: Clampas de cierre.



Figura 3.20: Termómetro laser.



Figura 3.21: Medidor de fugas.



Figura 3.22: Tijeras para Corte de tejidos.

Es posible considerar los material fungibles aplicados a la fabricación de composites como todo componente necesario para alcanzar la fabricación de la pieza que queda inservible tras la finalización del proceso y por tanto no puede ser reutilizado.

- Bolsa de vacío (Figura 3.23).
- Tubo Helicoidal de PEBD (Figura 3.24).
- Tubo de PEBD (Figura 3.25).
- Uniones tipo L y tipo T de PEBD (Figura 3.26).
- Llave de cierre (Figura 3.27).
- Tomas de infusión (Figura 3.28).
- Cinta de sujeción (adhesiva y de doble cara) (Figura 3.29).
- Masilla de cierre (Figura 3.30).
- Red de infusión (Figura 3.31).
- Tejido pelable (Peel Ply) (Figura 3.32).



Figura 3.23: Bolsa de vacío.



Figura 3.24: Tubo helicoidal.



Figura 3.25: Tubo PEBD.



Figura 3.26: Conector tipo "t".



Figura 3.27: Llave de cierre.



Figura 3.28: Toma para infusion de resina.



Figura 3.29: Cinta adhesiva.



Figura 3.30: Masilla de cierre para sellado.

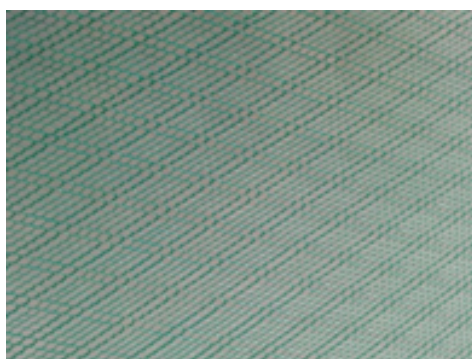


Figura 3.31: Malla de distribución.



Figura 3.32: Tejido pelable.

3.2.5 Proceso de fabricación

Para iniciar la fabricación de las probetas, el primer paso fue preparar las distintas muestras de tejidos a infundir, para dar lugar a las placas y agrupar todos los materiales, útiles y herramientas a emplear.

El proceso se inició desenrollando cada uno de los tejidos y marcando las líneas de corte, utilizando como guía un perfil recto de acero para formar las áreas rectangulares de la placa. Seguidamente, se procedió a cortar los distintos tejidos empleando para ello unas tijeras específicas para corte de telas técnicas industriales.



Figura 3.33: Proceso de fabricación. Corte de tejidos.

Una vez todo dispuesto, se pudo proceder a realizar la infusión de resina. Para comenzar se limpió el molde con disolvente y se le aplicó el

líquido desmoldeante para evitar la unión permanente entre la placa y la superficie del molde. Con la finalidad de asegurar el fácil desmoldeo se aplicaron tres capas del producto descrito.

Para las primeras infusiones realizadas se posicionaron las capas de cada uno de los tejidos con sus pertinentes orientaciones, uno al lado del otro. De esta manera fue posible obtener placas de distintos materiales en una sola infusión. No obstante, durante el desarrollo de la tesis fue necesario fabricar más placas de materiales por separado en función de las necesidades de probetas para el desarrollo de cada ensayo.



Figura 3.34: Proceso de fabricación. Posicionamiento de tejidos.

El siguiente paso fue situar sobre el material un tejido pelable de mayor tamaño, aproximadamente de 10 mm de desfase perimetral.

A continuación se posicionó sobre el tejido pelable la malla de difusión, del mismo tamaño que el tejido pelable. En el centro de la malla de difusión se posicionaron dos tomas de infusión con un tramo de tubo helicoidal en cada una para facilitar la entrada de la resina en el conjunto.

Seguidamente se instaló el tubo helicoidal para la absorción de la resina por los laterales, rodeando perimetralmente el tejido y exterior a este la masilla de cierre.

El siguiente paso fue realizar el acoplamiento de los tubos helicoidales con los conductos de vacío de la bomba por medio de una unión tipo T de PEBD, dejándolos por encima de la malla de difusión para favo-

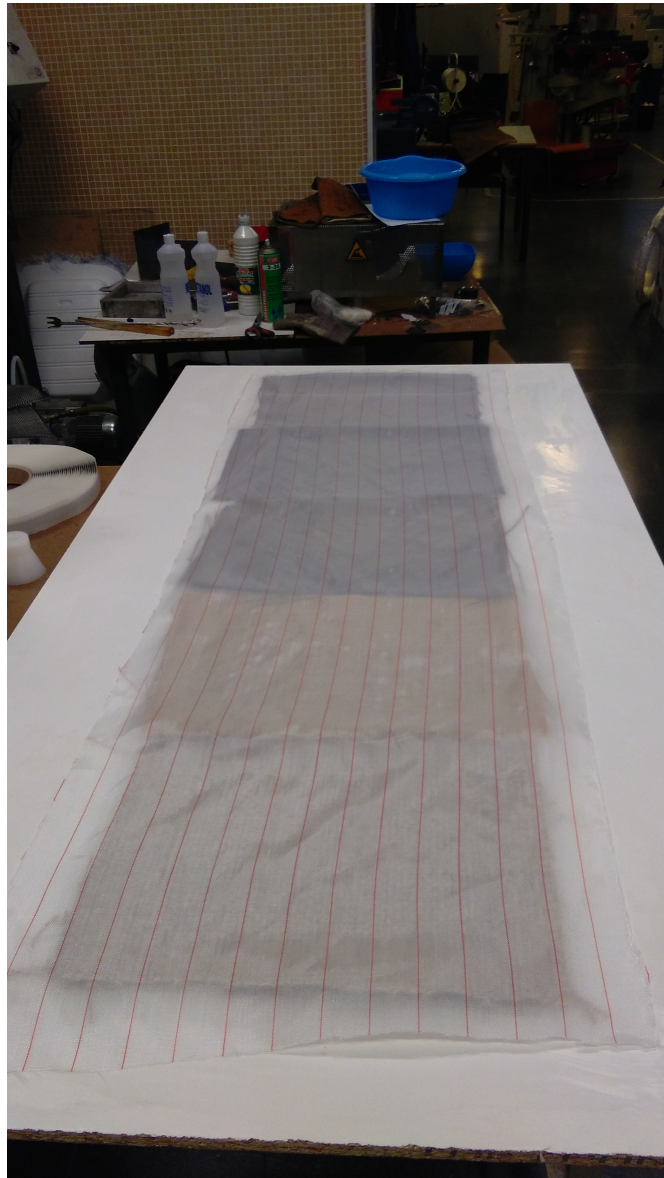


Figura 3.35: Proceso de fabricación. Posicionamiento del peel ply.

recer la extracción de aire y fijándolos con un pequeño trozo de cinta adhesiva. Una vez todo ubicado, se cubrió con una bolsa de vacío y se conectaron las tomas de extracción a la bomba de vacío.

La resina epoxi 1050 con el catalizador 1056S que se utilizó en el proceso tenía un tiempo de gel de 58 minutos, lo que significa que una vez mezclado con el catalizador se disponía solo de estos minutos para



Figura 3.36: Proceso de fabricación. Montaje.

realizar el proceso de fabricación, antes de que comenzase el proceso de polimerización de la resina con el endurecimiento de la misma.

Para obtener buenos resultados siempre se debe respetar las especificaciones del fabricante descritas en la ficha técnica del producto, en este caso 35% de catalizador en masa.

Antes de mezclar el catalizador con la resina siempre es conveniente haber comprobado la hermeticidad del sistema. Para ello, se conectó la bomba de vacío y mediante un detector de fugas se comprobó que no existiese ningún defecto de sellado. Una vez comprobado el circuito, se procedió a la apertura de la válvula de paso de resina.

Una vez terminado el proceso, las placas se dejaron curar durante un día. Pasado este periodo se procedió a su desmoldeo y al corte de excedentes de material. Una vez completado el proceso de fabricación de las placas se realizó el corte de las mismas mediante una sierra de

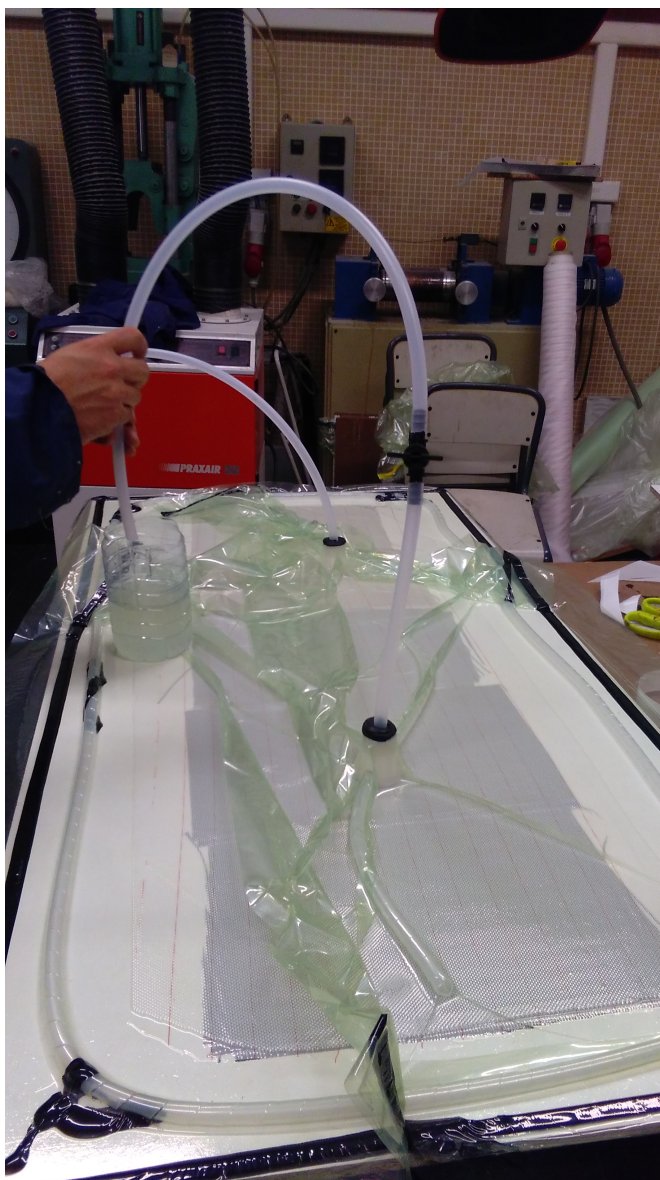


Figura 3.37: Proceso de fabricación. Aplicación de vacío.

corde con disco circular y el corte final de la geometría de las probetas mediante un router CNC.

Para ensayar la resina se fabricó un molde de aluminio por mecanizado CNC para dar cabida a tres probetas.

El proceso de fabricación de estas probetas consistió en limpiar el molde y aplicarle desmoldeante. A continuación se cubrió de resina

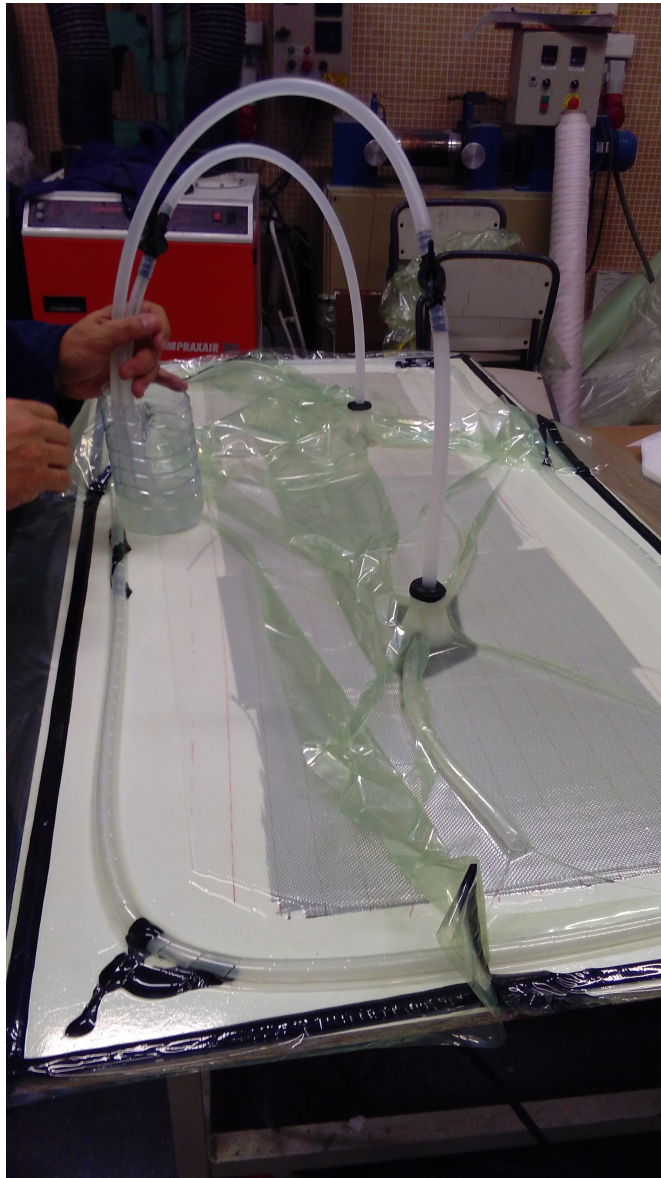


Figura 3.38: Proceso de fabricación. Entrada de resina.

cada una de las cavidades. Una vez curadas las piezas se procedió a su desmoldeo a partir de un sistema de extracción por tornillos incorporado en el molde, el cual genera presión sobre la base de las probetas (zona mordazas) desplazándolas fuera de la cavidad.

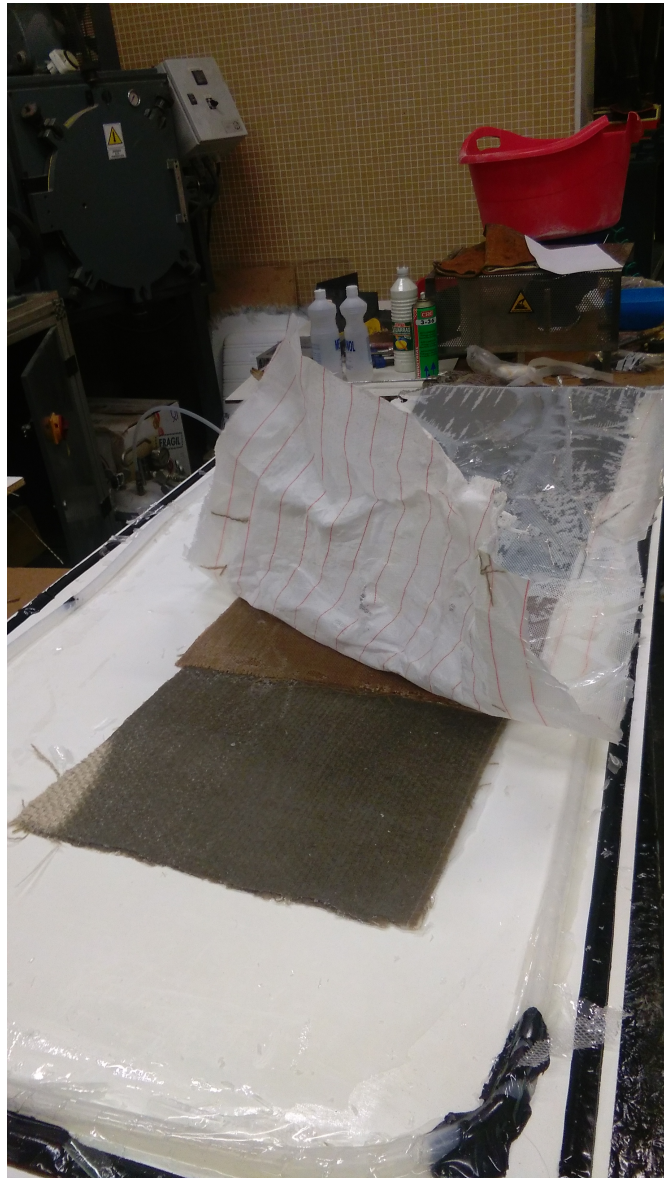


Figura 3.39: Proceso de fabricación. Desmoldeo.

3.2.6 Datos geométricos de los materiales a estudiar.

Los datos recopilados en las siguientes tablas se han obtenido a partir de mediciones en laboratorio. La tabla 3.1 muestra los datos de partida de los tejidos, la tabla 3.2 muestra los valores físicos referentes a las placas de material compuesto y el resto de tablas aportan información concreta sobre las probetas.

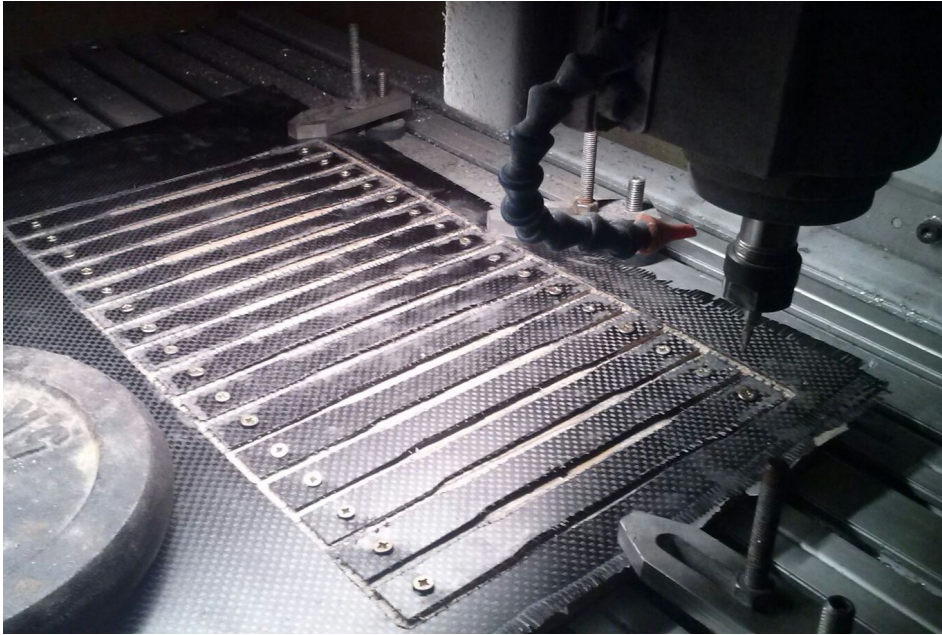


Figura 3.40: Proceso de Corte CNC.

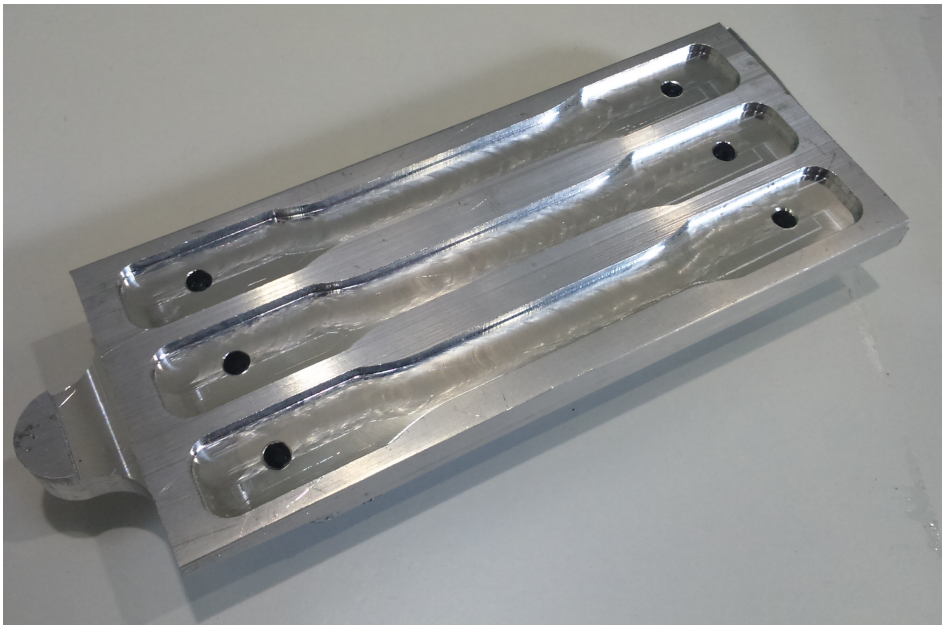


Figura 3.41: Molde mecanizado para fabricar probetas de resina.

Material	Carbono	Carbono	Yute	Lino	Basalto
Tipo de tejido	Sarga	Unidireccional	Tafetán	Tafetán	Sarga
Espesor capa	0,26	0,31	0,92	0,95	0,45
N°DE CAPAS	2	2	2	2	2
Espesor total	0,52	0,62	1,84	1,90	0,90
Gramaje (g/m ²)	218,98	322,66	354,95	505,96	634,23

Tabla 3.1: Características iniciales extraídas de las placas de material fabricadas.

Material	Carbono	Carbono	Yute	Lino	Basalto
% Resina	50,15	36,48	72,70	67,08	51,62
% Fibra	49,85	63,52	27,30	32,92	48,37
Gramaje (kg/m ²)	0,88	1,02	2,59	3,07	2,62
Densidad (kg/m ³)	1.179,46	1.372,27	1.168,94	1.239,56	1.248,99

Tabla 3.2: Características lámina de material compuesto.

Carbono	Corte	L	E	A	Área
Sarga	(tipo)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)
1	90°	135	0,71	19,55	13,88
2	90°	136,6	0,70	19,93	13,95
3	90°	101	0,70	19,50	13,65
4	90°	101	0,70	19,50	13,65
5	90°	101	0,80	19,50	15,60
6	90°	106	0,75	19,60	14,70
I	45°	102	0,8	19,10	15,28
II	45°	101	0,7	19,20	13,44
III	45°	101	0,8	19,20	15,36
IV	45°	105	0,7	19,00	13,30
V	45°	105	0,7	19,10	13,37

Tabla 3.3: Probetas ensayo de tracción sobre carbono (sarga).

Datos iniciales obtenidos de los distintos tejidos:

Datos obtenidos de las distintas placas de material compuesto:

Probetas de tracción de los distintos materiales:

Tras la realización de estos ensayos sobre los materiales descritos (jute, lino, basalto) se añadieron a la batería de ensayos dos nuevos tejidos

Carbono UD	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	135	0,70	20,17	14,12
2	90°	118	0,70	20,01	14,00
3	90°	137	0,70	20,01	14,01
4	90°	135	0,70	20,01	13,95
5	90°	111	0,90	19,93	17,91
6	90°	120	0,80	20,00	16,00

Tabla 3.4: Probetas ensayo de tracción sobre carbono (unidireccional).

Yute	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	120	2,25	20,01	45,02
2	90°	115	2,25	20,03	45,06
3	90°	121,9	2,25	20,10	45,22
4	90°	128,3	2,25	20,20	45,45
5	90°	121	2,25	20,10	45,22
6	90°	137,2	2,30	20,30	46,69
I	45°	66,21	2,3	19,10	43,93
II	45°	71,2	2,3	19,20	44,16
III	45°	70	2,3	19,20	44,16
IV	45°	71	2,3	19,20	44,16
V	45°	70	2,3	19,10	43,93

Tabla 3.5: Probetas ensayo de tracción sobre fibra de yute.

no previstos inicialmente, bambú y ramie. Sobre estos tejidos, a priori se realizaron solo ensayos de tracción para compararlos con el resto.

Datos obtenidos de las distintas placas de material compuesto:

Probetas de Flexión de los distintos materiales:

Tras caracterizar los materiales y hacer unos primeros ensayos de fatiga se decidió seguir trabajando en el estudio sobre fibra de bambú, por lo que los ensayos de compresión, cortadura y de tracción sobre el eje Z se realizaron sobre este material únicamente.

Lino	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	106	2,2	20,2	44,44
2	90°	109	2,2	20,35	44,77
3	90°	102,5	2,2	20,25	44,55
4	90°	105,3	2,2	19,97	43,93
5	90°	109	2,2	19,90	43,78
6	90°	109	2,2	20,30	44,66
I	45°	90,5	2,2	20,00	44
II	45°	92	2,1	19,96	41,91
III	45°	74,5	2,1	19,96	41,91
IV	45°	89	2,1	20,00	42
V	45°	89	2,1	20,00	42

Tabla 3.6: Probetas ensayo de tracción sobre fibra de lino.

Basalto	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	141,5	1,32	19,93	26,31
2	90°	119	1,35	20,00	27,00
3	90°	120	1,35	19,90	26,56
4	90°	120	1,35	20,00	27,00
5	90°	82	1,32	20,10	26,53
6	90°	88	1,40	20,15	28,21
I	45°	56	1,40	19,70	27,58
II	45°	56	1,30	19,70	25,61
III	45°	90	1,30	19,90	25,87
IV	45°	90	1,40	19,70	27,58
V	45°	92	1,30	19,70	25,61

Tabla 3.7: Probetas ensayo de tracción sobre fibra de basalto.

Material	Ramie	Bambú
Tipo de tejido	Tafetán	Tafetán
N°DE CAPAS	10	6
Gramaje (g/m ²)	100	205

Tabla 3.8: Características iniciales extraídas de las placas de material fabricadas: ramie y bambú.

Material	Bambú
% Resina	48,81
% Fibra	51,19
Gramaje (kg/m ²)	2,404
Densidad (kg/m ³)	1.265

Tabla 3.9: Características lámina de material compuesto: fibra de bambú con resina epoxi

Bambú	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	131,5	1,85	15,84	29,30
2	90°	135,3	1,85	15,75	29,14
3	90°	139,7	1,89	15,76	29,79
4	90°	131,5	2,06	15,98	32,92
5	90°	139,6	2,02	15,65	31,61
6	90°	144,2	2,03	15,65	31,77
I	45°	131,57	1,88	14,73	27,69
II	45°	139,2	1,85	13,84	25,60
III	45°	131,5	1,90	15,34	29,15
IV	45°	139,95	1,96	12,36	19,78
V	45°	139,35	1,92	10,93	20,99

Tabla 3.10: Probetas ensayo de tracción sobre fibra de Bambú.

Ramie	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	130,92	1,58	17,28	27,30
2	90°	133,43	1,59	17,35	27,58
3	90°	130,87	1,58	17,30	27,33

Tabla 3.11: Probetas ensayo de tracción sobre fibra de ramie.

Resina	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	87,18	2,91	13,05	37,98
2	86,62	2,96	13,04	38,60
3	91,01	3,02	13,07	39,47
4	90,97	3,05	13,06	39,83

Tabla 3.12: Probetas ensayo de tracción sobre resina epoxi 1050 sin refuerzo.

Carbono Sarga	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	60	0,80	9,6	7,68
2	90°	60	0,80	9,6	7,68
3	90°	60	0,80	9,6	7,68
4	90°	60	0,80	9,6	7,68
5	90°	60	0,80	9,6	7,68

Tabla 3.13: Probetas ensayo de flexión sobre fibra de carbono (sarga).

Carbono UD	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	60	0,80	9,30	7,44
2	90°	60	0,80	9,35	7,48
3	90°	60	0,80	9,30	7,44
4	90°	60	0,80	9,00	7,20
5	90°	60	0,80	9,30	7,44

Tabla 3.14: Probetas ensayo de flexión sobre fibra de carbono (unidireccional).

Yute	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	60	2,55	9,5	24,22
2	90°	60	2,55	9,8	24,99
3	90°	60	2,55	9,8	24,99
4	90°	60	2,55	9,9	25,24
5	90°	60	2,55	9,9	25,24

Tabla 3.15: Probetas ensayo de flexión sobre fibra de yute.

Lino	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	60	2,4	9,7	23,28
2	90°	60	2,4	9,8	23,52
3	90°	60	2,4	9,8	23,52
4	90°	60	2,4	9,9	23,76
5	90°	60	2,4	9,9	23,76

Tabla 3.16: Probetas ensayo de flexión sobre fibra de lino.

Probetas de compresión:

Probetas de Cortadura Iosipescu:

Probetas para tracción en el eje Z:

En este trabajo se ha caracterizado de forma empírica el eje Z a partir de un laminado de gran espesor que ha permitido el corte de probetas en dicho eje 3.44.

Basalto	Corte (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	90°	60	1,70	10,10	17,17
2	90°	60	1,50	9,35	14,02
3	90°	60	1,55	11,91	18,46
4	90°	60	1,50	9,30	13,95
5	90°	60	1,55	9,30	14,41

Tabla 3.17: Probetas ensayo de flexión sobre fibra de basalto.

Compresión	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	28	5,92	38,67	228,93
2	28	5,90	39,03	230,28
3	13	5,93	42,66	252,97
4	13	6,00	42,45	254,70
5	20	5,99	42,50	254,57

Tabla 3.18: Probetas ensayo de compresión sobre fibra de bambú.

Cortadura	L (mm)	h (mm)	W (mm)	Área (mm ²)
1	76,2	3,9	11	42,9
2	76,2	3,8	10,9	41,42
3	76,3	3,9	11,1	43,29
4	76,1	3,9	11,1	43,29
5	76,2	3,9	10,9	42,51

Tabla 3.19: Probetas ensayo de cortadura Iosipescu sobre fibra de bambú.

Para ello se ha fabricado un molde 3.43 en el que es posible posicionar 120 capas de fibra de Bambú. En el molde se genera vacío desde el perímetro de la cara superior y la resina es aportada al conjunto desde la lamina inferior como puede observarse en la figura 3.42.

Las probetas utilizadas para el ensayo de tracción del eje Z tuvieron una longitud relativamente corta en comparación al resto de probetas debido a la cantidad de capas necesarias para formar el bloque de base.

La cantidad de resina necesaria para fabricar unas probetas de mayor tamaño puede generar problemas debido a la reacción exotérmica del

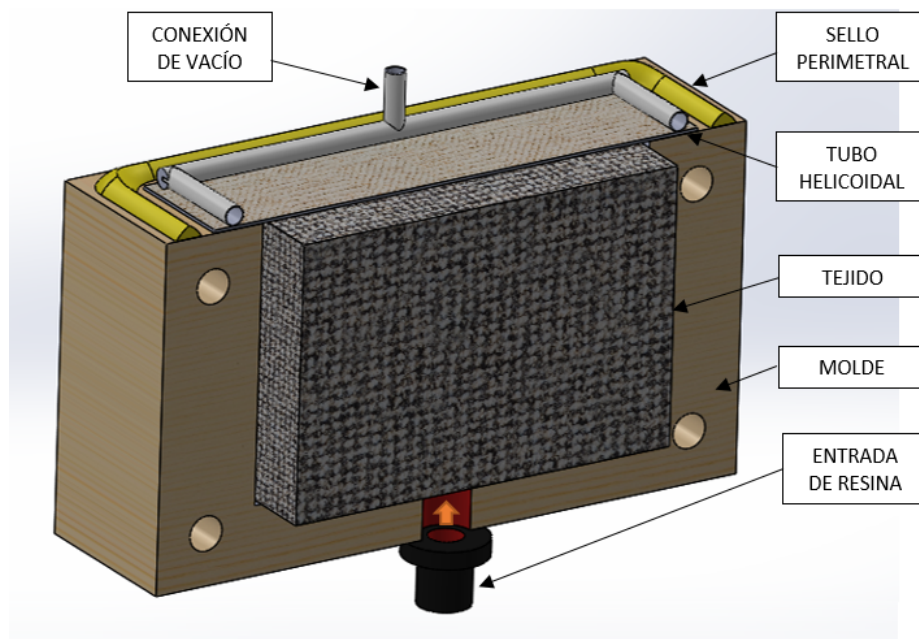


Figura 3.42: Esquema de moldeo.

proceso de curado que puede degradar parte de la pieza quedando inservible para los ensayos o incluso generar un incendio.

Tracción Z	L (mm)	E (mm)	A (mm)	Área (mm ²)
1	17,89	6,92	21,85	151,20
2	14,84	7,03	21,24	149,32
3	14,61	7,00	21,12	147,84
4	18,40	6,77	21,62	146,37

Tabla 3.20: Probetas ensayo de tracción en eje Z sobre fibra de bambú.

