



UNIVERSIDAD DE JAÉN

CONTENEDOR PARA BATERÍAS DE MOTOCICLETA ELÉCTRICA EN COMPUESTO FIBRA-RESINA

Alumno:

Francisco José de la Hoz Molina

Tutor:

Prof. D. José Enrique Mata Bago

Dpto: Inteniería Mecánica y Minera

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR. UNIVERSIDAD DE JAÉN

A mi madre, por su esfuerzo y dedicación y por su lucha incansable por hacernos ser mejores cada día .

RESUMEN

El presente documento es un estudio sobre el diseño y la fabricación en materiales compuestos, especialmente se centra en el estudio de un caso particular para la fabricación de un contenedor de baterías para una motocicleta eléctrica. Para ello se hace una pequeña introducción a los sistemas fibra-resina y a los procesos de fabricación. Tras esto se describe el proceso seguido para la fabricación del componente mencionado así como una serie de ensayos que verifiquen la calidad del producto terminado.

Índice

RESUMEN	6
1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL PROYECTO.....	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Objeto del Proyecto	12
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1 FIBRAS	14
2.1.2 Estructuras textiles.....	17
2.2 MATRICES	20
2.2.1 Interfase	23
2.3 CARGAS Y ADITIVOS	24
2.3 NÚCLEOS	25
2.5 ADHESIVOS ESTRUCTURALES	26
2.6 RECUBRIMIENTOS	27
2.7 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS	27
2.7.1 Propiedades físicas.....	27
2.7.1.1 Fracción volumétrica de fibra	27
2.7.1.2 Densidad del compuesto.....	28
2.7.1.3 Volumen de huecos.....	28
2.7.2 Regla de las mezclas	29
2.7.3 Ley de comportamiento de una lámina	30
2.6.3.1 Tensión plana en láminas según ejes principales.....	31
2.7.3.1 Tensión plana en láminas según cualquier dirección.....	32
2.7.3.2 Relación entre las constantes ingenieriles y términos de la matriz de rigidez	34
2.7.3.3 Teoría de placas laminadas	36
2.7.3.4 Teoría de estructuras tipo sándwich.....	39
Estudio de la placa sándwich biapoyada.....	42
2.8 PROCESOS DE FABRICACIÓN	43
3. MATERIALES	48
3.1 MADERA DE DM	48
3.2 COLA VINILICA PVA.....	48
3.3 TIRAFONDOS	48
3.4 ESMALTE DE POLIURETANO ESMALPOLY 2/C AR.....	50
3.5 SELLADOR SEALER GP-034.....	50

3.6 DESMOLDEANTE FLEXZ	51
3.7 CERA DESMOLDEANTE MIRROR GLAZE MEGUIARS	51
3.8 TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO	52
3.8.1 TEJIDO SARGA 200 g/m ²	53
3.8.2 TEJIDO TRIAXIAL de 450g/m ²	53
3.9 NÚCLEO SANDWICH SORIC XF 3mm	55
3.10 ADHESIVO DE POSICIONAMIENTO EN SPRAY AIRTAC 2E.....	56
3.11 MALLA DE DISTRIBUCIÓN TEJIDA CON FILM DESMOLDEANTE PERFORADO INFUPLEX FLONET	56
3.12 CANAL PLANO DE INFUSIÓN DIADRAIN	58
3.13 MASILLA DE CIERRE PARA BOLSA DE VACÍO LSM7000	58
3.14 BOLSA DE VACÍO TUBULAR DE 50 MICRAS	59
3.15 TUBO DE ESPIRAL POLIETILENO 1/2" (12,7 mm).....	60
3.16 TUBO DE ABSORCIÓN DE 12 mm	60
3.17 CONEXIÓN EN "T" PARA TUBERIA DE 10 mm	60
3.18 VÁLVULA DE PASO DE RESINA DE 10 mm	60
3.19 RESINA EPOXI	61
3.19.1 RESINA EPOXI RESOLTECH 1050 PARA INFUSIÓN	61
3.19.2 ENDURECEDOR RESOLTECH 1056S	62
3.19.3 MEZCLA DE RESINA EPOXI RESOLTECH 1050 Y ENDURECEDOR 1056S.....	62
3.20 ADHESIVO EPOXI ESTRUCTURAL C-PATCH.....	63
3.21 URKI-PROTEC COAT	63
3.22 EPI.....	64
4. MÁQUINAS Y EQUIPOS.....	65
4.1 INGLETADORA BOSCH GM-12 JL	65
4.2 TALADRO	66
4.3 LIJADORA ORBITAL	67
4.4 COMPRESOR Y PISTOLA DE PINTURA.....	67
4.5 TIJERAS	68
4.7 BOMBA DE VACÍO.....	68
4.8 TRAMPA ATRAPA RESINA.....	69
4.9 CALEFACTOR.....	69
4.10 AMOLADORA ANGULAR.....	70
4.11 PISTOLA APLICADORA DE SILICONA	70

