

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Campus de Alcoi

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Caracterización de materiales compuestos
de fibras de carbono y naturales
aplicados para la fabricación de
componentes de automoción

Trabajo de Fin de Master

Autor: Bernardo A. Oliver Borrachero
Ingeniero de materiales

Directores: Dr. D. Samuel Sánchez Caballero
Doctor Ingeniero en Organización Industrial
Dr. D. Octavio Fenollar Gimeno
Doctor Ingeniero en Organización Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA

CAMPUS DE ALCOI

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y DE MATERIALES

**Caracterización de materiales compuestos
de fibras de carbono y naturales
aplicados para la fabricación de
componentes de automoción**

Trabajo de Fin de Master

Autor: Bernardo A. Oliver Borrachero
Ingeniero de materiales

Directores: Dr. D. Samuel Sánchez Caballero
Doctor Ingeniero en Organización Industrial
Dr. D. Octavio Fenollar Gimeno
Doctor Ingeniero en Organización Industrial

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

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a Samuel Sánchez, como director de tesis, por su constante e implicada ayuda a la hora de resolver mis interminables dudas, por sus aportaciones, consejos y gran dedicación para la elaboración de este trabajo.

A Octavio Fenollar, como director de tesis, por sus valiosos consejos y su gran ayuda en lo relacionado a caracterización y ensayos, así como en todo lo que he necesitado.

En general a los profesores del Máster por compartir su experiencia y conocimientos conmigo, y por el buen trato recibido.

A mis amigos y compañeros por la ayuda prestada.

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

Índice general

Agradecimientos	i
1 Introducción	3
1.1 Objetivos del proyecto	3
1.2 Metodología empleada	4
1.3 Planificación de la investigación	5
1.4 Materiales compuestos	6
1.4.1 Introducción	6
1.4.2 Definición de material compuesto	8
1.4.3 Métodos de fabricación	9
1.5 Fibras naturales	15
1.5.1 Fibras. Generalidades	15
1.5.2 Definición	16
1.5.3 Clasificación de las fibras naturales	17
1.6 materiales de estudio	18
1.6.1 Lino (Flax)	18
1.6.2 Yute	19
1.6.3 Basalto	20
1.7 Fase matriz	21
1.7.0.1 Resinas: Definición	21
1.7.0.2 Matriz de estudio	22

1.8 Automóvil.	23
1.9 Definición.	23
1.10 Concienciación	24
2 Estado del arte	27
2.1 Introduccion	27
2.2 Fuentes de información	28
2.3 Fuentes de búsqueda	29
2.4 Revisión bibliográfica	33
3 Experimental	35
3.1 Método de fabricación	35
3.2 Materiales	37
3.2.1 Equipos y herramientas auxiliares	37
3.2.2 Materiales fungibles	41
3.3 Proceso de fabricación	46
3.4 Resultados.	53
4 Caracterización mecánica	59
4.1 Ensayo de tracción	59
4.1.1 Resultados.	63
4.2 Coeficiente de Poisson	64
4.2.1 Resultados.	67
4.3 Ensayo de flexión	68
4.3.1 Resultados.	71
4.4 Ensayo de dureza	72
4.4.1 Resultados.	72

5 Modelo teórico FEM	75
5.1 Criterios de fallo.	75
5.1.1 Tensión máxima	76
5.1.2 Deformación máxima	78
5.1.3 Tsai-Hill	79
5.1.4 Tsai-Wu	80
5.2 Selección de criterio	81
5.3 Software CAE	82
5.4 Modelado CAE	87
5.5 Análisis de resultados	91
5.5.1 Carbono sarga	91
5.5.2 Carbono UD	93
5.5.3 Lino.	94
5.5.4 Yute	97
5.5.5 Basalto.	98
5.6 Conclusiones	100
6 Presupuesto.	103
Bibliografía	105
Índice de figuras	109
Índice de tablas	115

1

Introducción

Objetivos del proyecto

El objetivo del presente proyecto es la caracterización de varios materiales compuestos con diferentes tipos de fibras naturales y diferentes composiciones con el fin de determinar la aptitud de estos en un posterior uso en componentes de automoción.

Una vez realizados los ensayos de caracterización mecánica se pretende obtener un modelo teórico de dichos ensayos de caracterización mediante un software de elementos finitos, para, de tal forma, poder dimensionar componentes reales para el sector de la automoción. A continuación se muestra un cuadro resumen de objetivos:

- Estudiar las características físicas y las propiedades mecánicas de los materiales compuestos con matriz epoxídica de forma individualizada.
- Obtener conocimientos respecto a las generalidades de los distintos tipos de fibras, diferencias, ventajas e inconvenientes comparándolas entre si.
- Definir una guía de proceso para la fabricación, en el que se revisen las variables que interfieren en la fabricación por el método de infusión.
- Procesar un número determinado de placas de material compuesto con fibras naturales y sintéticas de forma individual, con la misma matriz (resina epoxi), con las que se obtendrán las probetas para realizar los ensayos de caracterización mecánica.
- Realizar ensayos requeridos para obtener las principales propiedades mecánicas de los materiales.
- Realizar un modelo computerizado por método de elementos finitos que se adapte a la realidad del ensayo de tracción con la finalidad de comparar los resultados y permitir el correcto diseño de componentes.
- Calcular un componente de tipo auxiliar en automoción y fabricarlo en función de los datos obtenidos para una determinada aplicación.
- Realizar un análisis de los resultados con la finalidad de generar unas conclusiones sobre lo realizado en el proyecto.

Este es el resumen de los objetivos planteados para el presente proyecto, la memoria es solo un resumen de todo lo que se puede aportarse en una publicación científica futura, puesto que de cada apartado podría desarrollarse la investigación de forma tan extensa como fuese requerido.

Metodología empleada

Todos los ensayos mecánicos se han realizado utilizando equipos calibrados para tal fin y siguiendo la normativa específica en cada caso. Se ha pretendido a lo largo del proyecto explicar y justificar todas las decisiones tomadas, prueba de ello son la utilización de una gran cantidad de figuras, imágenes y tablas. Así

mismo se han empleado las últimas herramientas CAD-CAM-CAE existentes para facilitar el diseño, cálculo y fabricación. Los diseños han sido realizados en 3D mediante SolidWorks® y Desing modeler Ansys para 2D. Los modelos o aproximaciones matemáticas se han realizado con los últimos programas de elementos finitos al alcance, como es el caso del módulo ACP de Ansys, modulo específico para materiales compuestos.

Planificación de la investigación

La planificación del proyecto es fundamental para desarrollar de forma temporalmente ordenada las fases establecidas, fijando metas temporales que ayudan al desarrollo de la investigación y a distribuir mejor el tiempo en las distintas fases. Aunque tratándose de una investigación, suele ocurrir que los plazos establecidos no pueden llegar a cumplirse puesto que pueden ralentizarse fases por distintas causas ajenas a nuestra voluntad.

Este proyecto forma parte de un proyecto de mayor envergadura temporal, una tesis doctoral. Por ello, a continuación se presenta la planificación general distribuida en tres años.

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

Figura 1.1: Planificación temporal

Dentro de esta planificación podemos establecer en el segundo año el proyecto desarrollado a continuación, en el que se distinguen claramente tres fases del proyecto: Fase teórica: Revisión del estado del arte, búsqueda bibliográfica, análisis de datos y redacción.

Fase práctica: Fabricación de placas, corte de probetas, caracterización mecánica de los compuestos, fabricación de un componente.

Experimental: obtención de modelos matemáticos y comparación con los resultados con los obtenidos en los ensayos de tracción.

Cabe destacar que las fases se han ido alternando entre si durante la elaboración del proyecto, desarrollándose varias a la vez y regresando a fases ya desarrolladas de forma regresiva.

El proyecto se inicia con el planteamiento de los objetivos, la justificación de utilizar materiales compuestos en componentes de automoción y búsqueda bibliográfica.

A su vez, previa definición del método de fabricación, se fabricaron las placas y probetas necesarias para la obtención de datos mediante infusión de resina.

Finalizadas estas etapas, se procede a la obtención de resultados mediante la caracterización mecánica de las probetas: Ensayos de tracción, ensayos de flexión, dureza e impacto.

Seguidamente se inicia la etapa experimental, en la cual se desarrolla un modelo matemático por software de elementos finitos que aproxime los resultados a la realidad con la finalidad de poder ser aplicado en posterioridad a un componente de automoción.

Finalmente con datos y experiencias obtenidas, se realiza los análisis y conclusiones, dando por finalizado el proyecto.

Materiales compuestos

Introducción

Cada día es más habitual la utilización materiales compuestos debido a la demanda de mejores características y propiedades en los productos, principalmente en cuanto a su ligereza, resistencia y coste entre otras propiedades. De tal forma existe un continuo esfuerzo por parte de empresas e investigadores para mejorar los materiales tradicionales y desarrollar nuevos materiales.

Los materiales compuestos son materiales formados por dos o más componentes que se caracterizan porque las propiedades del material final son superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado.

Un buen ejemplo de materiales compuestos en la naturaleza serían los árboles, puesto que sus fibras de celulosa flexibles resisten los esfuerzos mecánicos a los que

el árbol puede estar sometido, mientras que la matriz de rígida lignina configura las formas de esas fibras, manteniéndolas unidas y sirviendo como medio transmisor de las cargas [15]. En el cuerpo humano encontramos otro ejemplo de material compuesto, los huesos son una mezcla de fibras de colágeno y una matriz de mineral frágil de apatito [12].

Aunque los ejemplos mencionados cumplen con los requisitos de un material compuesto por definición, consideraremos la premisa de que estos no han sido creados por el hombre, siendo de tal forma uno de los primeros ejemplos de aplicación de materiales compuestos las casas o chozas hechas en la antigüedad por los primeros pobladores, fabricadas con adobes reforzados con paja [17].

La ventaja de los materiales compuestos aparece cuando comparamos su módulo específico (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 es muy elevado, por lo que es muy importante en la industria del transporte ya suponen un ahorro energético.

La mayor parte de aplicaciones tecnológicas modernas requieren de materiales con combinaciones de propiedades imposibles de encontrar en materiales comunes. Por ejemplo, la industria aeronáutica solicita materiales de baja densidad con alta resistencia mecánica, alta rigidez, alta resistencia al impacto, a la abrasión y a la corrosión. Esta es una combinación de características que restringen la lista de materiales a emplear puesto que frecuentemente, los materiales más resistentes son relativamente más densos y además, un incremento de resistencia y rigidez se traduce en una disminución de la resistencia al impacto. Por todo ello, la combinación de las propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de nuevos materiales compuestos [6]. Por ello, en la industria Aeroespacial se presenta como material imprescindible debido a su comportamiento ante los requerimientos mecánicos y térmicos de estas estructuras.

Definición de material compuesto

Los materiales compuestos o composites son aquellos materiales constituidos por la combinación de al menos dos o más constituyentes, no solubles entre sí, con diferentes propiedades que se combinan al nivel macroscópico para alcanzar una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales individualmente [10].

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una llamada fase matriz, continua y rodeada por otra fase, denominada fase dispersa. La fase matriz soporta la fase dispersa y transmite las tensiones. La fase dispersa aporta resistencia al conjunto. Las propiedades de los materiales compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas.

En la mayoría de materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la fase matriz, y las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la intercara matriz-partícula[26]. Ambos constituyentes tanto, fibra como matriz, deben estar presentes en proporciones razonables, al menos un 5 % del total.

Los materiales compuestos pueden clasificarse de forma global por el tipo de refuerzo, tal como se expresa en la siguiente tabla:



Figura 1.2: Clasificación según el tipo de refuerzo.

De esta forma se distinguen tres grandes grupos:

- Refuerzo a base de partículas, con formas aproximadas a la esférica pudiendo ser partículas grandes (las iteraciones matriz-partícula se describen mediante la mecánica continua) o estando consolidado por dispersión (las iteraciones matriz-partícula se describen a nivel atómico o molecular).
- Refuerzo a base de Fibras, elementos en los que una dimensión predomina sobre las otras dos. Las Fibras se orientan de forma ordenada o aleatoria.
- Refuerzos estructurales, las fases componentes se encuentran en forma laminar, y no siempre con espesores semejantes.

Métodos de fabricación

En la actualidad existen muchos métodos de fabricación de materiales compuestos, aunque para todos fundamental es conseguir una buena unión entre la matriz de resina y la fibra de refuerzo sobre un molde que da la forma a la pieza.

Solo explicaremos los procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica más utilizados, pudiendo clasificarse en dos grandes grupos: molde abierto y molde cerrado.

PROCESOS EN MOLDE ABIERTO:

- Moldeo por colocación manual
- Moldeo a vacío
- moldeo en autoclave
- infusión
- Bobinado o filament winding
- Centrifugación

PROCESOS EN MOLDE CERRADO

- Pultrusión

- Compresión en caliente
- Moldeo por prensado en frío
- Inyección RTM (Resin Transfer Moulding)
- Vartm

A continuación se explica cada uno con más detalle.

PROCESOS EN MOLDE ABIERTO:[9]

- Método de contacto manual (Hand lay-up):

Es el método más sencillo para preparar una pieza reforzada con fibra. Se colocan sobre un molde, debidamente acondicionado, fieltros de fibra enrollada, mechas trenzadas u otros tejidos hechos de fibras y se impregnan con resina con una brocha o por vertido.

Posteriormente se pasa un rodillo y se ponen capas hasta que se llegue al espesor del diseño. Es conveniente pasar el rodillo cada vez que se añade una capa para evitar problemas de delaminación por bolsas de aire.



Figura 1.3: Moldeo por laminado manual.

La resina utilizada se mezcla con un catalizador o endurecedor, de lo contrario, el curado puede llevar días o incluso semanas. Es importante la utilización de la proporción correcta de catalizador en la resina para asegurar el tiempo de curado correcto.

Un 1% de catalizador es un curado lento, el 2% es la proporción recomendada, y el 3% dará un curado rápido.

- Moldeo al vacío.

Se trata de una derivación mejorada del método de laminado manual (Hand lay-up) en la que se cubre con una bolsa flexible el conjunto laminado y justo antes de que termine el periodo denominado tiempo de gel de la resina se aplica una presión de vacío sobre esta que comprime las láminas de material, eliminando bolsas de aire atrapado y formando un material más uniforme.

- Autoclave.

Un autoclave es un recipiente metálico, de paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar con alta presión y a una temperatura de curado más elevada. Posee los mismos pasos que el moldeo al vacío, pero se le añade un post-proceso, la aplicación de presión y temperatura que da como resultado laminados con altas propiedades físicas y químicas.



Figura 1.4: Horno autoclave para control de la presión y temperatura.

- Moldeo por infusión.

La Infusión utiliza una bolsa de vacío sobre un molde abierto, de igual forma que en molde al vacío.

La diferencia reside en que el refuerzo se posiciona en seco sobre el molde, se cubre con la bolsa y se le aplica vacío. La resina se introduce en el molde por la presión de vacío mediante unos conducto(gomas) mojando las fibras secas del interior.

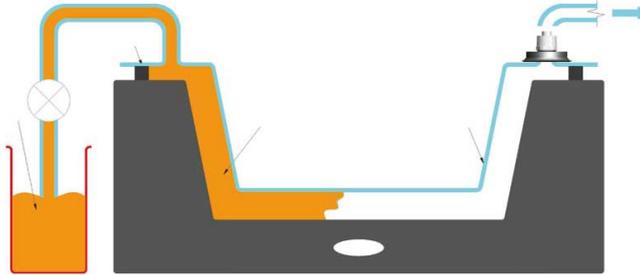


Figura 1.5: Moldeo por infusión de resina.

- Método de proyección.

Se proyectan hilos cortados y resina de forma simultánea sobre un molde previamente preparado y a continuación se pasa el rodillo (antes de que la resina endurezca). El curado de este método se produce de igual modo que el método anterior.

- Bobinado o filament winding.

Este método consiste en enrollar sobre un tubo o mandril filamentos continuos de fibra que previamente son guiados por unos rodillos y pasan por un baño de resina. El mandril gira, mientras que un carro se mueve en sentido horizontal. Todo se controla usando un programa que establece las fibras en el patrón deseado, los ángulos, velocidad, tensión etc. Una vez que el mandril está completamente cubierto con el espesor deseado, se coloca en un horno para curado de la resina.

- Centrifugación.

En este método se lamina sobre molde de revolución que gira y en el que se introducen en continuo y simultáneamente mezclas de fibras y resina catalizada y acelerada. Debido a la rotación se genera una fuerza empuja el material hacia las paredes, generando una presión que favorece la unión interlaminar.

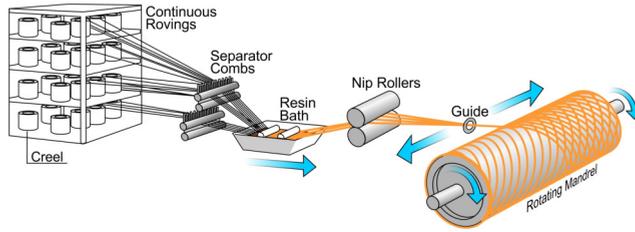


Figura 1.6: Moldeo por método de bobinado filament winding.

PROCESOS EN MOLDE CERRADO:[9]

- Pultrusión.

Una alimentación continua de fibras en una orientación pre-seleccionada se impregna con resina, se comprime y se le aplica calor para darle la forma de la sección final. Durante el paso por la matriz se Produce un curado parcial o total.

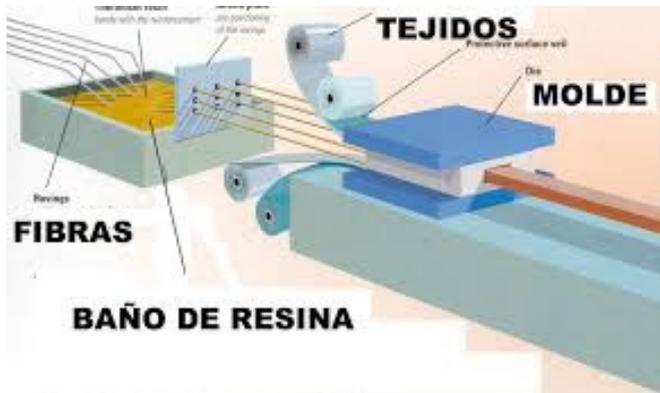


Figura 1.7: Moldeo por método de pultrusión.

- Moldeo por prensado en frío.

Es un Proceso a baja Presión y baja temperatura en que las fibras se impregnan con resina y se comprime entre ambas caras del molde. El calor se genera durante el curado.