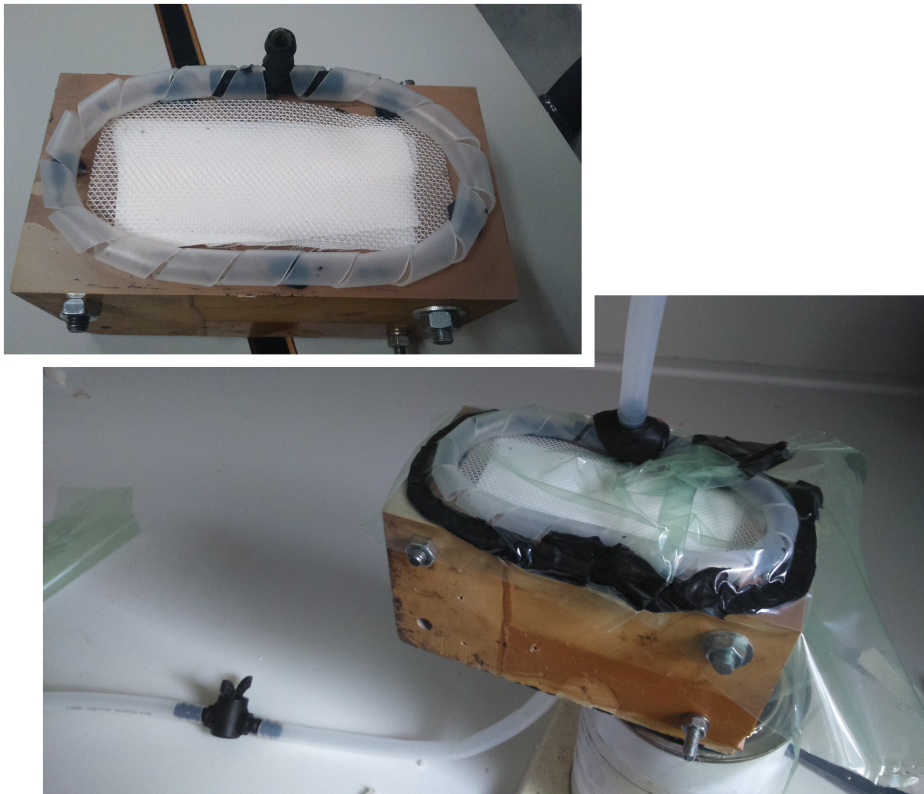


Figura 3.43: Proceso de moldeado.



Figura 3.44: Probetas para ensayo de propiedades resistentes sobre el eje Z del laminado.

3.3 Obtención del colín

De cara a la validación del modelo MEF triaxial ha sido necesario desarrollar dos componentes a modo de prototipos para realizar sobre ellos los estudios pertinentes. El primero de estos es un colín de una moto de competición, y su finalidad es el estudio por elementos finitos de un modelo estático y su fabricación para realizar pruebas en campo.

3.3.1 Obtención de la geometría en CAD del colín

En el estudio de este prototipo se ha partido de una geometría física de un componente real de una motocicleta, del cual se necesita disponer del formato CAD para poder realizar un estudio MEF triaxial estático, por lo que se ha empleado ingeniería inversa.

Para la digitalización del componente se ha utilizado el software gratuito de escaneado 3D KSCAN3D 1.2 y como hardware un escáner kinect de la consola Xbox.

El proceso comienza posicionando el componente frente al escáner, a unos 700 mm y sobre un soporte que permita la rotación. Es importante tener buena iluminación puesto que no se trata de un sistema de escaneado profesional.



Figura 3.45: Proceso de obtención de modelo CAD.

A continuación se van tomando imágenes del colín girándolo sobre su eje hasta completar una vuelta. Cuantas más imágenes se tomen mayor será la calidad final de la pieza.

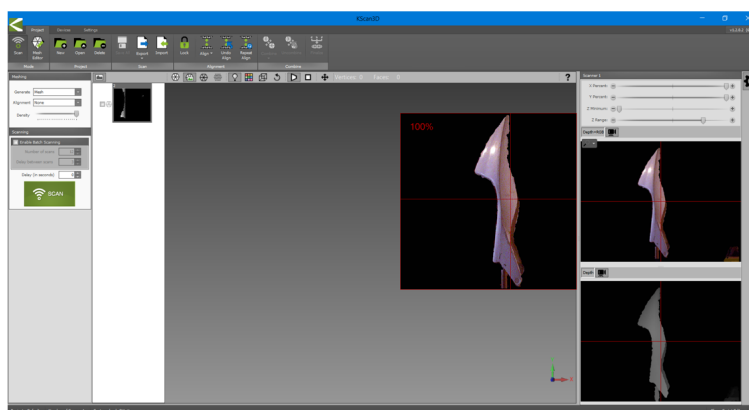


Figura 3.46: Proceso de obtención imágenes del modelo CAD.

Aunque se ajuste el rango del útil de escaneado, durante el proceso de captura de las instantáneas el programa registra objetos y superficies que no pertenecen al bloque principal y deben ser borradas de cada una de las imágenes. Resulta un trabajo laborioso pero necesario, puesto que de no eliminarse, el modelo no se completaría correctamente.

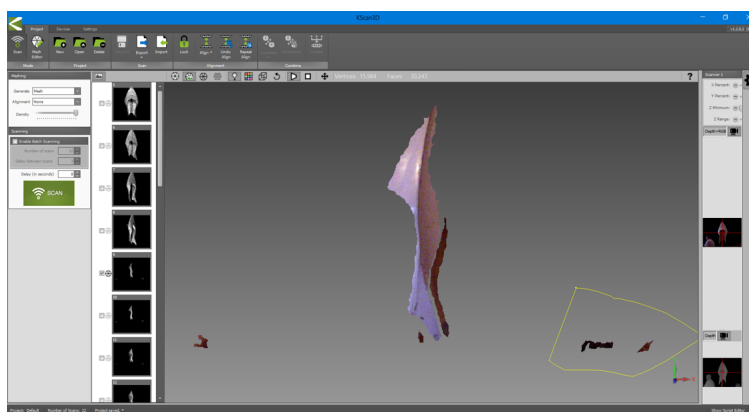


Figura 3.47: Borrado de superficies no deseadas en imágenes del modelo CAD.

Una vez completado el proceso de obtención de imágenes, estas aparecen unidas por su eje central a lo largo de 360° como se observa en la imagen.

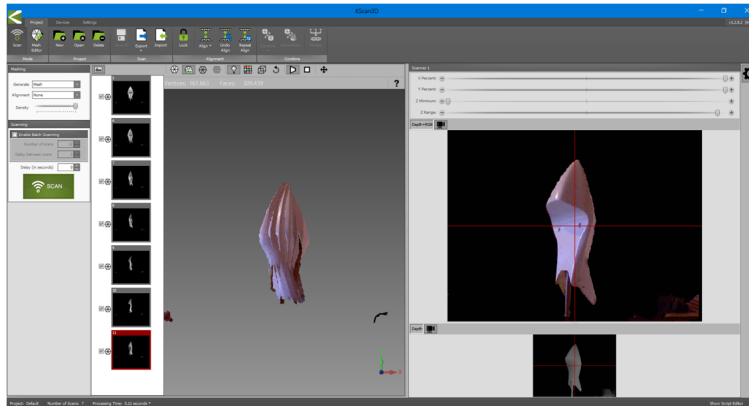


Figura 3.48: Procesado de imágenes del modelo CAD.

Finalmente es posible generar la unión de las diferentes superficies para obtener un cuerpo sólido y exportarlo en formato legible por cualquier software de CAD 3D.

A partir de esta superficie final es posible realizar trabajos de afinado que eliminen rugosidad superficial.

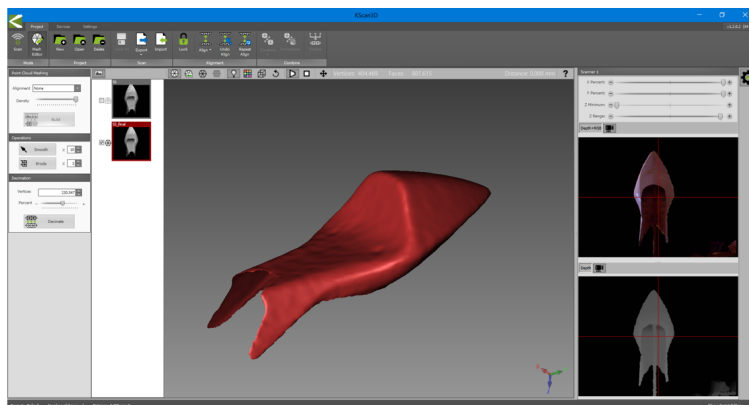


Figura 3.49: Geometría 3D del Colín.

3.3.2 Fabricación del colín

Para el proceso de fabricación de este prototipo ha sido necesario generar un molde a partir de un colín original Honda.

Para ello, se empieza marcando el componente por las líneas de partición que formarán los distintos semi-moldes, en nuestro caso dos partes. El siguiente paso es generar una barrera física perpendicular

al plano de la pieza siguiendo las líneas marcadas, utilizando algún material maleable como plastilina para moldes.

A continuación se aplica desmoldeante por toda la pieza y por los separadores que hemos fabricado sobre las líneas de partición. El siguiente paso es generar un laminado sobre la pieza y los separadores. Una vez seco el primer semi-molde, se retira el separador central de plastilina y se aplica desmoldeante sobre la otra mitad del colín para poder proceder al laminado. Finalmente se desmoldean las dos partes y se afinan los salientes de los bordes.



Figura 3.50: Molde del colín fabricado en dos partes.

Para fabricar el colín, el primer paso ha consistido en preparar el molde con un tratamiento anti-adherente y montarlo formando un solo cuerpo.

Para la fabricación de este componente se utilizó el método de laminado manual con bolsa de vacío. Para ello se aplicó una capa inicial de gel-coat y pasado un tiempo próximo al curado total se aplicó una capa de resina, y a continuación los distintos tejidos de refuerzo con las orientaciones definidas en el software de elementos finitos para obtener un componente con las especificaciones del diseño.

Seguidamente se posicionó un sangrador y un tejido fieltro para absorber el excedente de resina, cubriendo todo con la bolsa de vacío y se conectó la bomba.

Una vez seco se realizó el desmoldeo con cuidado. El último paso fue lijar los excedentes de resina de los bordes y las uniones.



Figura 3.51: Prototipo de colín junto con molde desmontable utilizado.

3.4 Obtención del estribo

Una vez validados los modelos del estudio por elementos finitos, fue necesario validar el modelo MEF triaxial estático a partir de los distintos ensayos realizados a los prototipos. En este caso, la fabricación del estribo dio paso a validar los modelos triaxiales frente a cargas derivadas de ensayos de fuerza máxima y de fatiga.

Por tanto, este componente permitirá comparar los resultados empíricos con los resultados del software de elementos finitos. Por esta razón fue necesario fabricar el molde del componente sobre un bloque de resina mecanizable mediante un router CNC para reproducir con detalle la geometría de estudio, permitiendo la fabricación de varias unidades.

Para fabricar el componente el proceso comenzó aplicando desmoldeante sobre la superficie del molde. A continuación se posicionó el laminado en seco, el cual está formado por doce capas de tejido de bambú alternando cortes a $0/90$ y $45/-45$, según lo descrito en el software de elementos finitos.

Sobre el laminado se posicionó el peel ply y la malla de difusión. Seguidamente se instaló el conducto de entrada con la toma de infusión en el centro del molde y tubo helicoidal en el perímetro del laminado



Figura 3.52: Mecanizado cnc del molde 1.

para conectar la toma de salida a la bomba de vacío. En la superficie del molde, exterior al tubo helicoidal se posicionó la masilla de cierre y posteriormente se cubrió la pieza con una bolsa de vacío cortada a medida. Tras esto, finalmente fue posible introducir la resina por la diferencia de presión generada.

Como se ha comentado anteriormente, se tubo que repetir el estudio, el molde y el estribo porque al desmoldear el primer prototipo nos dimos cuenta que existían defectos en la pieza debidos a unos radios excesivamente pequeños en los que quedaban inclusiones de aire. Además, resultaba muy complicado desmoldear la pieza por falta de ángulo de desmoldeo en las paredes del molde.

Por esta razón fue necesario diseñar y fabricar de nuevo el molde aumentando los ángulos de salida y redondeando el radio de las esquinas.

Con este nuevo molde los estribos quedan bien acabados, por lo que esta se considera la pieza final.

Se fabricaron varias unidades de esta pieza para poder realizar un estudio de fatiga sobre el componente y comparar los resultados de la simulación con los resultados de los ensayos empíricos.



Figura 3.53: Molde 1 del estribo.

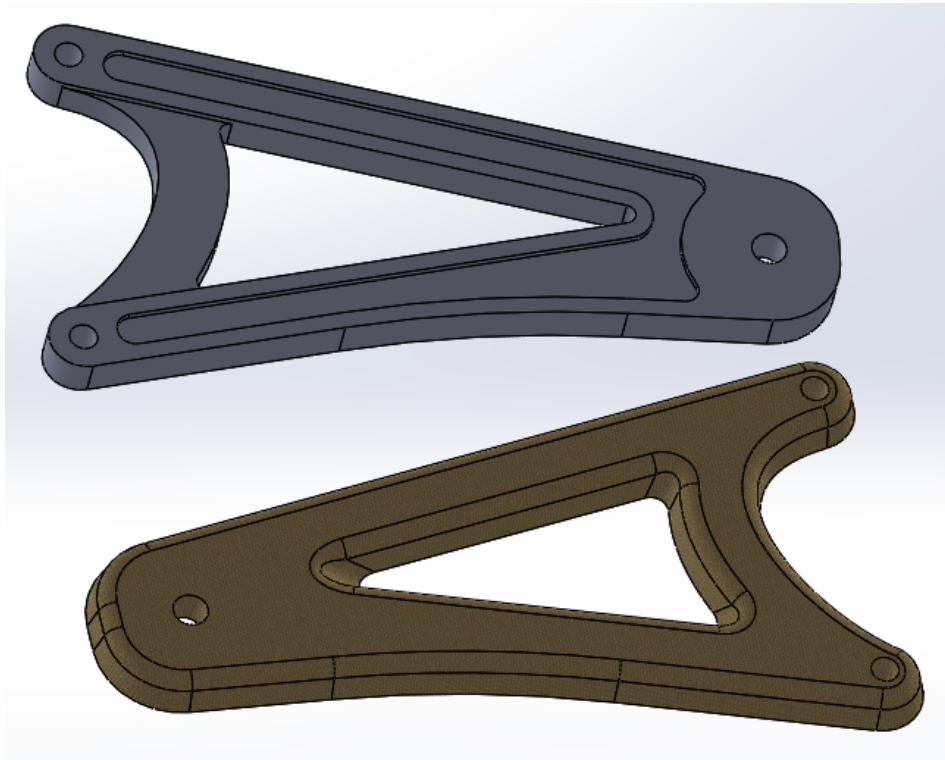


Figura 3.54: Comparación de geometrías: primer diseño de estribo frente al estribo final.

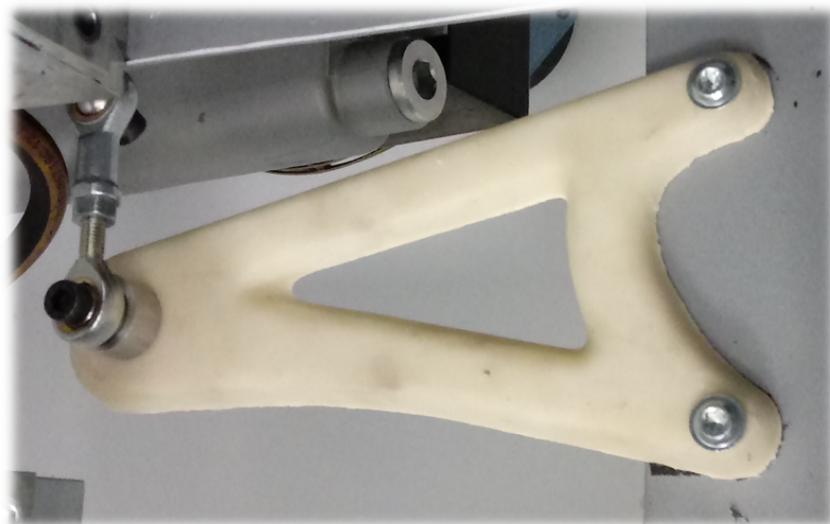


Figura 3.55: Prototipo final del estribo.

3.5 Ensayos de caracterización mecánica

3.5.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción puede ser considerado uno de los ensayos mecánicos con mayor relevancia en cuanto a la determinación de las propiedades y el comportamiento de un material.

Este ensayo se basa en aplicar un esfuerzo de tracción creciente sobre una probeta normalizada hasta alcanzar su punto de rotura. De esta forma es posible registrar la fuerza que ejerce la probeta en oposición al desplazamiento aplicado sobre uno de sus extremos por las mordazas según la imagen 3.56, quedando todo registrado en un diagrama tensión-deformación unitaria.

Por tanto, este ensayo permite extraer los principales valores de las propiedades resistentes que definen cada material, como es el caso del módulo de elasticidad, el límite elástico, límite de rotura, deformación unitaria o la energía de deformación, energía absorbida por el material durante la deformación y posterior fractura, a partir de la cual se puede conocer la tenacidad del material.

Previo a la realización de los ensayos, se registraron las propiedades físicas y geométricas de las probetas. Fue necesario medir con un calibre (pie de rey) el ancho y espesor de cada probeta para calcular su área útil de esfuerzo. Registrados estos valores, se inició cada uno de los ensayos utilizando la máquina del laboratorio, una IBERTEST modelo ELIB-50.

El procedimiento de ensayo consistió en posicionar la probeta entre las mordazas y aplicarle un pre-tensado. Seguidamente se midió y anotó la distancia libre entre mordazas L_0 . A continuación se inició el ensayo y la mordaza superior comenzó a desplazarse generando una deformación gradual mediante el incremento de distancia entre mordazas, y en consecuencia un esfuerzo en la dirección axial, según la imagen 3.57. Tanto los valores de fuerza como los de desplazamien-

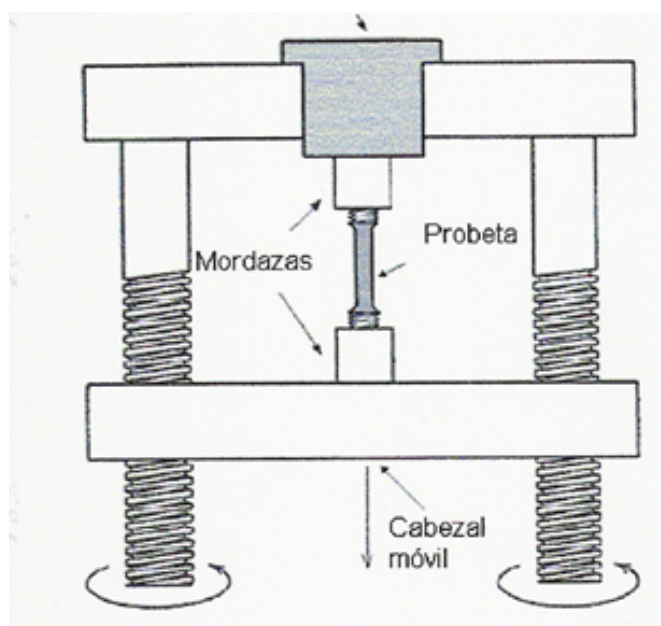


Figura 3.56: Ensayo de tracción ISO 527-1.

to fueron registrados por el software del equipo para dar lugar a las gráficas de fuerza-deformación.

Para plasmar la gráfica de tensión-deformación es necesario conocer el área útil de la probeta, la variación de su longitud y la fuerza ejercida durante el ensayo. A partir de estos valores aplicados a la norma ISO 527-1, es posible generar el gráfico.

El cálculo de la tensión en función de la fuerza y el área se define en el apartado 3.6 de la norma, especificado por la ecuación 3.5.

$$\sigma = F/A \quad (3.5)$$

Donde

- σ es el valor de la tensión expresado en megapascales (MPa);
- F es valor de fuerza registrada, expresada en newtons (N);
- A es el valor del área de la sección útil de esfuerzo (sección transversal) calculada a partir de el ancho y espesor de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm^2);



!ht

Figura 3.57: Ensayo de tracción realizado.

Cuando se calcula la tensión a un determinado porcentaje de deformación, esta deformación debe ser producto de la aplicación de la normativa.

Para el cálculo de la deformación unitaria sobre estados de deformación previos al punto de fluencia o sobre este, las deformaciones se calcularon aplicando el punto 3.7 de la norma, definido por la ecuación 3.6:

$$\varepsilon = \Delta L_o / L_o \quad (3.6)$$

Donde

- ε valor porcentual o adimensional de la deformación;
- L_o valor de la longitud inicial de referencia de la probeta a elongar, (distancia entre mordazas), expresada en milímetros (mm).
- ΔL_o es el valor del incremento de longitud de la probeta, expresado en milímetros (mm).

La obtención de la deformación mediante el uso de un extensómetro promedia los valores sobre la longitud de referencia. Esto resulta correcto siempre que la deformación de la probeta sea homogénea en la longitud de referencia. Si en el proceso la sección comienza a estrecharse en alguna de sus direcciones, la distribución de la deformación resultará no homogénea. Por tanto las deformaciones determinadas de esta forma dependen en gran medida de la zona del estrechamiento. Para estos casos, se emplea la deformación nominal para describir la evolución de la deformación tras el punto fluencia.

A partir de los valores de tensión y deformación unitaria calculados mediante la aplicación de la norma, ha sido posible generar los gráficos descritos para cada tipo de material.



Figura 3.58: Montaje de extensómetro. Ensayo Poisson.

3.5.2 Coeficiente de Poisson

Se define como coeficiente de Poisson a la constante elástica que relaciona los valores de la disminución de la sección transversal de la probeta frente los del incremento de la sección longitudinal, en la que se aplica la carga de manera axial (ensayo de tracción). Dicho coeficiente toma su nombre en honor al físico francés Simeon Poisson.

Para este ensayo se empleó de nuevo la máquina de ensayos IBER-TEST modelo ELIB-50 del laboratorio, puesto que se trata de una extensión del ensayo de tracción al que se le añade el registro de las deformaciones direccionales mediante el extensómetro de la imagen 3.58.

La formula que define el coeficiente de Poisson se expresa según la ecuación 3.7

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{transversal}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (3.7)$$

donde

- ν es el valor del coeficiente de Poisson.
- ε_t es el valor de la deformación unitaria transversal.
- ε_l es el valor de la deformación unitaria longitudinal.

A partir de los valores de deformación obtenidos para cada probeta es posible generar un gráfico de fácil interpretación donde se expresa la deformación longitudinal frente a la deformación transversal.

El proceso seguido para la realización de este ensayo puede describirse de la siguiente manera:

1. Registro de propiedades físicas y geométricas de la probeta: longitud, espesor y anchura.
2. Preparación del ensayo: posicionado de la probeta en las mordazas, pretensado y montaje del extensómetro.
3. Toma de datos: Inicio del ensayo y registro de las deformaciones mediante el extensómetro.
4. Cálculo de los valores unitarios de deformación : Aplicación de la fórmula 3.6 aplicada a las deformaciones longitudinal y transversal.
5. Cálculo del coeficiente de Poisson: Aplicación de la fórmula 3.7.

3.5.3 Ensayo de flexión

La deformación producida por una fuerza externa que presenta un elemento estructural en la dirección perpendicular a su eje longitudinal se denomina flexión. Se considera esfuerzo de flexión pura a la aplicación de pares de fuerza sobre un cuerpo, perpendiculares a su dirección longitudinal, de forma que deriven en la variación del ángulo de las

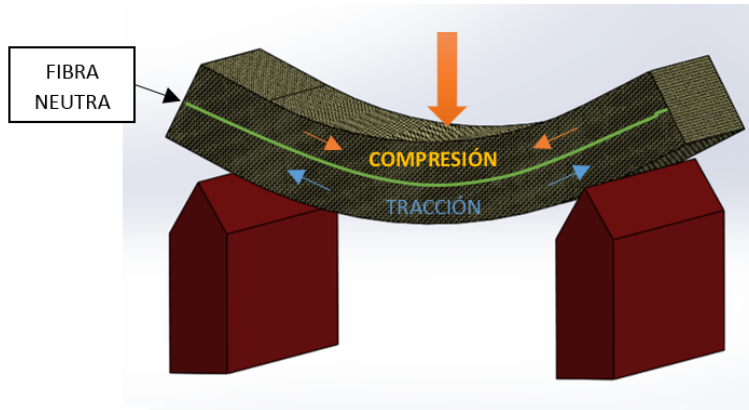


Figura 3.59: Ejemplo de esfuerzo de flexión.

secciones transversales en los puntos de apoyo, según puede verse en la figura 3.59.

Debido al tipo de deformación causada por un esfuerzo de flexión, en un objeto se puede distinguir una zona sometida a compresión (donde se aplica la fuerza) y una zona sometida a tracción. La línea intermedia que separa estas dos superficies se denomina fibra neutra y su distancia no varía a lo largo de la curva formada por la deformación con respecto al valor inicial, según puede verse en la figura 3.59. El esfuerzo que genera la flexión se define como momento flector.

El ensayo consistió en aplicar un esfuerzo perpendicular a la zona central de una probeta de ancho 10 mm ($\pm 0,2$) bi-apoyada separada 20 mm ($\pm 0,2$), según la norma ISO 14130, hasta alcanzar su rotura mediante un útil (3.60) con radio específico para este tipo de ensayos instalado en la máquina de desplazamiento lineal IBERTEST ELIB-50.

Con este útil el esfuerzo se transmite a partir del desplazamiento de un actuador lineal según se aprecia en la figura 3.61. El rozamiento de la probeta se considera despreciable atendiendo a que el útil dispone de rodamientos en cada uno de los puntos de contacto con el espécimen a ensayar.

El objetivo principal de los ensayos de flexión es obtener las propiedades mecánicas de un material relacionadas con el esfuerzo aplicado y

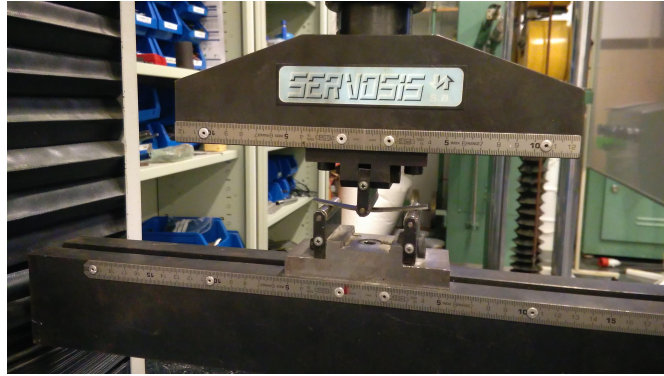


Figura 3.60: Ensayo realizado.

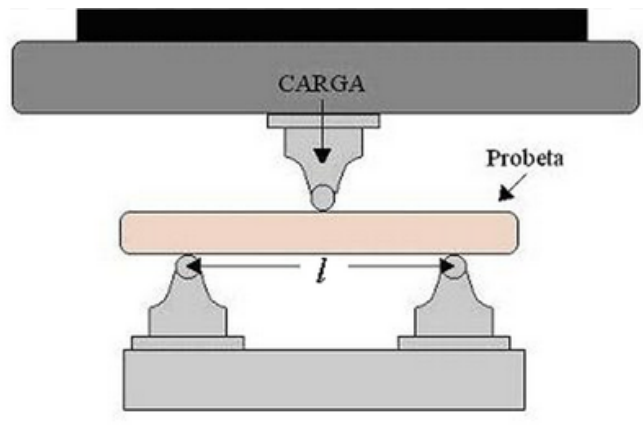


Figura 3.61: Ensayo flexión ISO 14130.

la deformación (flecha), dando lugar al cálculo del módulo elástico en flexión.

Ha sido necesario aplicar la norma ISO 14130, con el fin de generar el gráfico tensión-deformación(flecha). Para ello el cálculo de la tensión parte de la ecuación 3.9.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

donde se define

- σ_f como el esfuerzo de flexión, en megapascales (MPa);
- F la fuerza aplicada, en newtons(N);
- L la distancia entre los apoyos, en milímetros (mm);
- H espesor de la probeta, en milímetros (mm);
- B ancho de la probeta, en milímetros (mm);

De esta forma se han calculado los valores de tensión para plasmar los gráficos tensión/deformación, aplicados a cada tipo de material.

3.5.4 Ensayo de dureza

La dureza se define como la oposición que presenta un material a ser rallado, es decir, la capacidad o resistencia del material a soportar esfuerzos sin presentar una deformación plástica localizada.

Cuanto mayor dureza presenta un material, más difícil resulta deformarlo permanente[34]. En los ensayos de dureza se mide la profundidad o de huella resultante de la aplicación de una determinada fuerza sobre un indentador de balín o de aguja. De esta forma, un material más blando reflejará mayor profundidad de huella que otro de mayor dureza.[34].

Independientemente del tipo de material, la dureza resulta inversamente proporcional a la profundidad de huella y dependiente de su

módulo de elasticidad. Pero por otro lado, en función de la tipología de material, se deben utilizar penetradores y escalas concretas.

El estudio de la dureza de un material resulta interesante puesto que evalúa la reacción de su estructura frente a la aplicación de una tensión localizada, sin rotura.

Los ensayos sobre las distintas probetas se realizaron utilizando una aguja con ángulo de punta de 30° en un durómetro Shore 673D de la marca INSTRUMENTS J.BOT, S.A.

Las durezas obtenidas en estos ensayos tienen más bien un carácter comparativo, puesto que se trata de valores relativos que han servido para establecer una comparación cualitativa, no siendo relevantes para el apartado de diseño y cálculo.

3.5.5 Ensayo de compresión

Atendiendo a los resultados de los ensayos de tracción y a las primeras pruebas realizadas en el equipo de fatiga hemos visto que no es necesario seguir realizando el resto de ensayos a todos los materiales iniciales, puesto que durante el proceso de desarrollo de la tesis se ha pretendido realizar una selección hasta elegir un material con el que fabricar el prototipo final.

Por las propiedades mecánicas y resistentes, y atendiendo a los primeros ensayos de fatiga realizados, es posible distinguir dos fibras de origen natural que destacan sobre el resto: basalto y bambú. De estas dos fibras, se ha descartado el basalto por su procedencia de una fuente finita entre otros factores como la reciclabilidad y la huella de carbono. Por esta razón se ha seleccionado la fibra de bambú, por tratarse de un material procedente del cultivo, con baja huella de carbono y con alto potencial de reciclabilidad.

El ensayo de compresión mide la resistencia que opone una probeta de determinado material frente a una sollicitación axial negativa que pretende comprimir el material, por lo que de este ensayo es posible obtener el diagrama de tensión-deformación unitaria.

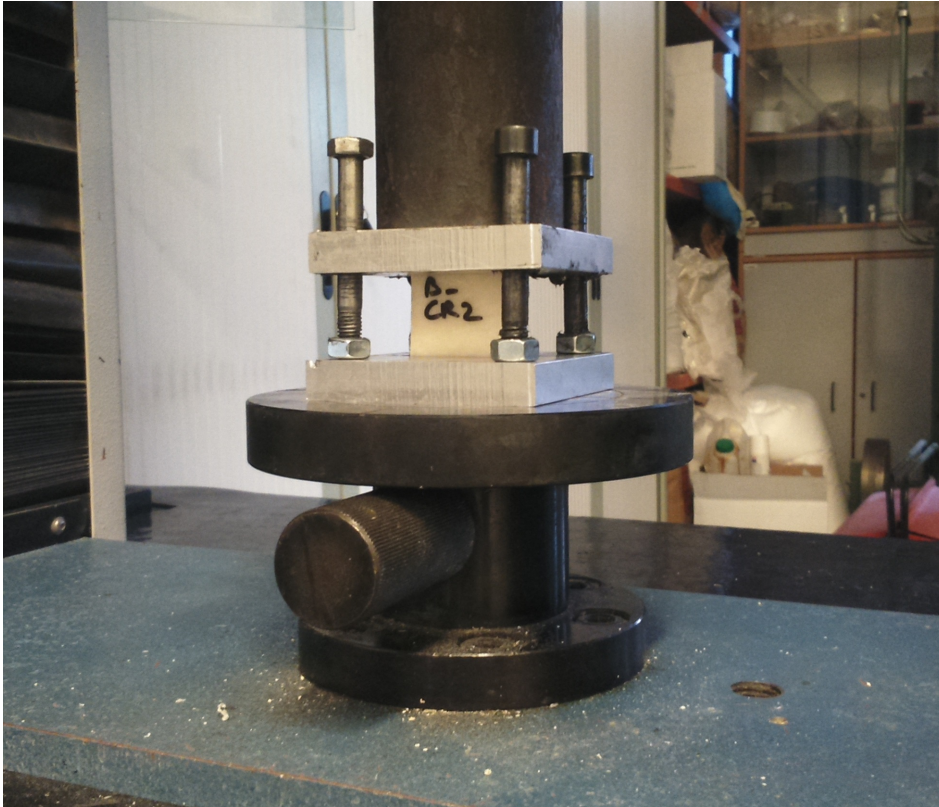


Figura 3.62: Ensayo de compresión.