4.13 PRENSA 30 kN.....	71
4.12 PRENSA HIDRAULICA 100 kN.....	72
4.13 ÚTIL PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS	72
4.14 CÁMARA	72
4.15 ORDENADOR	72
4.16 BÁSCULA.....	73
5. PROCESO DE FABRICACIÓN	74
5.1 FABRICACIÓN DEL MOLDE.....	74
5.2 PREPARACIÓN DE LA FIBRA.....	77
5.3 ELEMENTOS AUXILIARES DEL PROCESO DE INFUSIÓN.....	79
5.4 PREPARACIÓN DE LA RESINA.....	81
6. ENSAYOS Y DISCURSIÓN.....	87
6.1 ENSAYO DE TRACCIÓN	87
Propiedades físicas de la probeta	90
6.2 ENSAYO DE FLEXIÓN.....	92
7. CONCLUSIONES	94
VOCABULARIO	95
BIBLIOGRAFIA	96
NORMATIVA	96
REFERENCIAS ON-LINE	97

1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

El equipo EPS-UJATeam de la Universidad de Jaén participará en la competición internacional entre universidades MotoStudent IV en la que estudiantes y profesores miembros de dicho equipo diseñan y fabrican una motocicleta de carreras eléctrica.

Esta motocicleta, a diferencia de las convencionales, usa como combustible una célula de baterías eléctricas de Litio-Polímero. Debido a su gran volumen y peso, la célula de baterías es un elemento a considerar a la hora de diseñar la motocicleta. Si el conjunto se situase a una altura elevada, podría comprometer la estabilidad al vuelco en curvas de la motocicleta.

Para alojar la célula de baterías es necesario un elemento envolvente auto-portante que la proteja y fije al bastidor de la motocicleta. Esta envolvente debe resistir los esfuerzos producidos por el peso de la célula, garantizando el mínimo peso. Por tanto, es necesario el uso de materiales de alta resistencia específica.

El acero es uno de los materiales más usados en automoción debido a su alta resistencia y rigidez, sin embargo, en la industria automovilística de competición, donde la masa es tan importante, suele sustituirse por el aluminio en elementos estructurales. A pesar de ser más ligero que el acero, el aluminio es menos resistente y por consiguiente debe tener un dimensionado mayor. Esta necesidad puede ser subsanada con el uso de los materiales compuestos como la fibra de carbono que cuenta con unas propiedades mecánicas altas y una masa baja (Tabla 1).

La fibra de carbono es un material relativamente nuevo. En un principio estaba destinado a la industria aeroespacial debido a su alto coste de producción. A medida que se desarrolla la tecnología de fabricación de la fibra de carbono, disminuye su coste, haciendo que cada vez esté más consolidado su uso en la industria (Figura 1).

Material	Módulo de Elasticidad (GPa)	Tensión a Tensión (MPa)	Densidad (g/cm ³)
Fibra de Carbono T700S con resina Epoxi	120	2550	1,57
Acero AISI 5130	205	1275	7,85
ALUMINIO 7075-T6	71,7	570	2,81

Tabla 1. Comparativa entre distintos materiales estructurales (Niu Michael, 1992).

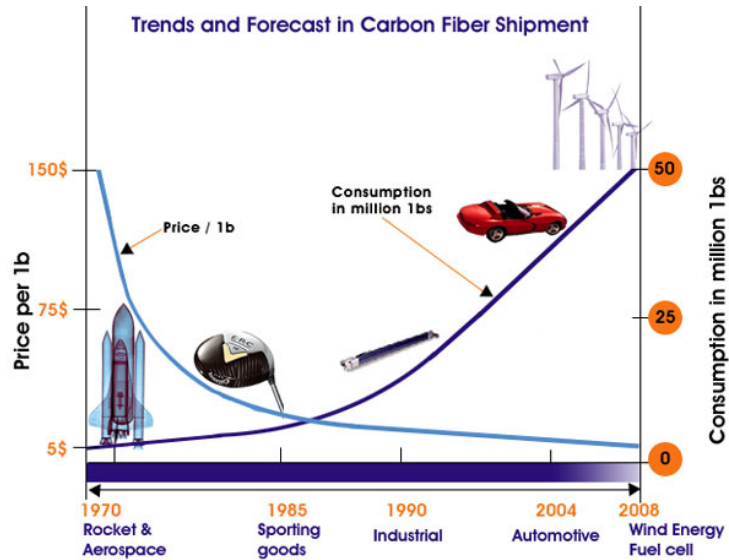


Figura 1. Relación entre el precio y el consumo de la fibra de carbono a lo largo de su historia (Lucintel, 2010).

1.2 Objeto del Proyecto

Dada la necesidad de un recipiente contenedor de baterías del equipo EPS-UJATeam para la motocicleta que están desarrollando, es objeto de este proyecto su diseño, planificación y fabricación según los requerimientos solicitados.