- Compresión en caliente.

El material, en general prepeg (tejido pre impregnado de resina), se coloca en la cavidad del molde abierto. El molde se cierra, y se aplica calor y presión para

forzar al material a entrar en contacto con todas las áreas del molde, mientras que el calor y la presión se mantiene hasta que el material se haya curado. Este método es muy utilizado en componentes deportivos por su alta capacidad de producción respecto a otros métodos.



Figura 1.8: Moldeo por compresión en caliente del bastidor de una bicicleta de fibra de carbono.

- RTM (Resin Transfer Moulding) moldeo por inyección.

En este proceso el molde está constituido por dos partes, que unidas dejan una cavidad en la que se colocan los refuerzos (fibras, núcleos, insertos, etc.) antes de realizar la inyección de la resina.

Con este método se consigue generar piezas de formas complejas.

La resina es inyectada por una máquina a una determinada presión, siempre ligeramente inferior a la que mantiene cerradas las pestañas del molde, que la empuja hacia el interior de un molde en el que previamente se han posicionado los tejidos de refuerzo.



Figura 1.9: Fabricación de un componente por método de moldeo RTM en molde cerrado.

- VARTM

Se trata del mismo método descrito para la infusión en molde abierto con la variación del molde cerrado, lo que permite controlar la geometría de la pieza en ambas cara.

Fibras naturales

Fibras. Generalidades.

Las fibras son los componentes resistentes en un material reforzado y definen la mayor parte de las características mecánicas del material, caracterizándose por poseer elevada resistencia a la tracción y flexión.

Las fibras se fabrican a partir de varios materiales. Para los plásticos reforzados se utilizan normalmente fibras inorgánicas, como las de carbono o de vidrio, o bien sintéticas como las de aramida. No obstante, también pueden obtenerse a partir de la naturaleza como es el caso de los refuerzos utilizados en este proyecto.

La propiedad más importante que permite comparar las fibras es el módulo elástico, el cual que debe ser más rígido que la matriz, puesto que la matriz transmite los esfuerzos a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad al compuesto, mientras las fibras soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada.

	Densidad (Mg/m ³)	Carga rotura (Mpa)	Módulo elasticidad (Gpa)	Temp. fusión (°C)	Módulo específico (x10 ⁶ m ² /s ²)	Resistencia específica (x10 ⁶ m ² /s ²)
Vidrio E	2.55	3448	72.4	<1725	28	1.35
Vidrio S	2.50	4483	86.9	<1725	35	1.79
SiO ₂	2.19	5862	72.4	1728	33	2.68
Al ₂ O ₃	3.95	2068	172	2015	55	0.66
ZrO ₂	4.84	2068	345	2677	71	0.43
Carbono (alta resistencia)	1.50	2759	276	3700	184	1.84
Carbono (alto módulo)	1.50	1862	531	3700	354	1.24
BN	1.90	1380	90	2730	47	0.73
Boro	2.36	3448	379	2030	161	1.46
B ₄ C	2.36	2276	482	2450	204	0.96
SiC	4.09	2068	482	2700	118	0.51
TiB ₂	4.48	103	510	2980	114	0.002
Be	1.83	1276	303	1277	166	0.70
W	19.40	400	407	3410	21	0.021
Poliétileno	0.97	2586	119	147	122	2.67
Poliámid	1.14	828	2.8	249	2.46	0.726
Poliaramida	1.44	3620	124	500	86	2.51

Figura 1.10: Tabla comparativa de fibras en propiedades de materiales compuestos.

Definición

Se llama fibra natural a los fragmentos, hebras o pelo, cuyo origen está en la Naturaleza(vegetal, mineral o inorgánicas), y que pueden hilarse para dar lugar a hilos o cuerdas. [18]

Las fibras naturales se han utilizado y se siguen utilizando en la actualidad en una gran variedad de aplicaciones. Los restos de fibras naturales más antiguas que se conocen son de fibra de lino silvestre encontradas en estratos del Paleolítico superior, unos 30.000 años a. C. Sus principales aplicaciones han sido la formación de textiles o cuerdas utilizados en ropa, sombreros, redes de pesca, cestas o sacos. No obstante, con la aparición de los materiales sintéticos, muchas de las aplicaciones que cubrían las fibras naturales quedaron obsoletas frente a las ventajas que aportaban los materiales sintéticos debido a su bajo coste, su fácil manejo y moldeabilidad.

En la actualidad, la sociedad esta concienciándose de que hay que cuidar el medio ambiente bajo ideas relacionadas con la "crisis del petróleo", el "desarrollo sostenible" y los "productos verdes", por lo que día a día se reclaman más productos naturales por lo que se empiezan a utilizar de nuevo las fibras naturales para los

mismos fines que en sus inicios, pero además se están retomando las investigaciones de los materiales compuestos, que permiten fabricar productos con materiales más eficientes en su relación peso-costos y con propiedades mecánicas óptimas.

Clasificación de las fibras naturales

Las fibras naturales se caracterizan por tener su origen en la Naturaleza, pudiendo dividirse en tres grandes grupos: de origen vegetal, de origen mineral o de origen mineral.

Fibras de origen animal.

Las fibras de origen animal son extraídas directamente de animales, generalmente 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.[18]

Desde un punto de vista químico, las fibras de origen animal son proteínas resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos. También resisten, en unas condiciones determinadas, la acción de ciertos ácidos minerales como el ácido sulfúrico. Por el contrario, las bases o álcalis poco agresivos pueden dañarlas.

Fibras de origen vegetal.

Las fibras vegetales son extraídas del reino vegetal en todas sus formas (semillas, tallos, hojas, frutos y raíces) y procesadas para obtener los tejidos que serán usados en las distintas aplicaciones.

Desde un punto de vista químico, las fibras vegetales son principalmente de celulosa, que, a diferencia de las proteínas de las fibras de origen animal, es resistente a los álcalis. Estas fibras son asimismo resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos, pero los ácidos minerales fuertes las destruyen. [37]

Las fibras de origen vegetal se pueden clasificar a partir de su forma de origen:

- Derivadas de la semilla: especies vegetales cuyas semillas vienen acompañadas por una fibra que es de interés para su explotación (Algodón, ceiba).
- Derivadas del tallo: especies vegetales cuyo tallo genera una fibra que es de interés para su explotación (lino, bambú).

- Derivadas de la hoja: especies vegetales cuya hoja genera una fibra que es de interés para su explotación (esparto, cabuya).
- Derivadas del fruto: especies vegetales cuyo fruto genera una fibra que es de interés para su explotación (coco).

Fibras de Origen inorgánico.

Las fibras de origen inorgánico son fibras generadas a partir de minerales y rocas. La fibra de vidrio es la fibra de origen inorgánico (mineral) más utilizada a gran escala. En el pasado se empleaba en aislamientos y protecciones ignífugas la fibra de amianto pero se ha descubierto que es cancerígena por lo que se ha prohibido su utilización pasando a utilizar lana de roca, una sustancia fibrosa hecha de viruta de fresadora, piedra caliza o roca silíceas.

materiales de estudio

El estudio a realizar consiste en una caracterización mecánica y posterior adaptación a modelo matemático de distintas probetas de materiales compuestos con fibras naturales embebidas en una matriz polimérica de resina epoxi, a su vez, comparándolos con materiales sintéticos como es el caso de la fibra de carbono.

Las fibras naturales derivadas de plantas, es decir, de origen vegetal que estudiaremos son el lino y el yute, mientras que de origen mineral estudiaremos la fibra de basalto. Como referente de comparación tomaremos la fibra de carbono en tejido sarga y unidireccional.

Lino (Flax)

El lino es una planta dicotiledónea de la familia de las Lináceas. Su tallo se utiliza para confeccionar tejidos y su semilla, llamada linaza, se utiliza para extraer harina (harina de linaza) y aceite (aceite de linaza).

El lino se cultiva en casi todos los climas. Suele tener entre 80 y 100 hojas sésiles alternas en cada tallo de la planta, que mide aproximadamente un metro de altura. Las flores son blancas o azules y producen pequeñas esferas globulosas formadas por cinco lóbulos, cada uno de los cuales contienen dos semillas.



Figura 1.11: Planta de lino.

El lino es una de las plantas que contiene fibras muy largas, ya que suelen medir entre 20 y 50 cm, aunque es posible extraer fibras de mayor longitud (1m). La fibra de lino se compone principalmente de celulosa. Junto con la fibra de yute, cáñamo y ramazo forman parte de un grupo denominado fibras liberianas, fibras que se encuentra en el floema y derivan del cambio vascular junto con los elementos vasculares del floema y células parenquimáticas.

Tiene la capacidad de absorber humedad (hasta un veinte por ciento de su peso seco) sin resultar húmedo al tacto. Inversamente, tiene gran facilidad para liberar humedad a la atmósfera.

Yute

Es un arbusto de 2 a 4 m de alto, el tronco rígido y fibroso de 2 cm de diámetro se ramifica en la parte superior. Las hojas, peciolada, con limbo triangular de 10 a 15 cm de largo por 5 cm de ancho.

Las fibras del yute son menos resistentes que las de lino y especialmente sensibles a los ácidos. Las fibras son suaves, brillantes y largas, tienen una longitud de entre 1 a 4 m. El principal destino de la fibra de yute actualmente es la fabricación de sacos, aunque también se usa frecuentemente para fabricar cuerdas y tejidos pero



Figura 1.12: Plantación de Yute.

en menor medida debido al tratamiento que requiere, por su alto contenido de lignina, y por la competencia de las fibras sintéticas.

Basalto

El basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica. Se trata de la roca volcánica más común en la tierra y supera en cuanto a superficie cubierta de la tierra a cualquier otra roca ígnea, cubre cerca del 70% de la superficie terrestre.



Figura 1.13: Mineral de basalto.

La fibra de basalto tiene una composición química similar a la fibra de vidrio, pero con mejores características de resistencia, y a diferencia de la mayoría de las fibras de vidrio es muy resistente a los alcalinos, ácidos y el ataque de la sal, por lo que es un buen candidato para estructuras de hormigón, puentes y estructuras ubicadas en el litoral costero.

En comparación con la fibra de carbono y la fibra de aramida, la fibra de basalto tiene una gama más amplia de temperaturas de aplicación $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (limitada por la temperatura de transición vítrea de la matriz), resistencia a la oxidación, mayor resistencia a la radiación, mayor resistencia a la compresión, y más alta resistencia al corte.

Fase matriz

Es el componente continuo del material que rodea, protege y soporta a las fibras para distribuir las tensiones entre las diferentes fibras, protegerlas de los agentes externos y evitar el fallo por pandeo.

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.

Resinas: Definición

Una resina es un polímero constituido por pequeñas unidades denominadas monómeros, que no son más que una agrupación definida de átomos que se repiten para formar el polímero.

Las resinas termoestables son las de uso más generalizado. Se presentan en forma líquida o viscosa que puede convertirse en material sólido termoestable mediante la adición de agentes catalizantes.

Se trata de polímeros constituidos por macromoléculas reticuladas, con un tiempo de vida limitado antes de la polimerización. Su proceso de curado químico irre-

versible, no siendo reciclables ya que se descomponen al fundir. Todo ello conlleva gran cantidad de mano de obra lo que repercute en un alto coste de fabricación.

- Características generales de las matrices termoestables:
- Viscosidad muy baja antes del curado.
- Estabilidad Térmica.
- Resistencia Química.
- Poca fluencia y relajación por tensión.
- Buena capacidad de impregnado y facilidad de fabricación.
- Tipos: (Poliéster, Epoxidicas, Fenolicas, Melaminas, Poliamidas, Bismaleimidias)

Matriz de estudio

La matriz utilizada en el proyecto para la fabricación de las probetas es una resina termoestable de la familia de las epoxídicas.

Se trata de la epoxi resoltech 1050 del distribuidor de composites "Resinas Castro". Se trata de una resina libre de sustancias CMR de acuerdo con los criterios de la organización mundial de la salud. Además ha sido optimizada con un desprendimiento de calor bajo, baja viscosidad y excelentes propiedades de liberación de volátiles en el aire.

Es posible catalizarla con distintos tipos de endurecedores, lo que permite optimizar el tiempo de gel según la aplicación, el cual va de 10 minutos a 14 horas. Los porcentajes de mezcla son igual para todos los endurecedores, la relación en masa es de 100/35 y pudiendo ser pre-mezclados juntos.

El sistema 1050 + resina 1053S está especialmente recomendado para infusión gracias a su baja viscosidad- (205mPa.s). La resina 1050 está disponible en una versión 1050T tixotrópico para la aplicación en laminados manuales en vertical o en superficies propensas a goteo de resina.

Es posible liberar las partes del molde sin realizar un post-curado pero se obtendrá propiedades termo-mecánicas mejores después de un ciclo de post-curado 60°C.

Su alargamiento a la rotura en flexión es de hasta un 5%, lo cual hace que la resina epoxi 1050 sea un sistema epoxi de primera elección para grandes laminados estructurales sometidos a esfuerzos de trabajo dinámicas.

Automóvil.

Definición.

El término automóvil se refiere a un vehículo autopulsado destinado al transporte de personas o mercancías sin necesidad de carriles. Existen diferentes tipos de automóviles, como camiones, autobuses, furgonetas, motocicletas, motocarros o cuatriciclos.[1]

Por definición, el primer automóvil de la historia es el Fardier, como lo llamó Nicolas-Joseph Cugnot (1725-1804), escritor e inventor francés. Cugnot decidió construir un automóvil de vapor para arrastrar piezas de artillería pero pronto comenzó a circular por las calles de París en 1769. Se trataba de un triciclo que montaba sobre la rueda delantera una caldera y un motor de dos cilindros verticales y 50 litros de desplazamiento. La rueda delantera resultaba tractora y directriz a la vez, algo difícil de controlar, trabajando los dos cilindros directamente sobre ella.



Figura 1.14: Fardier, primer automobol con motor a vapor.

El primer automóvil con motor de combustión interna se atribuye a Karl Friedrich Benz en 1886 con el modelo Benz Patent-Motorwagen.

El Benz Patent-Motorwagen era un automóvil de tres ruedas con un motor de tracción trasera. Contenía muchas innovaciones: estaba construido de tubo de acero con paneles de madera. Las ruedas tenían llantas de acero y caucho sólido. La dirección se accionaba mediante un piñón cremallera. Disponía de una sola velocidad, que podía ser variada actuando sobre el par motor entre un disco abierto y un drive disc.



Figura 1.15: Benz Patent-Motorwagen, primer automovil con motor de combustión interna.

Concienciación

Actualmente la industria de automoción vive momentos de adaptación a una nueva situación de mercado que viene determinada, no sólo por las actuales circunstancias de crisis económica, sino también por imposiciones de tipo medioambiental establecidas en protocolos internacionales que obligan a la reducción de consumo de combustible y de emisiones contaminantes además de generar compromisos que exigen a los fabricantes del sector responsabilidad sobre el reciclaje de piezas y

componentes tras su ciclo de vida lo que supone una oportunidad para el desarrollo de nuevos materiales y procesos de transformación.

Para hacer frente a las circunstancias del nuevo mercado, las empresas del sector de automoción intentan adoptar una serie de medidas estratégicas encaminadas a la disminución de costes de proceso y producto en la fabricación de vehículos de gran tirada, al lanzamiento de vehículos de muy bajo coste y a la mejora en la variedad de oferta para vehículos de alta gama en bajas tiradas. A su vez, los fabricantes comienzan a definir sus estrategias de cara al lanzamiento de los llamados vehículos limpios para posicionarse en esa nueva y revolucionaria concepción industrial asociada al coche eléctrico.

Las medidas tecnológicas necesarias para ejecutar esas estrategias pasan obligatoriamente por el diseño de piezas y componentes con menor peso y coste, con posibilidad de reciclaje, mejores prestaciones y funciones optimizadas en términos de seguridad, calidad y confort.

Todo este contexto supone una oportunidad inmejorable para el lanzamiento de líneas de I+D+i en el campo de los nuevos materiales, en el campo de sus procesos de transformación, con proyectos que permitan el desarrollo de técnicas de procesado, que favorezcan la introducción en el vehículo de materiales avanzados, diseñados a la medida de aplicaciones concretas, de modo que tanto el material como la técnica de procesado incidan positivamente en la cadena de valor del producto final.

Es por ello que en los últimos años se ha producido un incremento del uso de materiales compuestos de matriz polimérica en la fabricación de vehículos, tanto de motocicletas como automóviles. La gran mayoría de estos materiales se basan en el empleo de una matriz plástica de origen petroquímico (poliéster, epoxi, polietileno, polipropileno, poliestireno, etc.) con un refuerzo de alguna fibra tejida sintética. Estos materiales reducen el peso total del vehículo por lo que mejoran su relación potencia/peso y ello conlleva a la reducción de consumo de combustible y por tanto la reducción de emisiones.

Además, como es el caso de los materiales empleados en este proyecto, se puede decir que las fibras naturales tienen un bajo coste y una baja densidad lo que les confiere una elevada resistencia específica. Son biodegradables y no presentan efectos abrasivos como las fibras de vidrio.

2

Estado del arte

Introduccion

La presente investigación consta de temas sobre fibras naturales, combinaciones de fibras naturales y sintéticas, diseño y fabricación de composites, caracterización mecánica de materiales compuestos, aproximación de un modelo matemático por elementos finitos y aplicación de composites con fibras naturales en automoción.

Cada uno de los temas tiene su importancia dentro del proyecto, es por ello que resulta necesario dedicar gran cantidad de tiempo al análisis de las diferentes publicaciones.

Por otro lado, la búsqueda más relevante ha sido la de publicaciones referentes a la caracterización de materiales compuestos naturales destinados al uso en automóviles. Seguidamente se describe la metodología de búsqueda desarrollada en este estudio y los resultados obtenidos.

Fuentes de información

Actualmente, gracias a internet, es posible encontrar numerosos buscadores que permiten realizar una recerca de información técnica de forma sencilla en diferentes bases de datos y redes internas de diferentes instituciones, lo que facilita notablemente el trabajo.

De las bases existentes a día de hoy, destacan por su volumen las integradas en el "Science Citation Index (SCI)", que fue fundada en 1960 para ofrecer una manera novedosa de buscar información bibliográfica. Se trata de una base de datos documental comprendida en tres series de bases de datos multidisciplinarias, donde se recogen todas las contribuciones que se puedan publicar a las revistas de las ramas de ciencia, tecnología, ciencias sociales, humanidades y artes.