Antes de iniciar el ensayo de compresión, y al igual que en los demás, fue necesario registrar los valores de la longitud, anchura y espesor de las probetas de cara a los distintos cálculos. Una vez anotados, se iniciaron los ensayos de compresión con la máquina de ensayos IBER-TEST modelo ELIB-50 del laboratorio.

El ensayo consistió en someter a la probeta a una deformación gradual mediante el decremento de la separación entre las dos placas del útil diseñado para el ensayo figura 3.62. El sistema de guiado de las placas restringe el movimiento en dos de sus ejes, permitiendo solo el desplazamiento en el eje principal, con la finalidad de que sobre la probeta se ejerza solo esfuerzo de compresión axial. Cada ensayo se dio por finalizado en el momento en que se produjo la caída de fuerza sobre la probeta.

3.5.6 Ensayo de cortadura Iosipescu

Para poder determinar correctamente la resistencia a cizalladura se pueden distinguir dos tipos de métodos: indirectos y directos. El primer tipo consiste en métodos indirectos en los que se busca obtener el valor de la tensión tangencial a partir de un estado tensional combinado en el que predominan valores tangenciales. Por otro lado, en los métodos directos se busca obtener un estado tensional tangencial puro de forma directa.[35]

Existen distintos métodos directos de caracterización de las propiedades de cortadura en laminados de materiales compuestos. En nuestro caso, el método que se ha utilizado es el de Iosipescu estandarizado por ASTM en 1993 (ASTM D5379). Este método ha sido ampliamente utilizado por la comunidad científica en el estudio de materiales compuestos desde mediados de los años ochenta hasta la actualidad, por lo que ha demostrado ser muy preciso y fiable. [36]

Para poder realizar el estudio fue necesario diseñar y fabricar el útil concreto característico de este tipo de ensayos figura 3.63, el cual, por su disposición pretende forzar la generación de un estado tensional puro en la zona central de la probeta 3.64.

La carga de cortadura se consigue mediante el soporte del útil, el cual impide la rotación de los extremos de la probeta generando la tensión de cortadura por la existencia de dos momentos flectores formados por dos pares de fuerzas [37][35].

Las probetas utilizadas fueron fabricadas por el método de infusión de resina con bolsa de vacío y cortadas mediante un router CNC. Las probetas Iosipescu se caracterizan geométricamente por tener una doble entalla en el centro, por lo cual la rotura es inducida a producirse en ese punto de menor sección, obteniendo un estado tensional tangencial puro.

Al iniciar el ensayo, el actuador lineal de la maquina ELIB-50 desplazó directamente hacia abajo el soporte guiado del útil produciendo una



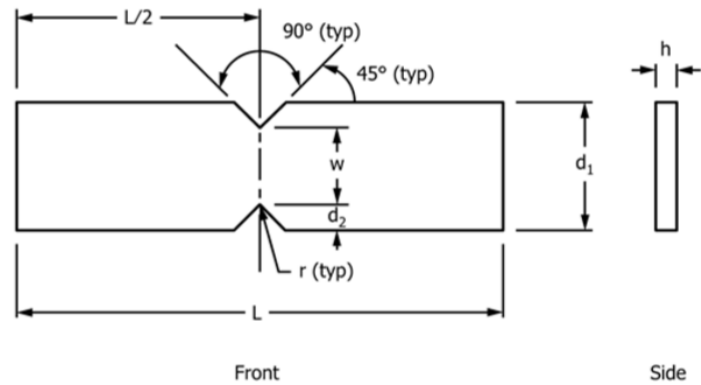
Figura 3.63: Útil de ensayo Iosipescu.

tensión de cortadura entre los extremos de las dos entallas. De esta forma se anula el momento flector y la tensión normal.

El estado de tensional de cortadura es constante a lo largo de la sección media de la probeta de ensayo y esta tensión se define por la ecuación 3.11

$$S = \frac{F}{wt} \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$



Nominal Specimen Dimensions

d_1	=	19 mm [0.75 in.]
d_2	=	3.8 mm [0.15 in.]
h	=	as required
L	=	76 mm [3.0 in.]
r	=	1.3 mm [0.05 in.]
w	=	11.4 mm [0.45 in.]



Figura 3.64: Dimensiones probeta de ensayo Iosipescu.

Donde:

- S es la tensión cortante.
- F es la fuerza aplicada.
- w es la sección mínima en la zona de las entallas.
- t es el espesor de la probeta.

La figura 3.65 muestra una imagen de la preparación del ensayo. La medida de la deformación unitaria en las direcciones vertical y horizontal se midieron mediante la técnica Digital Image Correlation (DIC) por el software gratuito GOM CORRELATE. Esta técnica permite determinar las deformaciones unitarias en base a la variación en la posición de diferentes puntos en la probeta.

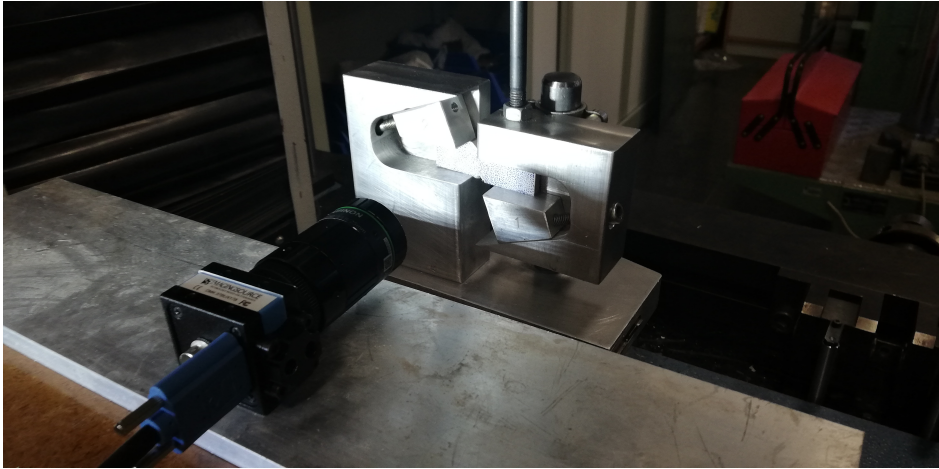


Figura 3.65: Ensayo Iosipescu.

3.5.7 Ensayo de tracción sobre el eje Z

En este trabajo se ha caracterizado de forma empírica el eje Z a partir de la probetas extraídas de un laminado de gran espesor (120capas), tras el ajuste geométrico con router CNC. De forma habitual, esta dirección tiene propiedades resistentes muy inferiores a las de las direcciones principales. En algunos laminados se están mejorando las propiedades en esta dirección a partir del uso de fibras refuerzo en la dirección del espesor[38].

El proceso de caracterización realizado es el mismo descrito para los ensayos de tracción, adaptado a las probetas fabricadas para este ensayo, las cuales son considerablemente más cortas.

El ensayo se basa en aplicar un esfuerzo de tracción creciente sobre la probeta hasta alcanzar su punto de rotura. Esta prueba permite registrar la fuerza que ejerce la probeta en oposición al desplazamiento aplicado sobre uno de sus extremos por las mordazas, quedando todo registrado en un diagrama tensión-deformación unitaria y a su vez nos permite verificar la adhesión inter-laminar a partir del estudio de la rotura.

La figura 3.66 muestra una imagen de la preparación del ensayo.

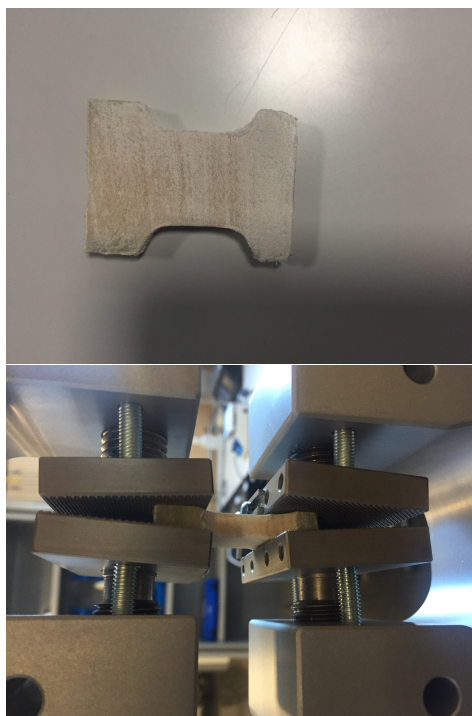


Figura 3.66: Ensayo de tracción en el Eje Z

3.5.8 Fatiga

Siempre que se hable de estudios de componentes mecánicos para el sector del transporte o la automoción van a existir asociadas cargas cíclicas repetitivas [6]. Por ello, se hace necesario disponer de datos suficientes relativos a las características resistentes de los materiales implicados bajo distintas situaciones.

Actualmente existen bases de datos de fatiga de multitud de materiales, aunque normalmente se centran en materiales extensamente conocidos y bajo condiciones de trabajo normalizadas. Sin embargo, no existen demasiadas fuentes de información respecto a materiales compuestos con fibras naturales, combinaciones de distintos tipos de fibras, orientaciones, bio-resinas, etc. o datos de fatiga bajo condiciones de trabajo concretas como alta o baja temperatura, porcentaje de humedad, presión, etc.

Los materiales pueden fallar con tensiones inferiores a las de rotura, cuando los esfuerzos a que se encuentren sometidos sean repetitivos y/o variables, este fenómeno se denomina fatiga [39].

El mecanismo de falla por fatiga siempre empieza con una grieta (pre-existente o que se forma) y ocurre cuando el esfuerzo repetido en algún punto excede el valor crítico relacionado con la resistencia a la fatiga del material. Para los materiales que poseen límite de fatiga, teóricamente es posible que nunca se generen grietas y, por lo tanto, que no ocurra la falla si los esfuerzos son tales que las deformaciones en el material sean siempre elásticas. Esto es lo deseable para que un elemento soporte las cargas indefinidamente.

Los fallos por fatiga son responsables del 90% de todos los fallos mecánicos, por tanto es una de las causas más comunes del fallo de componentes en casi cualquier aplicación sometida a sollicitaciones repetitivas [39]. La fatiga en construcción es un factor importante a tener en cuenta en el diseño de las estructuras de hormigón armado sometidas a cargas cíclicas como el pavimento rígido [40, 41], la travesía ferroviaria [42, 43] o la estructura de soporte de los generadores eólicos [44].

En estructuras aeroespaciales, la fatiga de alto ciclo es una causa común de falla. En materiales compuestos laminados, el proceso de fatiga implica varios mecanismos de daño que dan como resultado la degradación de la estructura. Uno de los mecanismos más importantes de daño por fatiga es el daño interlaminar [45]. La evolución del daño producido por cargas cíclicas en fatiga de alto ciclo, se formula generalmente en función del número de ciclos y de la variación de tensión generada por los desplazamientos [46, 47].

3.5.8.1 Fatiga en materiales compuestos

El método para determinar el comportamiento de los materiales a fatiga se basa en someter una probeta de material a ciclos de tensión alternante y registrar el número de ciclos requeridos para producir un fallo. Por lo general, el ensayo se ha de repetir con idénticas probetas y distintas cargas fluctuantes, de tipo axial para el caso de los materiales compuestos. Los datos obtenidos de los ensayos de fatiga se representan en un diagrama S-N (diagrama de Wöhler), que es un gráfico del número de ciclos necesarios para que se produzca el fallo en una probeta a una tensión cíclica determinada.

Según la tipología de aplicación de la carga cíclica repetitiva se distinguen cuatro tipos de ensayos en materiales compuestos 3.67, en función de $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, según describe la tabla 3.21.

R	Ensayo	
$R = 0,1$	Tracción-Tracción	$0 < R < 1$ Norma ASTM d3479
$R = 10$	Compresión-Compresión	$1 < R < 10$ Norma ASTM d615
$R = -1$	Tracción-Compresión	$R < 0$
$R = 1$	Ensayo estático	$R = 1$ No produce fatiga

Tabla 3.21: Tipología de cargas

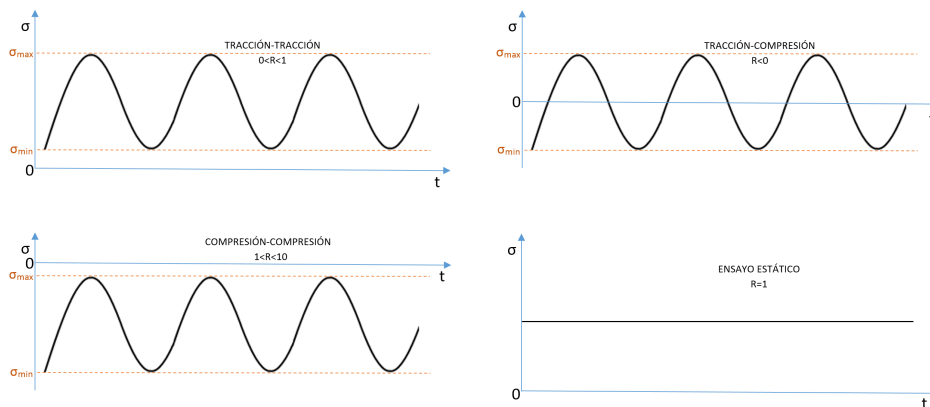


Figura 3.67: Tipología de aplicación de la carga.

En los ensayos de fatiga con materiales compuestos es muy importante tener en cuenta la frecuencia de aplicación de la carga puesto que tiene gran importancia en los resultados. Cuando situamos los ensayos por

debajo de la frecuencia de transición ($\approx 1\text{Hz}$) aparece el acoplamiento de fatiga-creep, produciéndose sobre la probeta una deformación extra por fluencia lenta (creep), la cual desvirtúa los resultados de resistencia de fatiga. Se trata de una deformación que sufren los materiales viscoelásticos cuando están sometidos a una tensión constante.

Por esta razón no es correcto bajar de 1Hz puesto que los resultados no versarán sobre fatiga, sino más bien sobre un comportamiento mixto fatiga-creep.

Por otro lado, si situamos los ensayos por encima de 10Hz se genera calor excesivo por el rozamiento interno de las fibras, pudiendo llegar degradar la resina por exceso de temperatura.

El tipo de ensayos que se realizarán en este trabajo son del tipo Tracción-Tracción y se encuentran regulados por la norma ASTM D3479. Con este método se determina el comportamiento a la fatiga de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras continuas o discontinuas para las cuales las propiedades elásticas son especialmente ortotrópicas con respecto a la dirección del ensayo.

El procedimiento descrito en la norma especifica dos tipos de ensayo:

- El procedimiento A consiste en someter una probeta a ciclos de carga axial mínima y máxima a una frecuencia especificada.
- El procedimiento B consiste en someter una probeta a ciclos de deformación axial mínima y máxima a una frecuencia especificada.

El número de ciclos de carga en los que ocurre la falla o se observa un cambio en la rigidez de la muestra es el límite de fatiga del material en las condiciones de estudio.

3.5.8.2 Diseño y fabricación de un banco de ensayos para fatiga

El equipo de la figura 3.68 ha sido el utilizado en este trabajo para realizar los ensayos de fatiga. Diseñado y fabricado durante la tesis, específicamente para materiales compuestos. Esta máquina ha sido pensada para poder realizar ensayos de fatiga en casos de tracción-tracción, tracción-cero, tracción-compresión, compresión-cero y compresión-compresión.

En este trabajo el equipo ha de ser capaz de realizar ensayos de fatiga de ciclos altos, por lo que resulta primordial optimizar el tiempo de ensayo al máximo. Además, se pretende ensayar probetas de distintas tipologías y composiciones con la posibilidad de realizar los ensayos en condiciones estándar y condiciones particulares a cada prueba (no estándar).

Por esta razón, se han diseñado unas mordazas cuádruples que permiten el montaje de hasta cuatro probetas de forma simultánea, lo cual reduce el tiempo de ensayos de las baterías de probetas. La frecuencia de funcionamiento puede ser ajustada entre 1 y 10 Hz mediante un grupo oleo-hidráulico con intercambiador de calor refrigerado por ventilación forzada.

La adquisición de datos se realiza mediante un equipo HBM MGCplus y el software Catman Professional[®]. El transductor de fuerza es un HBM tipo U3. En un primer momento, se instalaron dos sensores de posición lineal resistivos PL2S de ELAP como los de la figura 3.69 para controlar el desplazamiento y la posición de la bancada. Uno aportaba información al equipo de adquisición de datos HBM mientras que el otro formaba parte del equipo de control.

Con esta configuración se realizaron distintos ensayos con materiales para ajustar y validar el equipo. A su vez, estos primeros ensayos sirvieron para discernir que materiales debíamos seguir estudiando.

Después de realizar ensayos con distintos materiales y validar el funcionamiento del equipo se observó que en algunos casos existía una



Figura 3.68: Equipo de ensayos de fatiga.

deformación permanente con el paso del tiempo (creep), llegando a generar cargas de compresión en la zona del ciclo donde debería existir valores de tensión mínima de tracción axial. Para evitar esto, se realizó una modificación en la mordaza, liberándole la retención superior, lo cual permitió un movimiento relativo entre mordaza y eje, impidiendo la generación de cargas de compresión.

Además, para controlar esta deformación y mantener siempre las probetas en rango de tracción-tracción, se instaló un transductor de des-

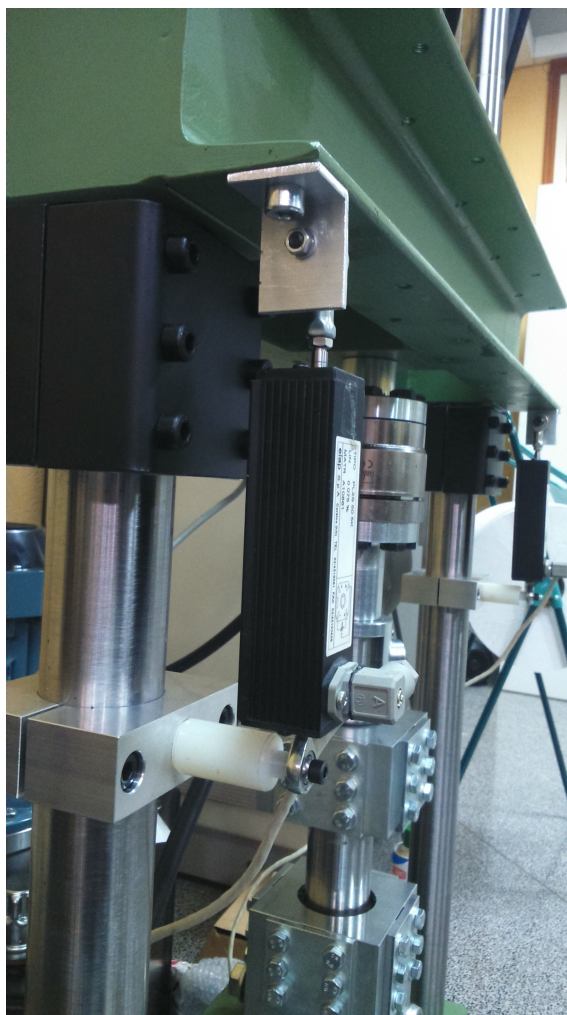


Figura 3.69: Sensor PL2S de ELAP.

plazamiento lineal modelo RS 317-780 (figura 3.70) para medir el desplazamiento relativo entre mordaza y eje pistón. Al controlar esta deformación plástica de las probetas, es posible realizar el autoajuste de la longitud cero y así mantener la probeta con esfuerzo de tracción axial en todo el estudio (figura 3.71).

Durante esta modificación se sustituyeron también los dos sensores de desplazamiento de la bancada por dos de tipo RS 317-780, puesto que los anteriores ya habían completado su ciclo de vida con los estudios realizados hasta el momento.



Figura 3.70: Sensor RS 317-780.

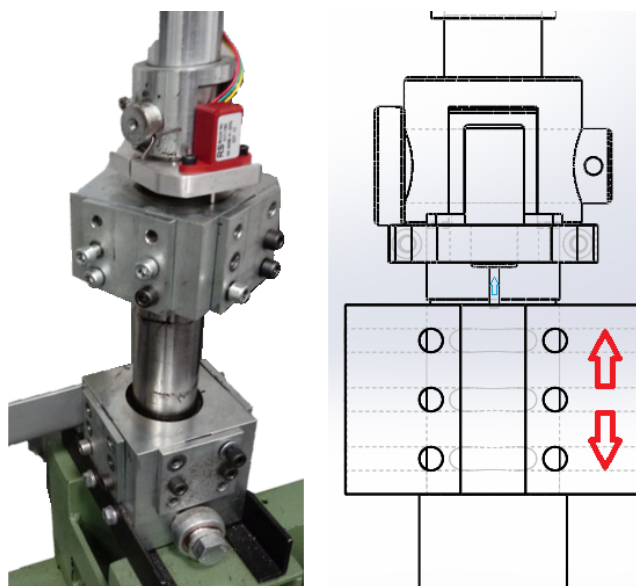


Figura 3.71: Montaje del sensor de desplazamiento relativo por creep.

Con esta configuración el equipo funcionaba correctamente, pero debido al elevado número de ciclos necesarios para caracterizar la fatiga en cada nivel de tensión y tipo de material, fue necesario sustituir los sensores en varias ocasiones.

Finalmente se decidió modificar de nuevo el sistema, sustituyendo los dos sensores potenciométricos de contacto mecánico que actuaban so-

bre la bancada móvil por un único sensor láser que aportaba datos al sistema de control y al equipo de adquisición. Además, la máquina se instaló en el interior de una cámara envolvente cerrada que disponía de un sistema de control de temperatura, quedando un equipo plenamente funcional como se muestra en la imagen 3.72.



Figura 3.72: Máquina en configuración final.

3.5.8.3 Ensayos de fatiga

Como se ha descrito, los ensayos de fatiga se han realizado con cuatro probetas a la vez gracias al sistema de mordazas diseñado que se muestra en la figura 3.73.

El proceso que se ha seguido en cada uno de los ensayos empieza con la introducción de los parámetros de funcionamiento en el script de Arduino para el control del equipo. Los parámetros principales a

introducir son la longitud inicial (L_0) de la probeta, desplazamiento mínimo L_{\min} y desplazamiento máximo L_{\max} .



Figura 3.73: Mordaza para soporte de probetas.

Se debe registrar cada una de las dimensiones principales de las probetas, así como grabarles un código en el que se identifique el material, número de ensayo y posición de la probeta en la mordaza.

Para la instalación de las probetas se posiciona el pistón en la punto "Cero de máquina" (coincidente con L_0) y se monta el tope mecánico para asegurar la posición. A continuación es posible apretar cada una de las probetas controlando que se encuentren a 90° de la base.

El ensayo se inicia de forma progresiva con un desplazamiento creciente en cada ciclo hasta alcanzar la longitud de desplazamiento máximo. Una vez alcanzado el funcionamiento normal previsto, el pistón se desplazará entre L_{\min} y L_{\max} hasta la rotura de todas las probetas. Tras unos miles de ciclos se empieza a apreciar una deformación permanente de la probeta, la cual es corregida de forma automática a partir del incremento de L_0 que se registra en el tercer sensor.

Cuando se produce la rotura de una de las probetas se aprecia en la gráfica una variación de la fuerza total que corresponde a la fuerza que soportaba dicha probeta, como puede apreciarse en la figura 3.74.

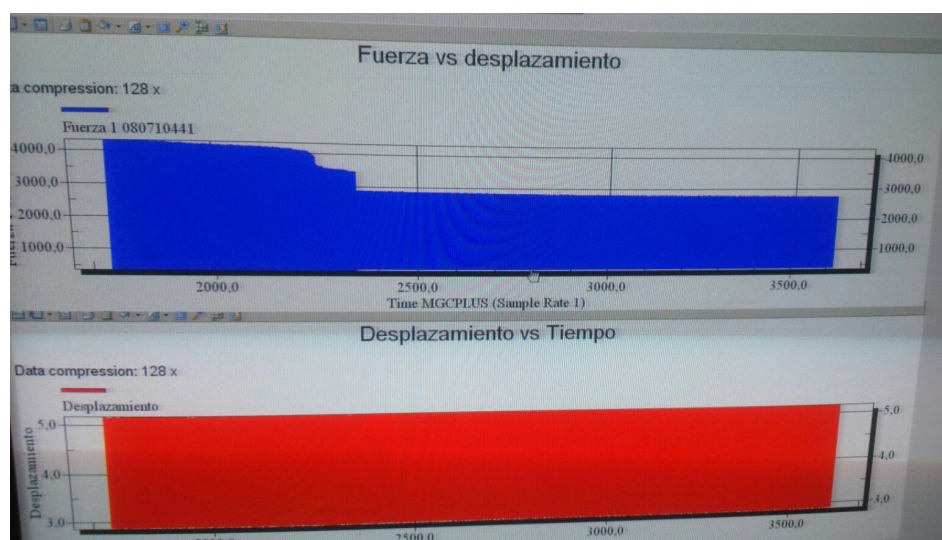


Figura 3.74: Registro de rotura de una probeta mediante equipo HBM y software Catman.

Para procesar los datos registrados por el equipo de adquisición HBM, en un inicio se trabajó con un script de conteo y ploteo de ciclos sobre el cual se fueron realizando modificaciones a fin de mejorarlo.

Este método trabajaba realizando un conteo de ciclos teniendo en cuenta variaciones en el valor de la fuerza para obtener el punto de rotura de cada probeta, lo cual era correcto. A continuación, el script calculaba la media aritmética de la fuerza máxima a la que habían estado sometidas las probetas durante los ciclos hasta la rotura y restaba esta fuerza del valor de la fuerza tras la rotura para obtener un valor

medio de fuerza máxima, de igual forma se procedía para obtener la fuerza mínima.

A partir de estos valores es posible calcular la fuerza media y la fuerza alternante:

De igual forma, y aplicando las formulas requeridas para cada caso, es posible calcular la tensión máxima, mínima, media, alternante, así como la alternante equivalente, conociendo el valor $S_{ut}(95)$.

En un caso ideal en el cual durante todos los ciclos se mantuviesen constantes los picos de fuerza máxima y mínima este procedimiento sería correcto, no obstante, en nuestro equipo no es posible mantener constante la fuerza, por lo tanto, durante el ensayo la probeta se ve sometida a distintos niveles de tensión, cada cual con su grado de implicación en el daño final de la probeta y el cálculo de la media aritmética de los picos de fuerza no es correcto.

Por ello, para conocer el daño causado es necesario tratar los datos mediante un software matemático de análisis de señales como es el caso del módulo de Matlab Rainflow Counting Algorithm. Con este módulo podemos conocer el número de veces que se repite cada nivel de esfuerzo, y a partir de esto extraer con exactitud el sumatorio de esfuerzos que han causado la rotura, calculando a su vez amplitud, tensión media, tensión alternante y tensión alternante equivalente.

3.5.9 Estudio de Fatiga Multiaxial

3.5.9.1 Montaje sobre banco de ensayos

Para realizar el estudio de fatiga sobre el prototipo fue necesario diseñar un conjunto de soportes que permitiesen reproducir la aplicación de las cargas que tendrían lugar en un uso real en competición.

Para ello se diseñó un soporte fijo en acero S355J2G3 (figura 3.75) que simulaba el bastidor de la motocicleta mientras que un sistema de bieleta formado por dos rotulas aplicaba el esfuerzo sobre el eje en

que descansaría el pie del piloto en una situación real, a 20 mm del estribo.



Figura 3.75: Soporte y montaje de prototipo sobre la bancada.

El esfuerzo en el estribo se aplicó en la carrera de retroceso del pistón por lo que a la vista del montaje (figura 3.76) puede parecer inverso al sentido de aplicación del caso real, no obstante, el sistema de sujeción del componente está diseñado para instalarlo invertido 180°, con lo cual el esfuerzo aplicado queda en la misma dirección y sentido al que tendría en la aplicación real.

Una vez posicionado el soporte fue posible ensayar los prototipos fabricados y registrar los datos mediante el equipo adquisición HBM MGCplus y el software Catman Professional®, viendo a tiempo real la fuerza y deformación generada como se aprecia en la captura de pantalla de la figura 3.77



Figura 3.76: Ensayo sobre prototipo 03.

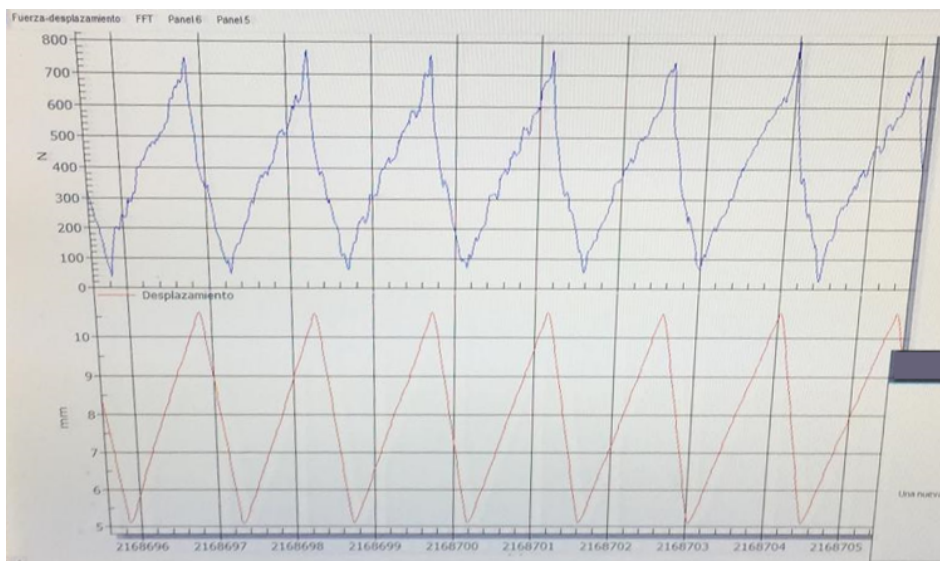


Figura 3.77: Gráfica de ciclos en software de adquisición de datos Catman.

3.6 Modelo teórico de Elementos Finitos uniaxial

3.6.1 Modelado CAE

Tras la caracterización de los materiales, se reprodujeron los ensayos de tracción en el software de elementos finitos ANSYS WORKBENCH, inicialmente en la versión 14.5.7.

La finalidad de este estudio fue la de validar un modelo CAE que se aproximará a la realidad del ensayo con el propósito de aplicarlo posteriormente a los cálculos de los prototipos en solicitaciones multi-axiales.

De esta manera, se reprodujeron los distintos ensayos de tracción para las probetas con las fibras orientadas a $0/90^\circ$ tomando como datos del material los extraídos de la caracterización. Tras comparar y ajustar los resultados de esta simulación con los obtenidos empíricamente, se realizó un nuevo modelado con las fibras orientadas a $45/-45$. A partir de los resultados de esta segunda simulación se pudo conocer la bondad del modelo por comparación con los resultados obtenidos empíricamente con probetas de esta orientación.

Para realizar la simulación, el proceso de modelado comenzó con el diseño CAD de las probetas utilizadas para el ensayo. Por tratarse de una geometría simple, para el diseño CAD de la probeta se empleó la herramienta de ANSYS 'DesingModeler'.

Para este tipo de estudio, basado en el posicionamiento de láminas de tejido, en este software resulta necesario que la geometría no sea un sólido, sino más bien una cascara 2D a la que aplicar el número de capas pertinente en el apartado de diseño del laminado (en ACP PRE) como se aprecia en la figura 3.78. Por esta razón se convirtió la cara en contacto con el molde en una superficie de espesor cero o cascara.

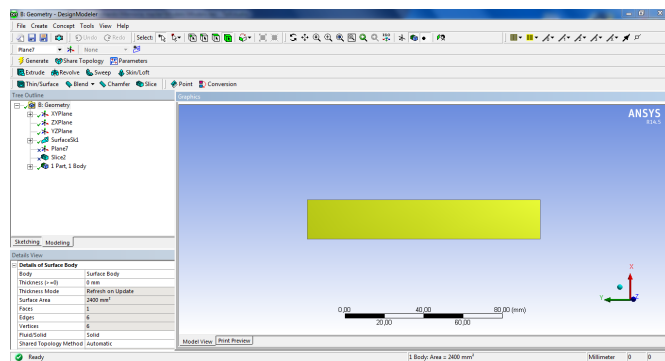


Figura 3.78: Diseño CAD de la probeta.