Partiendo del modelo del bastidor de la motocicleta y de las baterías a alojar, se define la geometría de la envolvente.

Una vez determinada la forma final del contenedor de baterías, se dimensiona el espesor de las paredes para fabricarlo con materiales compuestos. Para ello se tendrá en cuenta la correcta orientación de las fibras de modo que en la dirección de esfuerzo máximo se tenga máxima resistencia.

Tras esto, y atendiendo al sistema de fabricación, se diseñará y fabricará el utillaje necesario para la fabricación del contenedor: Molde, contra-molde, etc.

Por último se procede a la fabricación del contenedor de baterías en materiales compuestos y, tras ello, se realizará un análisis de la calidad obtenida ensayando una serie de probetas.

La célula de baterías es un elemento de alta fragilidad. Es por ello que el contenedor debe garantizar en todo momento la seguridad de las baterías sin comprometer en exceso el peso de la motocicleta. Cada celda tiene un peso de 0,84 kg y se distribuyen en dos niveles de 11 y 15 baterías.

Es necesario que ocupe el espacio que queda entre el bastidor de la motocicleta sin entorpecer los elementos móviles de su interior.

2. ESTADO DEL ARTE

Las estructuras de materiales compuestos, y en concreto las estructuras de fibra de carbono, cada vez están más usadas en la industria. Gracias a sus características excepcionales de resistencia, flexibilidad y bajo peso; abren un amplio abanico de posibilidades en las industrias: aeroespacial, naval, automovilística, etc. La fibra de carbono ofrece una resistencia superior al acero, una flexibilidad similar y un peso inferior al del aluminio (Tabla 1).

- Entre las ventajas de los materiales compuestos se pueden señalar:
- Gran resistencia.
- Baja densidad.
- Posibilidad de fabricar piezas complejas.
- Economía de fabricación.
- Gran resistencia a la fatiga.
- Buenos amortiguadores de vibraciones.
- Son inertes a la corrosión.

En la última década, el uso de la fibra de carbono ha tenido un incremento progresivo siendo más acentuado en los últimos años debido a su aplicación en distintos sectores y productos. Su empleo en automoción, energías renovables y construcción civil es la principal razón de este crecimiento.

Según el Plan Estratégico 2014-2016 del 7 de marzo de 2014 de la empresa Carbures Europe, S.A. los sectores más importantes en cuanto al uso de materiales compuestos fueron:

Industria aeroespacial comercial: El consumo de fibra de carbono en este sector durante el año 2012 estaba en torno a 8.000 T y se espera una tasa media de crecimiento anual entre 2013 y 2018 de 9,6%. Los productos más destacados son el A-350, A-380 y A-320 de Airbus o el 787 y el 737 de Boeing. Sin embargo, hay otros productos muy importantes como aviones comerciales, militares, helicópteros, aviación general y ejecutiva, satélites, cohetes, misiles o drones.

Industria del transporte/automóvil: En 2012 la industria del transporte alcanzó un consumo del 4.800 T de fibra de carbono. Esta cantidad equivale al 18% de la cantidad total de fibra de carbono consumida durante ese año. Principalmente se destina a la fabricación de automóviles de alta gama; en mástiles, cascos y quillas de embarcaciones y en fabricación y restauración de puentes y túneles.

Industria energética: En este sector se puede destacar un consumo de 7.700 T de fibra de carbono para la fabricación de aerogeneradores y 2.200 T para la fabricación de tanques de almacenamiento de gas.

Equipamiento deportivo: Este sector constituye el tercer segmento más grande de fibra de carbono ya que abarca un horizonte muy amplio. Su uso va desde pequeños artículos deportivos como cañas de pescar, palos de golf, raquetas, bates de béisbol, esquís o snowboards hasta otros de mayores dimensiones como bicicletas, kayaks o vehículos de competición.

Un material compuesto es un material formado por diversos materiales que le confieren mejores características que las que tendría cada uno de ellos por separado (Tabla 2). Principalmente se componen de dos elementos básicos: la fibra y la matriz. Sin embargo, se pueden incorporar otros elementos como núcleos, adhesivos y recubrimientos.

FIBRAS	Fibras Cerámicas: Carbono de Silicio, Alúmina.
	Fibras Inorgánicas: Carbono, Vidrio, Boro.
	Fibras Orgánicas: Aramida, Polietileno.
	Fibras Metálicas: Acero, Tungsteno, Berilio.
MATRICES	Matrices Inorgánicas: Cemento, Geopolímeros, Yeso.
	Matrices Termoestables: Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimidias, Polieteramida.
	Matrices Termoplásticas: ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, Polietierimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS.
NÚCLEOS	Nidos de Abeja: Aluminio, Nomex, Polipropileno.
	Espumas: Poliuretano, Poliestireno, PVC.
	Sandwich Tejido 3D, Madera de Balsa.
CARGAS	Cargas reforzantes, cargas no redorzantes y aditivos
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos.
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi + Arena, Intumescientes, Mats

Tabla 2. Materias primas que conforman un material compuesto (Miravete, A. 2007).