En la actualidad, todas las series de los "Science Citation Index" están integradas dentro de la denominada "Web of Science". A su vez, esta base de datos esta englobada en una plataforma denominada "Web of Knowledge", un servicio web de información científica que facilita el acceso a un conjunto de bases de datos bibliográficas y otros recursos que abarcan todos los campos del conocimiento académico. Esta plataforma permite la consulta interrelacionada de las siguientes bases de datos:

- "Web of Science": Base de datos que permite la búsqueda de artículos
- "Journal Citación Report on the web": ofrece información de publicaciones, como factor de impacto por año.
- "ISI proceedings": Base de datos de actas de congresos.
- "Current Contents Connect": Boletín de sumarios.
- "Derwent Innovation Index": en este caso la base de datos hace referencia a las patentes existentes.

Existe una base de datos bibliográfica, elaborada por el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), denominada "ICYT", que recoge la literatura científica contenida en publicaciones españolas de ciencia y tecnología. Analiza: revistas, informes, congresos, libros colectivos, etc. Publicados desde 1979 hasta la actualidad.

Además, cabe destacar, que existe una base de datos centrada expresamente en la consulta de tesis doctorales, denominada "Teseo", gestionada por el Ministerio de Ciencia Educación y Cultura, donde se recoge y permite recuperar información de las tesis doctorales leídas en las Universidades españolas desde 1976.

Scopus es otra base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revista científicas. Cubre áreas de ciencias, tecnología, medicina y ciencias sociales, incluyendo artes y humanidades. Las búsquedas en Scopus incorporan búsquedas de páginas web científicas mediante Scirus, también de Elsevier, y bases de datos de patentes.

Para el apartado de patentes es posible encontrar distintas plataformas de búsqueda, de las cuales destacaría "Espacenet", ya que contiene datos de más de 90 millones de documentos de patentes de todo el mundo permitiendo la consulta de información de apoyo.

Cabe destacar, que la base de datos que más se utiliza para la búsqueda de artículos y trabajos relacionados con composites y fibras naturales es "Web of Science", de la plataforma de búsqueda "Web of Knowledge" debido a la cantidad de citas recogidas, para la realización de la búsqueda de artículos relacionados con nuestro trabajo.

Fuentes de búsqueda

Las búsquedas se realizan en artículos y referencias de trabajos, conferencias y libros para poder abarcar los máximos resultados. Para ello, una de las principales acciones consiste en definir las palabras claves que utilizaremos para la búsqueda, puesto que son los condicionales de nuestra búsqueda y por tanto de ello dependen los resultados obtenidos.

Para tener un amplio abanico de trabajos se han realizado diferentes búsquedas, utilizando diferentes palabras claves de búsqueda.

Posteriormente se ha realizado el cribado de los resultados a partir de la adhesión de palabras claves en una misma búsqueda utilizando el operador booleano "and", lo que filtra los resultados obtenidos según nuestros criterios de búsqueda.

Las búsquedas se han efectuado teniendo en cuenta el periodo 2006-2016 y como palabras clave para la búsqueda bibliográfica se ha tomado:

TEMA	PALABRAS CLAVE
Materiales compuestos de fibras naturales	green composites, green fibers, flax, Jute epoxy
Caracterización de materiales compuestos	assay composite, traction composite
Calculo MEF en materiales compuestos	fem composites, finite elements composite
Aplicación en automóviles	Automobile

Tabla 2.1: Palabras clave.

A continuación se muestran las tablas con la cantidad de resultados obtenidos en la búsqueda bibliográfica por separado de las palabras clave.

Respecto de materiales compuestos de fibras naturales:

PALABRA	2006-2016	2016
Green composite	6529	460
Green fibers	8853	299
flax	4607	200
Jute composite	1014	58
basalt composite	972	57
Epoxy	50043	2131

Tabla 2.2: Resultados de búsqueda fibras naturales.

Respecto de caracterización en materiales compuestos:

PALABRA	2006-2016	2016
assay composite	3703	232
traction composite	896	53

Tabla 2.3: Resultados de búsqueda de caracterización materiales compuestos.

Respecto de cálculos MEF en materiales compuestos:

PALABRA	2006-2016	2016
fem composites	4482	196
finite elements composite	26185	1208

Tabla 2.4: Resultados de búsqueda MEF.

PALABRA	2006-2016	2016
Automobile	83855	1846

Tabla 2.5: Resultados de búsqueda de automóviles.

Respecto de automobiles:

Para realizar el filtrado uniremos palabras mediante el operador booleano "and". Nos centraremos en dos grupos de investigación, por un lado los ensayos de materiales compuestos con fibras naturales, y por otro lado las entradas referidas a materiales de fibras naturales aplicados a automóviles.

Seguidamente se muestran las tablas con la cantidad de resultados obtenidos en la búsqueda bibliográfica a partir del filtrado de información por la adhesión de palabras en la búsqueda.

PALABRA	2006-2016	2016
Green fiber, assay , fem	0	0
Green fiber, assay , finite elements	1	0
Green fiber, traction, fem	2	0
Green fiber, traction, finite elements	5	0
green composite, assay, fem	1	0
green composite, assay, finite elements	1	0
green composite, traction, fem, assay, finite elements	3	0
green composite, traction, finite elements	9	1

Tabla 2.6: Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.

De este primer grupo de búsqueda centrado en ensayos de materiales compuestos con fibras naturales y modelos de elementos finitos cabe destacar, por su mayor volumen de entradas, el estudio de los artículos encontrados con la búsqueda de:

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

PALABRA	2006-2016	2016
Green fiber, automobile	96	5
Green fiber, automobile, Fem	1	0
Green fiber, automobile, Finite elements	12	1
Green fiber, automobile, Finite elements, epoxy	2	0
green composite, automobile	131	8
green composite, automobile, Fem	4	0
green composite, automobile, Finite elements	17	7
green composite, automobile, Finite elements, epoxy	7	0

Tabla 2.7: Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.

Del segundo grupo de búsqueda centrado en aplicación de materiales compuestos con fibras naturales y modelos de elementos finitos sobre automóviles cabe destacar y centrarse en el estudio de los artículos encontrados con la búsqueda de:

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

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

Revisión bibliográfica

Una vez concluida la búsqueda de resultados de trabajos relacionados con las palabras claves más representativas y la combinación de estas, junto con los temas generales enunciados anteriormente, la cantidad de trabajos encontrados son 16, de los cuales, una vez examinados, solo guardarían relación 4 de ellos.

A continuación se detallan los resultados:

- **Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites.**[34]

En este artículo se discute el procesado y caracterización de fibras naturales de celulosa. Los materiales naturales basados en fibras de celulosa están encontrando sus aplicaciones en diversos campos que van desde la automoción hasta biomedicina. El artículo proporciona un análisis en profundidad sobre el campo de las fibras naturales de celulosa y compuestos de polímeros. El objetivo primordial de este artículo de revisión es demostrar la evolución reciente y las aplicaciones emergentes de fibras de celulosa naturales y sus materiales poliméricos.

- **Hybrid carbon-glass fiber composite for the door electric car application.**[30]

Este estudio se centra en las propiedades mecánicas del material compuesto híbrido de fibra de vidrio y de carbono para la puerta de un coche eléctrico con el fin de reducir los costos y mantener la resistencia a los impactos. La disminución de la fracción de volumen de fibra de carbono influyó en la resistencia a la tracción y reduciendo los costes de material, pero se aumentando la densidad. Las simulaciones por método de elementos finitos (FEM) del cuerpo del modelo de coche eléctrico son investigadas mediante la variación de la carga de de impacto y el espesor del material. Las propiedades mecánicas de material extraídas de los resultados del experimento se utilizan como propiedades de entrada de material en la simulación. El resultado de la simulación muestra que el aumento de capas de fibra de vidrio frente a las de carbono afecta disminuyendo el factor de seguridad, pero están permitido su valor en el espesores de 4 mm y 5 mm de la puerta, por lo tanto reduciendo coste.

- **Light-weighting design of eco-power automobile chassis made from green composite and its topology optimization in FEA.**[31]
- **Design of an eco-power automobile body made from green composite and its structural optimization in FEA.**[32]

En este trabajo, aunque son dos se trata del mismo, se propone fabricar un bastidor de un automóvil ecológico, ligero y de bajo consumo de combustible, con tejido de fibra de ramio y partículas de PP como matriz, unidas a través de un prensado en caliente (termo-compresión). Los comportamientos mecánicos del material compuesto de ramio-PP se ensayaron por el Sistema de Ensayo de Materiales MTS-810 en las direcciones de urdimbre y de trama por separado para la posterior optimización de la geometría del chasis en el software de análisis de elementos finitos (FEA) en cuanto a fracción de volumen de fibra, orientación del laminado y optimización de la estructura del chasis. Se pretende examinar la aplicación del material y su eficacia en la estructura.

3

Experimental

Método de fabricación

El método de fabricación que hemos seleccionado para la fabricación de las diferentes probetas de materiales compuestos ha sido el método de infusión de resina con bolsa de vacío.

El método de infusión de resina es un proceso de fabricación de composites en el cual la resina es aportada al conjunto por una canalización utilizando una diferencia de presión generada mediante una bomba de vacío conectada al molde. Gracias a este método, se garantiza que la resina empleada sea la estrictamente necesaria y permite que una vez el compuesto de fibras esté en su límite de saturación se extraiga la resina sobrante por la acción de la succión del vacío.

En este método se posicionan las distintas capas de material sobre la superficie del molde, con el tejido pelable y la malla de difusión de la resina, a continuación

se cubre todo con una bolsa de vacío y se sella completamente con masilla de cierre. De esta forma al accionar la bomba se genera una presión que comprime los tejidos. En un conducto auxiliar de acceso al molde se conecta el recipiente con resina, la cual es introducida en el molde al permitirle el paso por la diferencia de presión generada.

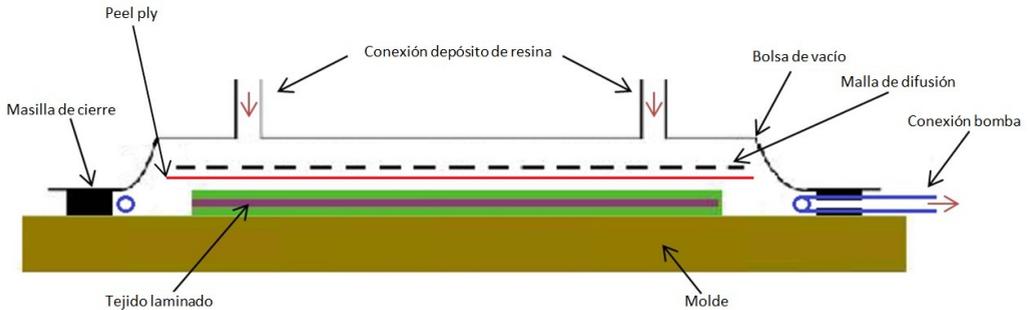


Figura 3.1: Método de fabricación.

Este método se considera "de molde cerrado" al desarrollarse en un molde completamente cerrado, sellado mediante una membrana flexible (bolsa de vacío). La pieza obtenida solo dispone de un lado con acabado visto, el cual corresponde al lado de molde rígido.

Esta técnica pretende sustituir al clásico método de laminación en el que se le aplica la resina a las fibras de forma manual, mediante máquina de proyección y la acción del rodillo.

Entre los beneficios de la infusión de resina, en comparación con el curado de compuestos laminados sin bolsa de vacío, se encuentran:

- Una mejor optimización de la relación fibra-resina. Reducción de peso de un 30% aproximadamente.
- Un laminado más resistente en un 40%.
- Se reduce la exposición del operador a emisiones perjudiciales. En el caso de la resina de poliéster reduce emisiones de estireno de un 95%.
- Se reduce el uso de resina debido a la precompactación de las fibras.
- La fabricación es más rápida.

- Se reduce el peso de la pieza en un 30%.

Materiales

Equipos y herramientas auxiliares

A continuación se enumerarán todos aquellos equipos y herramientas que se emplearan para la fabricación de las distintas probetas. Se trata de equipos y herramientas específicas para la fabricación de componentes en materiales compuestos que se utilizaran, siendo reutilizables durante toda su vida útil.

- Bomba de vacío (Figura 3.2).
- Cubo de evacuación de resina (Figura 3.3).
- Manguera de vacío (Figura 3.11).
- Clampas para cierre de los tubos (Figura 3.5).
- Medidor de temperatura (Figura 3.6).
- Medidor de fugas (Figura 3.7).
- Tijeras de corte especiales (Figura 3.8).



Figura 3.2: Bomba de vacío.



Figura 3.3: Cubo de resina.



Figura 3.4: Tubo PEBD.



Figura 3.5: Clampas de cierre.



Figura 3.6: Termometro laser.



Figura 3.7: Medidor de fugas.



Figura 3.8: Tijeras para corte de tejidos.

Materiales fungibles

A continuación se describen los materiales fungibles. Se puede definir como material fungible todo aquel material que se consume durante la fabricación de las placas de material compuesto, es decir, se trata del material que no puede ser reutilizado una vez fabricadas las placas.

- Bolsa de vacío (Figura 3.9).
- Tubo Helicoidal de PEBD (Figura 3.10).
- Tubo de PEBD (Figura 3.11).
- Uniones tipo L y tipo T de PEBD (Figura 3.12).
- Llave de cierre (Figura 3.13).
- Tomas de infusión (Figura 3.14).
- Cinta de sujeción (adhesiva y de doble cara) (Figura 3.15).
- Masilla de cierre (Figura 3.16).
- Red de infusión (Figura 3.17).
- Tejido pelable (Peel Ply) (Figura 3.18).



Figura 3.9: Bolsa de vacío.



Figura 3.10: Tubo elicoidal.



Figura 3.11: Tubo PEBD.



Figura 3.12: Conector tipo "t".



Figura 3.13: Llave de cierre.



Figura 3.14: Toma para infusion de resina.



Figura 3.15: Cinta adhesiva.



Figura 3.16: Masilla de cierre para sellado.

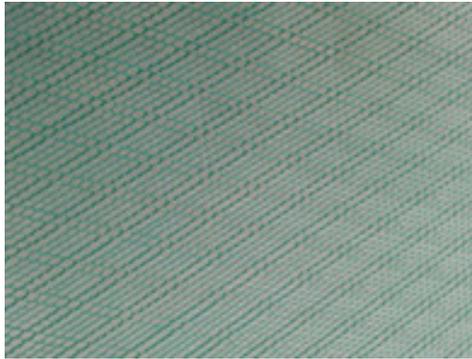


Figura 3.17: Malla de distribución.



Figura 3.18: Tejido pelable.

Proceso de fabricación

El primer paso es preparar las muestras de tejido que vamos a utilizar para la infusión. Para ello, desenrollamos el tejido y utilizamos como guía de corte un útil y como herramienta de corte unas tijeras especiales. Repetiremos esta operación para cada uno de los diferentes tejidos.



Figura 3.19: Proceso de fabricación. Corte de tejidos.

Una vez preparadas las muestras, procederemos al limpiado de la superficie donde realizaremos el proceso de infusión con disolvente para eliminar cualquier sustancia o partícula de la superficie.

A continuación, para favorecer el desmoldeo, es necesario aplicar sobre la superficie de trabajo algún agente desmoldeante que evite la adhesión permanente entre la resina y la superficie. Es necesario aplicar varias capas del producto antiadherente para asegurar buenos resultados.

Situaremos las dos capas de cada tipo de fibra recortadas sobre la superficie, una al lado de otra.

Dando 1 cm de desfase situamos encima del tejido el tejido pelable.

A continuación se posiciona sobre el tejido pelable la red de difusión. En el centro de la red de difusión se posicionan dos tomas de infusión con un tramo de tubo elicoidal en cada una para la entrada de la resina en el conjunto. Seguidamente se instala el tubo helicoidal para la absorción de la resina por los laterales, alrededor del tejido para conectar la bomba y realizar el vacío.



Figura 3.20: Proceso de fabricación. Posicionamiento de tejidos.

A continuación se realizará el acoplamiento de los tubos de conexión a la bomba con una unión tipo T de PEBD dejándolos por encima de la malla de distribución, posicionaremos la masilla rodeando el exterior, fijaremos los vértices con un pequeño trozo de cinta adhesiva y cubriremos todo con una bolsa de vacío. Conectaremos las tomas "T" de los tubos helicoidales de los extremos al cubo de evacuación de resina y este a la bomba de vacío.

La disolución de resina epoxi que utilizaremos en el proceso tiene un tiempo de gel de 20 minutos, lo que significa que disponemos de ese tiempo, a partir de la adhesión del catalizador, para realizar el proceso de fabricación antes de que empiece la polimerización. Siempre se deben respetar las especificaciones del fabricante, en este caso 2% en masa de la resina.

Prepararemos el equipo de vacío en lo que la resina llega el punto óptimo de gelificación para realizar la infusión. Una vez preparado aplicaremos vacío con la entrada de resina cerrada y pasaremos a comprobar si existen fugas en la masilla de cierre. Si está todo correcto y no existen fugas se procede a la apertura de la válvula que conecta la resina con el circuito.

Finalmente se dejarán curar las piezas y una vez curadas se procederá al desmoldeo y corte de excedentes de material. Una vez terminado el proceso de fabricación de las placas se procede a realizar el corte de las probetas mediante una sierra de corte con disco circular.