A continuación, en 'Engineering Data' (Figura 3.79), base de datos de materiales del programa se añadieron las principales propiedades de los materiales caracterizadas en los ensayos que pueden listarse como:

- Modulo de Young.
- Tensión máxima en cada dirección.
- Coeficiente de Poisson.
- Deformación unitaria en cada dirección.
- Módulo de cortadura estimado a partir de:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.12)$$

- Tensión cortante en cada dirección estimada a partir de:

$$\tau = 2G\varepsilon_{ij} \quad (3.13)$$

The screenshot shows the ANSYS Engineering Data interface. The 'Contents of Engineering Data' table lists various material properties. The 'Properties of Steel' table is expanded, showing the following data:

Property	Value	Unit
Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	3000	MPa
Young's Modulus Y direction	3000	MPa
Young's Modulus Z direction	700	MPa
Poisson's Ratio XY	0.34	
Poisson's Ratio XZ	0.263	
Poisson's Ratio YZ	0.263	
Shear Modulus XY	790	MPa
Shear Modulus XZ	790	MPa
Shear Modulus YZ	200	MPa
Orthotropic Stress Limits		
Tensile X direction	87.64	MPa
Tensile Y direction	87.64	MPa
Tensile Z direction	50	MPa
Compressive X direction	-100	MPa
Compressive Y direction	-100	MPa
Compressive Z direction	-80	MPa
Shear XY	40	MPa

Figura 3.79: Introducción de datos en Engineering Data.

Tras haber generado el CAD de la probeta y haber introducido las especificaciones del material en la base de datos, se definieron las hipótesis de carga, en esta simulación conocidas, puesto que se trata de las del ensayo de tracción, quedando definidas las cargas y restricciones aplicables.

Para reproducir un ensayo de tracción en ANSYS, el módulo de cálculo 'explicit dynamics' aporta gran cantidad de información extra, puesto que a pesar de estar diseñado para el cálculo de impactos, este tipo

simulaciones muestra la simulación de deformación plástica y de rotura de la probeta. Además, durante el proceso recalcula la malla en función del área resultante de la probeta deformada plásticamente.

El 'explicit dynamics' presenta el inconveniente de tener un tiempo elevado de resolución y además solo permite vincularlo con el módulo de preprocesado de composites, no con el post procesador. Por esta razón se utilizó el módulo 'Static Structural', teniendo en cuenta que el módulo de composites está pensado para enlazarse con el 'Static Structural'.

Para iniciar el modelado en el 'Static Structural', se debe asignar a la cascara un material y un espesor determinado. El modelado en este módulo se realizó considerando la probeta como un sólido de un material isótropo, por defecto de acero estructural.

A continuación se realizó el mallado. La malla se encuentra formada por 75 elementos y 104 nodos, dando un aspect ratio máximo de 1,15, según se observa en la imagen 3.80.

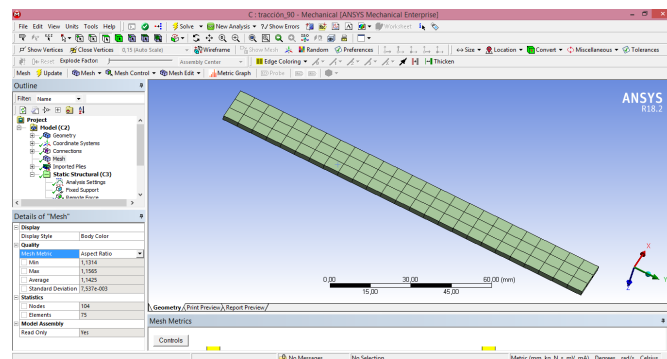


Figura 3.80: Diseño de la malla.

Seguidamente, tras el mallado se generó la restricción de tipo 'Fixed support' en un extremo de la probeta y un desplazamiento del tipo 'Remote displacement' en el otro extremo, simulando las mordazas. A continuación se calculó la simulación, obteniendo la visualización de resultados descrita por un mapa de colores sobre el componente como se aprecia en la figura 3.81.

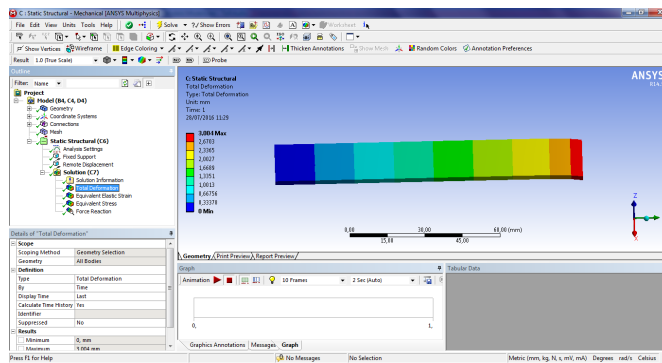


Figura 3.81: Cálculo en Static Structural.

La finalidad de este primer resultado de la simulación del ensayo atendiendo a propiedades y especificaciones no determinantes, fue la de generar un modelo para seleccionar los parámetros a tener en cuenta en el software específico de materiales compuestos. De esta forma, se seleccionaron los parámetros condicionantes para el cálculo con el material compuesto, siendo espesor y tensión máxima.

El siguiente paso fue vincular el estudio realizado con el pre-procesador del módulo ACP(PRE) Ansys composite prepost de ANSYS, el cual es específico para el cálculo de componentes de materiales compuestos, para definir las características del laminado de cada probeta (figura 3.82).

En este modulo se pudo definir los materiales que forman la lámina, el valor del espesor de la fibra y el tipo de entramado del tejido (tafetán, sarga, unidireccional, etc), todo ello para generar el laminado a aplicar, fijando el número de capas y el ángulo de cada una.

Finalmente se importó el estudio al Post-procesador Ansys ACP POST (figura 3.83) donde se definieron los factores de estudio (tensión, deformación, factor de seguridad) y los criterios de fallo donde el programa da a elegir entre tensión máxima, deformación máxima, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Hashin, Puck, LaRC o incluso alguno personalizado, siempre y cuando se disponga de todos los parámetros involucrados o se trabaje con materiales de la base de datos.

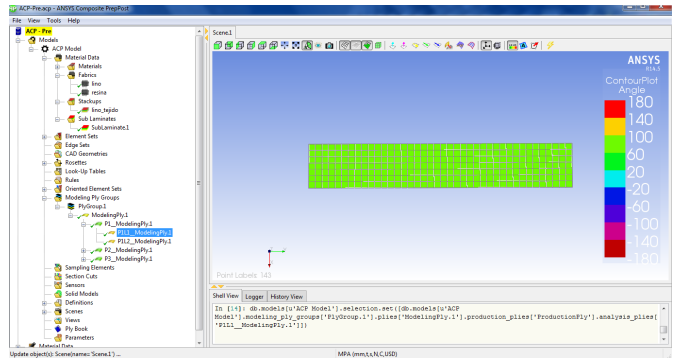


Figura 3.82: Introducción de datos en ACP-Pre.

Tras esto fue posible obtener los resultados para cada tipo de probeta, de nuevo en un mapa de colores expresado sobre la geometría (figura 3.83), donde fue posible conocer el estado tensional y las deformaciones del componente como único y de las distintas láminas que lo conforman por separado.

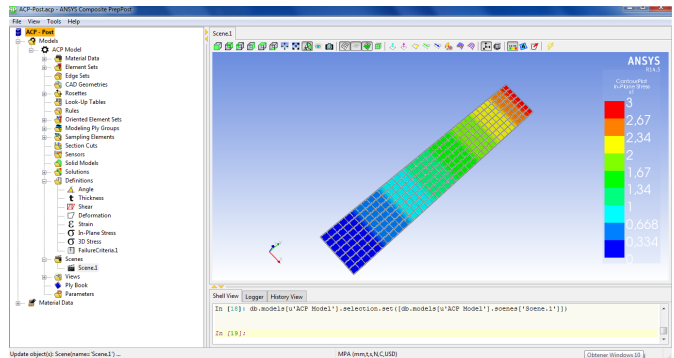


Figura 3.83: Obtención de resultados en ACP-Post.

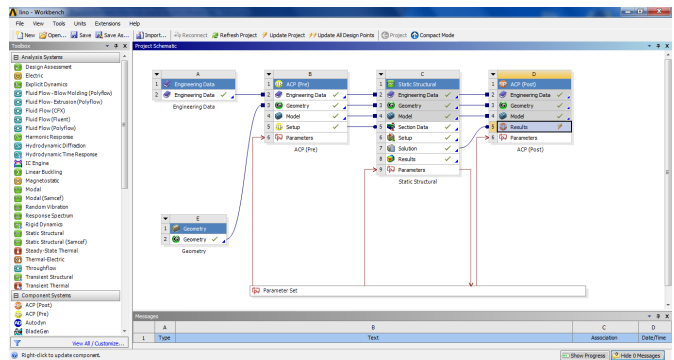


Figura 3.84: Arbol de módulos utilizados en ANSYS.

3.6.2 Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos para los ensayos de fatiga axial

El desarrollo del modelo de elementos finitos de las probetas sometidas a fatiga se ha basado en el del ensayo de tracción descrito en el punto anterior, atendiendo a que el esfuerzo aplicado sobre las probetas ha sido de tracción y con el mismo tipo de sujeción, solo que se han aplicado cargas repetitivas en ciclos de tracción-tracción y tracción-cero.

Para las simulaciones se han modelado distintos estados tensionales sobre las probetas en función de la carrera o desplazamiento aplicado en la máquina de fatiga. Este proceso en el software es el mismo que el del punto anterior.

El proceso consistió en aplicar un valor concreto de ciertos puntos de desplazamiento sobre el modelo de tracción y, conociendo el resultado del estado tensional de cada punto, realizar los ensayos en el equipo de fatiga. La finalidad de este apartado fue la de generar las gráficas de resistencia a fatiga (tensión-ciclos).

A su vez fue posible comparar de nuevo el software con los resultados empíricos a partir de los valores de fuerza necesarios para causar cada desplazamiento.

3.7 Desarrollo de un Modelo de Elementos Finitos multiaxial

Una vez validados los modelos de aproximación a los ensayos de tracción fue posible dimensionar un componente real de automoción.

3.7.1 Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial estático. Colín

Para este primer prototipo, el componente seleccionado para ser fabricado con fibras naturales fue un colín de una motocicleta de competición, por ser una de las piezas más utilizadas debido a su fragilidad frente a impactos por caídas. Concretamente, este apartado de estudio se centró en un componente de una Honda RS125R/NSF250R (imagen 3.85), modelo habitualmente empleado en el campeonato del mundo de velocidad.



Figura 3.85: Honda RS 125 R GP.

De forma estandarizada, los componentes de carrocería en vehículos de competición se fabrican con materiales compuestos. Lo más común es encontrar colines fabricados con fibra de vidrio por su facilidad de operación y su bajo coste. Pero en la alta competición el material estrella es la fibra de carbono por su baja densidad y elevada resistencia mecánica. Además, en muchos casos el laminado es reforzado con fibra de aramida, para mejorar la resistencia frente a caídas, buscando proteger componentes interiores para permitir al piloto retomar la marcha en una carrera, aunque el colín quede inservible.

3.7.1.1 Análisis por elementos finitos.

Existen colines con finalidad estructural, como es el caso de los colines auto-portantes, lo cual supone una elevada responsabilidad mecánica. Estos componentes no necesitan una estructura de apoyo, sino que por si mismo son suficiente para soportar los esfuerzos puntuales y de fatiga derivados del piloto.

El colín seleccionado para este apartado tiene como función principal acomodar al piloto y aportar aerodinámica al conjunto, por lo que se trata más bien de un componente estético. Este componente se instala atornillado sobre un subchasis de aluminio, por lo que el material compuesto queda liberado en gran medida de la masa del piloto.

Para analizar este prototipo se utilizó el software de elementos finitos ANSYS WORKBENCH en la versión 14.5.7 con la finalidad de obtener un resultado lo más próximo a la realidad, a partir del modelo computerizado del ensayo de tracción.

La secuencia de trabajo seguida para el estudio por elementos finitos y obtención del prototipo fue la siguiente:

1. Diseño del componente: conversión de la geometría a cascara.
2. Static structural: Estudio de simulación sobre hipótesis de carga.
3. ACP PRE: Especificaciones del laminado. Aplicación del laminado sobre el estudio de referencia.
4. ACP POST: Recálculo de la simulación con el material compuesto. Resultados específicos del laminado.
5. Fabricación

Por tratarse de una geometría real de un componente existente en el mercado, para obtener la geometría se realizó el escaneado 3D del componente. Pese a disponer de la geometría completa escaneada, se decidió simplificar el estudio a partir de la eliminación de parte del colín.

Una vez definida la geometría de estudio fue posible empezar el proceso de análisis por elementos finitos con el módulo ACP de Ansys. El proceso empezó por la generación de un esquema de proyecto, en el que se posicionó en un primer árbol la base de datos de materiales, la herramienta de geometría y el módulo Static Structural.

El siguiente paso fue añadir las principales propiedades del material, obtenidas en el apartado de caracterización. El material elegido para este componente fue la fibra de basalto con resina epoxi 1050.

A continuación se vinculó la geometría al estudio, importándola en formato step. Posteriormente se convirtió en cascara utilizando el editor de geometrías de Design Modeler de Ansys, creando una lámina de espesor 0 mm sobre la cara en contacto con el molde. De esta manera, se consigue aplicar el espesor de laminado deseado manteniendo la forma del molde.

El siguiente paso fue realizar el estudio sobre la pieza aplicando las cargas y restricciones pertinentes. Para ello se creó un estudio de tipo Static structural, vinculado a la geometría y a la biblioteca de materiales.

Para seguir avanzando fue necesario definir las hipótesis de carga. En este caso se simuló una carga B de 720N, normal a la base del sillín, que representaba el peso del piloto y otra carga C en la base trasera de 20N, que representaba posibles apoyos en aceleraciones.

Según se indica en la Figura 3.86, el colín dispone de cuatro de enlace con la estructura (color verde), los cuales se considerarán como las restricciones.

A continuación se designó un espesor y un material de tipo isótropo para seguir la simulación (este material solo se asigna para generar un modelo, posteriormente se sustituye por el laminado). Una vez mallada la geometría, se aplicaron sobre esta las restricciones de tipo 'Fixed support' en las cuatro áreas donde se enlazaría con el subchasis. A su vez se aplicaron como 'remote force', las fuerzas resultantes de la hipótesis tomada.

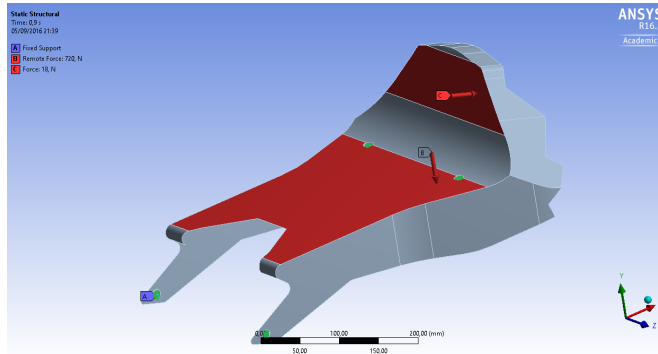


Figura 3.86: Aplicación de cargas y restricciones.

Tras esto, fue posible resolver y obtener los valores de tensión y deformación para el material isotropo seleccionado. Una vez generado el estudio en Static Structural se introdujeron y definieron los datos del material mediante el módulo ACP PRE.

El primer paso en el pre-procesador fue generar el material base en función de las capas que conforman una lámina, dando el valor del espesor y la orientación de las fibras dentro del tejido (0/90). El siguiente paso fue generar un sub-laminado a partir del tejido anterior, con la orientación y el número de capas deseado. En este caso el sub-laminado se formó por dos capas de tejido, la primera con fibras 0° y la segunda a 45°.

Una vez definido el material, el siguiente paso fue orientarlo en el componente, para lo que se tuvo que generar una roseta que serviría como eje de coordenadas. A partir de la cara vista de espesor cero y hacia el interior de la geometría se posicionan los sub-laminados orientados respecto de una de las aristas de la geometría.

A continuación, se añadió al árbol de trabajo un nuevo estudio ACP Post vinculado con el setup de ACP Pre y con la solución del Static estructural, con la finalidad de calcular los resultados de los esfuerzos supuestos sobre el laminado de forma más específica, puesto que el módulo está pensado para materiales compuestos.

Dentro del post-procesador, el primer paso fue definir los criterios de fallo, pudiendo visualizar más de uno de una vez. Con el criterio de

fallo seleccionado, el material bien definido en el ACP-pre y a partir de la solución obtenida en el módulo static structural fue posible resolver y obtener los valores de tensión y deformación de cada lámina para cada una de las tensiones principales y a su vez el factor de seguridad total del componente.

3.7.2 Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial estático. Estribo

El estudio de este segundo prototipo se centró en un componente de la misma motocicleta de competición Honda (NSF250R), concretamente en uno de sus estribos.

En una conducción tranquila se puede considerar que sobre el estribo se aplica la carga de las piernas del piloto de forma puntual o durante horas mientras se realiza un viaje, por lo que esto podría asemejar en gran medida a un estudio con cargas estáticas. No obstante, por tratarse de una moto de competición en la que el piloto se posa en posiciones extremas y ha de realizar constantes cambios de postura, las cargas debidas a la masa del piloto se aplican de forma variable en magnitud y tiempo.



Figura 3.87: Estribo de Honda RS 125 R GP.

Por tratarse de un componente semi-estructural que soporta cargas repetitivas producidas por la variación del porcentaje de masa del

piloto aplicado a cada estribo, es un componente idóneo para realizar un estudio de fatiga.

Dentro del estudio de fatiga queda incluido el estudio estático del estribo, puesto que se han analizado distintos estados de tensión derivados de cargas estáticas para obtener los niveles de tensión a aplicar en los ensayos empíricos, como se puede ver en el punto siguiente.

3.7.3 Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos multiaxial a fatiga

La fatiga se produce durante todo el periodo de tiempo que se está pilotando la moto, no obstante el momento donde las cargas son más elevadas sucede en la salida de una curva, donde los pilotos deben recuperar la posición vertical desde una postura en que se encuentran descolgados de la moto con el fin de trasladar el centro de gravedad del conjunto moto-piloto hacia un punto más bajo e interior de la circunferencia imaginaria trazada por la moto. En este momento se aplican las cargas máximas, ya que el piloto pretende recuperar la posición vertical lo más rápido posible.

El estribo original de la moto está fabricado en aluminio. En este caso no se pretende replicar la pieza original sino que desde el inicio la intención ha sido diseñar un nuevo modelo desde cero pensando en el proceso de fabricación y en el posterior ensayo real sobre la moto. Para ello se ha analizado por elementos finitos en diferentes estados de tensión y posteriormente ha sido ensayado en un banco de fatiga 3.88.

En este prototipo se tuvo que realizar el trabajo de diseño de componente, análisis FEM, diseño de molde, fabricación de molde y fabricación de componente dos veces, puesto que después haber fabricado el primer componente surgieron problemas tras el desmoldeo. Se vio que existían defectos en la pieza derivados de unos radios excesivamente pequeños en los que quedaban inclusiones de aire. Además, resultaba muy complicado desmoldear la pieza por falta de ángulo de desmoldeo en las paredes del molde. Por esta razón fue necesario re-diseñar

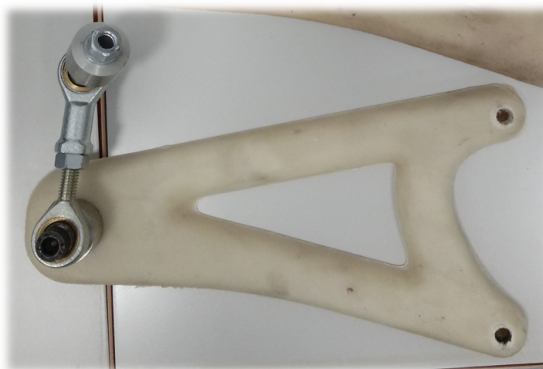


Figura 3.88: Prototipo de estribo fabricado y listo para ser ensayado.

y fabricar de nuevo el molde aumentando los ángulos de salida y redondeando el radio de las esquinas, y por tanto rehacer la simulación con la nueva geometría.

3.7.3.1 Desarrollo del Modelo de Elementos Finitos.

Para analizar este prototipo se utilizó el software de elementos finitos ANSYS WORKBENCH en la versión 18.2 con la finalidad de obtener un modelo lo mas próximo a la realidad.

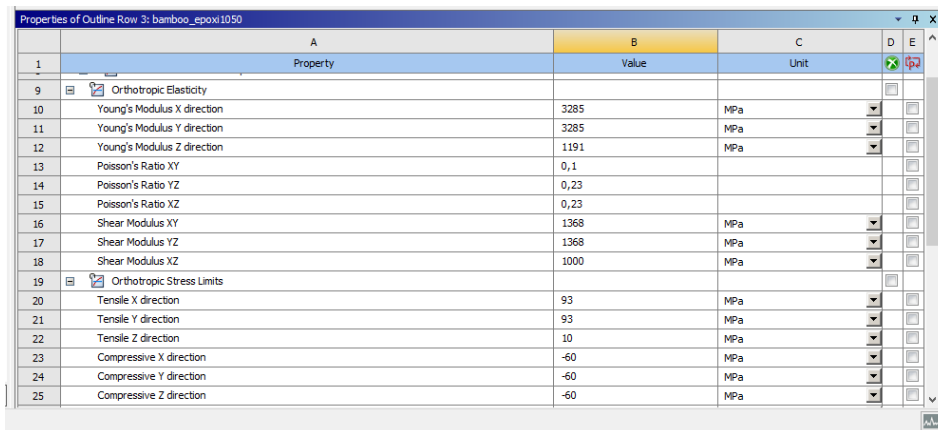
Esta versión difiere en procedimiento de uso respecto a las anteriores por lo que cabe explicar de nuevo el proceso. Se ha obviado la primera geometría defectuosa, por lo que a continuación se explica el proceso sobre la geometría final, el cual siguió el siguiente esquema:

1. Diseño del componente.
2. ACP PRE: Especificaciones del laminado.
3. Static structural: Estudio sobre hipótesis de carga.
4. ACP POST: Resultados específicos del laminado.
5. Fabricación

Una vez diseñado el componente atendiendo a las referencias del bastidor, se inició el proceso de análisis por elementos finitos con el módulo

ACP de Ansys. El proceso comenzó generando un esquema de proyecto, en el que se posicionó en un primer árbol la base de datos de materiales, la herramienta de geometría y el preprocesador de ACP.

El siguiente paso fue añadir las principales propiedades del material 3.89, en nuestro caso fibra de bambú con resina epoxi 1050. Estas propiedades se extrajeron del apartado de caracterización.



1	A	B	C	D	E
	Property	Value	Unit		
9	Orthotropic Elasticity				
10	Young's Modulus X direction	3285	MPa		
11	Young's Modulus Y direction	3285	MPa		
12	Young's Modulus Z direction	1191	MPa		
13	Poisson's Ratio XY	0,1			
14	Poisson's Ratio YZ	0,23			
15	Poisson's Ratio XZ	0,23			
16	Shear Modulus XY	1368	MPa		
17	Shear Modulus YZ	1368	MPa		
18	Shear Modulus XZ	1000	MPa		
19	Orthotropic Stress Limits				
20	Tensile X direction	93	MPa		
21	Tensile Y direction	93	MPa		
22	Tensile Z direction	10	MPa		
23	Compressive X direction	-50	MPa		
24	Compressive Y direction	-50	MPa		
25	Compressive Z direction	-50	MPa		

Figura 3.89: Propiedades del composite de bambú.

A continuación se importó la geometría diseñada en CAD del estribo en formato step. Utilizando el editor de geometrías de DesingModeler de Ansys convertimos en una cascara de espesor 0 mm la cara en contacto con el molde. De esta manera es posible aplicar el espesor de laminado deseado manteniendo la forma. A su vez, en este apartado se dibujaron las secciones en contacto con los tornillos de sustentación y el reposapié según se aprecia en la figura 3.90.

Una vez generado el diseño e introducidos los datos del material se pudo iniciar el trabajo en ACP PRE. Para ello en la pestaña model se generó el mallado del componente, lo cual resulta condicionante en esta versión para abrir el setup de ACP PRE.

El primer paso en el preprocesador fue generar el material base en función de las capas de la lámina, dando el valor del espesor y la orientación de las fibras dentro del tejido (0/90). El siguiente paso fue generar un sub-laminado, a partir del tejido anterior, con la orientación

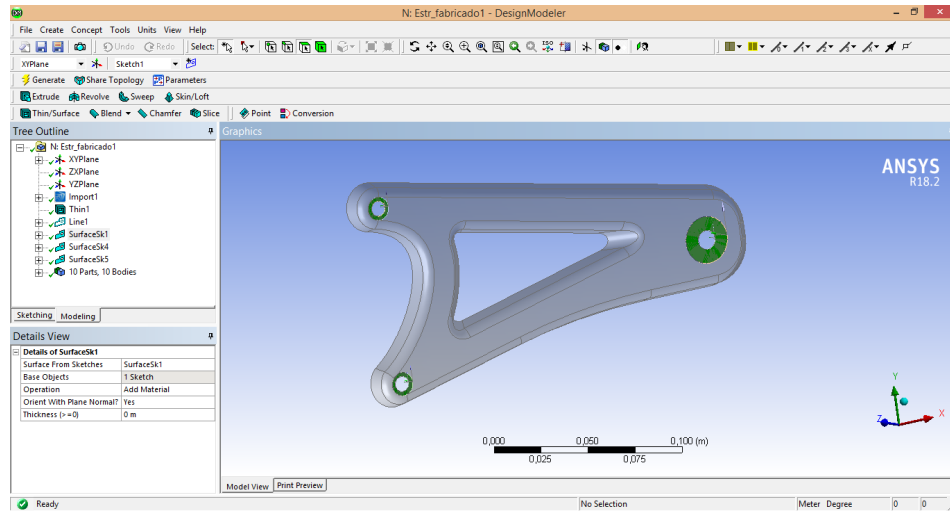


Figura 3.90: Generación de geometría de espesor cero.

y el número de capas deseado. En este caso el sub-laminado se formó a partir de dos capas; la primera con fibras 0° y la segunda a 45° .

Una vez definido el material, el siguiente paso fue orientarlo en el componente. Para esto se generó un nuevo eje de coordenadas (roseta) y se tomó la superficie lateral superior como referencia de orientación, dando lugar al posicionamiento de las capas según la figura 3.91.

A partir de la cara vista de espesor cero y hacia el interior de la geometría se posicionaron seis sub-laminados orientados respecto a la barra longitudinal superior, con lo cual la pieza disponía de doce capas de material orientadas a $0/90^\circ$ y $45/-45^\circ$, dispuestas alternativamente con respecto a la cara de referencia.

Quedando completamente definido el laminado dentro de la geometría, se pudo iniciar el estudio sobre la pieza aplicando las cargas y restricciones pertinentes. Para ello se añadió al árbol un estudio de tipo Static structural vinculado con el setup del preprocesador ACP. De esta manera, a diferencia de versiones anteriores, se importa directamente la geometría y el laminado a la primera simulación, con lo que no es necesario generar una simulación previa con materiales no deseados.

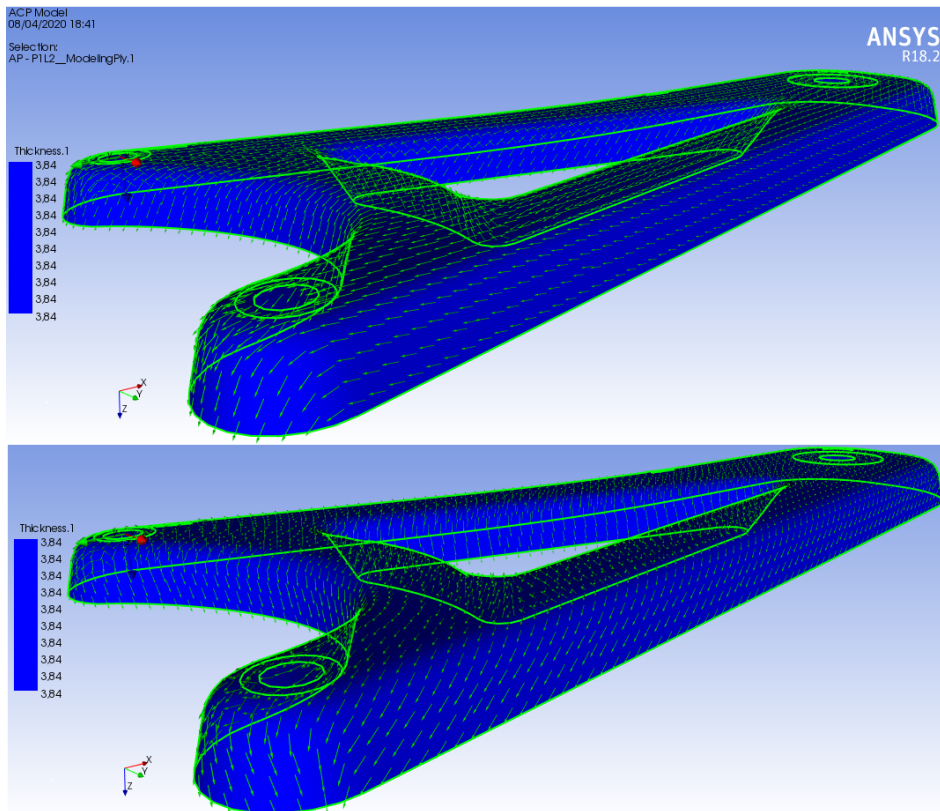


Figura 3.91: Orientación del laminado.

En este apartado se realizó el mallado obteniendo un aspect ratio medio de 1,18 para una malla de 3.360 nodos y 3.178 elementos según puede observarse en la figura 3.92.

Tras esto, fue necesario definir las hipótesis de carga. Se trata de valores conocidos, puesto que la masa de un piloto de moto³ no suele sobrepasar 60 kg. En condiciones normales de uso, estando sentado en conducción relajada, el piloto cede sobre cada uno de los estribos el peso de sus piernas lo que apenas supone un 18% sobre la masa total, pero en conducción deportiva puede llegar a posicionar la totalidad de su masa en uno de los apoyos para realizar los cambios de posición en los virajes.

Por tanto, como hipótesis de cálculo se simuló el total de la masa del piloto aplicada sobre el reposapié a 20 mm del alojamiento del estribo,

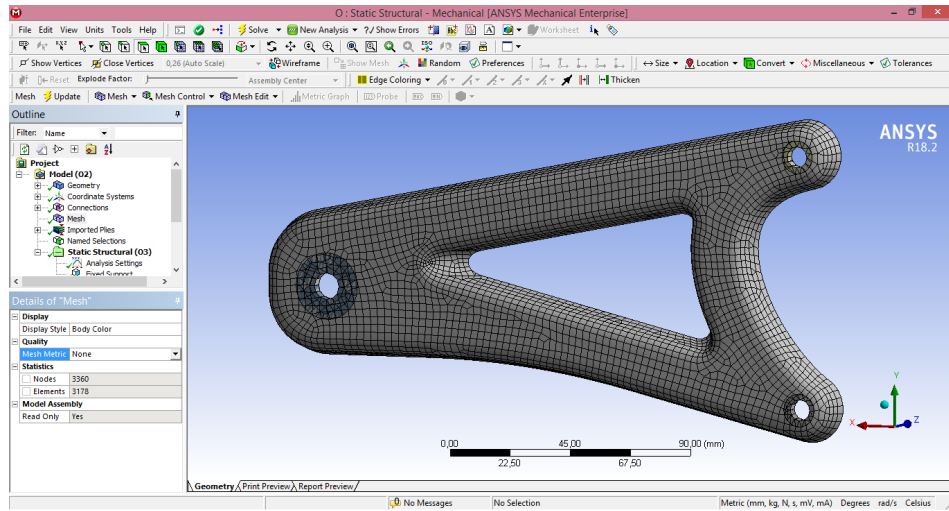


Figura 3.92: Diseño de la malla.

dando lugar a un momento torsor sobre este como se describe en la ecuación 3.14.

$$M = Fd = (60 \cdot 9,81) \cdot 0,02 = 11,77 \text{ Nm} \quad (3.14)$$

Una vez mallado se aplicó una restricción de tipo "Fixed support" en los soportes delanteros simulando la unión atornillada con el bastidor y una fuerza de 588,6 N a 20mm de la estribera según la figura 3.93.