2.1 FIBRAS

La fibra es el elemento que proporciona las principales propiedades mecánicas al compuesto. Constituyen el elemento resistente del material, sin embargo por sí solo no es capaz de soportar nada más que esfuerzos de tracción.

Es interesante destacar que el uso de fibras otorga unas propiedades mecánicas significativamente mejores que si se tratase como un cuerpo único. Esto es debido a que la densidad de defectos y dislocaciones en la fibra es inferior a la del cuerpo por tener una estructura cristalina más perfecta (Hull, D. 1987).

A diferencia de los materiales isotrópicos, las propiedades finales del compuesto dependerán de la dirección de las fibras ya que presenta mayor resistencia en la dirección longitudinal a las mismas.

En las figuras 2 y 3 se puede ver cómo afecta la dirección de la fibra a la resistencia del compuesto. Para una misma fibra y misma matriz, la resistencia del compuesto es mucho mayor cuando las fibras se disponen en la dirección del esfuerzo. Si por el contrario las fibras se disponen perpendiculares al compuesto, la resistencia final del compuesto será menor que la de los componentes por separado.

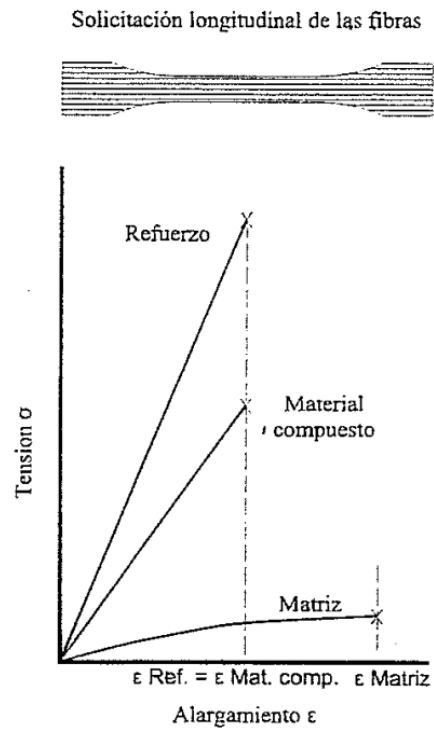


Figura 2. Diagrama Tensión-Alargamiento con fibra a 0° (Besednjak, A. 2005).

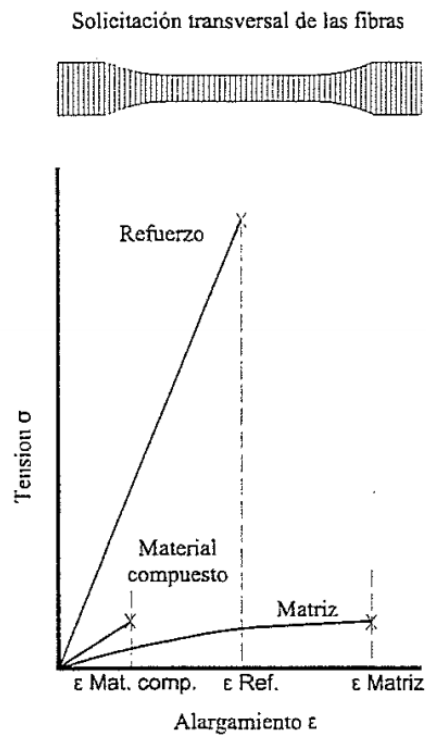


Figura 3. Diagrama Tensión-Alargamiento con fibra a 90° (Besednjak, A. 2005).

En la tabla 3 se detallan las propiedades de las fibras más comunes.