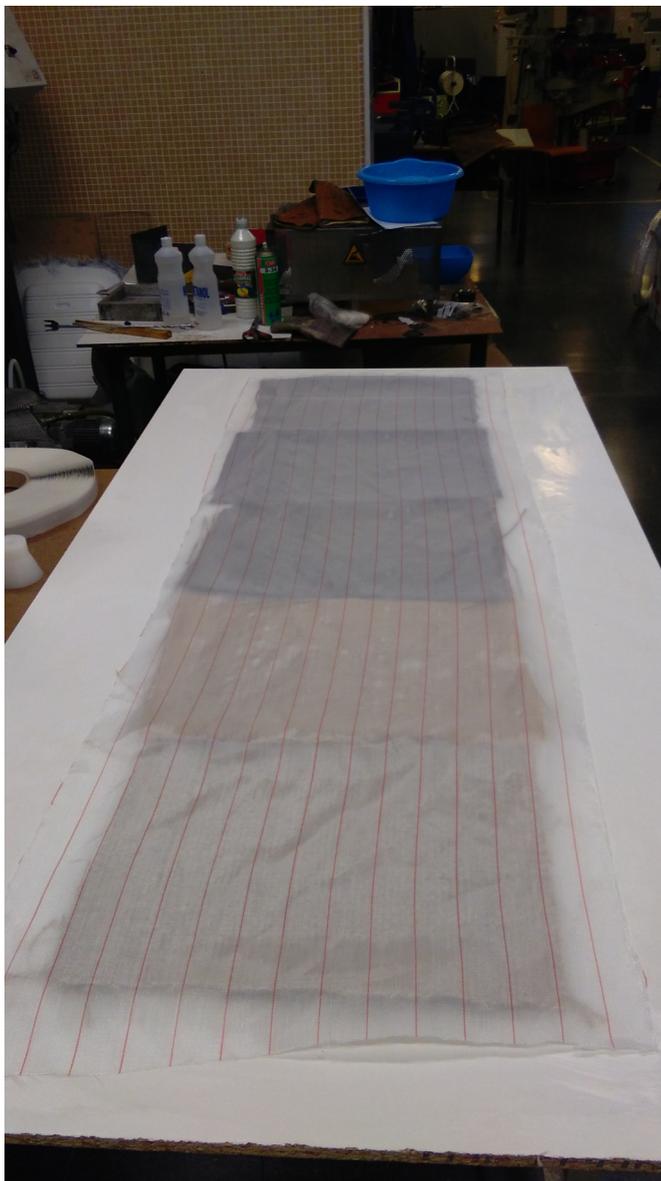


Figura 3.21: Proceso de fabricación. Posicionamiento del peel ply.

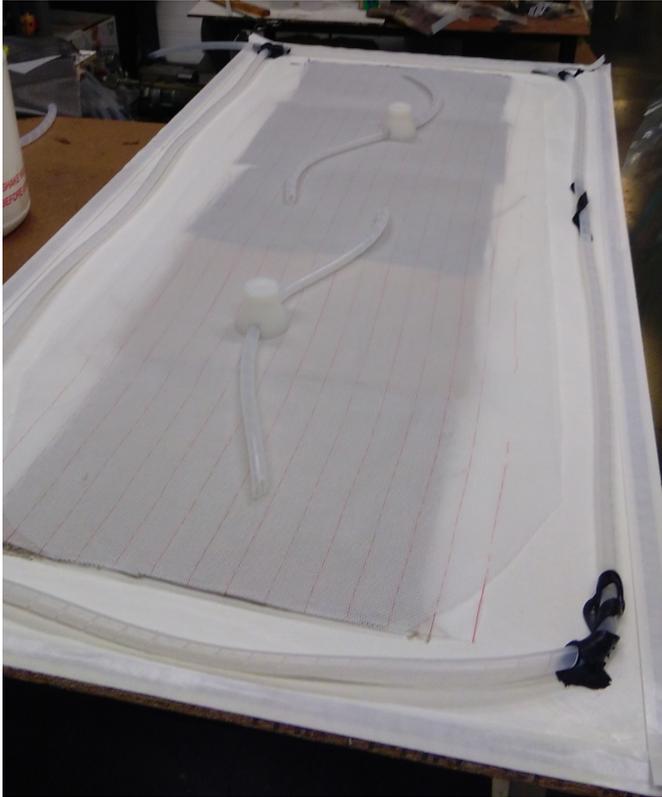


Figura 3.22: Proceso de fabricación. Montaje.

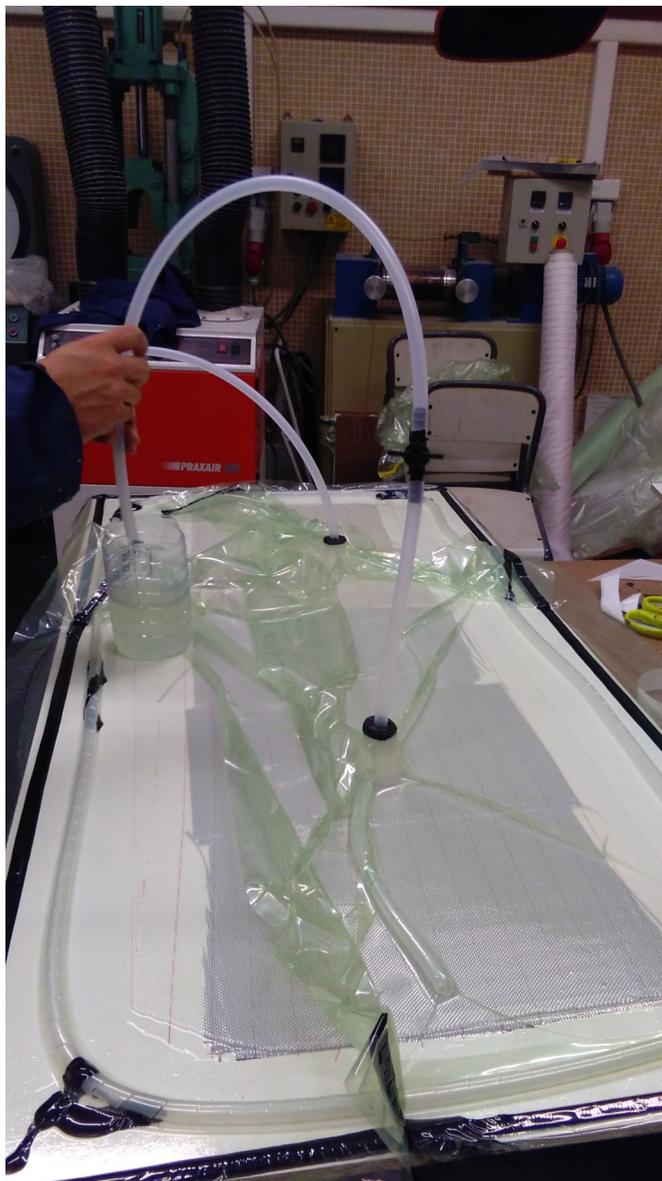


Figura 3.23: Proceso de fabricación. Aplicación de vacío.

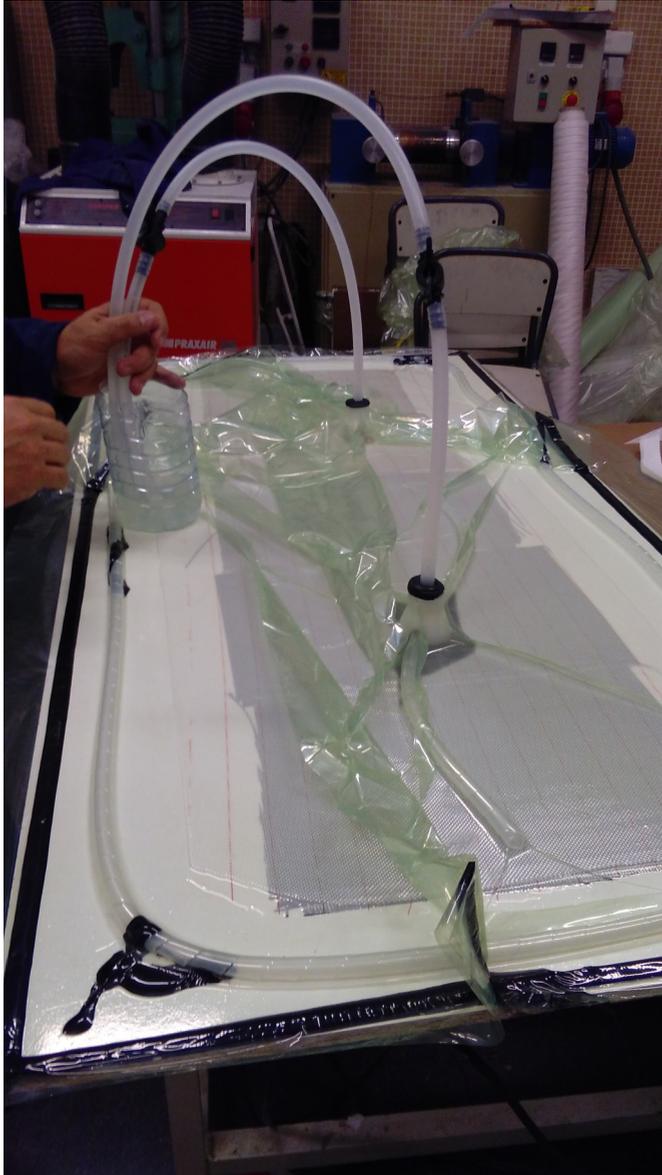


Figura 3.24: Proceso de fabricación. Entrada de resina.

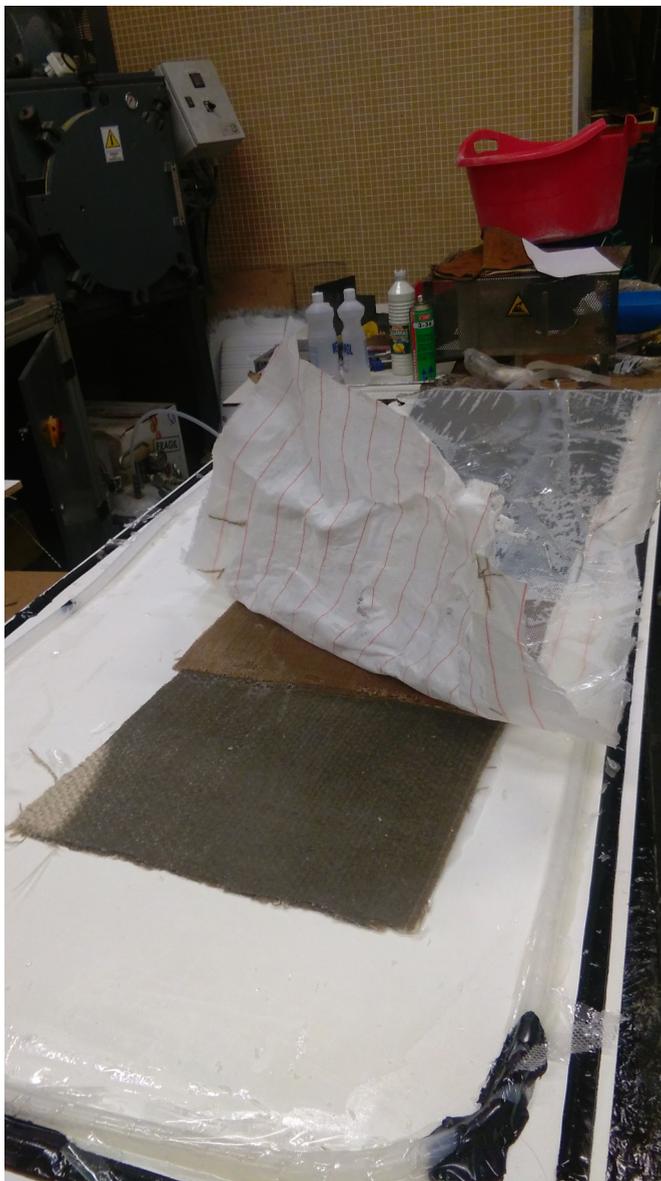


Figura 3.25: Proceso de fabricación. Desmoldeo.

Resultados

Los valores presentados a continuación, se obtienen a partir de ensayos en laboratorio. Para iniciar se muestran en los datos extraídos a partir de las placas de material compuesto y seguidamente los datos particulares de cada probeta.

Datos iniciales obtenidos de los distintos tejidos:

MATERIAL	CARBONO	CARBONO	YUTE	LINO	BASALTO
TIPO DE TEJIDO	Sarga	UD	Tafetán	Tafetán	Sarga
ESPELOR CAPA	0,26	0,31	0,92	0,95	0,45
N° DE CAPAS	2	2	2	2	2
ESPELOR 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 de las fibras.

Datos obtenidos de las distintas placas de material compuesto:

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.

Probetas de tracción de los distintos materiales:

CARBONO SARGA	CORTE (tipo)	L (mm)	E (mm)	A (mm)	ÁREA (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: Resultados ensayo de tracción sobre carbono (sarga).

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: Resultados 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: Resultados ensayo de tracción sobre fibra de Yute.

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: Resultados 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	27
3	90°	120	1,35	19,90	26,56
4	90°	120	1,35	20	27
5	90°	82	1,32	20,10	26,53
6	90°	88	1,4	20,15	28,21
I	45°	56	1,4	19,70	27,58
II	45°	56	1,3	19,70	25,61
III	45°	90	1,3	19,90	25,87
IV	45°	90	1,4	19,70	27,58
V	45°	92	1,3	19,70	25,61

Tabla 3.7: Resultados ensayo de tracción sobre fibra de Basalto.

Probetas de Flexión de los distintos materiales:

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 3.8: Resultados 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 3.9: Resultados 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

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 3.10: Resultados ensayo de flexión sobre fibra de Lino.

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 3.11: Resultados ensayo de flexión sobre fibra de Basalto.

4

Caracterización mecánica

Ensayo de tracción

Se trata de uno de los ensayos mecánicos más importantes para conocer el comportamiento de un material. Consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta.

Este ensayo mide la resistencia que opone una probeta de determinado material frente a una fuerza, por lo que de este ensayo es posible obtener el diagrama de tensiones-deformaciones unitarias.

Es posible extraer de este ensayo los valores de los principales parámetros de cálculo mecánico como es el caso del módulo elástico, la tensión de rotura o el porcentaje de alargamiento a la rotura, quedando delimitado el rango elástico y plástico del material. Además se obtiene el valor del trabajo o energía de rotura,

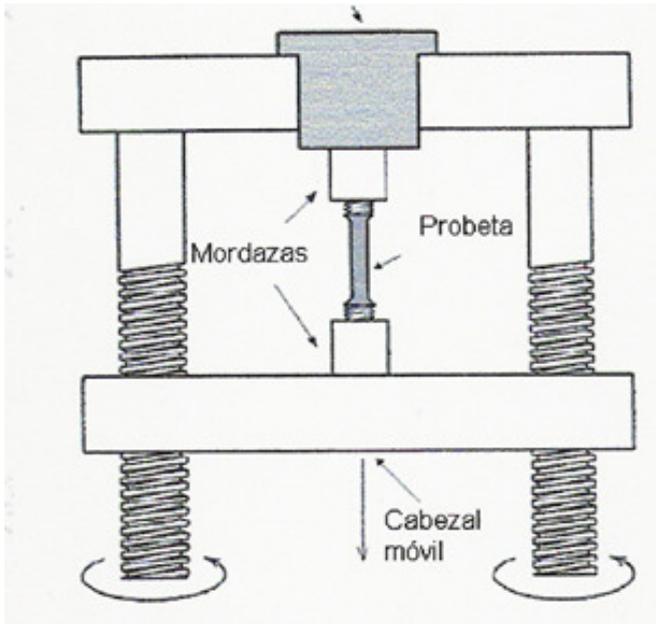


Figura 4.1: Ensayo de tracción ISO 527-1.

energía que consume un material en el proceso de deformación y fractura, muy útil para estimar la tenacidad del material.

Antes de iniciar el ensayo es necesario anotar su anchura, espesor y longitud libre entre mordazas, utilizando para ello un pie de rey. Una vez anotados estos datos podemos iniciar el ensayo de tracción con la máquina de ensayos IBERTEST modelo ELIB-50. El ensayo consiste en someter la probeta a una deformación gradual mediante el incremento de la separación entre las dos mordazas de la máquina, lo cual produce un esfuerzo en la dirección de su eje principal.

Para presentar la gráfica tensión/deformación es necesario conocer el incremento de longitud y la tensión a partir de la aplicación de la norma ISO 527-1.

Se calculan todos los valores de los esfuerzos, definidos en el apartado 3.6 de la norma, utilizando la siguiente ecuación:



h!

Figura 4.2: Ensayo de tracción realizado.

$$\sigma = F/A$$

Donde

σ es el valor del esfuerzo en cuestión, expresado en megapascales (MPa); F es la fuerza medida implicada, expresada en newtons (N); A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm²);

Cuando se determina el esfuerzo al x% de deformación, x se debe determinar a partir de la norma de producto correspondiente o se debe acordar entre las partes interesadas.

Para materiales y/o condiciones de ensayo para los cuales es predominante una distribución homogénea de las deformaciones en la sección paralela de la probeta, es decir, para deformaciones previas al punto de fluencia y en el punto de fluencia, se calculan todos los valores de las deformaciones, definidas en el apartado 3.7 de la norma, utilizando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \Delta L_o/L_o$$

Donde

ε es el valor de la deformación en cuestión, expresado como una relación adimensional, o en porcentaje; L_o es la longitud de referencia de la probeta, expresada en milímetros (mm). ΔL_o es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia, expresado en milímetros (mm).

La determinación de los valores de deformación utilizando un extensómetro promedia las deformaciones sobre la longitud de referencia. Esto es correcto y útil siempre y cuando la deformación de la probeta en la longitud de referencia sea homogénea. Si el material comienza a estrecharse, la distribución de la deformación se volverá no homogénea y las deformaciones determinadas con un extensómetro

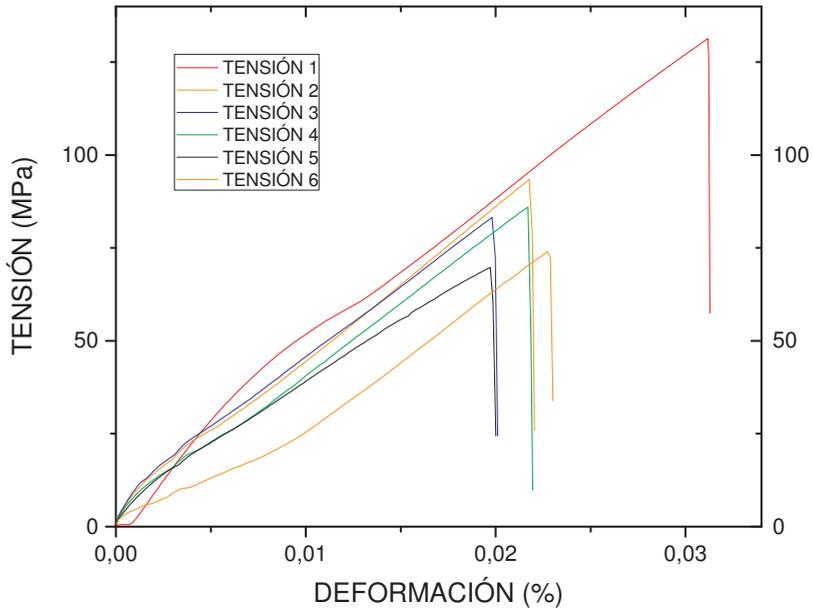


Figura 4.3: Ejemplo de graficas de tracción. Grafica tensión vs deformación unitaria para probetas de lino 90° .

dependerán fuertemente de la posición y del tamaño de la zona del estrechamiento. En tales casos, se utiliza la deformación nominal para describir la evolución de la deformación tras el punto de fluencia.