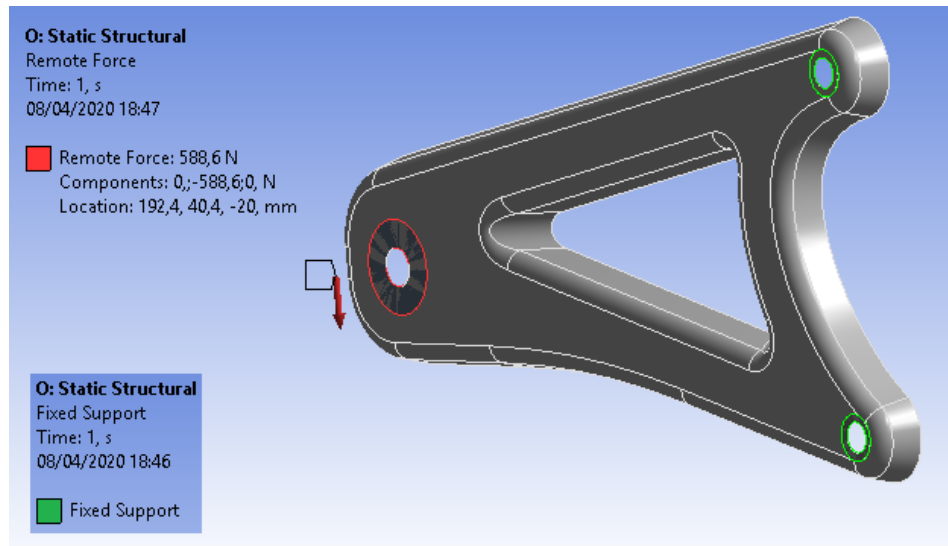


Figura 3.93: Restricciones y cargas.

Ambas solicitaciones se aplicaron sobre las áreas dibujadas que simulan los contactos con las arandelas. De esta forma ya fue posible simularlo y obtener valores de tensión y deformación.

No obstante, para obtener mejores resultados se importó el estudio al Post-procesador Ansys ACP con la finalidad de calcular los resultados de los esfuerzos supuestos sobre el laminado de forma más específica. Para ello, el primer paso fue vincular un nuevo estudio de ACP Post con el setup de ACP Pre y a continuación enlazarlo con la solución del Static estructural.

Dentro del post-procesador, fue necesario definir los criterios de fallo. Con el criterio de fallo seleccionado, el material bien definido en el ACP-pre y a partir de la solución obtenida en el módulo static estructural se generó la simulación en ACP post para conocer la tensión y deformación de cada lámina, tensiones globales y el factor de seguridad total del componente.

4

Resultados y discusión

4.1 Permeabilidad

Con la finalidad de predecir el llenado y avance de la resina sobre el molde se generó un estudio por el método de volúmenes finitos utilizando la herramienta CFD FUENT de ANSYS. El primer paso, previo a la simulación, fue conocer permeabilidad del conjunto.

La permeabilidad está directamente relacionada con la porosidad del material, puesto que define la cantidad de espacio vacío en el tejido. Atendiendo al método de fabricación seleccionado, el cálculo de la porosidad se realizó para todo el conjunto de materiales involucrados en el avance del flujo de resina. Por tanto, se calculó la porosidad de la capa de peel ply, la capa de malla de difusión y las dos capas de basalto a partir de la aplicación de la ecuación Ecuación 3.4 sobre las propiedades descritas en la tabla Tabla 4.1, dando como resultado un 41% de porosidad del conjunto.

Material	W_f (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Espesor mm	Contenido (%)
Tejido(basalto)	0,634	2890	0,45	49
Malla difusión	0,127	950	0,80	44
Tejido pelable	0,084	1350	0,12	7
Conjunto	1,478	1936	1,82	100

Tabla 4.1: Propiedades y condiciones de contorno.

En el estudio de la permeabilidad, además de la porosidad del medio, también intervienen en gran medida las propiedades de la resina, las zonas de entrada y salida del molde, y las presiones de trabajo. En la tabla 4.2 se muestran las propiedades de la resina y los registros de presión tomados durante el ensayo. La toma de presión de salida corresponde al vacío generado por la bomba, puesto que el indicador se instaló en el tubo de salida, mientras que la presión de entrada corresponde al tubo de inserción, se conectó en T a la cavidad del molde y al recipiente de la resina (presión atmosférica).

Porosidad (%)	Densidad de la resina de (Kg/m ³)	Viscosidad dinámica (mPa s)	Presión de entrada (Pa)	Presión de salida (Pa)
41	1.090	362	-3.999	-57.431

Tabla 4.2: Propiedades y condiciones de contorno.

La obtención del valor de permeabilidad del conjunto fue calculada a partir de la aplicación de la ecuación 3.1, sobre los datos experimentales registrados con la cámara en función del avance espacio-temporal del frente de flujo.

Tiempo(s)	Rf(mm)	$r_f^2 [2 \ln(r_f/r_0)-1]+r_0^2$
2	25,44	0,001547581
5	40,58	0,005405999
10	50,46	0,009509932
17	61,10	0,015361331

Tabla 4.3: Tiempos de frente de flujo.

Del avance del frente de flujo descrito en la tabla 4.3 puede observarse que en el instante de tiempo $t=2s$ el espacio recorrido por la resina en el eje X fue de 25,44mm. Pasados 3s aumento 15,44mm, resultando una velocidad media lineal de 5 mm/s. En $t=10s$ el valor de X se incrementó en 9,88mm más, dando lugar a una velocidad media lineal de 1,9 mm/s. En $t=17s$ el valor de X se incrementó en 10,6mm, resultando una velocidad media lineal de 1,5 mm/s.

De este análisis se pudo observar una disminución de la velocidad lineal del frente de flujo producida por la distribución radial del fluido, dando lugar a un aumento exponencial del área aumenta con respecto del radio. A su vez se observó que la velocidad en los dos ejes era muy próxima como se observa en el avance descrito en la figura 4.1.

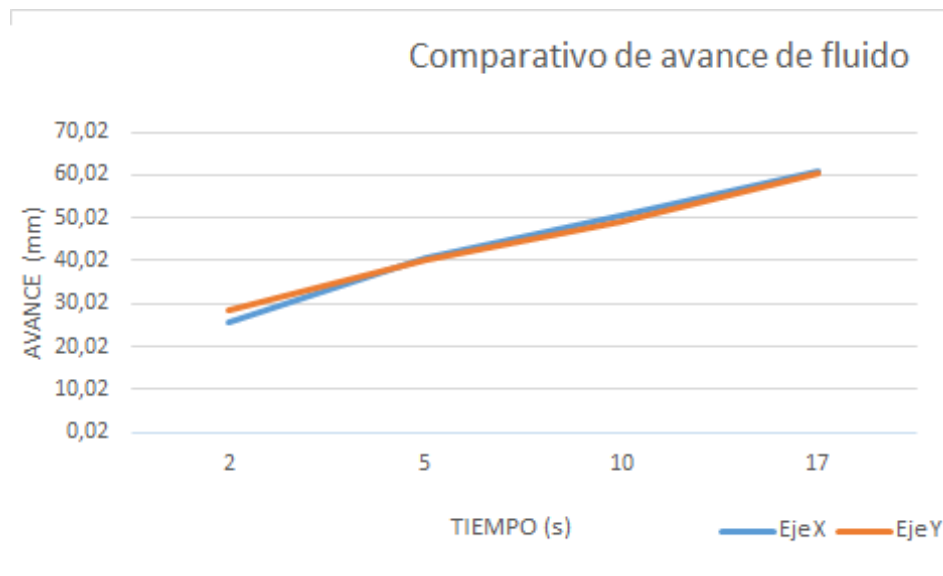


Figura 4.1: Comparativa de avance del frente de flujo en los ejes X e Y, en distintos estados de tiempo.

A partir de los resultados de permeabilidad obtenidos en los diferentes instantes de tiempo, con la aplicación de la ecuación 3.2 pudo representarse la pendiente y la línea de tendencia según se muestra en la gráfica 4.2.

De esta forma, se calculó la permeabilidad del conjunto aplicando la ecuación 3.2, a partir del valor de la pendiente de la recta de ajuste (fiso). El valor resultante del cálculo fue una permeabilidad de K

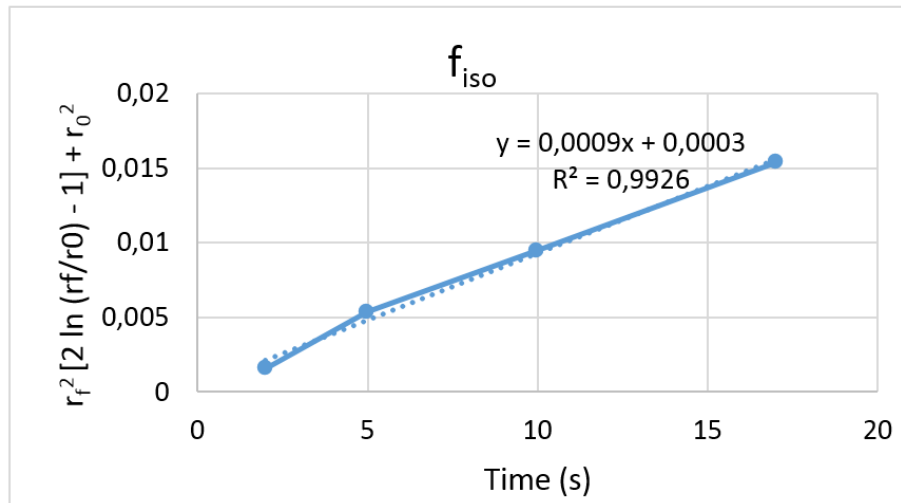


Figura 4.2: Representación de recta fiso.

= $6,25 \cdot 10^{-10}$ (m²) para el conjunto de tejido de basalto y materiales auxiliares con porosidad media del 41% como se indica en la tabla 4.4.

Fibra	Porosidad	Permeabilidad	Resina
Basalto	41	$6,25 \cdot 10^{-10}$	Epoxi 1050

Tabla 4.4: Resumen de valores de porosidad y permeabilidad obtenidos.

En la tabla 4.5 se muestra un comparativo del resultado del estudio de permeabilidad con el valor obtenido por otros autores [48] para distintos materiales. Cabe destacar que el método de fabricación utilizado en los otros estudios fue RTM. Por esta razón el comparativo se realizó solo para identificar el rango de magnitud de K y observar que el resultado calculado estaba entre dicho rango.

El valor de la porosidad en el método de RTM difiere del calculado para una infusión de resina con bolsa de vacío puesto que no se aplican materiales auxiliares como el peel ply o la malla de difusión por los que pase el flujo de resina. Además, debido a disponer de molde y contramolde, en RTM se puede ajustar el valor de la porosidad total en función del número de capas dispuestas en el molde, puesto que el espesor final de la pieza se encuentra determinado por la cavidad existente entre el molde y el contramolde.

Fibra	Porosidad	Permeabilidad	Resina
Cáñamo	64	$1,7 e^{-9}$	Bio-epoxi 01S
Vidrio	51	$6 e^{-11}$	Bio-epoxi 01S
Carbono	44	$2 e^{-11}$	Bio-epoxi 01S
Lino	58	$0,82 e^{-9}$	Bio-epoxi 01S

Tabla 4.5: Valores de porosidad y permeabilidad obtenidos por otros autores para distintos materiales. [48]

Tras realizar las simulaciones con el software de ANSYS, fue posible comparar los resultados obtenidos de avance de la resina para cada instante de tiempo con los registrados en la grabación del ensayo radial como se muestra en la tabla resumen 4.6, quedando identificados los porcentajes de error del software en comparación con los valores empíricos.

Tiempo (s)	R_f experimental (mm)	R_f software (mm)	Error (%)
X2	25,4	29,3	15,35
X2	28,4	28,9	1,76
X5	40,5	43,7	7,90
X5	40,1	46,6	16,21
X10	50,4	57,9	14,88
X10	49,2	56,9	15,65

Tabla 4.6: Comparativa de resultados del software y experimentales del ensayo.

Además, utilizando el software de análisis de vídeos KINOVEA, fue posible superponer las dos imágenes grabadas (cámara y simulación) para ver el desfase existente al unisono, según se muestra en la figura 4.3.

A partir de los resultados de las simulaciones se pudo observar que el avance de flujo mostrado por el programa era prácticamente circular, dejando una pequeña superficie de avance irregular pero concéntrica, mientras que en el ensayo empírico el avance resultó algo menos concéntrico. Esto puede deberse a que el software toma el material como un sólido homogéneo en forma y porosidad, no considerando el entramado de las fibras dentro de los tejido. Además, debido a la

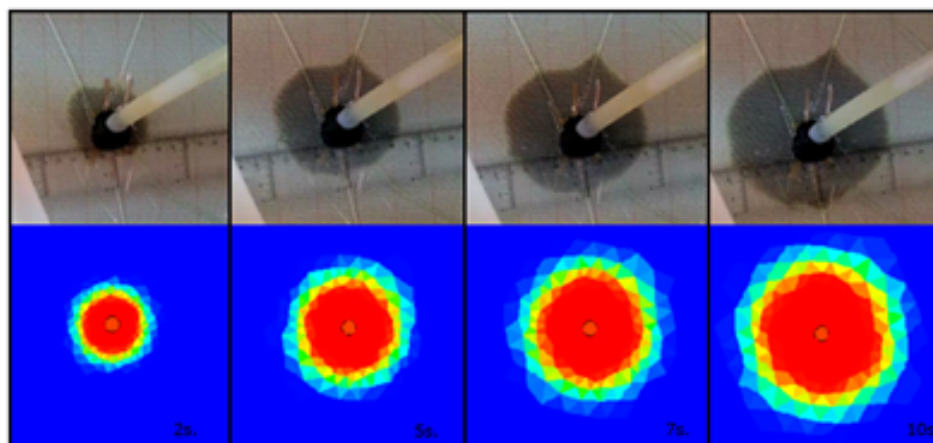


Figura 4.3: Test de permeabilidad. Comparativa en distintos estados de tiempo del ensayo frente al modelo FVM.

configuración del método de fabricación resulta imposible generar un contramolde (bolsa de vacío) totalmente uniforme, puesto que debe quedar un excedente suficiente de bolsa para adaptarse a toda la geometría, generándose pliegues por los que la resina avanza un poco más rápido. Estas zonas puntuales de avance se deben despreciar para la toma de valores de radio de avance puesto que en una aplicación industrial no siempre serán idénticas y además, la diferencia de avance respecto al resto corresponde a la superficie entre la bolsa y el tejido, lo cual no significa que en su base esa zona se encuentre completamente impregnada, por lo que es difícil de predecir.

El proceso de cálculo de la permeabilidad debe ser realizado para cada caso de estudio antes de realizar una simulación MVF del llenado, puesto que cada conjunto de materiales laminados ofrece una determinada resistencia al avance de la resina. Aunque existen bases de datos de permeabilidad y porosidad, resulta muy complicado encontrar los valores para combinaciones concretas de materiales, por lo que resultaría interesante para los fabricantes de componentes disponer de bibliotecas de datos personalizadas con las combinaciones que utilizan habitualmente para, de esta forma, disponer de modelos MVF a los que únicamente se le debe introducir la geometría específica del producto a fabricar.

4.1.1 Discusión

El cálculo de la permeabilidad a partir de la aplicación de la ley de Darcy resulta una técnica que genera buenos resultados como puede extraerse de la comparativa de la simulación y de artículos de distintos autores [30][49].

Para el cálculo de k en procesos de fabricación mediante el método de infusión de resina con bolsa de vacío cabe matizar que la porosidad se ha de calcular considerando todos los materiales que involucrados que dejan pasar resina a su través, tanto los tejidos como los materiales auxiliares. En el caso de estudio, dos capas de fibra de basalto, una lámina de peel ply y una lámina de malla de difusión.

Comparando los resultados de avance de flujo del software con los empíricos, el error medio fue del 11,95%. Aunque no se trata de un porcentaje de error elevado, se observó que el avance de flujo simulado era prácticamente circular, cuando en el ensayo empírico resultó algo más irregular, probablemente por la distribución de las fibras en el tejido, puesto que el software no tiene en cuenta el entramado de las fibras, sino que lo considera un sólido simétrico homogéneo en toda su superficie.

Se puede concluir que la utilización de esta técnica puede facilitar el trabajo de fabricación de componentes de materiales compuestos, evitando en gran medida fallos por atrapamiento de aire y zonas secas en el laminado. A su vez, a partir de la generación de una base de datos propia, es posible reducir el número de ensayos, facilitando las simulaciones a partir de la generación de modelos de referencia.

4.2 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron sobre diez probetas de cada tipo de material, cinco cortadas con orientación de las fibras a $0/90^\circ$ y las otras cinco cortadas a 45° . Las probetas fabricadas con tejido de carbono se ensayaron solo para servir como referencia comparativa.



Figura 4.4: Tipos de rotura en tracción.

Existen dos tipos de rotura diferenciados que pueden aparecer en las probetas ensayadas a tracción, como se puede observar en la figura 4.4:

- Rotura limpia: se trata de la rotura de la probeta a partir de la rotura de las fibras, como se observa en la parte superior de la figura 4.5.
- Rotura por explosión: la rotura se debe de un fallo en la interfase fibra matriz, como se observa en la parte inferior de la figura 4.5.

Atendiendo a las roturas de las distintas probetas ensayadas se puede determinar que el material compuesto ha sido correctamente fabricado puesto que el tipo de rotura ha sido limpio, por lo que presentaba buena interfase fibra-matriz, de no ser así se hubiese producido fallo por explosión.

Primero se realizaron los ensayos sobre las probetas con el tejido orientado a $0/90^\circ$. De cada tipo de material se pudo generar la gráfica tensión-deformación a partir de los resultados de los ensayos, como se muestra en la figura 4.6 de los ensayos sobre fibra de lino y en la figura 4.7 sobre probetas de bambú. A partir de estos resultados se pudo

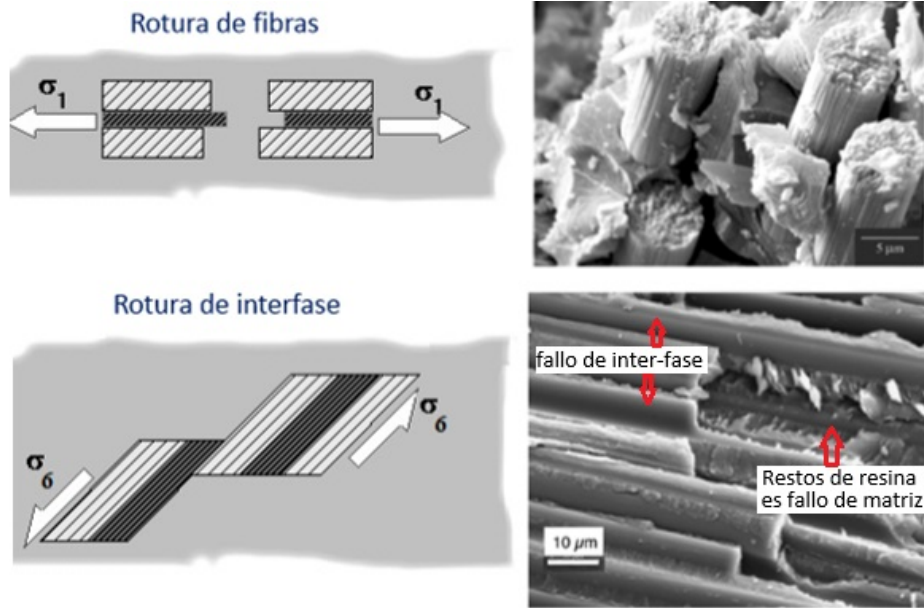


Figura 4.5: Tipos de fallo en tracción.

calcular un valor medio de las principales propiedades que definen el material, como se describe en la tabla 4.7.

Material 90°	Tensión máx (MPa)	Alargamiento (%)	Módulo (MPa)
Carbono sarga	231	2,1	10.856
Carbono UD	565	4,7	11.995
Lino	87	2,2	3.890
Yute	51	2,7	1.621
Basalto	392	6,5	5.980
Ramie	44	3,5	2.031
Bambú	93	3,1	3.285

Tabla 4.7: Resumen de resultados para los tejidos cortados a 90°.

En la tabla 4.7 se observa que los valores obtenidos del módulo elástico son algo más bajos los obtenidos en otras fuentes bibliográficas. En parte esto es debido a la forma en que se ha calculado dicho valor.

Si se toman dos puntos (tensión/def. unitaria) de la zona de la recta de la pendiente de un ensayo próximos al inicio de este, el valor del módulo de Young es mucho más elevado que el que se muestra en la

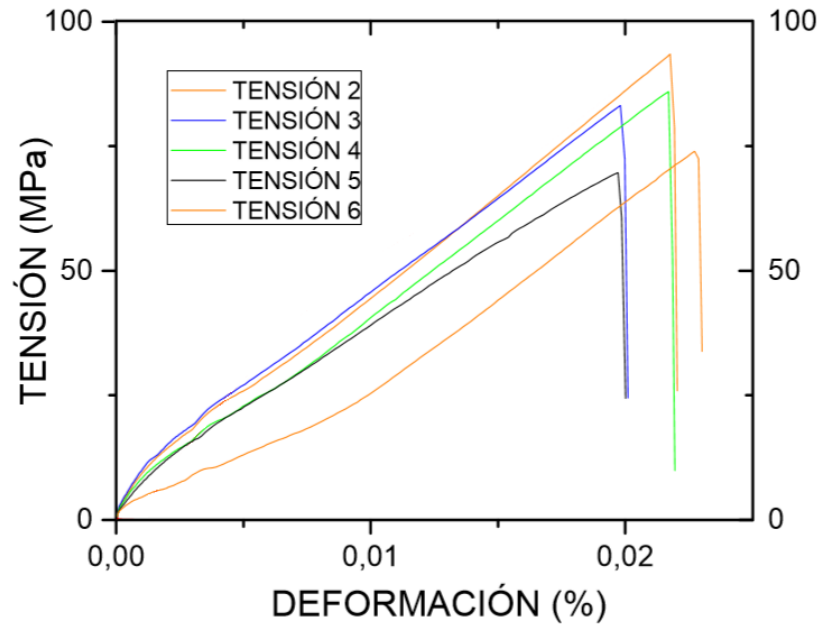


Figura 4.6: Gráfica tensión vs deformación unitaria para probetas de lino 90°.

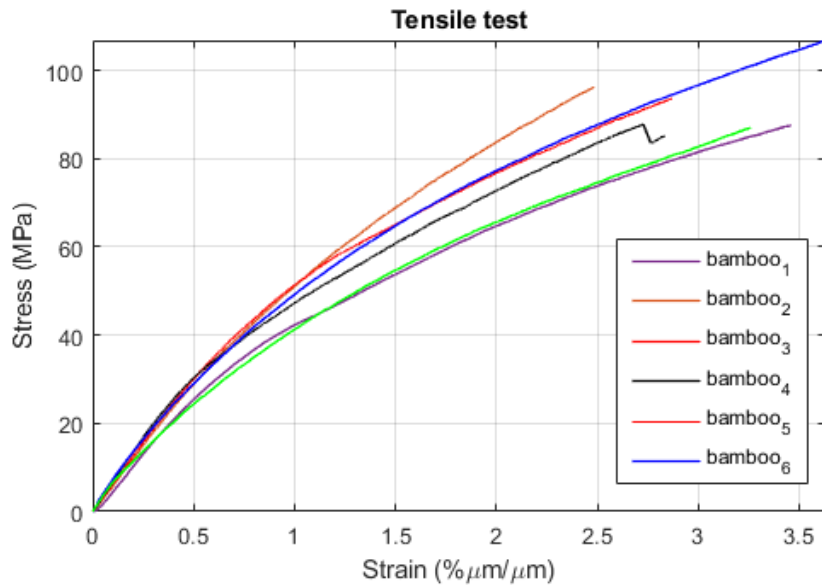


Figura 4.7: Gráfica tensión vs deformación unitaria para probetas de bambú 90°.

tabla. Este cálculo del módulo sería admisible para aplicaciones en que la deformación no sea elevada o se trate vibraciones como es el caso de aplicaciones acústicas pero desvirtua totalmente cálculos de componentes reales en estados de tensión o deformación más elevados.

Para este estudio, el módulo de Young ha sido calculado a partir de la toma de valores de tensión y deformación unitaria más próximos a la rotura, aproximadamente 90% de la tensión máxima. De esta manera, se consigue que los cálculos de componentes y las simulaciones se aproximen en mayor medida a la realidad.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{90\%} - \sigma_i}{\varepsilon_{90\%} - \varepsilon_i} \quad (4.1)$$

Donde

- E es valor del módulo de Young en (MPa)
- $\sigma_{90\%}$ es el valor de la tensión en un punto al 90% de la tensión máxima, expresado en megapascales (MPa)
- σ_i es el valor de la tensión en un punto de la pendiente próximo al inicio de del ensayo, expresado en megapascales (MPa)
- $\varepsilon_{90\%}$ es el valor de la deformación unitaria en un punto al 90% de la tensión máxima
- ε_i es el valor de la deformación unitaria en un punto de la pendiente próximo al inicio de del ensayo

En la tabla 4.7 se pueden observar valores de tensión de rotura, deformación unitaria y módulo elástico de los materiales naturales ensayados, además de valores de tejidos de fibra de carbono ensayados para tomar como referencia comparativa. El valor de la tensión de rotura que se obtuvo corresponde a su vez al límite elástico para esta orientación de fibra, puesto que según se observa en la gráfica 4.6, no existe plasticidad.

Tras haber ensayado las probetas con fibras orientadas en el sentido de aplicación del esfuerzo, se repitieron los ensayos para los especímenes

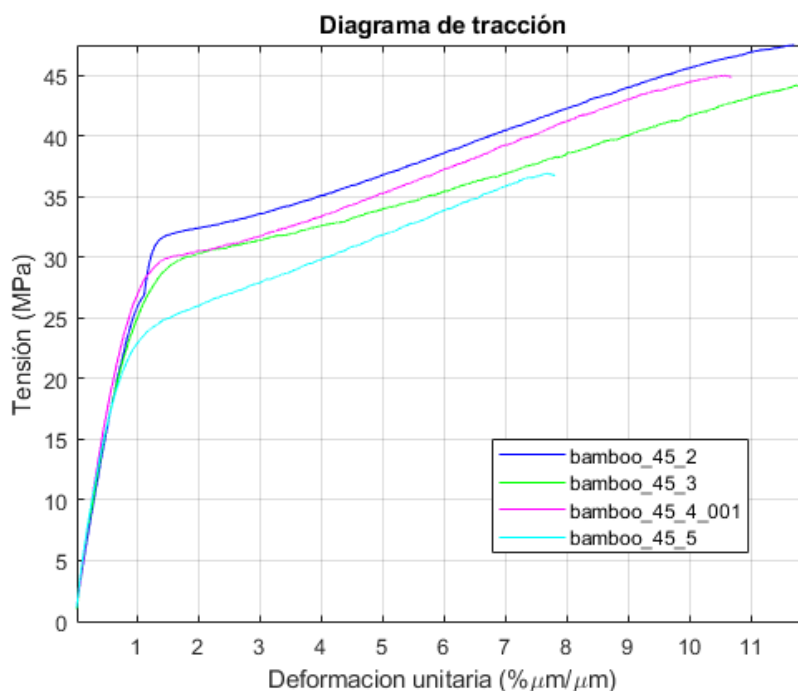


Figura 4.8: Caracterización de tracción de las probetas de bambú a 45/-45°.

cortados a 45° excepto para el caso del ramie, el cual se descartó por su baja resistencia mecánica.

En la tabla 4.8 se muestran los resultados que se obtuvieron de los ensayos para esta orientación. En este caso, las gráficas tensión-deformación presentaron un cambio de pendiente, mostrando una deformación plástica irreversible debida al alineamiento de las fibras al romper parte de la matriz, según se puede observar en la figura 4.8, referida a los ensayos sobre tejido de bambú.

Material 45°	Tensión máx (MPa)	Alargamiento (%)
Carbono sarga	90,06	2,54
Lino	23,33	1,67
Yute	38,40	5,01
Basalto	87,73	3,52
Bambú	43,28	10,40

Tabla 4.8: Resumen de resultados para los tejidos cortados a $\pm 45^\circ$

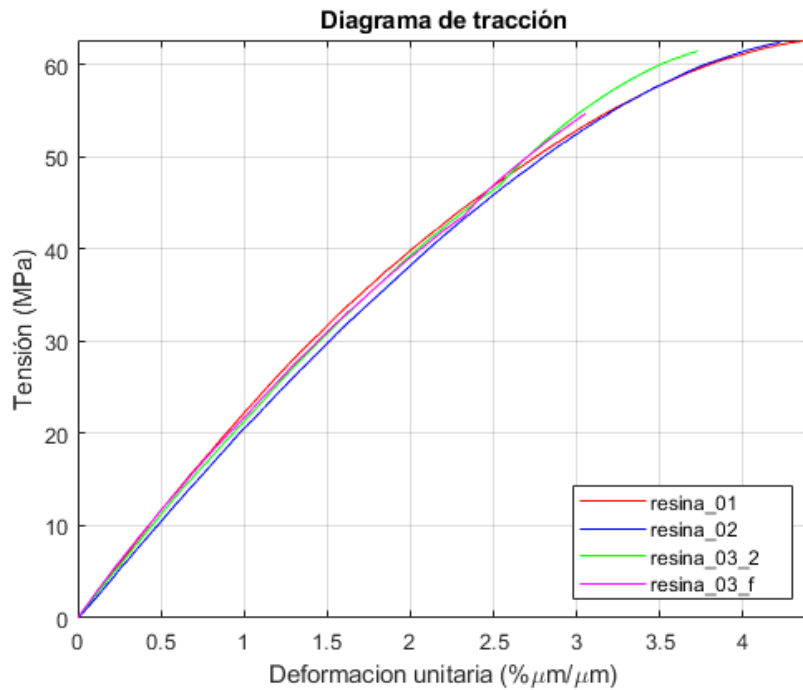


Figura 4.9: Caracterización de tracción de la resina.

Es conveniente resaltar que los resultados de los ensayos hechos con las probetas cortadas a 45° solo tienen carácter comparativo, considerando como valores de resistencia para el estudio los ensayados a $0/90^\circ$. Por tanto, la finalidad de realizar los ensayos a $\pm 45^\circ$ fue la de poder comparar los resultados con el modelo de elementos finitos simulados con esta orientación teniendo como datos de entrada la propiedades de las probetas a $0/90^\circ$.

Finalmente se ensayaron las probetas de resina epoxi 1050 sin refuerzo, dando como resultado los valores plasmados en el gráfico de la figura 4.9.

En la tabla 4.9 se muestra los valores registrados empíricamente de los ensayos realizados sobre las probetas de resina en comparación con los teóricos del fabricante.

Material	Tensión máx (MPa)	Alargamiento (%)	Módulo (MPa)
Resina (experimental)	62	3,8	3189
Resina (teórico)	97	3	3350

Tabla 4.9: Resumen de resultados de resina epoxi 1050 (experimental vs teórico)

4.3 Ensayo Poisson

Aprovechando los ensayos de tracción, se destinaron algunas probetas al cálculo del coeficiente de Poisson mediante el uso de un extensómetro. Se realizaron los ensayos para cada material con la orientación de corte a 90° y a 45° .

El ensayo consistió en deformar la probeta en el banco de ensayos de tracción sin llegar a la rotura para no dañar el extensómetro. Mediante la utilización de esta herramienta fue posible registrar la deformación transversal y longitudinal de las probetas dando lugar a una gráfica comparativa de deformaciones (longitudinal-transversal) con respecto de la tensión del ensayo, como se muestra en la gráfica de la figura 4.10, referida a un ensayo en carbono sarga 45° . Los resultados de este ensayo se muestran en la tabla resumen 4.10.

Material	Coef. de Poisson	Coef. de Poisson
	Ángulo 90°	Ángulo 45°
Carbono sarga	0,37	0,33
Lino	0,27	0,52
Yute	0,28	0,54
Basalto	0,08	0,22
Bambú	0,23	0,53

Tabla 4.10: Resumen de resultados de los ensayos del coeficiente de Poisson.