Contenedor para baterías de motocicleta eléctrica, en compuesto fibra-resina

Fibra	Módulo (GPa)	Resistencia tracción (GPa)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia compresión (GPa)	Resistividad eléctrica (μ·Ω·m)	Módulo torsión (GPa)	Deformación rotura (%)
Fibras Orgánicas							
PBO	200-360	3,5-5,7	1,58	0,2		1,0	1-2
Kevlar 29	65	2,8	1,44	0,4		1,9	4,0
Kevlar 49	125	3,5	1,44	0,4		1,4	2,3
Kevlar 149	185	3,4	1,47	0,4		1,1	
Nomex	10	0,5	1,38				22
Spectra 900	117	2,6	0,97				
Spectra 1000	170	3,0	0,97	0,17		0,8	2
Vectran HS	65	2,8	1,41			0,6	3,3
Vectran M	53	1,1	1,4				2,0
PBI	55-100	3,0	1,4				30
Fibras Inorgánicas							
Vidrio E	75	3,5	2,58	>0,8	10 ³	28	4
Vidrio S	90	4,5	2,46	>1,1			
Boro	415	3,5	2,5-2,6	5,9	8,3	139	
Nicalon	200	2,8	2,8	3,1	10 ⁷		
Nextel 440	186	2,1	3,05				
CVD	400	3,45	3,0				
FP	350-380	1,7	3,7	6,9		122	
Asbesto	169	3,1	2,5	2,5			
Fibras de carbono a partir de alquitrán							
Amoco P-25	160	1,4	1,9	1,15	13,0		0,9
A moco P-100	725	2,2	2,15	0,48	3,0	4,7	0,32
Nippon NT-20	200	2,8					
Nippon NT-60	595	3,0					
Fibras de carbono a partir de PAN							
T-300	235	3,2	1,76	2,88	15	15	1,4
T-1000	295	7,1	1,82	2,76	14		2,4
GY-70	520	1,8	1,96	1,06	6,5		0,36
A S4	235	3,6	1,8	2,69	15	17	1,6
M 60J	585	3,8	1,9	1,67	8		0,7
Alambres metálicos							
Acero Inox. (50<Ø<250μm)	198	1,0-1,4	8				
Tungsteno (Ø<25μm)	360	5,5	19,3				
Berilio	300	1,8	1,85				
Fibras textiles							
Poliéster (PET)	3-10	0,4-0,8	1,39				
Nylon 66	1-5	0,3-0,8	1,14				

Tabla 3. Propiedades de fibras (Miravete, A. 2007).

Por sus buenas propiedades mecánicas, la fibra de carbono es uno de los principales elementos de los materiales compuesto en la industria naval y aeronáutica. Es un material muy completo ya que presenta alta resistencia tanto a la tracción como a la flexión. Según el proceso al que se someten en su fabricación se pueden clasificar como de alto módulo o de alta resistencia.

Además es un material muy resistente a la fatiga debido a cargas cíclicas. Cuenta con una alta rigidez; bajo coeficiente de expansión térmica; permeabilidad a rayos X y a ondas electromagnéticas; auto-lubricación; elevada amortiguación; alta resistencia a la corrosión; alta conductividad eléctrica y no presenta plasticidad, de modo que el límite de rotura coincide con el límite elástico.

Según la temperatura de obtención de la fibra de carbono se pueden diferenciar tres tipos:

- Fibras de alta tenacidad (HT): Tienen una resistencia y tenacidad superior a la fibra de vidrio pero inferior al resto de fibras de carbono.
- Fibras de alto módulo (HM): Son fibras con un módulo de elasticidad muy alto y bajo alargamiento de rotura.
- Fibras de módulo intermedio (IM): Son fibras con propiedades intermedia de rigidez y resistencia.

La fibra de carbono se puede encontrar en forma de mecha, de tejido, de tejido híbrido o de pre-impregnados.

- Una mecha es un conjunto de fibras de carbono formado por entre 500 y 100.000 hebras de 5 a 7 μm si son fibras de PAN o de 10 a 12 μm si son fibras derivadas del alquitrán.
- Un tejido es la unión de mechas de entre 24.000 y 80.000 fibras que pueden disponerse de forma unidireccional o multidireccional.
- Un tejido híbrido es la unión de mechas de distintos tipos de fibras.
- Un pre-impregnado es un tejido de fibra de carbono recubierto de una resina epoxi que se activará al alcanzar unas condiciones de temperatura determinadas. Por ello es necesario almacenar el material en cámaras frigoríficas hasta el momento de su uso.

2.1.2 Estructuras textiles

Para mejorar las propiedades de las fibras, estas se disponen según tres tipos de configuraciones denominadas estructuras textiles: fieltros, sistemas mallados y sistemas no mallados.

Los fieltros o mats son estructuras textiles compuestas por fibras continuas, hilvanadas o cortadas distribuidas aleatoriamente sobre el plano de modo que se tienen las mismas propiedades en las dos direcciones principales del plano (Figuras 4 y 5). Con esto se consigue que la resistencia al impacto y a la abrasión sea mayor. Por otro lado se reduce la resistencia y la rigidez.

Dentro de los sistemas no mallados encontramos los tejidos (Figuras 6 a 9), los ensamblados y los trenzados.

Los tejidos son estructuras textiles en los que se entrecruzan fibras perpendiculares, la urdimbre y la trama (Figura 6). Las configuraciones más comunes son:

- Tafetán o tela: Los hilos de trama y urdimbre se entrecruzan de forma alternativa entre sí. También son conocidos como tejido convencional (Figura 7).
- Sarga: Los hilos de trama se entrelazan con los de urdimbre saltándose uno o varios hilos (Figura 8). Este tipo de tejido es el que da el acabado tan característico de la fibra de carbono.
- Satén: Los hilos de urdimbre se entrelazan con los de trama saltándose uno o varios hilos (Figura 9). Con esto se consigue un tejido más flexible.