De esta forma, a partir de los valores de tensión y deformación unitaria calculados podemos obtener los gráficos de tensión/deformación unitaria para los distintos tipos de material.

Resultados

Se han realizado los ensayos probetas de cada tipo de material con el tejido cortado a 90° y sobre cinco probetas más de cada tipo de material con el tejido cortado a 45° , excepto para el carbono unidireccional que no oponía resistencia en esta dirección por lo que solo se realizaron ensayos con el tejido cortado a 90° .

A continuación se muestra el resumen de resultados obtenidos para el tejido cortado a 90°:

MATERIAL 90°	TENSIÓN MAX MPa	ALARGAMIENTO Porcentaje	MÓDULO MPa
Carbono sarga	231,43	2,13	10856,26
Carbono UD	565,75	4,72	11995,52
Lino	87,64	2,25	3890,14
Yute	50,62	2,74	1621,40
Basalto	392,11	6,56	5980,43

Tabla 4.1: Resumen de resultados para los tejidos cortados a 90°.

A continuación se muestra el resumen de resultados obtenidos para el tejido cortado a 45°:

MATERIAL 45°	TENSIÓN MAX MPa	ALARGAMIENTO Porcentaje	MÓDULO MPa
Carbono sarga	90,06	2,54	3454,11
Carbono UD	0	0	0
Lino	23,33	1,67	1394,90
Yute	38,40	5,01	1453,78
Basalto	87,73	3,52	1463,80

Tabla 4.2: Resumen de resultados para los tejidos cortados a 45°.

Coefficiente de Poisson

El Coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida de la relación entre el estrechamiento de sección transversal de un prisma frente al alargamiento de la sección longitudinal principal en la que se aplica la carga (ensayo de tracción). El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeon Poisson.

Se empleará la máquina universal de ensayos IBERTEST modelo ELIB-50 para realizar el ensayo de tracción y se empleará para la medición de las deformaciones direccionales un extensometro.



Figura 4.4: Montaje de extensometro. Ensayo Poisson.

La fórmula usual para el Coeficiente de Poisson es:

$$\nu = -\varepsilon_{transversal} / \varepsilon_{longitudinal}$$

donde ν es el coeficiente de Poisson.

ε_t es la fuerza transversal.

ε_l es la fuerza longitudinal.

De los valores obtenidos para cada probeta ensayada puede generarse un gráfico de que extraer los valores para la deformación longitudinal y para la deformación transversal.

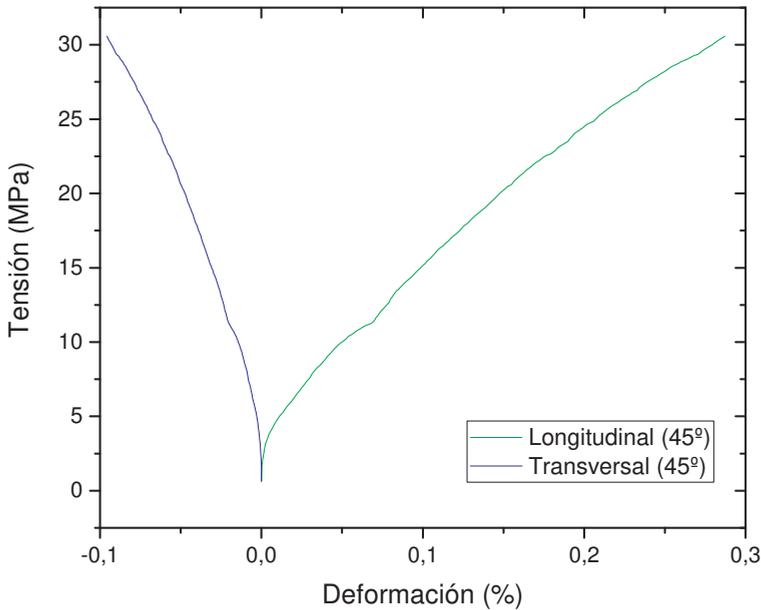


Figura 4.5: Ejemplo gráfico deformaciones longitudinal y transversal unitarias vs tensión. Ensayo sobre probeta de carbono sarga cortado a 45°.

De forma simplificada, el proceso puede describirse de la siguiente forma:

1. Medición la longitud, espesor y el anchura de la probeta.
2. Colocación de la probeta en las mordazas de la máquina de ensayos a tracción y montaje del extensómetro.
2. Elongación de la probeta mediante ensayo de tracción, sin llegar a la rotura de la misma.
3. Medición de la nueva longitud, y anchura de la probeta (datos del extensómetro).
4. Aplicación de la fórmula para obtener los valores unitarios de deformación.

$$\varepsilon = \Delta L/L$$

5. Aplicación de la fórmula para obtener los valores unitarios de deformación.

$$\nu = -\varepsilon_{transversal}/\varepsilon_{longitudinal}$$

Resultados

Se han realizado los ensayos para cada tipo de material con el tejido cortado a 90° y con el tejido cortado a 45°, excepto para el carbono unidireccional que no oponía resistencia en esta dirección por lo que solo realizaron ensayos con el tejido cortado a 90°.

A continuación se muestra el resumen de resultados obtenidos para los ensayos realizados:

MATERIAL Tipo	COEFICIENTE POISSON 90°	COEFICIENTE POISSON 45°
Carbono sarga	0,37	0,33
Carbono UD	0,01	0
Lino	0,27	0,52
Yute	0,28	0,54
Basalto	0,08	0,22

Tabla 4.3: Resumen de resultados para el coeficiente de Poisson.

Ensayo de flexión

En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El esfuerzo de flexión puro o simple se obtiene cuando se aplican sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que provoquen el giro de las secciones transversales con respecto a los apoyos.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutral que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector.

El ensayo consistente en someter a una deformación plástica y posterior rotura una probeta recta de sección plena, mediante el pliegue de ésta, sin inversión de su sentido de flexión, sobre un radio especificado al que se le aplica una presión constante.

El objetivo principal de los ensayos de flexión (upcommons.upc) es determinar la curva de tensión-desplazamiento del material, para lo que hemos de someter la probeta a un esfuerzo de flexión y medir la flecha obtenida.

Para presentar la gráfica tensión deformación es necesario conocer la flecha y la tensión de flexión a partir de la aplicación de la norma ISO 14130.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2BH^2}$$

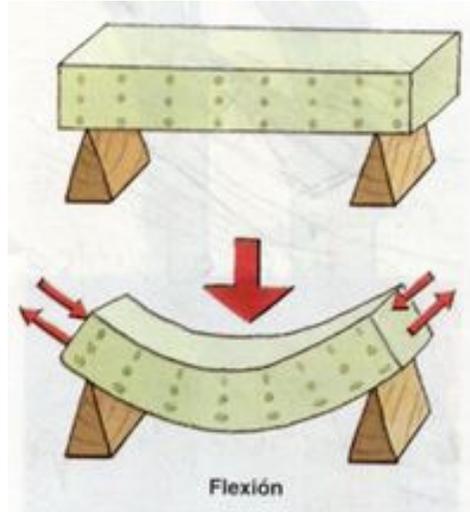


Figura 4.6: Ejemplo de esfuerzo de flexión.



Figura 4.7: Fibra neutra.



Figura 4.8: Ensayo realizado.

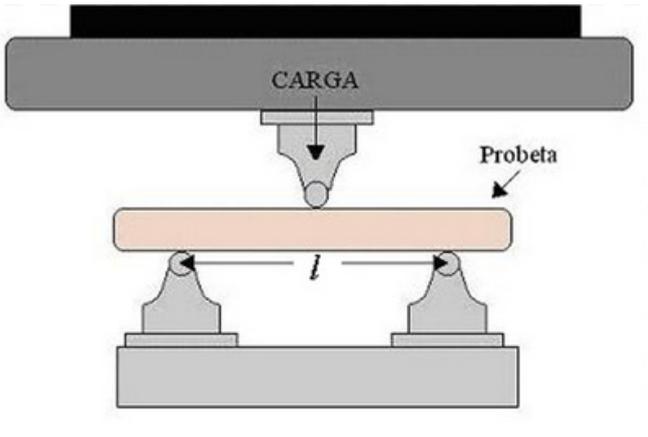


Figura 4.9: Ensayo flexión ISO 14130.

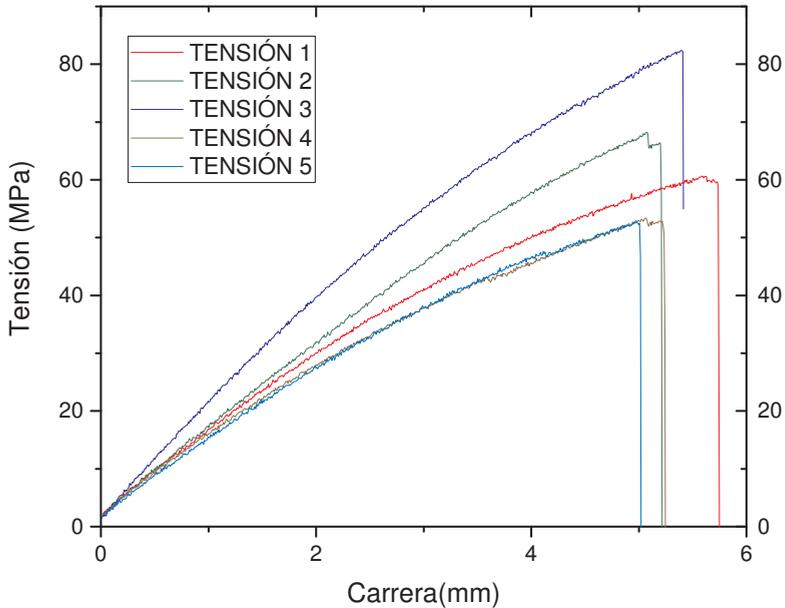


Figura 4.10: Grafico resultados del ensayo realizado sobre las probetas de lino.

donde σ_f es el esfuerzo de flexión, en megapascales (MPa); F es la carga, en newtons(N); L es la distancia entre los apoyos, en milímetros (mm); H es el espesor de la probeta, en milímetros (mm); B es la anchura de la probeta, en milímetros (mm);

De esta forma, a partir de los valores de tensión y deformación (flecha) podemos obtener los graficos de tensión/deformación para los distintos tipos de materiales.

Resultados

Se han realizado los ensayos sobre cinco probetas de cada tipo de material, con una longitud entre apoyos de 60 mm tal como especifica la norma ISO 14130.

A continuación se muestra el resumen de resultados obtenidos:

MATERIAL 90°	TENSIÓN MAX 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 4.4: Resumen de resultados para para el ensayo de flexión.

Ensayo de dureza

La dureza se define la oposición de un material a ser rallado, o lo que es lo mismo, la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. Cuanto más duro es el material, más cuesta deformarlo plásticamente. En las pruebas de dureza se mide la profundidad o tamaño de huella resultante tras la aplicación de una fuerza constante con un vástago, lo cual se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, en consecuentemente, menor dureza. uca.edu.sv/facultad

Las durezas obtenidas tienen interés comparativo, es decir no son absolutas sino que se trata de valores relativos que servirán para comparar materiales, no siendo útiles para el diseño y cálculo. Para materiales plásticos de dureza intermedia se emplea el durómetro Shore con la escala D. El ensayo se realizó mediante un durómetro Shore modelo 673D del fabricante INSTRUMENTS J. BOT, S.A, empleando una aguja no roma con ángulo de punta de 30°.

Como ya se ha indicado la dureza es inversamente proporcional a la penetración y depende del módulo de elasticidad del material. En función de cómo sea el material, si es más blando o duro, se utilizarán palpadores o penetradores con puntas distintas.

Resultados

Se han realizado los ensayos sobre cinco probetas de cada tipo de material, mediante un durómetro de tipo shore D. En la tabla 4.5 se muestra el resumen de resultados obtenidos.

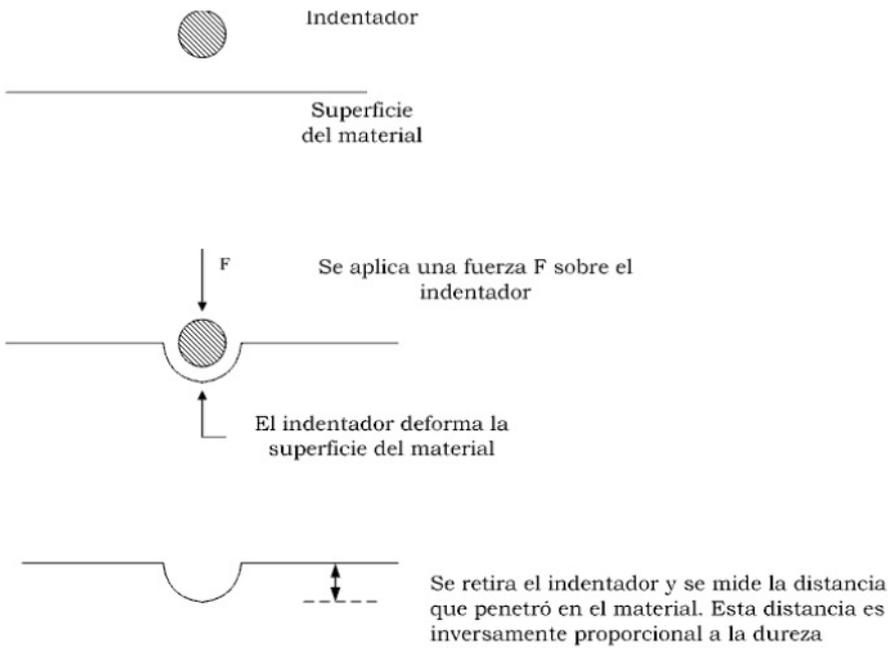


Figura 4.11: Ejemplo ensayo dureza.



Figura 4.12: Medición de dureza sobre probeta de yute.

MATERIAL Tipo	DUREZA Shore D
Carbono sarga	85,19
Carbono UD	84,09
Lino	78,99
Yute	74,57
Basalto	85,39

Tabla 4.5: Resumen de resultados para el ensayo de dureza.

5

Modelo teórico FEM

Criterios de fallo

[28][35][36][11] Por lo general, los materiales compuestos son anisótropos y quebradizos. Esto determina los diferentes modos de falla del material, algunos relacionados con la falla de los constituyentes y otros relacionados con la falla de la interfase, pudiendo diferenciarse entre los derivados de una carga de tracción y los derivados de una carga de compresión.

Las fibras no presentan plasticidad, normalmente su límite de rotura coincide con el límite de elasticidad, estando su falla relacionada con un fenómeno de redistribución de esfuerzos a las fibras vecinas, la cual puede causar una nueva ruptura de la fibra. Para el caso de una carga a compresión, se produce un micro pandeo progresivo de las fibras hasta que las se rompen.

La microfisuración es el principal modo de falla para la matriz. Se generan grietas en la matriz, paralelas a la dirección de la fibra sobre el espesor total de la lámina, más notablemente en aquellas láminas en las que el refuerzo no está en la misma dirección de la carga aplicada. Estas grietas aparecerían debido a los esfuerzos en ambos sentidos, tracción o compresión, y esfuerzo cortante disminuyendo considerablemente las propiedades mecánicas en la dirección transversal.

El modo de falla común para la interfase fibra-matriz es el "debonding". Esto equivale a una pérdida de adhesión y un deslizamiento relativo entre la fibra y la matriz debido a las diferencias en los esfuerzos cortantes de deformación en la interfase fibra-matriz. Esto produce una pérdida de adhesión y un deslizamiento con una gran pérdida de energía de fricción. Si las propiedades en la interfase entre la fibra y la matriz se pierden, la transmisión de carga desde la matriz a las fibras no se efectúa correctamente con una pérdida de características del composite.

Por último, el modo de falla que puede aparecer en la interfase fibra-fibra es la delaminación. Esto equivale a una pérdida de adhesión entre las láminas, por lo tanto una pérdida de la correcta distribución de cargas entre ellas.

Existen distintos criterios de fallo aplicables a materiales compuestos. Para clasificar cada uno de ellos por la veracidad de sus resultados suele ser necesario comparar los datos obtenidos experimentalmente con los resultados teóricos. Aunque existen muchos criterios para predecir el daño de una lámina. Casi todos éstos asumen homogeneidad y un comportamiento lineal esfuerzo-deformación hasta la falla. Estas teorías son adaptaciones de las existentes para materiales homogéneos e isotrópicos. Algunas de las teorías clásicas que han sido y siguen siendo más utilizadas son la teoría del esfuerzo máximo, la teoría de la deformación máxima, la teoría de falla Tsai-Hill y la teoría de falla Tsai-Wu.

Tensión máxima

Este criterio se basa en suponer que la lámina no rompe si las tensiones dentro de la misma, expresadas en unos ejes que coincidan con la dirección de las fibras, son menores que las resistencias respectivas obtenidas de unos ensayos de carga uniaxial y de cizalladura pura. Se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz.

Este método tiene el inconveniente que al manejar las tensiones en forma separada no permite observar la interacción entre las tensiones en distintas direcciones. Es el criterio más sencillo y al suponer que no existe interacción entre los diferentes mecanismos de fractura y tiende a sobreestimar la carga de rotura.

Este criterio presenta la limitación de que no permite una relación entre la tensión normal y cortante. No suele dar resultados precisos si se aplica a estados de carga distintos al uniaxial.

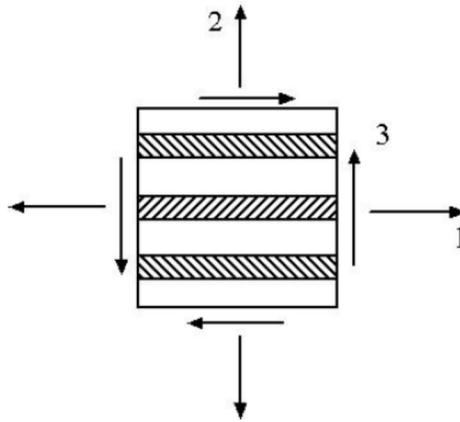


Figura 5.1: Criterio tensión máxima.

Para el caso de tensiones de tracción (ensayo de tracción), la lamina no debe fallar mientras:

$$\sigma_1 < X_t$$

$$\sigma_2 < Y_t$$

$$|T_{max}| < S$$

Deformación máxima

Según este criterio, las deformaciones longitudinales y de corte en el interior de la lámina no deben superar unos determinados valores. Se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz y se tiene en cuenta como sucede.