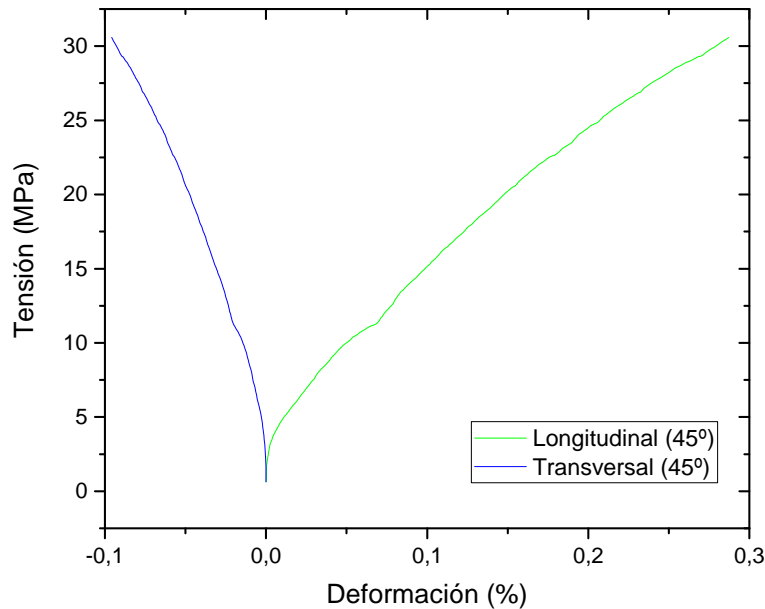


Figura 4.10: Ejemplo gráfico deformaciones longitudinal y transversal unitarias vs tensión. Ensayo sobre probeta de carbono sarga cortado a 45.

4.4 Ensayo de flexión

Se realizaron los ensayos de flexión sobre cinco probetas de cada tipo de material, tomando longitud libre entre apoyos de 60 mm, tal como se define en la norma ISO 14130.

Se pudo observar que el fallo común producido en los ensayos de flexión realizados se iniciaba desde la capa inferior de la probeta, por tratarse de la capa más deformada de las sometidas a tracción al ser la más alejada respecto de la fibra neutra, al igual que en referencias de otros autores [50]. Tras el fallo de la capa inferior la rotura avanza hasta la zona de aplicación de la fuerza.

Se puede considerar que la rotura se produce a tracción y tiene lugar en la capa (sometida a tracción) más alejada de la fibra neutra, considerando que la fibra neutra varía su emplazamiento hipotético en función del número de capas restantes tras el inicio de la rotura.

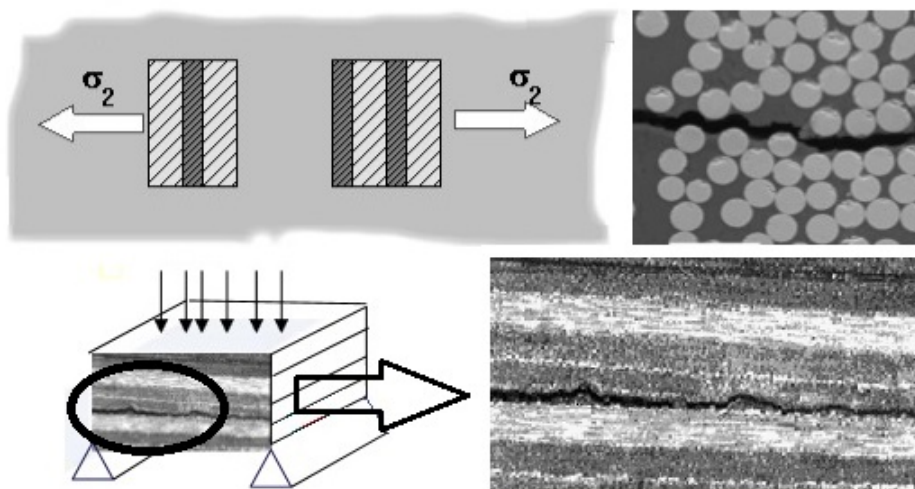


Figura 4.11: Fallo de agrietamiento de matriz por cortadura interlaminar en placas de gran espesor sometidas a flexión.

Aunque no es tan común en los ensayos, se puede dar un fallo de agrietamiento de matriz por cortadura interlaminar en componentes de gran espesor como vigas, lo cual genera una rotura cerca del plano de simetría, derivando en un fallo catastrófico del componente[6].

De cada uno de los ensayos se generó una gráfica tensión-carrera con el registro de las probetas de cada material, tal como se observa en la figura 4.12, extraída de los ensayos sobre probetas de lino. En la tabla 4.11 se muestran resumidos los resultados de los ensayos realizados.

Material 90°	Tensión máx. (MPa)	Flecha (mm)
Carbono sarga	150,45	16,00
Carbono UD	583,58	14,11
Lino	62,63	5,51
Yute	70,09	8,00
Basalto	103,99	15,91

Tabla 4.11: Resumen de resultados para para el ensayo de flexión.

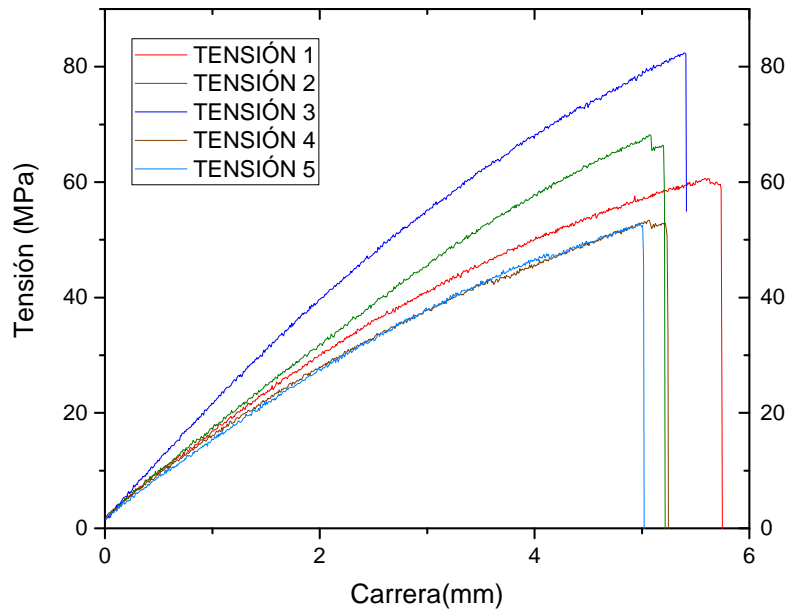


Figura 4.12: Gráfico resultados del ensayo de flexión realizado sobre las probetas de lino.

4.5 Ensayos de dureza

Se realizaron mediciones de dureza sobre distintos puntos aleatorios de cada material. Puesto que todas las probetas de un mismo material surgieron de la misma placa, las mediciones podrían haberse realizado sobre una misma probeta, no obstante se realizaron mediciones en distintos especímenes utilizando el durómetro de tipo shore D de la figura 4.13.

En la tabla 4.12 se muestra el resumen de resultados obtenidos y en el gráfico de barras de la figura 4.14 se representa el comparativo de durezas.



Figura 4.13: Medición de dureza sobre probeta de yute.

Material	Dureza Shore D
Carbono sarga	85,19
Carbono UD	84,09
Lino	78,99
Yute	74,57
Basalto	85,39

Tabla 4.12: Resumen de resultados para el ensayo de dureza.

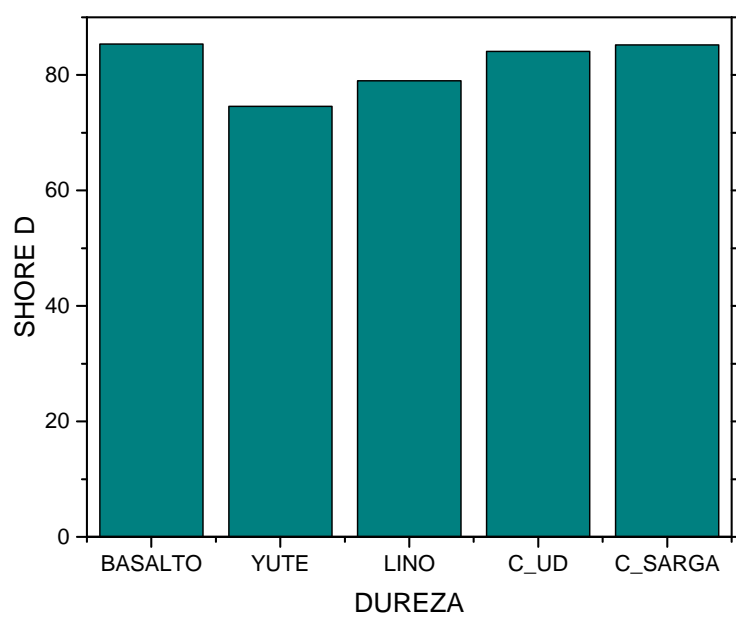


Figura 4.14: Resumen de valores de dureza.

4.6 Ensayo de compresión

Los ensayos de compresión se realizaron solo sobre el compuesto de fibra de bambú 4.15. Esto fue debido a que después de realizar unos primeros ensayos a fatiga y atendiendo a los resultados de tracción, este fue el tejido natural con potencial de fabricación no finito que presentó mejores propiedades por lo que se decidió centrar el resto de la investigación sobre él únicamente. Es cierto que la fibra de basalto presenta ventajas en cuanto a propiedades mecánica, pero se trata de un material derivado de una roca y por tanto finito, además de que su proceso de fabricación es más complejo, costoso y por tanto con mayor huella de carbono, al igual que su posterior reciclabilidad.

Del ensayo de compresión se pudo generar la gráfica 4.16 a partir del registro de los valores ensayados para cada probeta. En la tabla 4.13 se muestra el valor de las características resistentes de compresión del laminado.

Material	Tensión máx (MPa)	Alargamiento (%)	Módulo (MPa)
Bambú	59	7	2250

Tabla 4.13: Resumen de resultados del ensayo de compresión sobre fibra de bambú

Las láminas de las probetas sometidas a compresión suelen sufrir pandeo a nivel meso o micro-mecánico. Derivado de este fenómeno, se

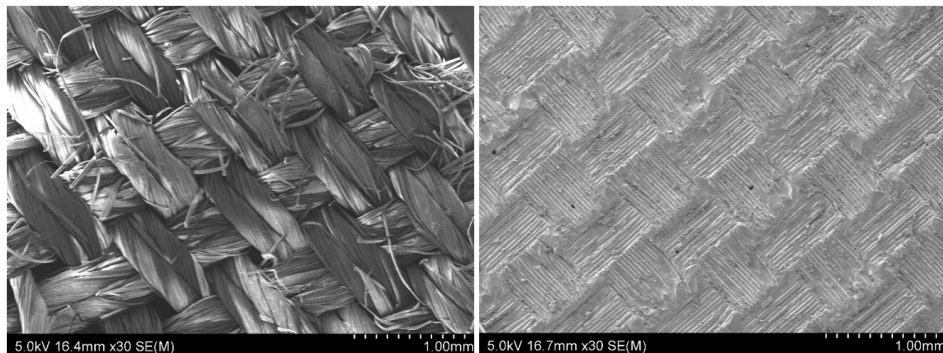


Figura 4.15: Imagen de microscopia: a la izquierda tejido de bambú, a la derecha composite de bambú con resina epoxi 1050.

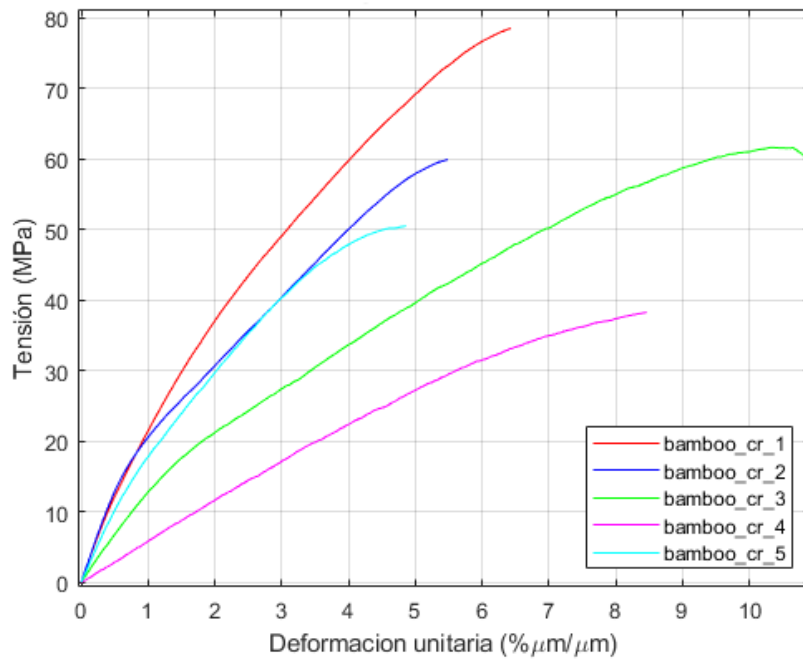


Figura 4.16: Ensayo de compresión sobre probetas de bambú.

pueden distinguir dos mecanismos de fallo principalmente, plegado y pandeo tal como se describe en la figura 4.17, siendo más común es el plegado[6] [51].

En la figura 4.18 se observa el fallo de la probeta de bambú. Se trabajó con separaciones entre placas de entre 12 y 25 mm como se indica en la norma ASTM D 3410, observando valores más representativos en los ensayos con probetas más cortas. De esta imagen puede extraerse que el mecanismo de fallo que produjo esta rotura es el de plegado o kinking, creandose una zona de plegado o kink band según se describe en la imagen 4.19.

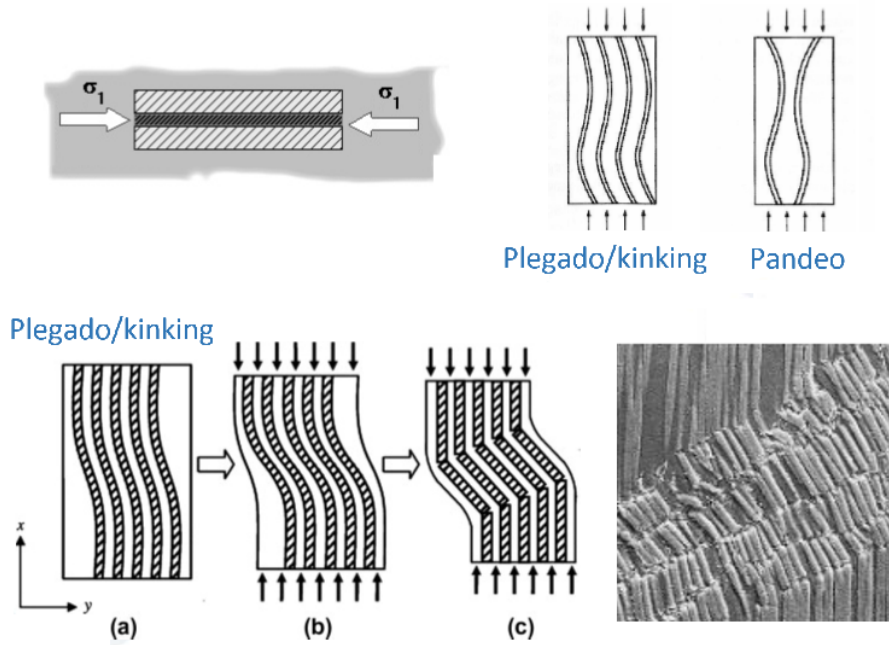


Figura 4.17: Mecanismos de fallo en compresión.



Figura 4.18: Fallo en probeta de bambú sometida a compresión.

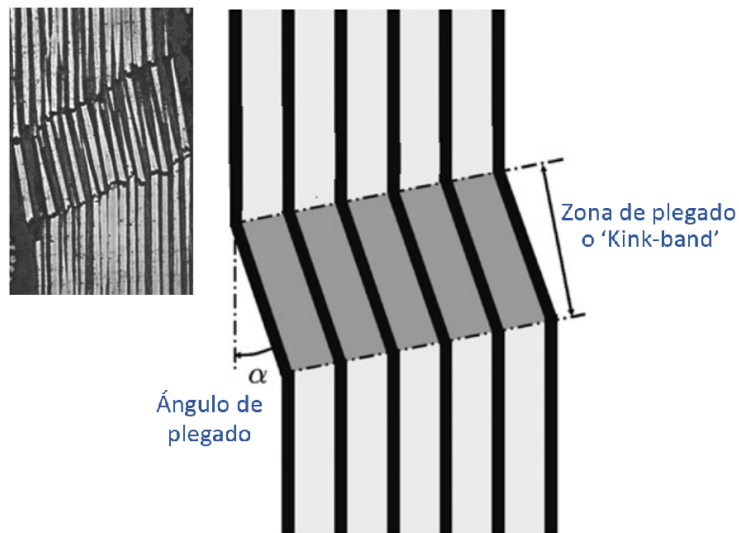


Figura 4.19: Zona de plegado (kink band).

4.7 Ensayo de cortadura Iosipescu

Este ensayo se realizó sobre cuatro probetas de fibra de bambú mediante la herramienta específica para ensayos Iosipescu, en el banco de ensayos de tracción/compresión.

La figura 4.20 muestra los resultados de los ensayos.

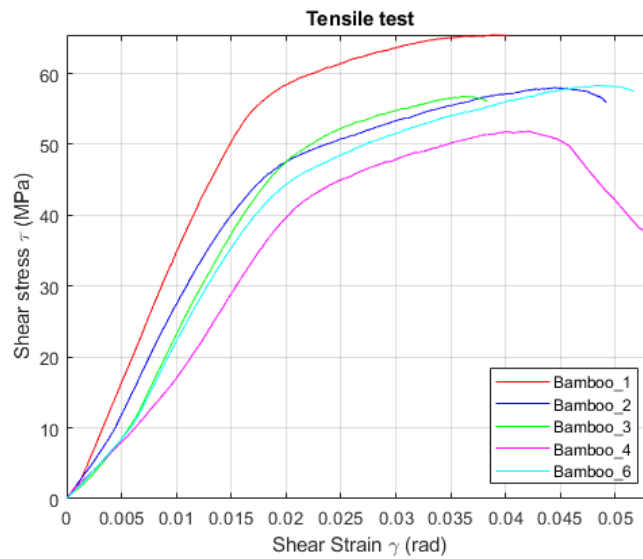


Figura 4.20: Ensayo Iosipescu sobre probetas de bambú

En la tabla 4.14 se muestra el resumen comparativo del valor del módulo de cortadura obtenido por tres métodos distintos:

- Estimado a partir del ensayo de tracción.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{4.2}$$

$$\tau = 2G\varepsilon_{ij} \tag{4.3}$$

donde:

G = Módulo de cortadura

E = Módulo de Young

ν = coeficiente de Poisson

τ = Tensión de cortadura

ε_{ij} = deformación unitaria del eje

- Calculado a partir del ensayo cortadura plana basado en la probeta cortada $\pm 45^\circ$ mediante la aplicación de la norma UNE-EN-ISO 14129:1999. [35]

$$G_{12} = \frac{\tau}{(|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|)} \quad (4.4)$$

$$\tau_{12} = \frac{p}{2bd} \quad (4.5)$$

donde:

G = Módulo de cortadura

τ = Tensión de cortadura

ε_1 = Deformación unitaria longitudinal

ε_2 = Deformación unitaria transversal

p = Carga aplicada

b = Ancho de la probeta

d = Espesor de la probeta

- A partir del ensayo de cortadura Iosipescu descrito en la norma ASTM D 5379.[35]

	Estimado a partir del módulo de Young	Método de cortadura probeta 45/-45	Ensayo método Iosipescu
Módulo cortante Módulo G (MPa)	1.314	1.368	1.472

Tabla 4.14: Comparativa valores obtenidos de módulo de cortante por distintos métodos para el composite de fibra de bambú.

Se pudo observar que el valor del módulo de cortadura extraído a partir del método de ensayo Iosipescu presenta el valor más elevado, lo cual nos muestra que este método es menos conservador que el resto.

4.8 Ensayo de tracción sobre laminado en eje Z

Este ensayo se realizó sobre probetas de fibra de bambú cortadas en el eje Z a partir de un bloque de 120 capas.

Los ensayos realizados siguieron los parámetros utilizados en los ensayos de tracción.

Del ensayo de tracción en el eje Z se obtuvo la gráfica 4.21 a partir del registro de los valores ensayados para cada probeta.

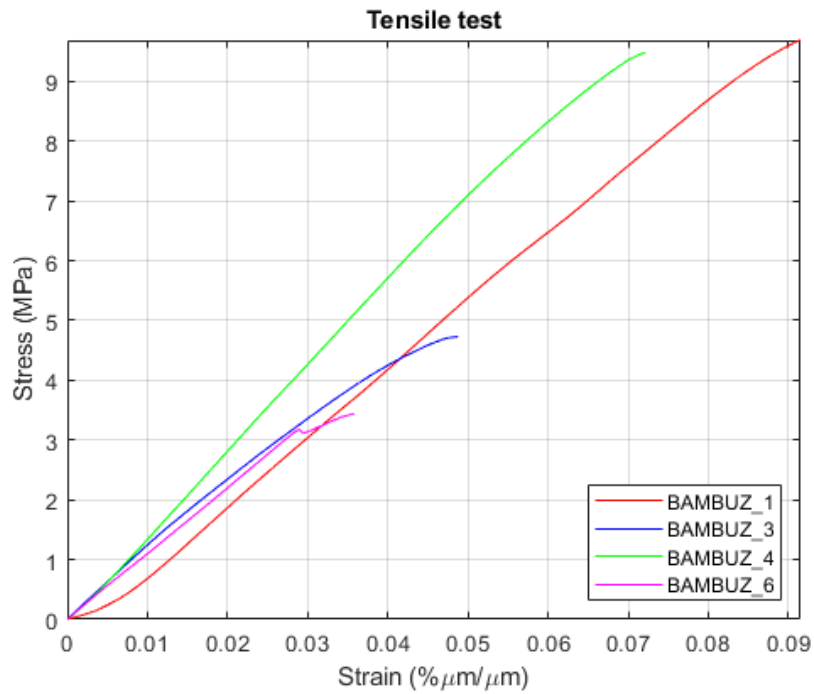


Figura 4.21: Ensayo de tracción en el eje Z sobre probetas de bambú.

A partir de este ensayo ha sido posible calcular el valor del módulo en la dirección Z para el laminado de fibra de bambú 4.15.

Bambú [0/90] 120 capas	
Módulo elástico en la dirección Z (MPa)	1.191

Tabla 4.15: Valor del módulo elástico en la dirección Z para el composite de bambú.

4.9 Ensayos de fatiga

4.9.1 Ensayos previos: validación del equipo y selección del material

Durante el proceso de ajuste del banco de fatiga se realizaron ensayos aleatorios sobre distintos materiales, los cuales sirvieron para elegir el tejido más apto para la fabricación de un componente de automoción teniendo en cuenta sus características resistentes, comportamiento a fatiga, reciclabilidad y su fuente de obtención.

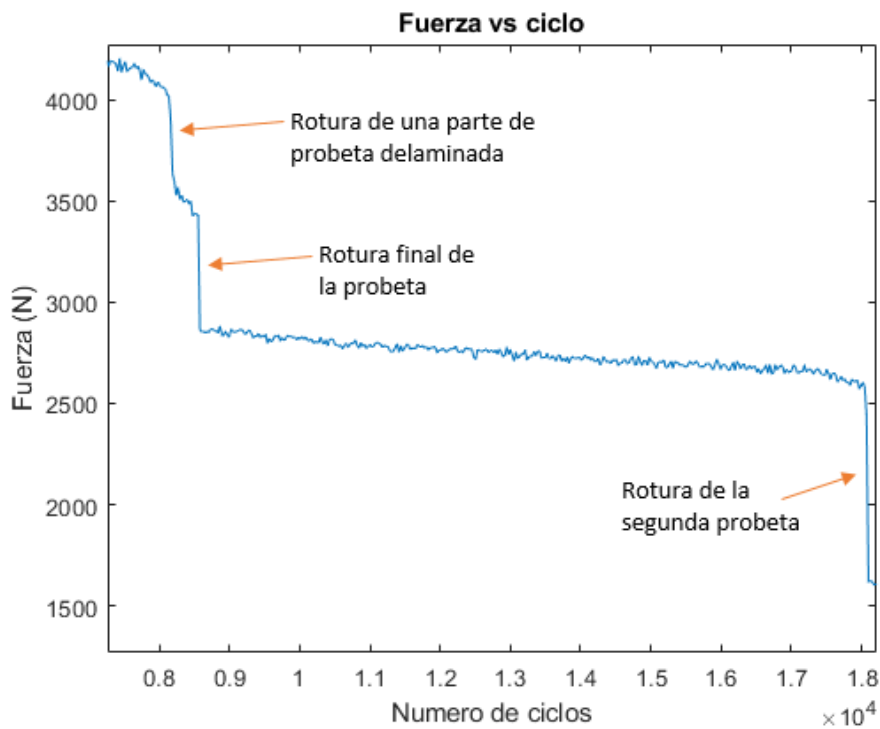


Figura 4.22: Delaminación y rotura parcial en ensayo sobre probeta de basalto.

En los primeros ensayos aparecían deformaciones permanentes en las probetas que provocaban esfuerzos de compresión en la carrera descendente del pistón. Estos esfuerzos generaban un pandeo en los especímenes debido a su esbeltez (119 x 14 x 2 mm) lo cual derivaba en la delaminación de las probetas, por lo que se producía la rotura

parcial de las capas en diferente número de ciclos como se muestra en la figura 4.22.

Buscando evitar este fenómeno se realizó la modificación del soporte superior mediante la eliminación de la retención superior de las mordazas, lo cual evitó la compresión en las probetas. Además, se incorporó un tercer sensor para controlar la deformación permanente de las probetas (creep) y auto-correrir la longitud inicial durante el ciclo. De esta forma desapareció la posibilidad de fallo por pandeo y con ella la delaminación de las probetas, dando lugar a la rotura completa del espécimen como se observa en la figura 4.23.

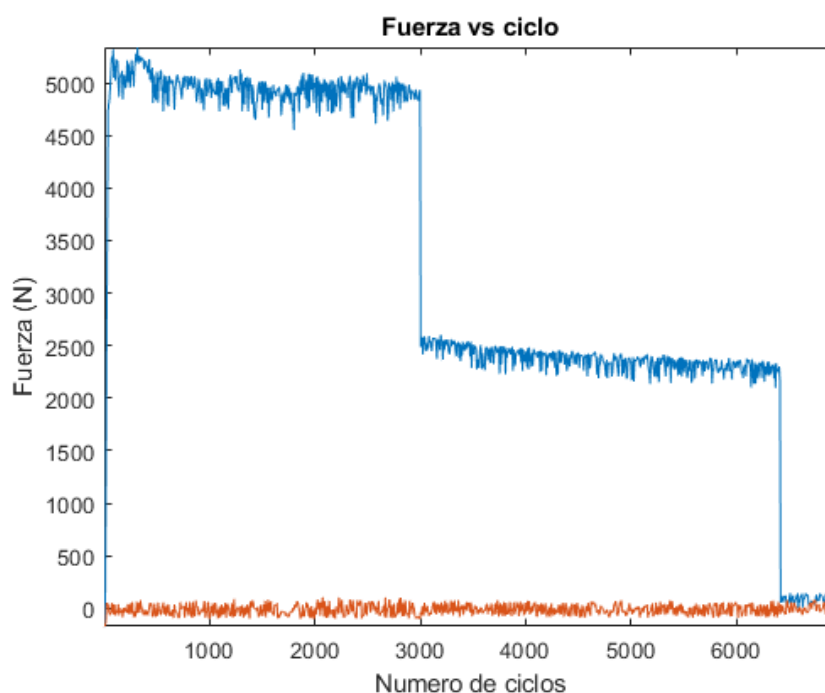


Figura 4.23: Ensayo de fatiga con dos probetas.

A su vez, estos primeros ensayos sirvieron para ajustar el equipo y validar su funcionamiento a partir de resultados de materiales de los que si se disponía de bases de datos o estudios de otros autores, como en el caso de los resultados de los ensayos sobre fibra basalto descritos en la figura 4.24, donde se comparó los resultados con los de un artículo de los autores A. Dorigato et al[52], posicionando los puntos obtenidos

directamente sobre su gráfico para observar la proximidad con la línea de tendencia según puede verse en la figura 4.25.

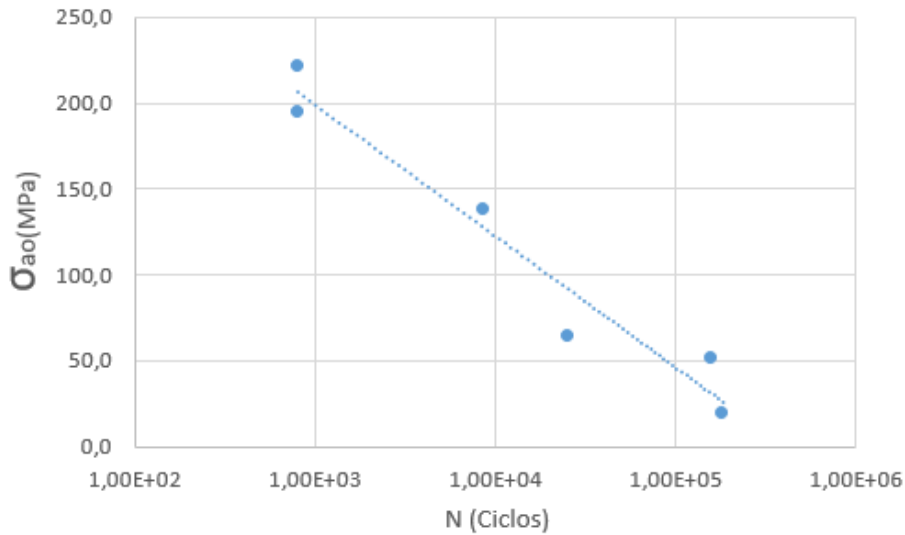


Figura 4.24: Resultados de ensayos de fatiga en fibra de basalto: Tensión equivalente-Ciclos.

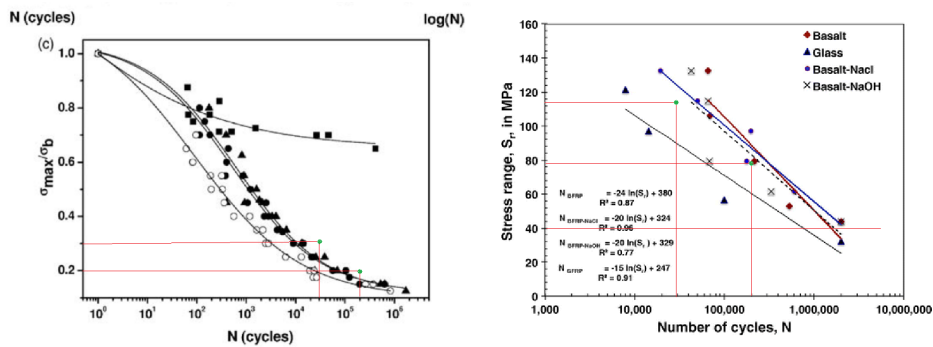


Figura 4.25: Comparativa fibra de basalto con estudio de otros autores. [52]

4.9.2 Estudio de fatiga uniaxial sobre fibra de bambú

Se seleccionó el tejido de bambú para seguir el desarrollo por sus buenas propiedades físicas y mecánicas como material para fabricar el prototipo 2, además de por su elevada producción anual y el rápido crecimiento de la planta, lo cual convierte a este tejido en una fuente de materia prima infinita.

Al igual que los ensayos de tracción, estos test se dividieron según el corte de los tejidos en las probetas, 0/90° y 45/-45°.

Se pudo observar gran diferencia en cuanto al comportamiento del material en función de su orientación. Los ensayos con las probetas con fibras orientadas en el sentido del esfuerzo axial tuvieron un comportamiento más lineal y sin plasticidad, más allá de la pequeña deformación (creep) producida por la exposición a cargas cíclicas durante un largo periodo. Por otro lado, las probetas cortadas a 45° mostraron un cambio en el comportamiento y una plasticidad pasado un tiempo.

Los ensayos se realizaron en baterías de cuatro probetas por cada nivel de tensión a analizar, quedando registrados los valores de fuerza máxima y mínima, desplazamiento y número de ciclos, tal como se muestra en la tabla 4.16 para un ensayo sobre probetas de bambú (90°), valores a partir de los cuales se pudo calcular la fuerza media y alternante del ensayo.

Pos.	Área (mm ²)	Ciclos	F_{\max} (N)	F_{\min} (N)	F_m $\frac{F_{\max}+F_{\min}}{2}$	F_a $\frac{F_{\max}-F_{\min}}{2}$
1	29,30	9,02E+06	951,96	5,28	478,62	473,34
2	29,33	1,06E+07	1146,30	5,90	576,10	570,20
3	28,50	1,40E+07	1147,80	1,96	574,88	572,92
4	29,65	2,25E+07	1162,10	88,11	625,10	537,00

Tabla 4.16: Resultados extraídos del ensayo BAMBOO19 sobre 4 probetas de bambú epoxi cortadas a 0/90°.