Por otro lado, en los ensamblados se cosen diferentes capas orientadas en distintas direcciones (Figura 10). A diferencia de los tejidos, en los ensamblados las capas están en distinto nivel (Figura 11). Los trenzados se tejen en forma de calcetín o de cinta.

Los sistemas mallados son estructuras textiles en los que las fibras son malladas o encadenadas mediante máquinas de punto (Figuras 12 y 13).

A la hora de designar el laminado se parte de una dirección X que suele coincidir con la dirección principal para establecer el ángulo 0° . A partir de ahí se establecen los distintos ángulos de cada lamina teniendo en cuenta que serán positivos si son en sentido horario.

Si el laminado es simétrico se designa mediante los ángulos de cada lámina de exterior a centro separados por comas y encerrados entre corchetes o paréntesis con subíndice "S". Para el caso de un laminado con número impar de caras, se notará el ángulo correspondiente a la capa central con una barra horizontal sobre él. Si por el contrario no es simétrico, es necesario indicar los ángulos de un extremo a otro del laminado y se pondrá subíndice "T".

Si dos o más laminas consecutivas tienen la misma orientación, puedes simplificarse su notación designando su ángulo con el número de capas de subíndice. Sin embargo si tienen signos distintos en lugar del subíndice se recurre al signo " \pm " delante del ángulo.

Se pueden designar otros elementos como Rc (MAT) o núcleos sándwich.

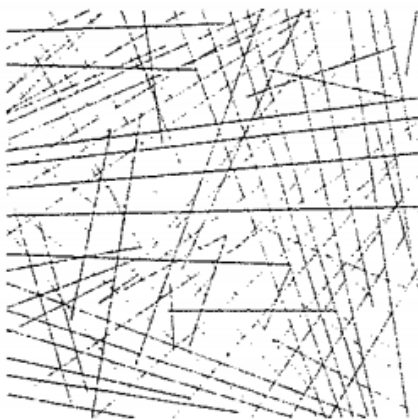


Figura 4. Mat de fibras cortadas (Besednjak, A. 2005).

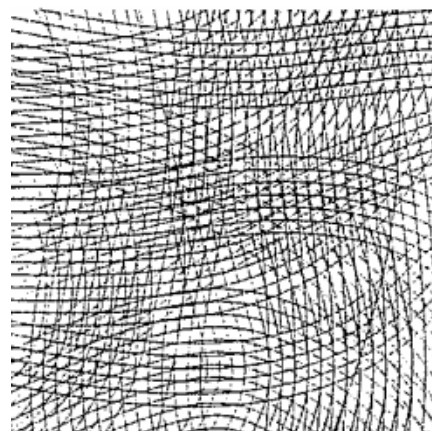


Figura 5. Mat de fibras continuas (Besednjak, A. 2005).

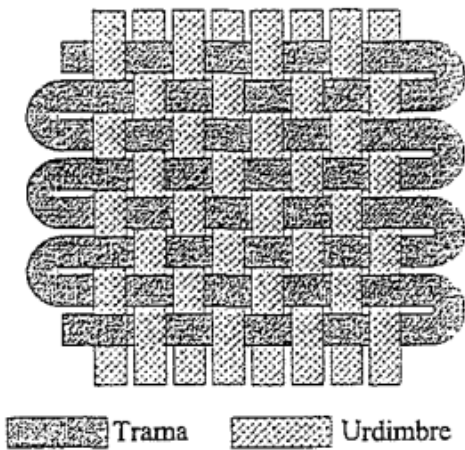


Figura 6. Esquema de tejido (Besednjak, A. 2005).

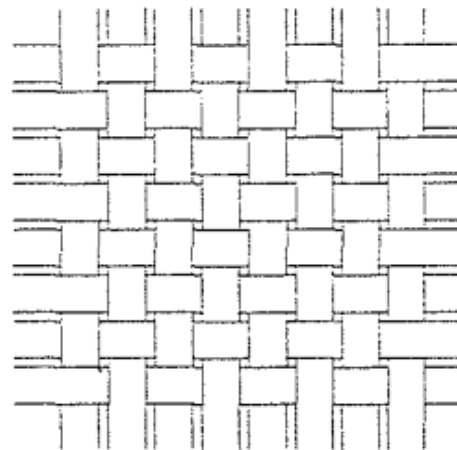


Figura 7. Tejido convencional (Besednjak, A. 2005).

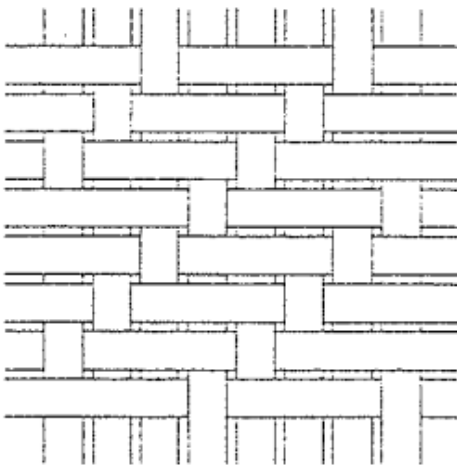


Figura 8. Tejido Sarga (Besednjak, A. 2005).