Este criterio presenta la limitación de que no permite una relación entre la tensión normal y cortante. No suele dar resultados precisos si se aplica a estados de carga distintos al uniaxial.

No se considera la interacción entre las deformaciones combinadas sobre la lámina analizada. El criterio de falla por deformación se puede considerar en tres condiciones de falla correspondientes con la deformación máxima en la dirección de la fibra, en la dirección transversal o de la matriz y para deformación al corte.



Figura 5.2: Criterio deformación máxima.

Para el caso de tensiones de tracción (ensayo de tracción), la lamina no debe fallar mientras:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &< X_\varepsilon \\ \varepsilon_2 &< Y_\varepsilon \\ |\gamma_{max}| &< S_\varepsilon \end{aligned}$$

Donde las deformaciones son producto de:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} \\ \varepsilon_2 &= -\nu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1} \\ |\gamma &= 0\end{aligned}$$

Tsai-Hill

Este es un criterio basado en los criterios de falla polinomiales y es uno de los criterios más usados y con resultados más ajustados. Se trata de un criterio similar al de Von Mises que se propuso para ajustarse a datos experimentales de materiales ortotrópicos.²

Para materiales anisótropos, Hill estableció un criterio de plastificación basado en el de Von Mises cuya validez se comprobó para algunos materiales metálicos. Este criterio hace intervenir una serie de parámetros de plastificación. Su expresión general es:¹

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

Tsai relacionó los parámetros de plastificación F, G, H, L, M y N con las resistencias mecánicas en dirección de las fibras, X, en dirección transversal a ellas, Y, de la resistencia de la lámina en dirección perpendicular a la misma, Z y de la resistencia a cortadura plana, S, e interlaminar Sxz y Syz. Tsai supuso que sobre la lámina actuaban estados de carga simples.

Esta teoría se ajusta mejor a los datos experimentales para ciertos rangos de esfuerzos. Tiene la ventaja adicional de tener en cuenta la interacción de los esfuerzos, ya que como se aprecia en la ecuación, todos los esfuerzos se involucran en el cálculo, para cualquier estado de esfuerzo.

Sin embargo, esta teoría no identifica los modos en que interactúan para producir la falla, aunque comparando las magnitudes relativas de los términos de la ecuación, podrían apreciarse los mecanismos que más efecto tienen sobre la falla. Además, la ecuación involucra todos los modos de falla, haciendo interactuar algunos de

ellos que pueden no estar aportando realmente a la falla de la lámina, ya que en general no todos los modos aparecen simultáneamente en un laminado. 3

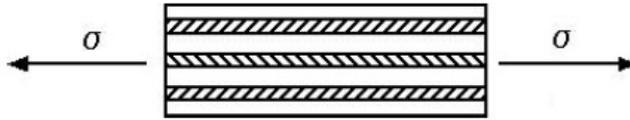


Figura 5.3: Criterio Tsai-Hill.

Para el caso de tensiones de tracción (ensayo de tracción), se aplicaría el primer polinomio de la formula:

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

Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu fue desarrollado a partir del criterio de Tsai-hill, siendo algo más complejo. Empleando una notación tensorial, puede ponerse de la forma siguiente:

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

Donde los índices repetidos indican la suma, y i, j, k = 1, 2, ... 6. Para un elemento 3D de un material ortotrópico, tensión plana se reduce a:

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

Donde:

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

El coeficiente F_{12} , que introduce la interacción entre los dos esfuerzos normales, debe obtenerse mediante algún tipo de ensayo biaxial, los cuales no son fáciles de realizar, por lo que no es fácil conseguir datos experimentales. Este coeficiente puede aproximarse a un valor obtenido en el ensayo de tracción o mediante fórmulas matemáticas. En ausencia de otra información se suele estimar el parámetro F_{12} mediante la siguiente ecuación:

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11} F_{22}}$$

donde:

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

Selección de criterio

Como se observa a lo largo de esta exposición, la complejidad de los criterios de rotura va en aumento debido a que hubo que adecuarlos con los resultados experimentales que se iban obteniendo.

Para la selección de una teoría de falla es necesario tener en cuenta que para materiales con comportamiento frágil sometidos a tracción, la teoría del esfuerzo máximo o la de la deformación máxima parecen ser las más apropiadas. Para materiales con comportamiento dúctil anisotrópicos, las teorías Tsai-Hill y Tsai-Wu podrían ser útiles para cargas que predominan en cortante o compresión.[28]

Aproximadamente el 17% de los diseñadores de elementos en composite utilizan el criterio de falla de Tsai-Hill mientras que el 11% utiliza el criterio de Tsai-Wu. Esto es debido a que los criterios polinomiales son fáciles de usar y la determinación de los parámetros es relativamente sencilla, obteniéndose de ellos unos resultados bastante aceptables. Aunque ciertamente tienen ciertas carencias. Una de ellas es que son capaces de predecir cómo será la falla de la lámina pero no identifican el modo de falla o el componente que falla. En muchas de las formulaciones de los criterios de falla, que sí tienen en cuenta la falta de isotropía, no tienen en cuenta el carácter heterogéneo del composite y su influencia en la falla. Este es el caso de los criterios polinomiales.[28]

Para solucionar esto se han desarrollado diversos criterios asociados a los distintos modos de falla. Estos tienen en cuenta el tipo de falla. En ellos se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz y se tiene en cuenta como sucede. Los criterios de este tipo más sencillos son el de máxima tensión y el de máxima deformación. Son los criterios de falla más utilizados por los diseñadores de elementos de composite siendo el más utilizado el criterio de falla de máxima de formación con un 30% y le sigue el de máxima tensión con un 22%. El único inconveniente

es que presentan la limitación de que no permiten una relación entre la tensión normal y cortante.[28]

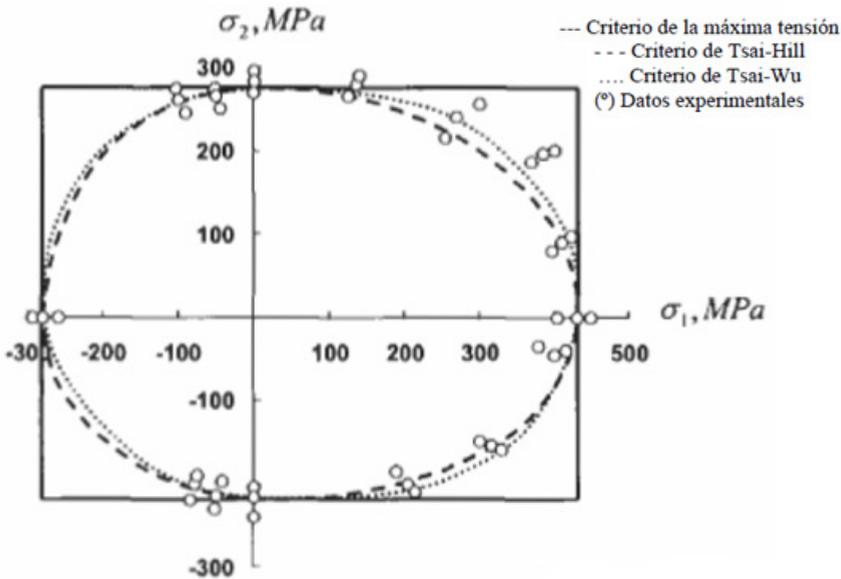


Figura 5.4: Envoltorio de falla para un composite de fibra de vidrio con resina epoxi.

Sin embargo debido a datos experimentales se ha podido comprobar que no hay un criterio mejor que otro, sino que dependiendo del tipo de composite, es decir, del tipo de fibra y de matriz utilizado hay un criterio de falla que se acerca mejor a los datos obtenidos experimentalmente.

Software CAE

Ingeniería asistida por computadora o por ordenador (CAE, del inglés Computer Aided Engineering) es la disciplina que se encarga del conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación, y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

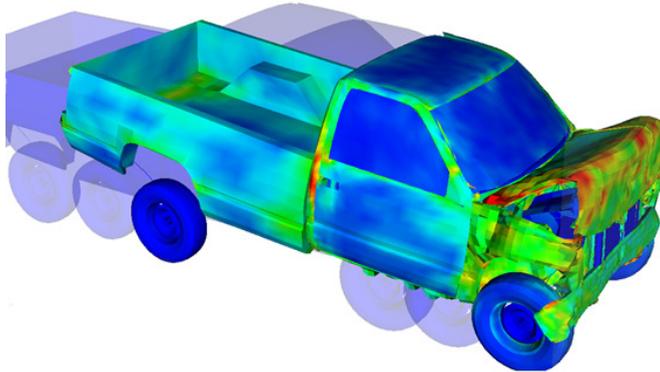


Figura 5.5: Simulación de accidente mediante programa CAE.

En este apartado nos centraremos en los software CAE MEF. El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».



Figura 5.6: Simulación FEM de una biela.

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente

adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético.

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Básicamente los pasos que sigue un análisis de estructuras mediante el método MEF son:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de preproceso.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o "nodos", situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada "elemento finito" en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Por ejemplo, el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos podría venir definido por: $u = N_1 \cdot u_1 + N_2 \cdot u_2$, siendo N_1 y N_2 las funciones (de forma) comentadas y u_1 y u_2 los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.
4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \cdot u$, que como vemos es similar a la del cálculo matricial.

6. La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.
7. En la etapa de postproceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis.

ANSYS

ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilizando aproximadamente 1700 empleados. La mayoría con experiencia en elemento finito y dinámica de fluido computacional. ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir como funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otros software para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además presta soporte a la industria.

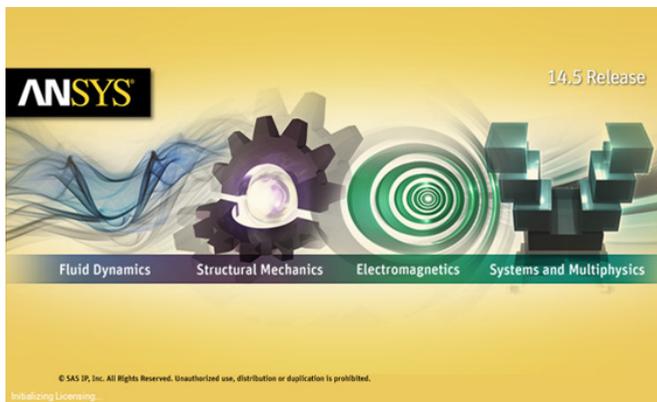


Figura 5.7: Cabecera software ANSYS.

El programa utilizado ha sido ansys workbench, el modulo de calculo de estructuras y sistemas por elementos finitos. Dentro de este se han realizado los primeros cálculos, siendo terminados en el pre-postprocesador de materiales compuestos ACP.

Este módulo ACP (Ansys composite prepost) es específico para cálculo de materiales compuestos y presenta como principales ventajas la posibilidad de crear

tejidos, permite modificar la orientación de las fibras, añadir o quitar capas en función de las necesidades, etc.

Modelado CAE

Se van a reproducir los ensayos de tracción realizados con los distintos materiales mediante el software de elementos finitos ansys workbench 14.5.7 con la finalidad de obtener un modelo lo mas próximo a la realidad para realizar posteriormente cálculos en componentes de automoción lo más fiables posible.

El proceso de modelado empieza con el diseño del CAD, una probeta con las dimensiones de las ensayadas. En este caso se ha utilizado para el diseño CAD el módulo de dibujo de ANSYS, "DesingModeler". Cabe resaltar que el diseño ha de hacerse como lámina para aplicar las capas en los siguientes pasos.

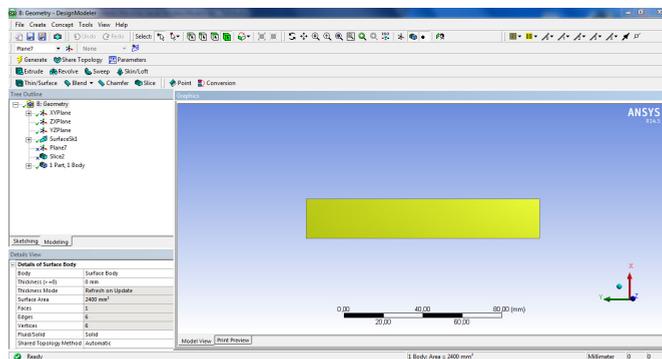


Figura 5.8: Diseño CAD de la probeta.

El siguiente paso ha sido añadir las principales propiedades de los materiales en la base de datos del programa, desde el "Engineering Data". Estos datos se han obtenido del ensayo de tracción y son:

- Modulo de Young.
- Tensión máxima en cada dirección.
- Coeficiente de Poisson.
- Deformación unitaria en cada dirección.

- Módulo de cortadura estimado a partir de:

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

- Tensión cortante en cada dirección estimada a partir de:

$$\tau = 2G\epsilon_{ij}$$

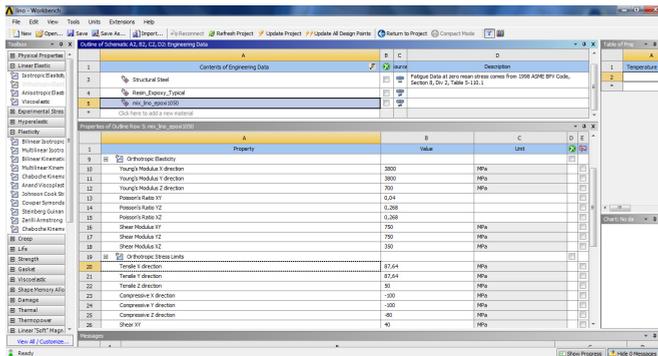


Figura 5.9: Introducción de datos en Engineering Data.

Una vez generado el diseño y introducido los datos del material se ha de realizar el estudio sobre la pieza aplicando cargas y restricciones pertinentes. Para ello se han de conocer las hipótesis de carga, en este caso son conocidas, puesto que son las del ensayo de tracción.

Para la reproducción del ensayo en ANSYS, el módulo de cálculo óptimo sería el "explicit dynamics". Aunque se trata de un módulo para el cálculo de impactos sería correcto utilizarlo para la reproducción del ensayo con materiales dúctiles porque muestra la visualización de la deformación plástica y de la rotura. Además, el explicit dynamic recalcula la malla a medida que se va deformando plásticamente la probeta. Esto presenta el inconveniente del elevado tiempo de resolución.

En este caso, los materiales ensayados no presentan ductilidad, por lo que podemos utilizar el módulo "Static Structural". Se debe realizar el estudio de la pieza como si se tratase de un material isotrópico, por lo que le aplicaremos un espesor y

un material sobre la cascara, que más adelante serán sustituidos por el material compuesto cuando sea importado al ACP.

Una vez mallado aplicaremos una restricción de tipo "Fixed support" en la arista base y un deformación del tipo "Remote displacement" en la arista opuesta para simular el avance de las mordazas.

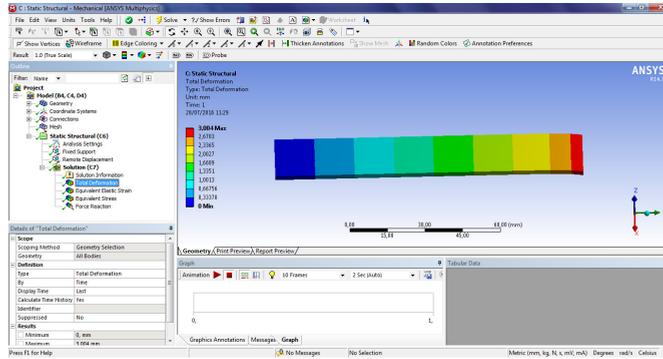


Figura 5.10: Cálculo en Static Structural.

Una vez simulado el ensayo con el material y el espesor de ejemplo, seleccionaremos los parámetros a tener en cuenta en el cálculo (espesor y tensión máxima) y pasaremos a introducir las características del laminado de material compuesto utilizando el pre-procesador del módulo ACP (Ansys composite prepost) de ANSYS que sirve únicamente para cálculo de materiales compuestos. En este modulo se eligen primero los material que forman la lámina. Seguidamente se introduce el valor del espesor de la fibra y se pasa a generar el tejido (unidireccional, sarga, bidireccional, etc). A continuación, utilizando los tejidos generados se crea el laminado, indicando el número de capas y el ángulo.

Finalmente se ha de importar estudio al Post-procesador Ansys ACP (módulo de composite) para obtener los resultados definiendo previamente los criterios de estudio y criterios de fallo, de los que se puede elegir entre tensión máxima, deformación máxima, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Hashin, Puck y LaRC.

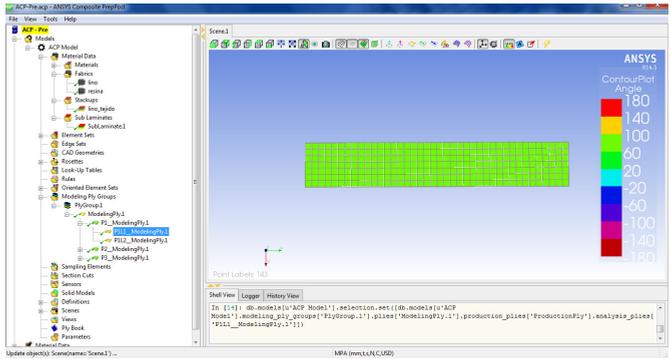


Figura 5.11: Introducción de datos en ACP-Pre.

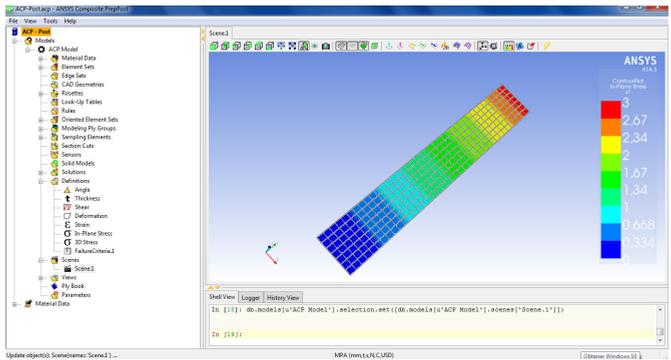


Figura 5.12: Obtención de resultados en ACP-Post.