A partir de los resultados del ensayo fatiga y mediante la aplicación de distintas ecuaciones se pudo obtener en valor de la tensión máxima, mínima, media, alternante y equivalente del ensayo, como se muestra en la tabla 4.17 del ensayo anterior.

Tras realizar las distintas baterías de ensayos se pudo generar los gráficos de la figura 4.26, donde es posible visualizar el número de ciclos de vida de un componente sometido a un determinado nivel de tensión. De igual forma, aunque con carácter comparativo se generó el mismo tipo de gráfico para los ensayos con las probetas cortadas a 45°, como puede verse en la figura 4.27, donde se observa una pendiente más

Pos.	σ_{\max} F_{\max}/A (MPa)	σ_{\min} F_{\min}/A (MPa)	σ_m F_m/A (MPa)	σ_a F_a/A (MPa)	σ_{a0} $\sigma_a/(1 - (\sigma_m/S_{ut}))$ (MPa)
1	32,49	0,18	16,33	16,15	19,51
2	39,09	0,20	19,64	19,44	24,51
3	40,27	0,07	20,17	20,10	25,52
4	39,20	2,97	21,09	18,11	23,28

Tabla 4.17: Cálculo tensiones en ensayo BAMBOO19 sobre 4 probetas de bambú epoxi cortadas a 0/90°.

plana que la de la figura 4.26, lo que que indica que el laminado en esta orientación acusa menos los daños de fatiga.

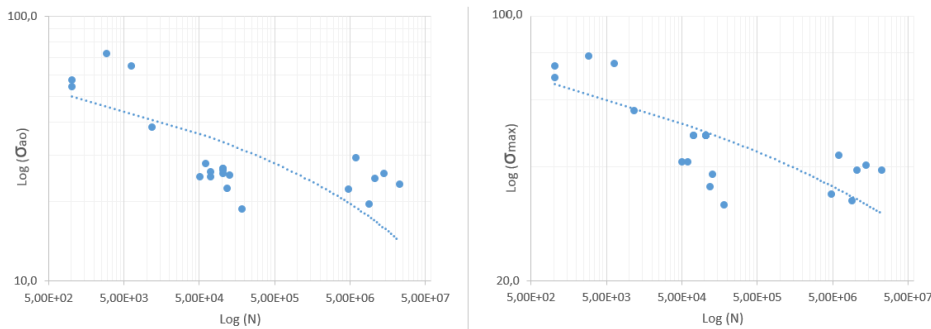


Figura 4.26: Ensayos sobre probetas con fibras alineadas con el esfuerzo axial. (A)tensión equivalente-N; (B)tensión máxima-N

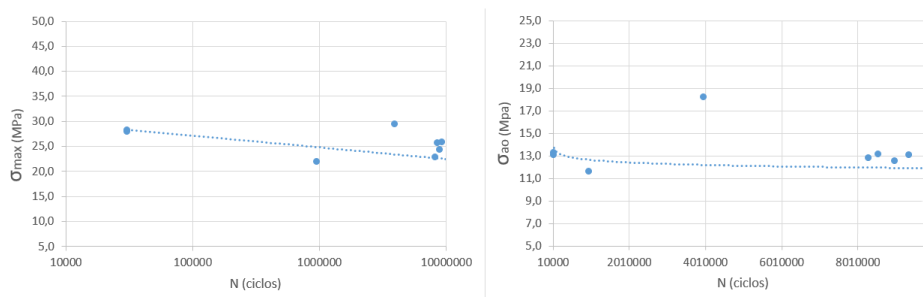


Figura 4.27: Ensayos sobre probetas con fibras alineadas a $\pm 45^\circ$ del esfuerzo axial. (A)tensión equivalente-N; (B)tensión máxima-N

Como se ha indicado, las probetas con fibras orientadas a 45° respecto del sentido de aplicación del esfuerzo sufrían, pasado un número de ciclos, una plasticidad producida por la rotura parcial de la matriz y una re-alineación de las fibras en dirección del sentido de aplicación

de la carga. Este fenómeno producía sobre las probetas una estricción y un aumento de temperatura por la fricción entre fibras.

Mediante una cámara termográfica FLIR E8 se pudieron tomar capturas de las probetas de forma periódica, registrando la evolución térmica de la zona de rotura. Atendiendo a la figura 4.28, se puede destacar la aparición de zonas localizadas con temperatura superior al resto generadas a partir de la estricción de la probeta, y con mayor magnitud térmica cuanto más cerca se encuentra del ciclo de rotura. Es visible además, un foco térmico principal con la orientación a 45° del sentido de aplicación del esfuerzo como se aprecia en la figura 4.29, es decir en el sentido en que se orientan las fibras, por lo que el calor debe generarse a partir del rozamiento de estas.

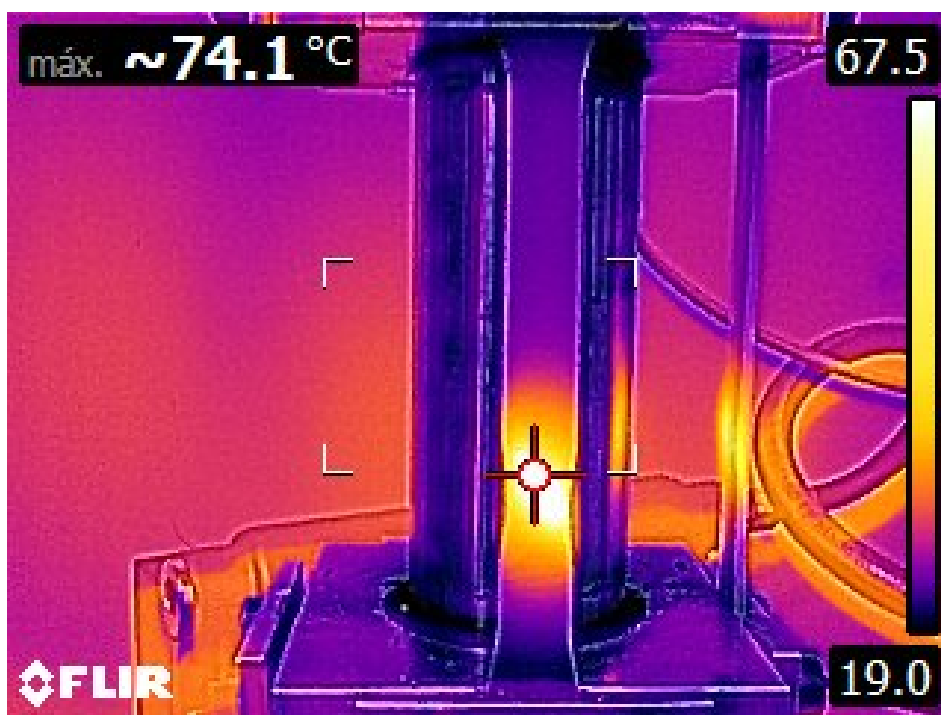


Figura 4.28: Imagen termográfica sobre probeta $\pm 45^\circ$ en la generación de la estricción.



Figura 4.29: Imagen termográfica sobre probeta $\pm 45^\circ$ en posición próxima a la rotura.

4.9.3 Estudio de fatiga multiaxial

Tras obtener las gráficas de tensión-ciclos del material, se procedió a realizar el estudio empírico de fatiga sobre los prototipos descritos en la tabla 4.18. Se fabricaron cuatro estribos con idénticas configuraciones de laminado para caracterizar distintos niveles de tensión. La batería de ensayos empezó con una carrera de 9 mm de desplazamiento para el primer prototipo y se fue ajustando para el resto de ensayos en función del resultado de ciclos de rotura.

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	MASA	CARRERA TEÓRICA
Estribo_1	Bambú-Epoxi	102 gr	9 mm
Estribo_2	Bambú-Epoxi	101 gr	8 mm
Estribo_3	Bambú-Epoxi	103 gr	6 mm
Estribo_5	Bambú-Epoxi	103 gr	5,5 mm

Tabla 4.18: Características de los especímenes a ensayar.

Tras realizar los distintos ensayos fue posible registrar los valores medios de fuerza máxima (F_{\max}) y fuerza mínima (F_{\min}) que tuvieron lugar en las posiciones de desplazamiento máximo (L_{\max}) y desplazamiento mínimo (L_{\min}) respectivamente, como se muestra en la tabla resumen 4.19.

Descripción	L_{\max} mm	L_{\min} mm	F_{\max} N	F_{\min} N	N Ciclos
Estribo_1	8,22	0,54	692,23	121,10	33.731
Estribo_2	9,51	1,39	701,44	95,49	13.949
Estribo_3	11,27	6,11	618,42	79,03	413.586
Estribo_5	6,69	0,08	706,18	57,62	133.325

Tabla 4.19: Resultados de los ensayos de fatiga sobre la geometría del estribo.

La finalidad de estos ensayos fue la de comparar los resultados en cuanto al número de ciclos de vida frente a la gráfica de tensión-deformación generada con los ensayos a fatiga uniaxial, mediante la utilización del software de elementos finitos para conocer el nivel de tensión de cada ensayo a partir de la fuerza obtenida empíricamente para cada desplazamiento. Como se verá más adelante, de esta manera es posible predecir la rotura de cada uno de los estribos y la zona aproximada de la grieta.

4.10 Modelo uniaxial por elementos finitos

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación por elementos finitos de los ensayos de tracción comparados con los valores obtenidos empíricamente para cada tipo de material.

Para obtener los resultados del modelo MEF se realizaron los cálculos repetidamente con pequeñas variaciones sobre la deformación aplicada a la probeta con la finalidad de determinar que valores, que según el modelo, generan la rotura a partir del estudio de teoría de fallo aplicada.

De esta manera fue posible predecir el valor de desplazamiento que causaría la rotura y a su vez el nivel de tensión. Atendiendo a los

criterios de fallo aplicados, se considera que existe rotura cuando el valor es 1 o inferior.

4.10.1 Carbono sarga

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de carbono sarga y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.20, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.21 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,036	0,975
Tsai-wu	1,027	0,959

Tabla 4.20: Comparativa valores teoría de fallo.

Carbono sarga	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	2,56	231,43
Simulación FEM	2,56	233,61
%Error	0,03	0,94

Tabla 4.21: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 0,94%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.30.

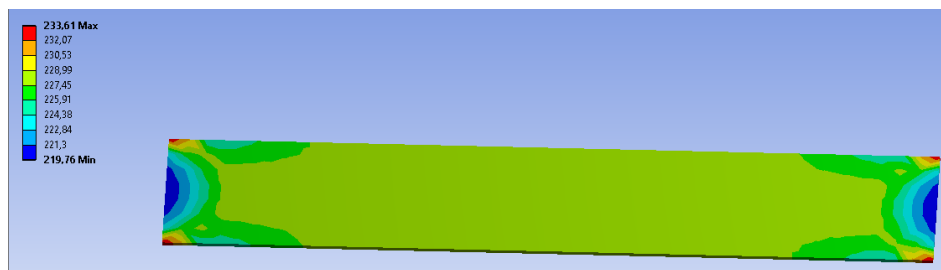


Figura 4.30: Tensión de rotura.

4.10.2 Carbono UD

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de carbono unidireccional y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.22, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.23 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,024	0,964
Tsai-wu	0,979	0,874

Tabla 4.22: Comparativa valores teoría de fallo.

Carbono UD	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	5,56	565,75
Simulación FEM	5,67	510,67
%Error	1,98	9,73

Tabla 4.23: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 9,73%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.31.



Figura 4.31: Tensión de rotura.

4.10.3 Lino

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de lino y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.24, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.25 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,008	0,983
Tsai-wu	0,986	0,954

Tabla 4.24: Comparativa valores teoría de fallo.

Lino	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	2,70	87,64
Simulación FEM	2,70	85,27
%Error	0,12	2,70

Tabla 4.25: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 2,70%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.32.

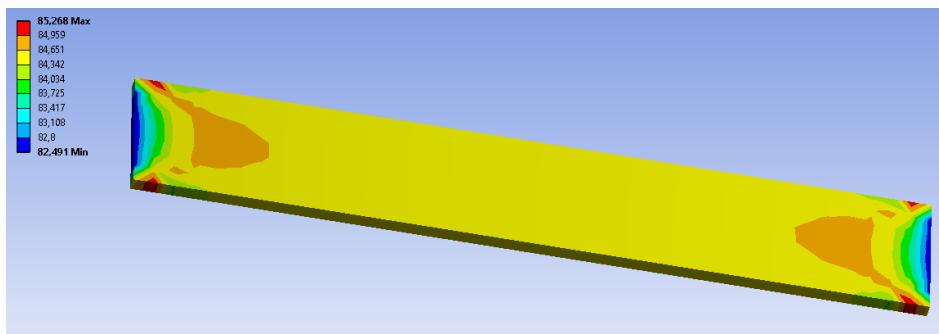


Figura 4.32: Tensión de rotura.

4.10.4 Yute

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de yute y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.26, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.27 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,021	0,976
Tsai-wu	1,021	0,977

Tabla 4.26: Comparativa valores teoría de fallo.

Yute	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	3,74	50,62
Simulación FEM	3,75	50,65
%Error	0,26	0,06

Tabla 4.27: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 0,06%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.33.

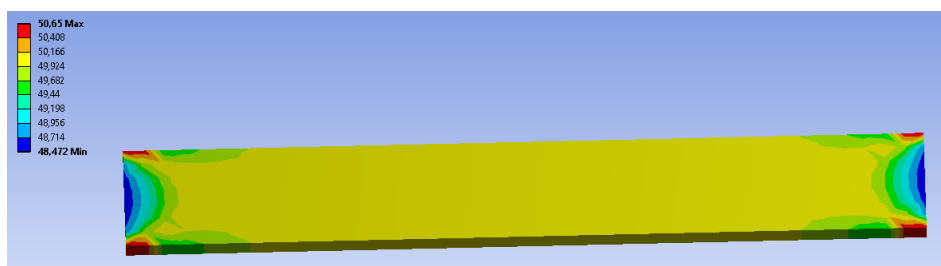


Figura 4.33: Tensión de rotura.

4.10.5 Basalto

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de basalto y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.28, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.29 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,022	0,979
Tsai-wu	1,024	0,969

Tabla 4.28: Comparativa valores teoría de fallo.

Basalto	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	7,88	392,11
Simulación FEM	8,03	392,37
%Error	2,06	0,06

Tabla 4.29: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 0,06%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.34.

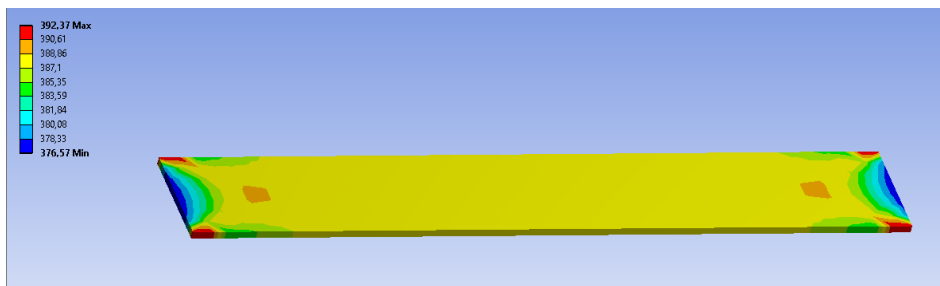


Figura 4.34: Tensión de rotura.

4.10.6 Bambu

En este apartado se realizó la simulación MEF del ensayo sobre una probeta de 120 mm de fibra de bambú y resina epoxi 1050. Tras ajustar la deformación aplicada sobre la probeta hasta predecir la rotura mediante la teoría de fallo como se observa en la gráfica 4.30, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.31 en comparación con los valores empíricos.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,01	0,49
Tsai-wu	1,11	0,57

Tabla 4.30: Comparativa valores teoría de fallo.

Bambu	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
Ensayo experimental	4,6	93
Simulación FEM	4,5	95
%Error	2,17	2,15

Tabla 4.31: Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM

Atendiendo a los resultados obtenidos para la rotura según los criterios de fallo, el porcentaje de error en cuanto al cálculo del estado tensional fue de un 2,17%, con una distribución descrita según se observa en la figura 4.35.

4.10.7 Discusión

De la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones MEF con respecto a los valores empíricos podemos observar una variación porcentual baja en relación a las tensiones calculadas.

Por tanto, es posible decir que la aplicación de este método para el cálculo de componentes presenta buenos resultados para el caso esfuerzo uniaxial. Normalmente, en el diseño de componentes con materiales compuestos se aplica un factor de seguridad suficientemente elevado para cubrir los posibles defectos derivados del proceso de fabricación

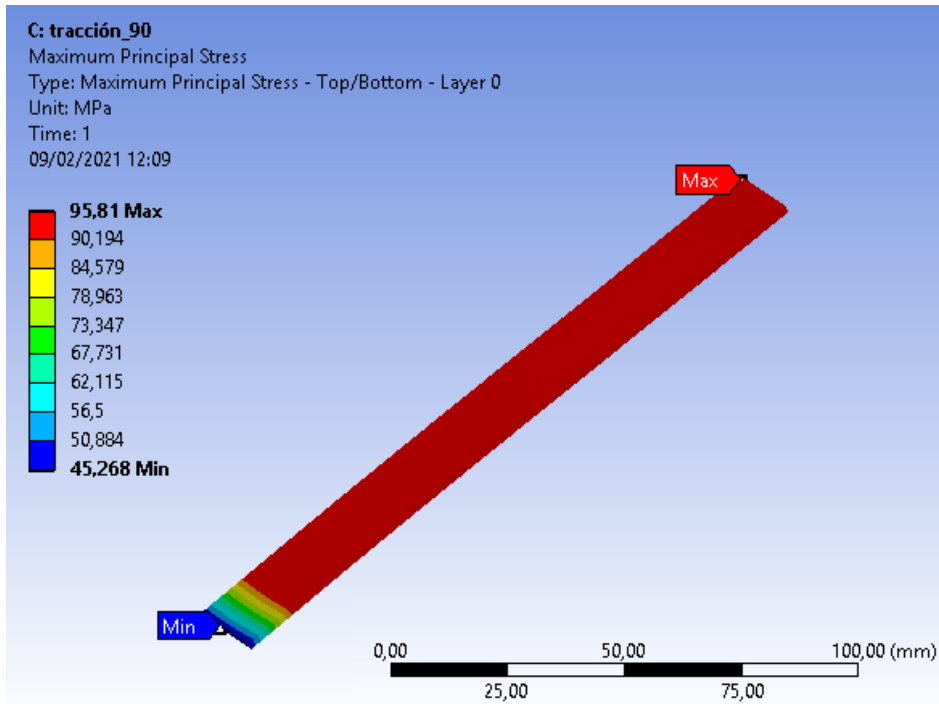


Figura 4.35: Tensión de rotura MEF bambú.

y defectos del material en si. Por esta razón, el porcentaje error en el modelo puede ser despreciado frente al factor de seguridad a aplicar en un diseño real.

Respecto a las teorías de fallo comparadas, se ha podido comprobar que los valores obtenidos por la teoría de deformación máxima han sido menos conservadores que los de la teoría de Tsai-wu, dando el primero mejores resultados para el caso de esfuerzo uniaxial de tracción, aunque bien es cierto que en este tipo de esfuerzo, parte de la ecuación de los métodos polinomiales se anula, por lo que no aportan ninguna ventaja.

4.11 Modelo estático por elementos finitos multiaxial

4.11.1 Simulación del colín

Tras modelar distintas combinaciones en el software de simulación por elementos finitos se decidió tomar como referencia de fabricación un laminado formado por 3 capas de fibra de basalto orientadas a 90° , 45° y 90° .

Atendiendo a los resultados obtenidos en la simulación para los valores de tensión mostrados en la figura 4.36, puede observarse que el los puntos más esforzados se encuentran en una pequeña zona próxima a la unión atornillada trasera. Respecto a la deformación, el pico máximo se encuentra en la zona central donde se simuló el peso del piloto, siendo de pequeña magnitud como se observa en las figuras 4.37 y 4.38 a pesar de haberse simulado de forma puntual y sin el subchasis.

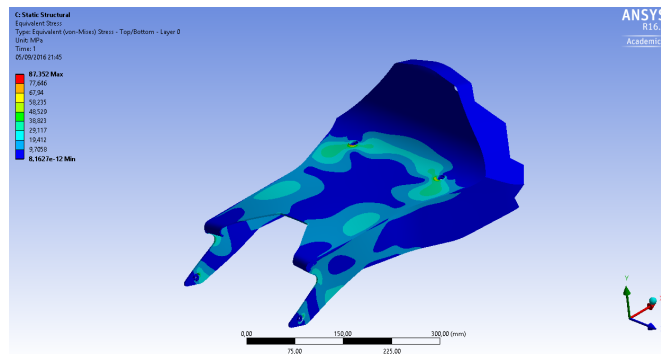


Figura 4.36: Resultado simulación MEF. Tensión debida a la fuerza sobre la base.

Revisando la tensión Figura 4.36 obtenida en la simulación, puede observarse que su magnitud es inferior al valor de tensión máxima admisible calculado en los ensayos de tracción, por tanto puede considerarse que el componente no romperá con la aplicación de estas cargas desde el punto de vista de la teoría de tensión máxima. De igual forma se observa que no producirá rotura atendiendo al criterio de fallo por deformación mostrado en la figura Figura 4.39 calculado utilizando el modulo de ACP POST.

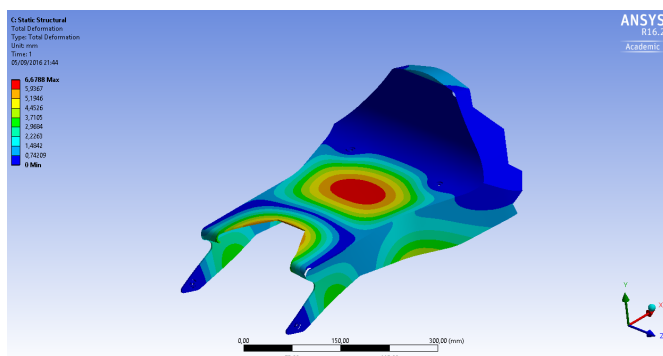


Figura 4.37: Resultado simulación MEF. Deformación de la base.

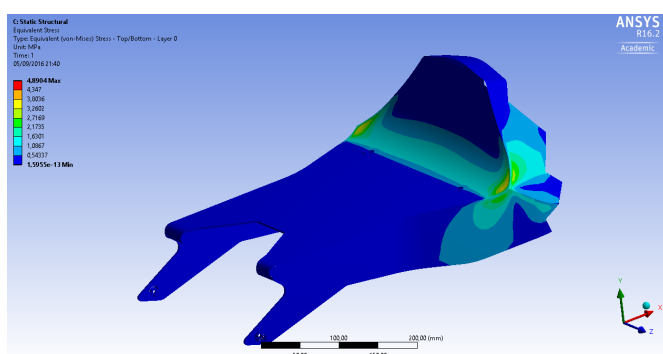


Figura 4.38: Resultado simulación MEF. Tensión debida a la fuerza sobre la zona trasera.

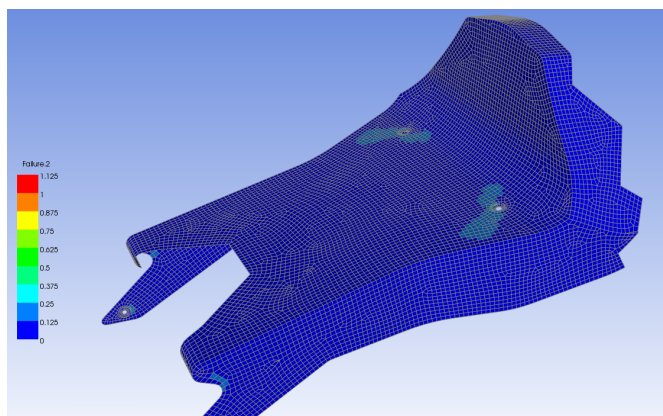


Figura 4.39: Modulo ACP. Resultados criterio de fallo.

4.11.2 Discusión

En este apartado se ha puesto de manifiesto la posibilidad de cálculo y dimensionado de componentes en un software de simulación por elementos finitos a partir de cualquier material conocido o desconocido,

siempre que se conozcan de sus propiedades resistentes o se obtengan mediante ensayos. Los materiales compuestos ofrecen un amplio abanico de posibilidades aun sin explorar para dar soluciones a problemas en materiales todavía inexistentes en el mercado. A su vez los software de simulaciones por MEF constituyen una herramienta de desarrollo esencial para alcanzar estos objetivos en casi cualquier campo(estudios mecánicos, acústicos, térmicos, etc), aportando la posibilidad de predecir los resultados de una aplicación sin tener la necesidad de desarrollar completamente el producto.

4.11.3 Simulación del estribo frente a cargas estáticas.

La simulación MEF del estribo frente a cargas estáticas se realizó a partir de la hipótesis de carga extraída de la conducción deportiva de piloto de 60 kg de masa. Para esta, se tomo en consideración que el piloto podría llegar a posicionar toda su masa sobre un estribo al realizar el cambio de posición entre virajes.

Del resultado de la simulación se pudo observar que el nivel de tensión máximo del componente descrito en la figura 4.40, se agrupaba localizado en una zona puntual próxima a uno de los tornillos. Aunque, el nivel de tensión más alto se situó entorno a la periferia del orificio esto se debe al concentrador de tensiones, por lo que la parte más predispuesta a producir el fallo es la situada entre la zona amarilla o naranja, la cual sitúa su magnitud entorno a 50 MPa. No obstante, ninguna de estas tensiones aplicadas de forma estática produciría el fallo en el estribo puesto que la tensión de rotura del material esta entorno a 93 MPa.

Por esta razón, atendiendo a la forma cíclica repetitiva de aplicación de estas cargas, el estudio de este prototipo se derivó a un análisis de fatiga.

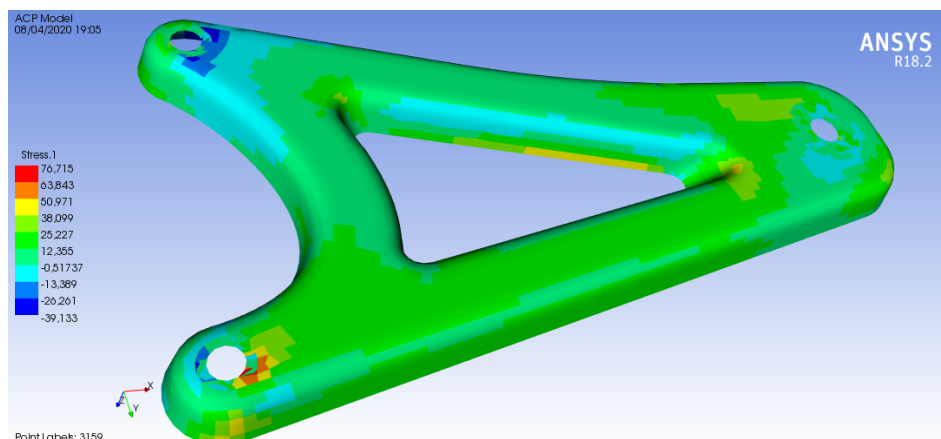


Figura 4.40: Nivel de tensión en el componente.

4.11.4 Simulación del estribo para estudio de fatiga.

En este apartado se realizó el estudio de resistencia a fatiga del componente a partir de las gráficas tensión-ciclos generadas de los ensayos realizados con probetas de bambú y del modelo estático de elementos finitos.

Lo habitual hubiese sido comparar la tensión del modelo estático con la gráfica generada para determinar el número de ciclos de vida del componente. Pero en este caso, para validar tanto la gráfica como la metodología, se buscó realizar varios ensayos empíricos de fatiga sobre el componente a distintos niveles de tensión para después comparar los resultados obtenidos (ciclos de vida) con los de la gráfica del estudio de fatiga uniaxial.

Para ello, se trabajó sobre el modelo estático aplicando los valores de entrada de desplazamiento descritos que generasen los niveles de tensión deseados. A continuación, tomando como referencia estos valores de desplazamiento se ajustó el banco de fatiga y se realizaron los distintos ensayos.

De los resultados de los ensayos fue posible obtener los valores medios de fuerza máxima (F_{\max}) y fuerza mínima (F_{\min}) que tuvieron lugar en las posiciones de desplazamiento máximo (L_{\max}) y desplazamiento mínimo (L_{\min}) respectivamente, según se muestra en la figura 4.32.

Descripción	L_{\max} mm	L_{\min} mm	F_{\max} N	F_{\min} N	N Ciclos
Estribo_1	8,22	0,54	692,23	121,10	33.731
Estribo_2	9,51	1,39	701,44	95,49	13.949
Estribo_3	11,27	6,11	618,42	79,03	413.586
Estribo_5	6,69	0,08	706,18	57,62	133.325

Tabla 4.32: Resultados de los ensayos de fatiga sobre el estribo.

Tomando como punto de partida los valores medios de fuerza máxima (F_{\max}) y fuerza mínima (F_{\min}) que tuvieron lugar en las posiciones de desplazamiento máximo (L_{\max}) y desplazamiento mínimo (L_{\min}) en los ensayos de fatiga sobre la geometría del estribo, fue posible simular el estado tensional de cada estudio sobre el modelo de elementos finitos.

La finalidad de estas simulaciones fue la de obtener los valores de tensión máxima y mínima para cada posición de desplazamiento de cada estribo, y posteriormente calcular la tensión media alternante según se puede ver en la tabla 4.33 y posteriormente la tensión alternante equivalente partir de la aplicación de las distintas ecuaciones para cada ensayo. Para ello bastó con introducir los valores sobre el modelo estático generado en el punto anterior.

Descripción	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ (MPa)	$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ (MPa)
Estribo_1	58,16	10,10	34,13	24,03
Estribo_2	59,68	7,94	33,81	25,87
Estribo_3	47,34	6,56	26,95	20,39
Estribo_5	53,23	4,75	28,99	24,24

Tabla 4.33: Cálculo de tensión media y alternante mediante simulación FEM

Una vez obtenida la tensión alternante equivalente (σ_{a0}) fue posible predecir la rotura comparando los valores con los de la gráfica Tensión alternante - Número de ciclos como se muestra en la figura 4.41.

A partir de la simulación se pudo predecir cual sería la zona de rotura del componente, que al igual que en el caso estático estaba localizada próxima a la unión atornillada como puede verse en la figura 4.42 y que

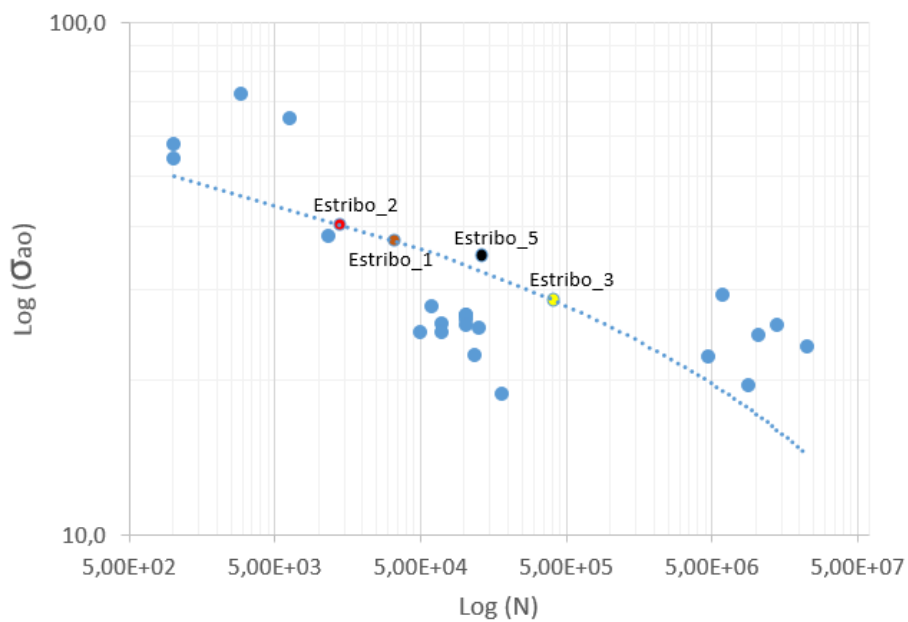


Figura 4.41: Posicionamiento de ensayos sobre gráfica Tensión alternante equivalente - Número de ciclos.

con idénticos resultados se reprodujo en las distintas piezas ensayadas como se muestra en la figura 4.43.