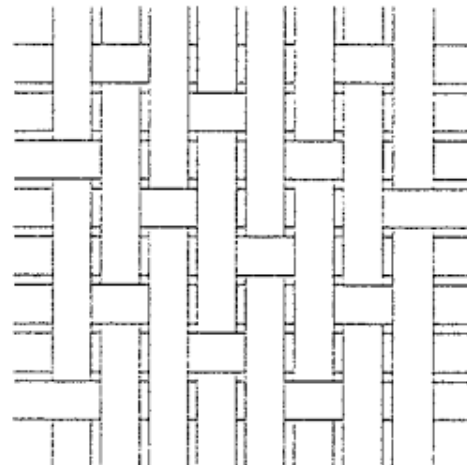


Figura 9. Tejido Satén (Besednjak, A. 2005).

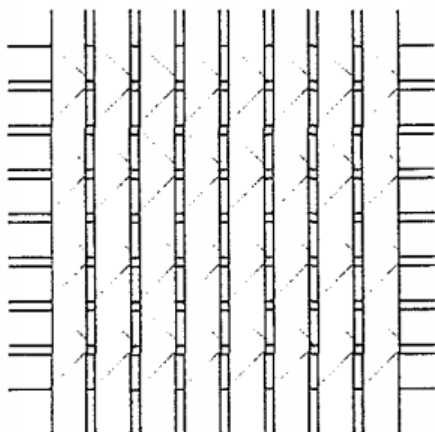


Figura 10. Ensamblado biaxial (Besednjak, A. 2005).

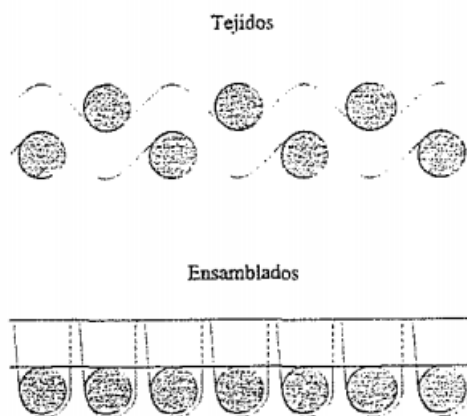


Figura 11. Diferencia entre tejidos y ensambles (Besednjak, A. 2005).

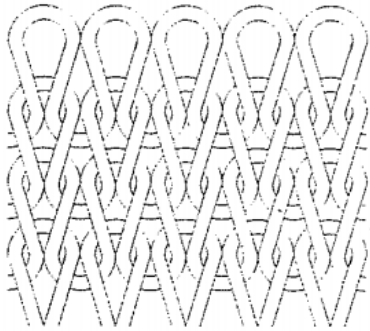


Figura 12. Mallado (Besednjak, A. 2005).

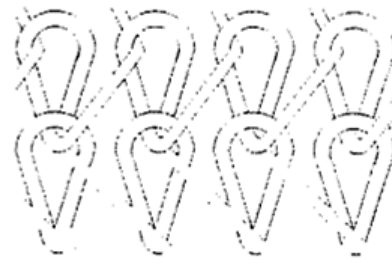


Figura 13. Encadenado (Besednjak, A. 2005).

Existe otro tipo de compuesto a partir de pequeñas fibras cortadas llamadas Wiskers que se combinan con una matriz de resina donde la matriz es el elemento principal del compuesto y la fibra actúa como refuerzo secundario. Ya que la fibra no hace el papel de estructura, no se considera un tejido.

2.2 MATRICES

Las matrices son componentes que sirven como elemento aglutinante de las fibras para soportar los esfuerzos de compresión. Transmiten los esfuerzos a las fibras y las protegen de agentes externos como la humedad, ataque químico...

Estas se pueden clasificar como :

Inorgánicas	Cemento, Geopolímeros, Yeso, Matrices Cerámicas, Matrices Metálicas	
Orgánicas	Termoestables	Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres Cianato, Bismaleimidas, Poliidmidas, Polieteramidas.
	Termoplásticas	Policloruro de Vinilo, Copolímeros de Estireno, Polietileno, Polipropileno, Policarbonato, Polimetacrilato de Metilo, Acetato, Poliestireno, Polioximetileno, Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS

Tabla 4. Clasificación de diferentes matrices utilizadas en materiales compuestos (Miravete, A. 2007).

Las matrices constituidas por resinas orgánicas termoestables son las más importantes en la fabricación con materiales compuestos. Las resinas orgánicas son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos base.

Si además la matriz orgánica es de tipo termoestable, las fuerzas de unión entre las fibras del compuesto le confieren una resistencia similar a la propia resistencia de los filamentos, de modo que se rompen antes de separarse. Otra propiedad muy importante en este tipo de matrices es que no experimentan cambios de estado con la variación de la temperatura.