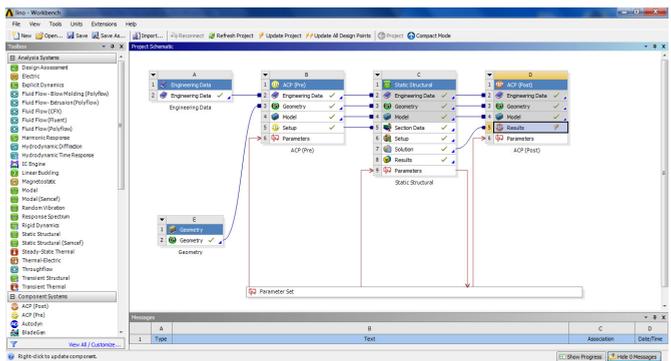


Figura 5.13: Arbol de módulos utilizados en ANSYS.

Análisis de resultados

A continuación se presentan los valores de los estudios realizados según el punto anterior para cada uno de los materiales empleados comparándolos con los valores extraídos experimentalmente.

Cabe indicar que para obtener los resultados de la simulación ha sido necesario realizar los cálculos distintas veces, variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta y revisando los valores de la teoría de fallo por deformación hasta que se ha encontrado el valor de deformación que produce la rotura. De este punto se han extraído los valores mostrados a continuación.

Carbono sarga

Para realizar la aproximación de los modelos de tracción es necesario conocer previamente los valores a obtener.

En este caso, el material a ensayar ha sido fibra de carbono sarga con resina epoxi 1050 para una probeta de 120 mm.

Una vez realizadas las aproximaciones mediante software del modelo de tracción podemos comparar los resultados de la simulación con los valores obtenidos experimentalmente en el ensayo de tracción:

Carbono sarga	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	2,56	2,13	231,43
Ensayo software	2,56	2,52	233,61
%Error	0,03	18,08	0,94

Tabla 5.1: Comparativa de resultados obtenidos experimental/software.

Los resultados de la simulación han sido obtenidos variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta hasta que valores de la teoría de fallo por deformación han mostrado la rotura.

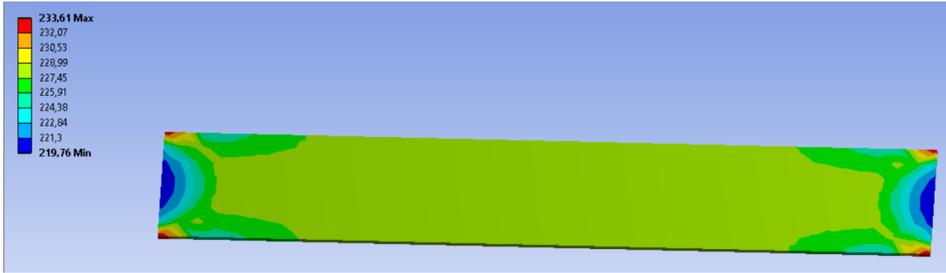


Figura 5.14: Tensión de rotura.

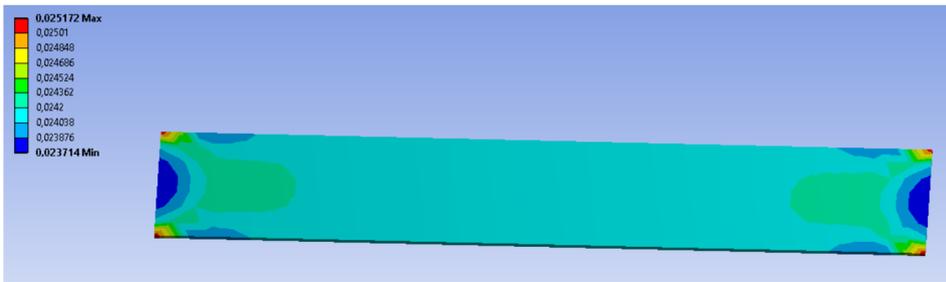


Figura 5.15: Deformación unitaria.

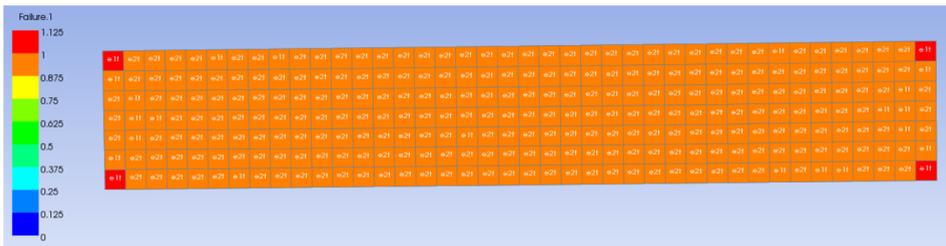


Figura 5.16: Criterio fallo por deformacion máxima.

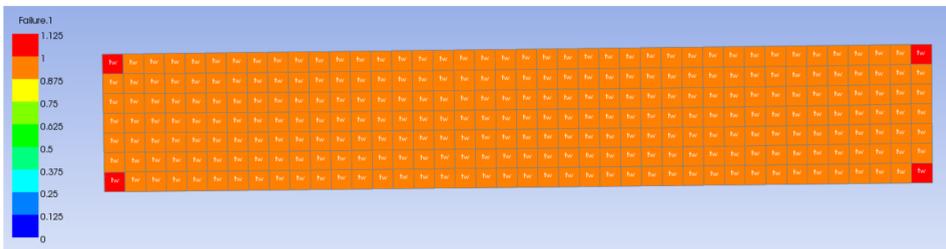


Figura 5.17: Criterio de fallo Tsai-wu.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,036	0,975
Tsai-wu	1,027	0,959

Tabla 5.2: Comparativa valores teoría de fallo.

Carbono UD

En este caso, el material a ensayar ha sido fibra de carbono unidireccional con resina epoxi 1050 para una probeta de 120 mm.

Una vez realizadas las aproximaciones mediante software del modelo de tracción podemos comparar los resultados de la simulación con los valores obtenidos experimentalmente en el ensayo de tracción:

Carbono UD	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	5,56	4,72	565,75
Ensayo software	5,67	5,50	510,67
%Error	0,18	16,68	9,73

Tabla 5.3: Comparativa de resultados obtenidos experimental/software.

Los resultados de la simulación han sido obtenidos variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta hasta que valores de la teoría de fallo por deformación han mostrado la rotura.



Figura 5.18: Tensión de rotura.

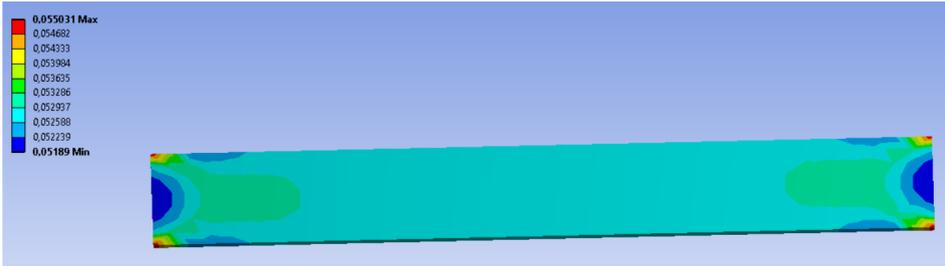


Figura 5.19: Deformación unitaria.

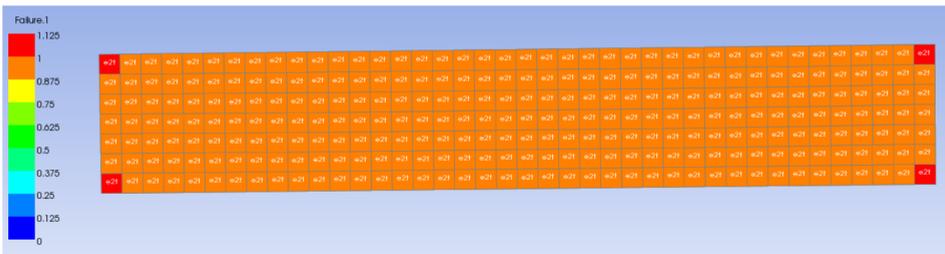


Figura 5.20: Criterio fallo por deformacion máxima.

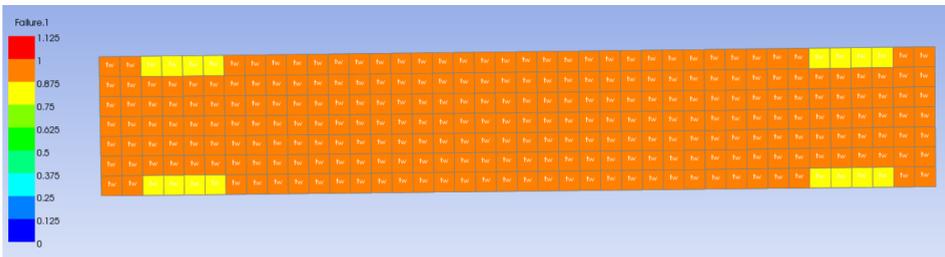


Figura 5.21: Criterio de fallo Tsai-wu.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,024	0,964
Tsai-wu	0,979	0,874

Tabla 5.4: Comparativa valores teoría de fallo.

Lino

En este caso, el material a ensayar ha sido fibra de lino con resina epoxi 1050 para una probeta de 120 mm.

Una vez realizadas las aproximaciones mediante software del modelo de tracción podemos comparar los resultados de la simulación con los valores obtenidos experimentalmente en el ensayo de tracción:

Lino	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	2,70	2,25	87,64
Ensayo software	2,70	2,54	85,27
%Error	0,12	12,78	2,70

Tabla 5.5: Comparativa de resultados obtenidos experimental/software.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,008	0,983
Tsai-wu	0,986	0,954

Tabla 5.6: Comparativa valores teoría de fallo.

Los resultados de la simulación han sido obtenidos variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta hasta que valores de la teoría de fallo por deformación han mostrado la rotura.

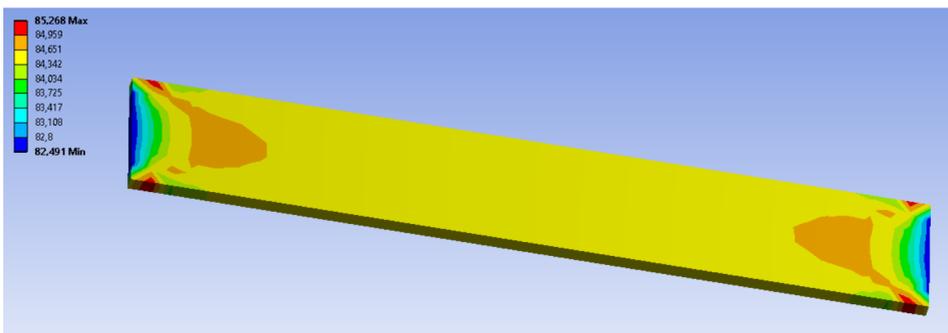


Figura 5.22: Tensión de rotura.

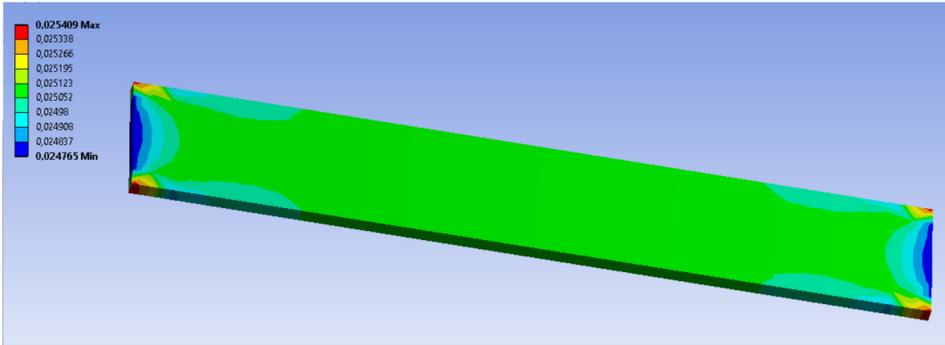


Figura 5.23: Deformación unitaria.

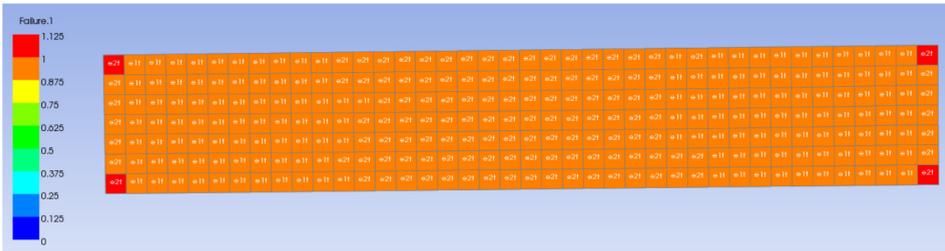


Figura 5.24: Criterio fallo por deformacion máxima.

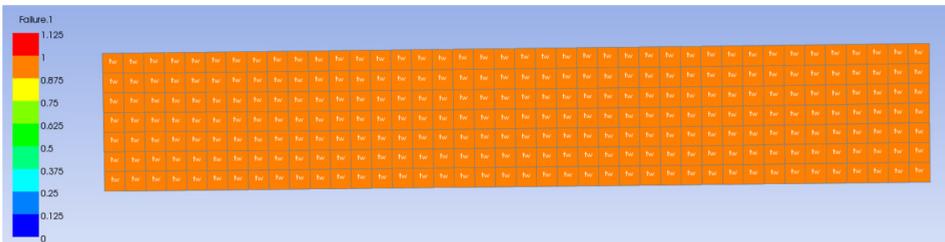


Figura 5.25: Criterio de fallo Tsai-wu.

Yute

En este caso, el material a ensayar ha sido fibra de Yute con resina epoxi 1050 para una probeta de 120 mm.

Una vez realizadas las aproximaciones mediante software del modelo de tracción podemos comparar los resultados de la simulación con los valores obtenidos experimentalmente en el ensayo de tracción:

Yute	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	3,74	3,12	50,62
Ensayo software	3,75	3,42	50,65
%Error	0,10	9,58	0,06

Tabla 5.7: Comparativa de resultados obtenidos experimental/software.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,021	0,976
Tsai-wu	1,021	0,977

Tabla 5.8: Comparativa valores teoría de fallo.

Los resultados de la simulación han sido obtenidos variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta hasta que valores de la teoría de fallo por deformación han mostrado la rotura.

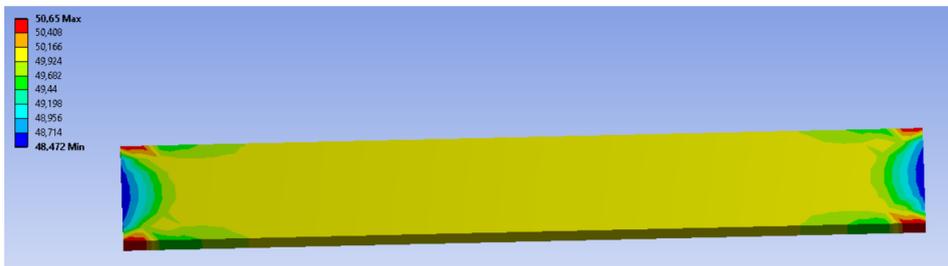


Figura 5.26: Tensión de rotura.

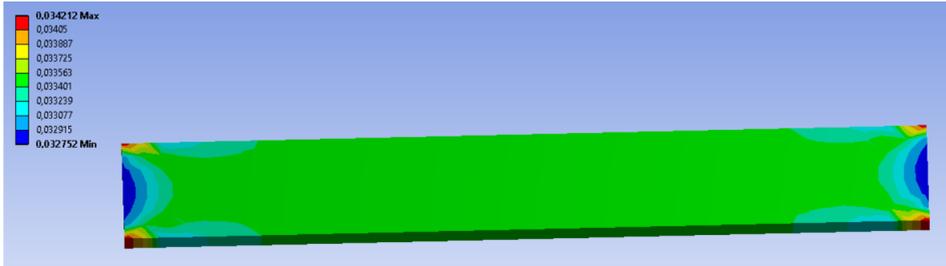


Figura 5.27: Deformación unitaria.

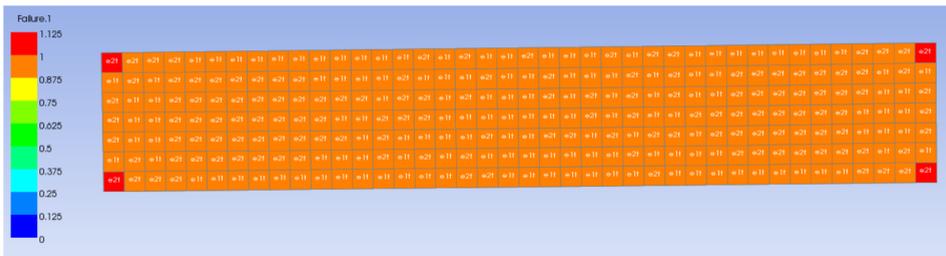


Figura 5.28: Criterio fallo por deformación máxima.

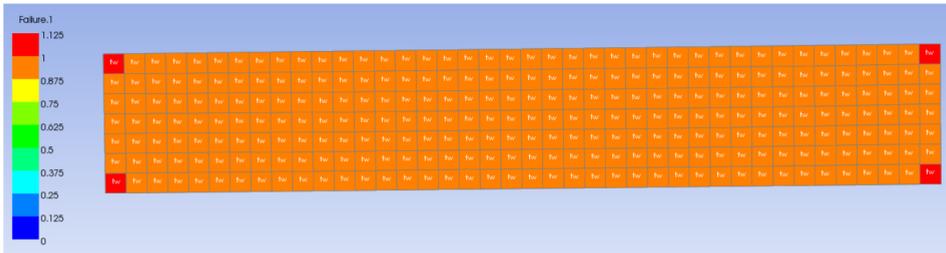


Figura 5.29: Criterio de fallo Tsai-wu.

Basalto

En este caso, el material a ensayar ha sido fibra de basalto con resina epoxi 1050 para una probeta de 120 mm.

Una vez realizadas las aproximaciones mediante software del modelo de tracción podemos comparar los resultados de la simulación con los valores obtenidos experimentalmente en el ensayo de tracción:

Basalto	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	7,88	6,55	392,11
Ensayo software	8,03	6,72	392,37
%Error	2,06	2,53	0,06

Tabla 5.9: Comparativa de resultados obtenidos experimental/software.

Criterio	Máximo	Mínimo
Deformación máx	1,022	0,979
Tsai-wu	1,024	0,969

Tabla 5.10: Comparativa valores teoría de fallo.

Los resultados de la simulación han sido obtenidos variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta hasta que valores de la teoría de fallo por deformación han mostrado la rotura.