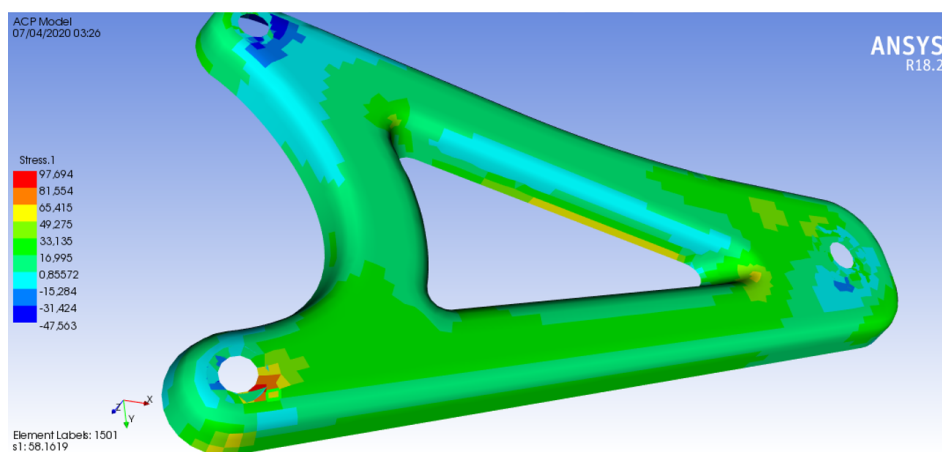


Figura 4.42: detalle tensión máxima en Estribo_1.



Figura 4.43: Estribos ensayados con la rotura en la misma zona.

5

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación han permitido conocer diferentes factores determinantes en el desarrollo y la producción de componentes con materiales compuestos de fibras naturales, tanto enfocados al proceso de diseño y al proceso de fabricación, como a la caracterización mecánica de propiedades.

Las conclusiones que se pueden extraer referentes a la búsqueda de un material compuesto con tejido natural apto para el desarrollo de componentes estructurales de vehículos son las siguientes:

- En esta tesis se han fabricado distintos componentes con fibras naturales, por lo que se desprende que es posible la utilización de estos materiales en un uso industrial en que se busque la utilización de materiales eco-friendly con gran potencial de reciclabilidad. Se ha visto que es posible aplicar la fibra de bambú en un componente con responsabilidad mecánica obteniendo buenos resultados de resistencia a fatiga. De igual forma se puede de-

cir que este material es apto para su aplicación en componentes estéticos, aerodinámicos y estructurales.

- A partir del método desarrollado en el estudio realizado se ha demostrado que es posible predecir el comportamiento en servicio y la vida útil de un componente fabricado con fibras naturales, del cual a priori no se conocían sus propiedades, siendo posible además predecir y ajustar su proceso de fabricación.
- De todos los tejidos naturales analizados, el basalto presenta las mejores propiedades resistentes, con un límite de rotura de 392 MPa. Este material se puede considerar apto para la fabricación de componentes de automoción puesto que sus propiedades resistentes son un poco superiores a las de la fibra de vidrio, la cual se aplica desde hace años en el sector. Pese a haber fabricado un prototipo de un colín con fibra de Basalto, este tejido se descartó del estudio como material final por su complejidad en cuanto al proceso de obtención y su origen mineral, características que lo alejan del objetivo de ser eficiente en su fabricación, uso y reciclaje.
- Respecto a los materiales de origen vegetal, el lino y el bambú destacaron en cuanto a propiedades mecánicas frente al ramie y al yute, siempre hablando del caso concreto de los tejidos utilizados en la tesis.
- El ramie fue el tejido que presentó los peores valores en cuanto a resistencia a la tracción, solo 44 MPa de tensión de rotura. Pese a esto, se observó un buen acabado superficial y gran facilidad de moldeo, por lo que podría utilizarse en componentes interiores de baja exigencia mecánica.
- Tanto el lino como el bambú se podrían aplicar a la fabricación de componentes de automoción. No obstante, se observó que el bambú presentaba un límite elástico de tracción más elevado y una mayor deformación unitaria, por lo que frente a un impacto absorbería mejor la energía. Además, tras realizar la caracterización a fatiga se pudo confirmar un buen comportamiento del

material, razón de peso para su validación teniendo en cuenta que los componentes de automoción se ven sometidos a cargas cíclicas, siendo esta la causa de fallo más habitual. Por tanto se puede considerar que la fibra de bambú cumple el objetivo de ser un material de coste moderado debido a que su fuente de extracción es natural e infinita, baja densidad, buenas propiedades mecánicas resistentes y alto potencial de reciclabilidad teniendo en cuenta que si se aplicase sobre una matriz de origen natural podría dejarse degradar con el tiempo.

- Un componente fabricado con fibra de bambú atenuará mejor las vibraciones que uno fabricado en fibra de carbono. En este aspecto, un colín o un bucket fabricado con esta fibra natural será más comfortable para el piloto que uno de fibra de carbono en cuanto a la transmisión de vibraciones derivadas de las imperfecciones del pavimento y del propio motor.

En cuanto a la consecución del resto de objetivos parciales se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se ha observado que para la fabricación de piezas complejas por el método de infusión de resina resulta de gran ayuda el desarrollo de un modelo de llenado por método de volúmenes finitos, reduciéndose los fallos por race-tracking.
- Para obtener los valores de la porosidad y permeabilidad necesarios para simular una infusión de resina en el software de elementos finitos es necesario considerar las capas de tejido pelable y malla de difusión.
- El ensayo más relevante para la caracterización de un material compuesto con la finalidad de aplicarlo a un componente con responsabilidad mecánica es el ensayo de tracción. Esto se debe a que en la mayoría de diseños con materiales compuestos las fibras se disponen para trabajar a tracción preferentemente.
- Se ha comprobado que es correcto el proceso seguido para validar el modelo de elementos finitos (caracterización del material, aproximación del ensayo de tracción en modelo MEF, validación del

modelo por comparación con los resultados MEF y empíricos de esta orientación, diseño multiaxial y fabricación del componente).

- El método utilizado para conocer la resistencia a fatiga de un componente (multiaxial) a partir de la simulación MEF de un estado tensional frente a una deformación concreta aporta valores muy próximos a los obtenidos empíricamente.
- En los ensayos de fatiga con probetas orientadas a 45° se produce una gran fricción entre las fibras que causa un aumento de temperatura puntual muy superior al de las probetas con fibras orientadas a 90° .
- En los ensayos de fatiga es posible observar un incremento de temperatura localizado en la zona de inicio de grieta.
- Se pudo observar que las probetas con orientación $[45/-45]$ acusan menos los daños de fatiga que las orientadas a $[0/90]$, aunque soportan niveles de tensión inferiores.
- Tras realizar un elevado número de ciclos de fatiga sobre las probetas, aparece una deformación permanente por relajación del material.
- Para caracterizar los composites a fatiga se han realizado los estudios con ciclos de carga tracción-tracción, no obstante para los casos en que se ha aplicado a las probetas ciclos de tracción-compresión el fallo común ha sido por delaminación.
- Para iniciar los ensayos de fatiga sobre las probetas de fibras naturales resulta conveniente generar una rampa de desplazamiento progresivo creciente, puesto que de no aplicarse está gran parte de las probetas rompen tras los primeros ciclos.
- Se ha comprobado en este trabajo que realizando un modelo FEM en Ansys ACP para el ensayo de tracción a partir de las propiedades caracterizadas sobre laminados orientados a $[0/90]$ es posible simular laminados con otras orientaciones obteniendo buenos resultados. De esta manera es posible aplicar este método para la

simulación de estados tensionales más complejos sobre geometrías de componentes.

6

Líneas de investigación futuras

En el documento se ha plasmado de forma resumida lo que podría aportarse en una publicación científica futura, puesto que el trabajo realizado en cada apartado desarrollado ha sido en muchos casos mayor a lo descrito por la cantidad de útiles mecánicos, moldes y elementos auxiliares que ha sido necesario diseñar y fabricar. Por lo que cada uno de los apartados podría ampliarse y extenderse hasta formar por si solo una investigación individual focalizada en un tema concreto.

Algunas de las líneas que se podrían desarrollar son:

- Una de las principales restricciones fijadas a los fabricantes de automóviles ha sido reciclaje de productos tras su vida útil. Un estudio que podría plantearse sería comprobar la aplicabilidad de residuo triturado de fibra de bambú (con bioresina) en fertilizantes y abonos agrícolas.

- Aplicabilidad de residuo triturado de material compuesto natural como aislante acústico disperso en los paneles de pladur de edificios.
- Determinar la validez del residuo triturado como combustible en calderas, para aplicaciones domésticas e industriales.
- Estudios de fatiga con influencia de la temperatura.
- Estudio de aplicación de la fibra de basalto para elementos sometidos a fricción y temperatura como los discos de freno de vehículos. Se han iniciado estudios de tribología sobre fibra de bambú durante esta tesis, aunque no han sido incluidos.
- Estudio sobre la reorientación de las fibras en el interior de la matriz de las probetas orientadas a 45° durante los ensayos de tracción.
- Creep en los ensayos de fatiga sobre materiales compuestos con fibras naturales.

Bibliografía

- [1] Lorena Marín Hernández. «Optimización de paneles rigidizados de materiales compuestos sometidos a cargas medioambientales y mecánicas». Tesis de mtría. Universidad de Granada, 2011.
- [2] Maria del Mar Nogueira López. «Análisis del hormigón reforzado con fibra de lino». Tesis de mtría. ETSAG_Master en arquitectura y materiales, 2015.
- [3] William D. Callister. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Ed. por Reverté. 2019.
- [4] William D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Volumen 2*. Ed. por Editorial Reberte. 2007.
- [5] Javier García de la Figal; Pedro A. Rodríguez Ramos. «El cálculo de los materiales compuestos por elementos finitos.» En: *Instituto Panamericano de ingeniería naval*. (2007).
- [6] A. Miravete. *Fundamentos de materiales compuestos*. Ed. por Compositeas: The alliance. 2017.
- [7] Alberto Moral Borque; Marar Nogueira López. «Materiales de ultima generación y materiales eficientes: materiales compuestos - composites». En: *Máster Oficial en Proyecto de Arquitectura y Ciudad . ETSAG . UAH* (2007).
- [8] Y. Yamashita; S. Kawabata; H. Minami;S. Okada; A. Tanaka. «Fatigue Property of PBO Fiber». En: *Taiyo Kogyo Corp., Osaka, Japan* (2001).

- [9] *Diseño con fibras animales*. <http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-diseno/fibras-animales>. (Visitado 16-01-2021).
- [10] Omar Faruk; Andrzej K. Bledzki; Hans-Peter Fink; Mohini Sain. «Biocomposites reinforced with natural fibers». En: *Progress in Polymer Science; Volume 37, Issue 11, November 2012, Pages 1552-1596* (2012).
- [11] Gabrio Zappelli Cerri. *Imagen escénica : aproximación didáctica a la escenología, el vestuario y la luz para teatro, televisión y cine*. Ed. por Editorial UCR. 2006.
- [12] Jose Enrique Crespo. *Apuntes de materiales compuestos, máster ingeniería de materiales*. 2015.
- [13] «Definiciones y categorías de los vehículos». En: *Real Decreto 711/2006, BOE* (2010).
- [14] Matías Molinier. «Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos». En: *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires*. (2006).
- [15] Hans Magnus Thorsen. «Belly Landing of the LocalHawk UAV, Low-Velocity Impact Simulation Using an Explicit Finite Element Solver». Tesis doct. Chalmers University Of Technology, 2013.
- [16] Luz Stella Arias Maya ; Libardo Vanegas Useche. «Falla de los materiales compuestos laminados». En: *Scientia et Technica Año X, No 25* (2004).
- [17] Universidad Carlos III de Madrid. «Teorías sobre la resistencia a rotura de una lámina». En: cap. capítulo 5.
- [18] *Elsevier Research Platforms*. <https://www.elsevier.com/es-es/research-platforms>. (Visitado 16-01-2021).
- [19] Vijay Kumar Thakur y Manju Kumari Thakur. «Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites». En: *Carbohydrate Polymers* 109 (2014), págs. 102-117. ISSN: 0144-8617. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.03.039.

-
- [20] I.C. Sukmaji y col. «Hybrid carbon-glass fiber composite for the door electric car application». En: 2013. DOI: 10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741519.
- [21] B. Sun y col. «Light-weighting design of eco-power automobile chassis made from green composite and its topology optimization in FEA». En: *Advanced Materials Research* 341-342 (2012), págs. 183-188. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.183.
- [22] B. Sun y col. «Design of an eco-power automobile body made from green composite and its structural optimization in FEA.» En: *Advanced Materials Research* 341-342 (2012), págs. 183-188. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.183.
- [23] H.T. Sreenivas, N. Krishnamurthy y G.R. Arpitha. «A comprehensive review on light weight kenaf fiber for automobiles». En: *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (2020).
- [24] P.M. Bupathi Ram y col. «A FEA Model to Predict Mechanical Properties of Laminated Bamboo Composites». En: *Lecture Notes in Mechanical Engineering* 23 (2021), págs. 587-595.
- [25] Z. Li y col. «A Strong, Tough, and Scalable Structural Material from Fast-Growing Bamboo». En: *Advanced Materials* 32.1906308 (2020).
- [26] Krishan Kumar Chawla. *Composite Materials: Science and Engineering*. Ed. por Springer Science & Business Media. 1987.
- [27] Flake C Campbell. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Ed. por Elsevier. 2004.
- [28] C. D. Rudd; A. C. Long; K. N. Kendall; C. Mangin. *Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and related processing techniques*. Ed. por SAE International. 1997.
- [29] F. J. Sánchez-SanRomán. «Ley de Darcy. Conductividad hidráulica». En: *Dpto. Geología, Univ. Salamanca* (2014).

-
- [30] J. Youn; Y. Cho; Y. Song; K. Chung; T. Kang. «Permeability measurement of a circular braided preform for resin transfer molding». En: *Fibers and Polymers* 4(3):135-144 (2003).
- [31] Jorge León. *Botánica de los cultivos tropicales*. Ed. por Editorial Agroamérica. 2000.
- [32] Mayra Montiel Longhi. *Cultivo y uso del bambú en el neotrópico*. Ed. por Editorial Universidad de Costa Rica. 1998.
- [33] *Características de la resina epoxi 1050*. <https://www.resoltech.com/en/>. (Visitado 16-01-2021).
- [34] Ligia María Vélez Moreno. *Materiales industriales. Teoría y aplicaciones*. Ed. por ITM Instituto Tecnológico Metropolitano. 2008.
- [35] J. Cuartero. Antonio Miravete. *Materiales compuestos 1 y 2*. Ed. por Editorial Reverté. 2003.
- [36] J.C. Xavier ; N.M. Garrido ; M. Oliviera; J.L. Morais ; P.P. Camanho ; F. Pierron. «A comparison beteen the Iosipescu and off-axis shear methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait». En: *Composites Part A*, p.827-840 (2004).
- [37] A. Blázquez; F. París; J. Cañas. «Análisis del ensayo de Iosipescu para la determinación del G12 con el método de los elemntos de contorno». En: *Materiales compuestos* (1995).
- [38] M. Meo M. Grassi X. Zhang. «Prediction of stiffness and stresses in Z-fibre reinforced composite laminates». En: *Composites Part A: applied science and manufacturing* (2002).
- [39] E. Paul DeGarmo; J. Temple Black; A. Kohser. *Materiales y procesos de fabricación, Volumen 1*. Ed. por Editorial Reverte. 2008.
- [40] T.F. Fwa. «The Handbook of Highway Engineering». En: *CRC Press* (2005).
- [41] S. Qian; H. Zhang; G. Keoleian. «Life cycle analysis of pavement overlays made with engineered cementitious composites». En: *Cem. Concr. Compos.* (2012).

-
- [42] J. Taherinezhad; M. Sofi; P. Mendis; T. Ngo. «A review of behaviour of prestressed concrete sleepers». En: *J. Struct. Eng*, pp. 1-16 (2013).
- [43] W. Ferdous; A. Manalo. «Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies?review of current practice». En: *Eng. Fail. Anal.*, 44, pp. 17-35 (2014).
- [44] A.D. Sorensen I.D. Unobe. «Multi-hazard analysis of a wind turbine concrete foundation under wind fatigue and seismic loadings». En: *Struct. Saf.*, 57, pp. 26-34. (2015).
- [45] W. Ferdous; A. Manalo. «Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue». En: *Fail.* (2000).
- [46] R. Peerling; W. Bredelmans; R. de Borst; M. Geers. «Gradient-enhanced damage modelling of high-cyclic fatigue». En: *Int J Numer Meth Eng*, 9, pp. 1547-1569 (2000).
- [47] J.J. Muñoz; U. Galvanetto; P. Robinson. «On the numerical simulation of fatigue-driven delamination using interface elements». En: *Eng5* (2).
- [48] Luca Di Landro; Gerardus Janszen. «Composites with hemp reinforcement and bio-based epoxy matrix». En: *Composites: Part B* 67 (2014), 220–226.
- [49] J. Weitzenbock; P. Wilson. «Radial flow permeability measurement». En: *Part A: Theory Composites* (1999), vol. 30.
- [50] M.C. Serna Moreno y col. «Flexión en materiales compuestos con distinta respuesta a tracción y a compresión». En: *AEMAC* 2 (2017), págs. 1-4. ISSN: 2531-0739.
- [51] Geng Han y col. «The failure mechanism of carbon fiber-reinforced composites under longitudinal compression considering the interface». En: *Science and Engineering of Composite Materials* 24 (2015). ISSN: 3.
- [52] A. Dorigato; A. Pegoretti. «Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates». En: *Journal of Composite Materials* (2012).

Índice de figuras

1.1	Fases de un material compuesto.	4
1.2	Módulo transversal vs módulo longitudinal de fibras por su naturaleza.	9
1.3	Método de laminado manual.	17
1.4	Moldeo por laminado manual.	17
1.5	Horno autoclave para control de la presión y temperatura.	18
1.6	Moldeo por infusión de resina.	20
1.7	Moldeo por infusión de resina.	21
1.8	Infusión de resina preparada para la entrada de resina.	22
1.9	Problema zona seca en infusión de resina.	22
1.10	Moldeo por método de bobinado filament winding.	24
1.11	Método de proyección.	25
1.12	Moldeo por método de pultrusión.	27
1.13	Moldeo por compresión en caliente.	28
1.14	Moldeo por compresión en caliente del bastidor de una bicicleta de fibra de carbono.	30
1.15	Fabricación de un componente por método de moldeo RTM en molde cerrado.	31

1.16 Fardier, primer automóvil con motor a vapor.	32
1.17 Benz Patent-Motorwagen, primer automóvil con motor de combustión interna.	33
1.18 Evolución de la masa en berlina de lujo de AUDI.	34
1.19 Ejemplo de fallo por despegado "debonding".	38
1.20 Ejemplo de fallo por delaminación.	38
1.21 Criterio tensión máxima.	39
1.22 Criterio deformación máxima.	40
1.23 Criterio Tsai-Hill.	42
1.24 Porcentaje de aplicación de cada método por los di- señadores de componentes del sector.	45
1.25 Envoltorio de falla para un composite de fibra de vidrio con resina epoxi.	45
1.26 Simulación de accidente mediante programa CAE.	46
1.27 Simulación FEM de una biela.	47
1.28 Cabecera software ANSYS.	50
2.1 Planificación temporal	69
2.2 Planificación temporal: Prorroga	71
2.3 Planificación temporal: Tiempo parcial	72
2.4 Proceso de diseño y optimización del bastidor.	73
2.5 Proceso de fabricación.	73
2.6 Bastidor terminado.	74
2.7 Bastidor terminado.	74
3.1 Tipos de ensayos de permeabilidad	79

3.2	Ensayo radial de permeabilidad	80
3.3	Proceso de ensayo radial de permeabilidad	81
3.4	Mallado. Áreas de entrada y salida de resina.	84
3.5	Fluid Flow (fluent). CFD-Post.	84
3.6	Método de fabricación.	86
3.7	Proceso de fabricación.	87
3.8	Planta de Lino.	89
3.9	Tejido de Lino.	89
3.10	Tejido de Lino utilizado.	90
3.11	Plantación de Yute.	90
3.12	Fibra de Yute.	91
3.13	Tejido de fibra de yute utilizado.	91
3.14	Trozo de roca de Basalto.	92
3.15	Tejido de Basalto.	92
3.16	Bomba de vacío.	95
3.17	Cubo de resina.	96
3.18	Tubo PEBD.	96
3.19	Clampas de cierre.	96
3.20	Termómetro laser.	97
3.21	Medidor de fugas.	97
3.22	Tijeras para Corte de tejidos.	98
3.23	Bolsa de vacío.	99
3.24	Tubo helicoidal.	99
3.25	Tubo PEBD.	99

3.26 Conector tipo "t".	99
3.27 Llave de cierre.	100
3.28 Toma para infusión de resina.	100
3.29 Cinta adhesiva.	101
3.30 Masilla de cierre para sellado.	101
3.31 Malla de distribución.	101
3.32 Tejido pelable.	102
3.33 Proceso de fabricación. Corte de tejidos.	102
3.34 Proceso de fabricación. Posicionamiento de tejidos. . .	103
3.35 Proceso de fabricación. Posicionamiento del peel ply. .	104
3.36 Proceso de fabricación. Montaje.	105
3.37 Proceso de fabricación. Aplicación de vacío.	106
3.38 Proceso de fabricación. Entrada de resina.	107
3.39 Proceso de fabricación. Desmoldeo.	108
3.40 Proceso de Corte CNC.	109
3.41 Molde mecanizado para fabricar probetas de resina. . .	109
3.42 Esquema de moldeo.	116
3.43 Proceso de moldeo.	117
3.44 Probetas para ensayo de propiedades resistentes sobre el eje Z del laminado.	118
3.45 Proceso de obtención de modelo CAD.	119
3.46 Proceso de obtención imágenes del modelo CAD. . . .	120
3.47 Borrado de superficies no deseadas en imágenes del mo- delo CAD.	120

3.48	Procesado de imágenes del modelo CAD.	121
3.49	Geometría 3D del Colín.	121
3.50	Molde del colín fabricado en dos partes.	122
3.51	Prototipo de colín junto con molde desmontable utilizado.	123
3.52	Mecanizado cnc del molde 1.	124
3.53	Molde 1 del estribo.	125
3.54	Comparación de geometrías: primer diseño de estribo frente al estribo final.	126
3.55	Prototipo final del estribo.	126
3.56	Ensayo de tracción ISO 527-1.	128
3.57	Ensayo de tracción realizado.	129
3.58	Montaje de extensómetro. Ensayo Poisson.	131
3.59	Ejemplo de esfuerzo de flexión.	133
3.60	Ensayo realizado.	134
3.61	Ensayo flexión ISO 14130.	134
3.62	Ensayo de compresión.	137
3.63	Útil de ensayo Iosipescu.	139
3.64	Dimensiones probeta de ensayo Iosipescu.	140
3.65	Ensayo Iosipescu.	141
3.66	Ensayo de tracción en el Eje Z	142
3.67	Tipología de aplicación de la carga.	144
3.68	Equipo de ensayos de fatiga.	147
3.69	Sensor PL2S de ELAP.	148
3.70	Sensor RS 317-780.	149

3.71 Montaje del sensor de desplazamiento relativo por creep.	149
3.72 Máquina en configuración final.	150
3.73 Mordaza para soporte de probetas.	151
3.74 Registro de rotura de una probeta mediante equipo HBM y software Catman.	152
3.75 Soporte y montaje de prototipo sobre la bancada. . . .	154
3.76 Ensayo sobre prototipo 03.	155
3.77 Gráfica de ciclos en software de adquisición de datos Catman.	155
3.78 Diseño CAD de la probeta.	156
3.79 Introducción de datos en Engineering Data.	157
3.80 Diseño de la malla.	158
3.81 Cálculo en Static Structural.	159
3.82 Introducción de datos en ACP-Pre.	160
3.83 Obtención de resultados en ACP-Post.	160
3.84 Arbol de módulos utilizados en ANSYS.	160
3.85 Honda RS 125 R GP.	162
3.86 Aplicación de cargas y restricciones.	165
3.87 Estribo de Honda RS 125 R GP.	166
3.88 Prototipo de estribo fabricado y listo para ser ensayado.	168
3.89 Propiedades del composite de bambú.	169
3.90 Generación de geometría de espesor cero.	170
3.91 Orientación del laminado.	171
3.92 Diseño de la malla.	172

3.93	Restricciones y cargas.	172
4.1	Comparativa de avance del frente de flujo en los ejes X e Y, en distintos estados de tiempo.	177
4.2	Representación de recta fiso.	178
4.3	Test de permeabilidad. Comparativa en distintos estados de tiempo del ensayo frente al modelo FVM.	180
4.4	Tipos de rotura en tracción.	182
4.5	Tipos de fallo en tracción.	183
4.6	Gráfica tensión vs deformación unitaria para probetas de lino 90°.	184
4.7	Gráfica tensión vs deformación unitaria para probetas de bambú 90°.	184
4.8	Caracterización de tracción de las probetas de bambú a 45/-45°.	186
4.9	Caracterización de tracción de la resina.	187
4.10	Ejemplo gráfico deformaciones longitudinal y transversal unitarias vs tensión. Ensayo sobre probeta de carbono sarga cortado a 45.	189
4.11	Fallo de agrietamiento de matriz por cortadura interlaminar en placas de gran espesor sometidas a flexión.	190
4.12	Gráfico resultados del ensayo de flexión realizado sobre las probetas de lino.	191
4.13	Medición de dureza sobre probeta de yute.	192
4.14	Resumen de valores de dureza.	193
4.15	Imagen de microscopia: a la izquierda tejido de bambú, a la derecha composite de bambú con resina epoxi 1050.	194

4.16	Ensayo de compresión sobre probetas de bambú.	195
4.17	Mecanismos de fallo en compresión.	196
4.18	Fallo en probeta de bambú sometida a compresión. . .	196
4.19	Zona de plegado (kink band).	197
4.20	Ensayo Iosipescu sobre probetas de bambú	198
4.21	Ensayo de tracción en el eje Z sobre probetas de bambú.	200
4.22	Delaminación y rotura parcial en ensayo sobre probeta de basalto.	201
4.23	Ensayo de fatiga con dos probetas.	202
4.24	Resultados de ensayos de fatiga en fibra de basalto: Tensión equivalente-Ciclos.	203
4.25	Comparativa fibra de basalto con estudio de otros au- tores. [52]	203
4.26	Ensayos sobre probetas con fibras alineadas con el es- fuerzo axial. (A)tensión equivalente-N; (B)tensión máxima- N	205
4.27	Ensayos sobre probetas con fibras alineadas a $\pm 45^\circ$ del esfuerzo axial. (A)tensión equivalente-N; (B)tensión máxima-N	205
4.28	Imagen termográfica sobre probeta $\pm 45^\circ$ en la genera- ción de la estricción.	206
4.29	Imagen termográfica sobre probeta $\pm 45^\circ$ en posición próxima a la rotura.	207
4.30	Tensión de rotura.	209
4.31	Tensión de rotura.	210
4.32	Tensión de rotura.	211
4.33	Tensión de rotura.	212

4.34	Tensión de rotura.	213
4.35	Tensión de rotura MEF bambú.	215
4.36	Resultado simulación MEF. Tensión debida a la fuerza sobre la base.	216
4.37	Resultado simulación MEF. Deformación de la base. . .	217
4.38	Resultado simulación MEF. Tensión debida a la fuerza sobre la zona trasera.	217
4.39	Modulo ACP. Resultados criterio de fallo.	217
4.40	Nivel de tensión en el componente.	219
4.41	Posicionamiento de ensayos sobre gráfica Tensión alter- nante equivalente - Número de ciclos.	221
4.42	detalle tensión máxima en Estribo_1.	221
4.43	Estribos ensayados con la rotura en la misma zona. . .	222

Índice de tablas

1.1	Clasificación de los refuerzos en materiales compuestos.	5
1.2	Resumen de propiedades en fibras de materiales compuestos.	8
1.3	Cantidad de fibras naturales que se fabrican al año[10]	11
1.4	Cantidad de energía utilizada en la producción de fibras. Fuente: [6]	11
1.5	Ventajas e inconvenientes de las fibras naturales [6] . . .	13
1.6	Clasificación de las fibras naturales.	14
1.7	Resumen de propiedades de fibras de materiales naturales. [10]	15
1.8	Palabras clave de búsqueda según los principales temas de la tesis.	54
1.9	Resultados de la búsqueda de palabras clave relacionadas con materiales compuestos de fibras naturales. . . .	55
1.10	Resultados para la búsqueda de palabras clave relacionadas con búsqueda de caracterización materiales compuestos.	55
1.11	Resultados de búsqueda MEF.	56
1.12	Resultados de búsqueda de automóviles.	56

1.13	Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras. . .	57
1.14	Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras. . .	57
1.15	Resultados de búsqueda en función del tipo de fibra empleada, tras adhesión de palabras clave.	59
3.1	Características iniciales extraídas de las placas de ma- terial fabricadas.	110
3.2	Características lámina de material compuesto.	110
3.3	Probetas ensayo de tracción sobre carbono (sarga). . .	110
3.4	Probetas ensayo de tracción sobre carbono (unidirec- cional).	111
3.5	Probetas ensayo de tracción sobre fibra de yute.	111
3.6	Probetas ensayo de tracción sobre fibra de lino.	112
3.7	Probetas ensayo de tracción sobre fibra de basalto. . .	112
3.8	Características iniciales extraídas de las placas de ma- terial fabricadas: ramie y bambú.	112
3.9	Características lámina de material compuesto: fibra de bambú con resina epoxi	113
3.10	Probetas ensayo de tracción sobre fibra de Bambú. . .	113
3.11	Probetas ensayo de tracción sobre fibra de ramie. . . .	113
3.12	Probetas ensayo de tracción sobre resina epoxi 1050 sin refuerzo.	113
3.13	Probetas ensayo de flexión sobre fibra de carbono (sarga).114	
3.14	Probetas ensayo de flexión sobre fibra de carbono (uni- direccional).	114
3.15	Probetas ensayo de flexión sobre fibra de yute.	114
3.16	Probetas ensayo de flexión sobre fibra de lino.	114

3.17	Probetas ensayo de flexión sobre fibra de basalto.	115
3.18	Probetas ensayo de compresión sobre fibra de bambú.	115
3.19	Probetas ensayo de cortadura Iosipescu sobre fibra de bambú.	115
3.20	Probetas ensayo de tracción en eje Z sobre fibra de bambú.	116
3.21	Tipología de cargas	144
4.1	Propiedades y condiciones de contorno.	176
4.2	Propiedades y condiciones de contorno.	176
4.3	Tiempos de frente de flujo.	176
4.4	Resumen de valores de porosidad y permeabilidad obtenidos.	178
4.5	Valores de porosidad y permeabilidad obtenidos por otros autores para distintos materiales. [48]	179
4.6	Comparativa de resultados del software y experimentales del ensayo.	179
4.7	Resumen de resultados para los tejidos cortados a 90°.	183
4.8	Resumen de resultados para los tejidos cortados a $\pm 45^\circ$	186
4.9	Resumen de resultados de resina epoxi 1050 (experimental vs teórico	188
4.10	Resumen de resultados de los ensayos del coeficiente de Poisson.	188
4.11	Resumen de resultados para para el ensayo de flexión.	190
4.12	Resumen de resultados para el ensayo de dureza.	192
4.13	Resumen de resultados del ensayo de compresión sobre fibra de bambú	194

4.14	Comparativa valores obtenidos de módulo de cortante por distintos métodos para el composite de fibra de bambú.	199
4.15	Valor del módulo elástico en la dirección Z para el composite de bambú.	200
4.16	Resultados extraídos del ensayo BAMBOO19 sobre 4 probetas de bambú epoxi cortadas a 0/90°.	204
4.17	Cálculo tensiones en ensayo BAMBOO19 sobre 4 probetas de bambú epoxi cortadas a 0/90°.	205
4.18	Características de los especímenes a ensayar.	207
4.19	Resultados de los ensayos de fatiga sobre la geometría del estribo.	208
4.20	Comparativa valores teoría de fallo.	209
4.21	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.	209
4.22	Comparativa valores teoría de fallo.	210
4.23	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.	210
4.24	Comparativa valores teoría de fallo.	211
4.25	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.	211
4.26	Comparativa valores teoría de fallo.	212
4.27	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM.	212
4.28	Comparativa valores teoría de fallo.	213
4.29	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM	213
4.30	Comparativa valores teoría de fallo.	214
4.31	Comparativa de resultados obtenidos experimental/FEM	214
4.32	Resultados de los ensayos de fatiga sobre el estribo. . .	220
4.33	Cálculo de tensión media y alternante mediante simulación FEM	220