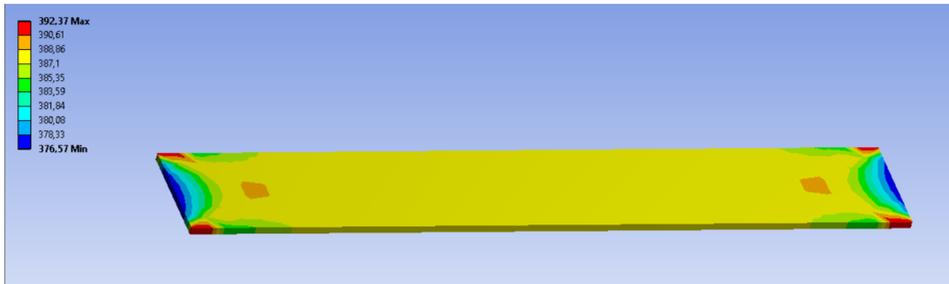


Figura 5.30: Tensión de rotura.

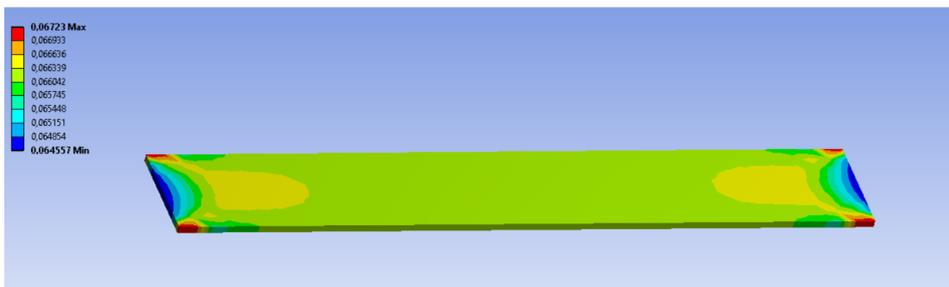


Figura 5.31: Deformación unitaria.

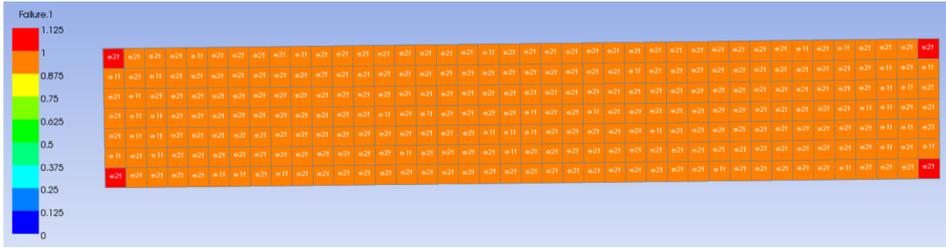


Figura 5.32: Criterio fallo por deformación máxima.

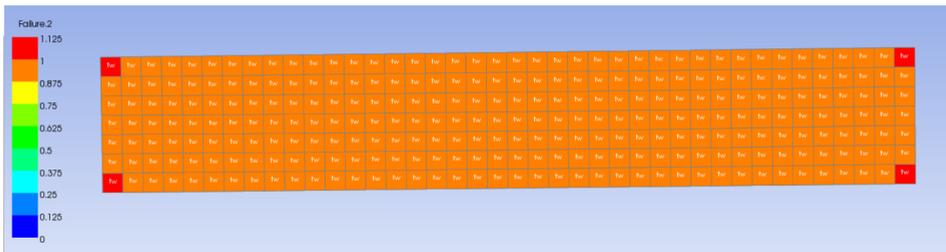


Figura 5.33: Criterio de fallo Tsai-wu.

Conclusiones

Observando todos los resultados podemos concluir que la resolución de los ensayos mediante el modelo generado por elementos finitos es muy aproximada a la realidad, con el porcentaje de error mostrado en cada caso, pero siendo prácticamente despreciable en el diseño de un componente, puesto que por norma general se aplica un factor de seguridad por fallos en el material y otro por fallos en la fabricación para asegurar el correcto diseño, por esto, el error puede despreciarse frente los factores de seguridad aplicados.

En cuanto a la comparación entre teorías de fallo, se observa que los valores obtenidos en la teoría de Tsai-wu son más conservadores, siendo más próximos a la realidad los obtenidos por la teoría de deformación máxima, al menos para estas simulaciones en concreto.

De tal forma, se ha comprobado en este trabajo que es posible realizar la aproximación por elementos finitos de cualquier material del que se conozcan sus propiedades mediante ensayos previos, pudiendo así dimensionar componentes reales con materiales hasta el momento no utilizados. En este ámbito, el campo de los

materiales compuestos abre un gran abanico de posibilidades sin explorar al dar la posibilidad de combinar distintos materiales para conseguir unas propiedades concretas.

6

Presupuesto.

Este trabajo no trata sobre el diseño de un nuevo producto destinado a su posterior venta sino que se trata de un estudio para la posible aplicación de materiales en un campo concreto, no obstante, en cualquier estudio, proyecto o actividad se emplea tiempo y recursos para su realización, y por lo tanto es posible presupuestarlo.

El presupuesto supone la evaluación económica de todo el proyecto. De forma sencilla, se va a valorar el tiempo empleado en el proyecto, es decir en el estudio y preparación de materiales, ensayos, simulaciones, generación de moldes y prototipos, preparación de la memoria, etc.

Por otro lado se va a pasar a valorar el precio de los materiales consumibles empleados para la fabricación y los materiales utilizados (fibra de lino, fibra de carbono, fibra de yute, fibra de basalto y resina epoxi), pasando por alto gastos como la energía consumida, coste de herramientas y materiales auxiliares, asistencia técnica de los directores de tesis, etc.

Cantidad	Descripción	Precio unitario (€)	Precio Total(€)
1m	Fibra de carbono sarga	41,00	41,00
1m	Fibra de carbono UD	32,50	32,50
1m	Fibra de lino	21,00	21,00
2m	Fibra de Yute	20,50	41,00
2m	Fibra de Basalto	24,10	48,20
3kg	Resina epoxi	36,05	108,15
1	Materiales Auxiliares y consumibles		160
	Material total empleado		451,85
410h	Tiempo total empleado	20	8.200,00
	TOTAL		8.651,85

Tabla 6.1: Presupuesto.

Bibliografía

- [1] Definiciones y categorías de los vehículos. *Real Decreto 711/2006, BOE*, 2010.
- [2] F. Ahmad, H. Choi, y M. Park. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1):10–24, 2015. doi: 10.1002/mame.201400089. cited By 8.
- [3] F. Ahmad, H. Choi, y M. Park. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1):10–24, 2015. doi: 10.1002/mame.201400089. cited By 8.
- [4] M. Alkbir, S. Sapuan, A. Nuraini, y M. Ishak. Fibre properties and crashworthiness parameters of natural fibre-reinforced composite structure: A literature review. *Composite Structures*, 148:59–73, 2016. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.01.098. cited By 0.
- [5] J. C. Antonio Miravete. *Materiales compuestos 1 y 2*. 2003.
- [6] W. D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Volumen 2*. 2007.
- [7] E. A. Casado. *Elementos estructurales del vehículo*. 2009.
- [8] J. Choma, L. Osuchowski, M. Marszewski, A. Dziura, y M. Jaroniec. Developing microporosity in kevlar®-derived carbon fibers by co2 activation for co2 adsorption. *Journal of CO2 Utilization*, 16:17–22, 2016. doi: 10.1016/j.jcou.2016.05.004. cited By 0.

- [9] J. E. Crespo. *Apuntes de materiales compuestos, master ingeniería de materiales.*, 2015.
- [10] J. G. de la Figal; Pedro A. Rodríguez Ramos. El cálculo de los materiales compuestos por elementos finitos. *Instituto Panamericano de ingeniería naval.*, 2007.
- [11] U. C. I. de Madrid. *Teorías sobre la resistencia a rotura de una lámina*, chapter capitulo 5.
- [12] M. del Mar Nogueira López. Análisis del hormigón reforzado con fibra de lino. Master's thesis, ETSAG_Master en arquitectura y materiales, 2015.
- [13] R. F. Estrada Martin. *Bambú Y Materiales Compuestos.* 2012.
- [14] T. Gurunathan, S. Mohanty, y S. Nayak. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77:1–25, 2015. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.06.007. cited By 15.
- [15] L. M. Hernández. Optimización de paneles rigidizados de materiales compuestos sometidos a cargas medioambientales y mecánicas. Master's thesis, Universidad de Granada, 2011.
- [16] https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_natural.
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto.
- [18] http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-diseno/fibras_animales.
- [19] D. Hull. *Materiales compuestos.* 1987.
- [20] P.-B. Jacquot, P. Wang, D. Soulat, y X. Legrand. Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 46(3):698–718, 2016. doi: 10.1177/1528083715591592. cited By 0.
- [21] P.-B. Jacquot, P. Wang, D. Soulat, y X. Legrand. Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 46(3):698–718, 2016. doi: 10.1177/1528083715591592. cited By 0.

- [22] D. J. V. José E. Crespo Amorós, Antonio V. Nadal Gisbert. *Cuadernos de investigación en la ingeniería vol. i 2015: avances en el área de materiales y sus procesos*. 2015.
- [23] C. Kong, H. Lee, y H. Park. Design and manufacturing of automobile hood using natural composite structure. *Composites Part B: Engineering*, 91:18–26, 2016. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.12.033. cited By 0.
- [24] M. Lagel, L. Hai, A. Pizzi, M. Basso, L. Delmotte, S. Abdalla, A. Zahed, y F. Al-Marzouki. Automotive brake pads made with a bioresin matrix. *Industrial Crops and Products*, 85:372–381, 2016. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.12.090. cited By 0.
- [25] K. L. Lawrence. *ANSYS Workbench Tutorial Release 14*. 2012.
- [26] A. M. B. M. N. López. Materiales de ultima generacion y materiales eficientes: materiales compuestos - composites. *Máster Oficial en Proyecto de Arquitectura y Ciudad . ETSAG . UAH*, 2007.
- [27] L. Mohammed, M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, y M. Islam. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 2015. doi: 10.1155/2015/243947. cited By 4.
- [28] M. Molinier. Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.*, 2006.
- [29] J. R. O.O. Ochoa. *Finite Element Analysis of Composite Laminates*. 2013.
- [30] I. Sukmaji, M. Anwar, W. Wijang, y D. Danardono. Hybrid carbon-glass fiber composite for the door electric car application. 2013. doi: 10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741519. cited By 0.
- [31] B. Sun, K. Luan, B. Gu, X. Fang, y J. Zhang. Light-weighting design of eco-power automobile chassis made from green composite and its topology optimization in fea. *Advanced Materials Research*, 341-342:183–188, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.183. cited By 0.
- [32] B. Sun, K. Luan, B. Gu, X. Fang, y J. Zhang. Light-weighting design of eco-power automobile chassis made from green composite and its topology optimization in fea. *Advanced Materials Research*, 341-342:183–188, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.183. cited By 0.

- [33] Z. Sun, M. Guo, y Z. Yu. Research on vartm technology for fabricating basalt fiber/vinyl ester composites. *Applied Mechanics and Materials*, 268(PART 1): 19–22, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.19. cited By 0.
- [34] V. K. Thakur y M. K. Thakur. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 109: 102 – 117, 2014. ISSN 0144-8617. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>.
- [35] H. M. Thorsen. *Belly Landing of the LocalHawk UAV, Low-Velocity Impact Simulation Using an Explicit Finite Element Solver*. PhD thesis, Chalmers University Of Technology, 2013.
- [36] L. S. A. M. . L. V. Useche. Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica Año X, No 25*, 2004.
- [37] G. Zappelli Cerri. *Imagen escénica : aproximación didáctica a la escenología, el vestuario y la luz para teatro, televisión y cine*. 2006.

Índice de figuras

1.1	Planificación temporal	5
1.2	Clasificación según el tipo de refuerzo.	8
1.3	Moldeo por laminado manual.	10
1.4	Horno autoclave para control de la presión y temperatura.	11
1.5	Moldeo por infusión de resina.	12
1.6	Moldeo por método de bobinado filament winding.	13
1.7	Moldeo por método de pultrusión.	13
1.8	Moldeo por compresión en caliente del bastidor de una bicicleta de fibra de carbono.	14
1.9	Fabricación de un componente por método de moldeo RTM en molde cerrado.	15
1.10	Tabla comparativa de fibras en propiedades de materiales compuestos.	16
1.11	Planta de lino.	19
1.12	Plantación de Yute.	20
1.13	Mineral de basalto.	20
1.14	Fardier, primer automovil con motor a vapor.	23

1.15 Benz Patent-Motorwagen, primer automovil con motor de combustión interna.	24
3.1 Método de fabricación.	36
3.2 Bomba de vacío.	37
3.3 Cubo de resina.	38
3.4 Tubo PEBD.	38
3.5 Clampas de cierre.	39
3.6 Termometro laser.	39
3.7 Medidor de fugas.	40
3.8 Tijeras para corte de tejidos.	40
3.9 Bolsa de vacío.	41
3.10 Tubo elicoidal.	42
3.11 Tubo PEBD.	42
3.12 Conector tipo "t".	42
3.13 Llave de cierre.	43
3.14 Toma para infusion de resina.	43
3.15 Cinta adhesiva.	44
3.16 Masilla de cierre para sellado.	44
3.17 Malla de distribución.	45
3.18 Tejido pelable.	45
3.19 Proceso de fabricación. Corte de tejidos.	46
3.20 Proceso de fabricación. Posicionamiento de tejidos.	47
3.21 Proceso de fabricación. Posicionamiento del peel ply.	48

3.22	Proceso de fabricación. Montaje.	49
3.23	Proceso de fabricación. Aplicación de vacío.	50
3.24	Proceso de fabricación. Entrada de resina.	51
3.25	Proceso de fabricación. Desmoldeo.	52
4.1	Ensayo de traccion ISO 527-1.	60
4.2	Ensayo de tracción realizado.	61
4.3	Ejemplo de graficas de tracción. Grafica tensión vs deformación unitaria para probetas de lino 90°.	63
4.4	Montaje de extensometro. Ensayo Poisson.	65
4.5	Ejemplo gráfico deformaciones longitudinal y transversal unitarias vs tensión. Ensayo sobre probeta de carbono sarga cortado a 45°.	66
4.6	Ejemplo de esfuerzo de flexión.	69
4.7	Fibra neutra.	69
4.8	Ensayo realizado.	70
4.9	Ensayo flexión ISO 14130.	70
4.10	Grafico resultados del ensayo realizado sobre las probetas de lino.	71
4.11	Ejemplo ensayo dureza.	73
4.12	Medición de dureza sobre probeta de yute.	74
5.1	Criterio tensión máxima.	77
5.2	Criterio deformación máxima.	78
5.3	Criterio Tsai-Hill.	80
5.4	Envolvente de falla para un composite de fibra de vidrio con resina epoxi.	82

5.5 Simulación de accidente mediante programa CAE.	83
5.6 Simulación FEM de una biela.	84
5.7 Cabecera software ANSYS.	86
5.8 Diseño CAD de la probeta.	87
5.9 Introducción de datos en Engineering Data.	88
5.10 Cálculo en Static Structural.	89
5.11 Introducción de datos en ACP-Pre.	90
5.12 Obtención de resultados en ACP-Post.	90
5.13 Arbol de modulos utilizados en ANSYS.	90
5.14 Tensión de rotura.	92
5.15 Deformación unitaria.	92
5.16 Criterio fallo por deformacion máxima.	92
5.17 Criterio de fallo Tsai-wu.	92
5.18 Tensión de rotura.	93
5.19 Deformación unitaria.	94
5.20 Criterio fallo por deformacion máxima.	94
5.21 Criterio de fallo Tsai-wu.	94
5.22 Tensión de rotura.	95
5.23 Deformación unitaria.	96
5.24 Criterio fallo por deformacion máxima.	96
5.25 Criterio de fallo Tsai-wu.	96
5.26 Tensión de rotura.	97
5.27 Deformación unitaria.	98

5.28	Criterio fallo por deformacion máxima.	98
5.29	Criterio de fallo Tsai-wu.	98
5.30	Tensión de rotura.	99
5.31	Deformación unitaria.	99
5.32	Criterio fallo por deformacion máxima.	100
5.33	Criterio de fallo Tsai-wu.	100

Índice de tablas

2.1	Palabras clave.	30
2.2	Resultados de búsqueda fibras naturales.	30
2.3	Resultados de búsqueda de caracterización materiales compuestos.	30
2.4	Resultados de búsqueda MEF.	31
2.5	Resultados de búsqueda de automóviles.	31
2.6	Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.	31
2.7	Resultados de búsqueda tras adhesión de palabras.	32
3.1	Características iniciales de las fibras.	53
3.2	Características lámina de material compuesto.	53
3.3	Resultados ensayo de tracción sobre carbono (sarga).	54
3.4	Resultados ensayo de tracción sobre carbono (Unidireccional).	54
3.5	Resultados ensayo de tracción sobre fibra de Yute.	54
3.6	Resultados ensayo de tracción sobre fibra de Lino.	55
3.7	Resultados ensayo de tracción sobre fibra de Basalto.	55
3.8	Resultados ensayo de flexión sobre fibra de carbono (Sarga).	56
3.9	Resultados ensayo de flexión sobre fibra de carbono (Unidireccional).	56

3.10	Resultados ensayo de flexión sobre fibra de Lino.	56
3.11	Resultados ensayo de flexión sobre fibra de Basalto.	57
4.1	Resumen de resultados para los tejidos cortados a 90°.	64
4.2	Resumen de resultados para los tejidos cortados a 45°.	64
4.3	Resumen de resultados para el coeficiente de Poisson.	68
4.4	Resumen de resultados para para el ensayo de flexión.	72
4.5	Resumen de resultados para el ensayo de dureza.	74
5.1	Comparativa de resultados obtenidos experimental/software. . . .	91
5.2	Comparativa valores teoría de fallo.	93
5.3	Comparativa de resultados obtenidos experimental/software. . . .	93
5.4	Comparativa valores teoría de fallo.	94
5.5	Comparativa de resultados obtenidos experimental/software. . . .	95
5.6	Comparativa valores teoría de fallo.	95
5.7	Comparativa de resultados obtenidos experimental/software. . . .	97
5.8	Comparativa valores teoría de fallo.	97
5.9	Comparativa de resultados obtenidos experimental/software. . . .	99
5.10	Comparativa valores teoría de fallo.	99
6.1	Presupuesto.	104