En función de la temperatura de utilización, las resinas se pueden clasificar según la tabla 5.

Bajas Temperaturas	Poliéster
Medias Temperaturas	Vinilester Epoxi
Medias-Altas Temperaturas	Fenólica
Altas Temperaturas	Bismaleimida Poliimida Esteres cianato Polieteramida

Tabla 5. Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura de utilización (Miravete, A. 2007).

La resina epoxi es un polímero termo-endurecible que cuenta con dos o más funciones epoxídicas en su molécula. Esto le confiere una dureza superior a las resinas de poliéster. También presenta una alta adherencia a distintas fibras y una baja concentración en el proceso de polimerización. Estas resinas se pueden clasificar en función de su estructura molecular (tabla 6) o según su aplicación (tabla 7).

Para que se produzca el curado de la resina epoxi es necesaria la reacción con un agente catalizador o acelerador. También se suele combinar con otros aditivos para mejorar sus prestaciones y facilitar el proceso de conformado. Estos agentes de curado se pueden clasificar según la tabla 8.

TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno)		Presenta alta densidad de entrecruzamiento que le confiere un alto módulo de Young y una alta temperatura de servicio. Su desventaja es que posee una baja deformación de rotura que puede producir delaminaciones antes del impacto y baja resistencia a compresión después del mismo.
DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A)		Tiene una densidad de entrecruzamiento menor por lo que presenta una mayor deformación a rotura, sin embargo, su módulo de Young es más bajo que la anterior.
Otras resinas epóxicas	Novolacas	Curan a mayor densidad de entrecruzamiento que las TGMDA. La deformación de rotura es menor.
	Trifuncionales	Tienen propiedades intermedias
	Bisfenol F	Es similar al Bisfenol A con una viscosidad menor.
	Alifáticas	Son muy usadas para RTM, enrollamiento en húmedo y para laminados debido a su baja viscosidad.

Tabla 6. Clasificación de resinas epoxi en función de su estructura molecular (Miravete, A. 2007).

Resinas para laminado	Tienen baja viscosidad ya que principalmente se usan a temperatura ambiente. Su componente principal es el Bisfenol A con un diluyente para reducir su viscosidad.
Resinas para enrollamiento filamentario	Son resinas a partir de Bisfenol A combinadas con diluyentes reactivos (epoxis alifáticas). En la industria aeroespacial se curan a altas temperaturas con aminas aromáticas o anhídridos.
Resinas para RTM	Son resinas de baja viscosidad de Bisfenol A o Bisfenol F y agentes de curado de aminas aromáticas o cicloalifáticas.
Preimpregnados de curado a 175°C	Son resinas epoxi a partir de TGMDA combinadas con resinas de menores propiedades. Se curan con aminas aromáticas combinadas con aceleradores.
Preimpregnados de curado a 120°C	Se componen de Bisfenol A con formulaciones complejas.
Preimpregnados de curado a 60-120°C	Son preimpregnados diseñados para curar con baja presión de vacío mediante bolsa de vacío.

Tabla 7. Clasificación de las resinas según su aplicación (Miravete, A. 2007).

Aminas	Alifáticas	Curan la resina epoxi a temperatura ambiente.
	Cicloalifáticas	Gelifican la resina epoxi a temperatura ambiente, sin embargo, necesitan de un post-curado a temperatura entre 120 y 175°C.
	Aromáticas	Presentan las mejores propiedades mecánicas pero necesitan un curado a temperatura entre 120 y 175°C.
Agentes catalíticos	Usan varios agentes catalíticos combinados con agentes de curado como Imidazoles o Diciandiamida para curar la resina a 120°C.	
Anhídridos	Se usan principalmente en enrollamiento filamentario húmedo, en laminados preimpregnados y en otras aplicaciones eléctricas para curar la resina a temperatura entre 120 y 175°C.	

Tabla 8. Agentes de curado para resinas de tipo epoxi (Miravete, A. 2007).

Una vez que entran en contacto la resina y el catalizador se inicia el proceso de endurecimiento de la resina. Como se puede ver en la figura 14, la mezcla de resina y catalizador se encuentra en estado líquido hasta alcanzar el punto de gel. En este punto comienza a aumentar la viscosidad de la mezcla debido al calentamiento producido por la reacción.

Cuando la mezcla se encuentra en la fase de gel no puede seguir impregnando las fibras. Por eso es necesario conocer el punto de gel ya que determinará la duración máxima del proceso de fabricación.

Tras alcanzar el pico de temperatura, la reacción química se detiene produciendo un lento descenso de temperatura a lo largo del curado final. Esta etapa puede ir acompañada de un aumento de temperatura externo conocido con el nombre de postcurado con el que se consiguen mejores propiedades.

A diferencia de otras resinas, la resina epoxi requiere gran precisión en la cantidad de catalizador ya que las propiedades mecánicas y térmicas de la resina dependen del curado.

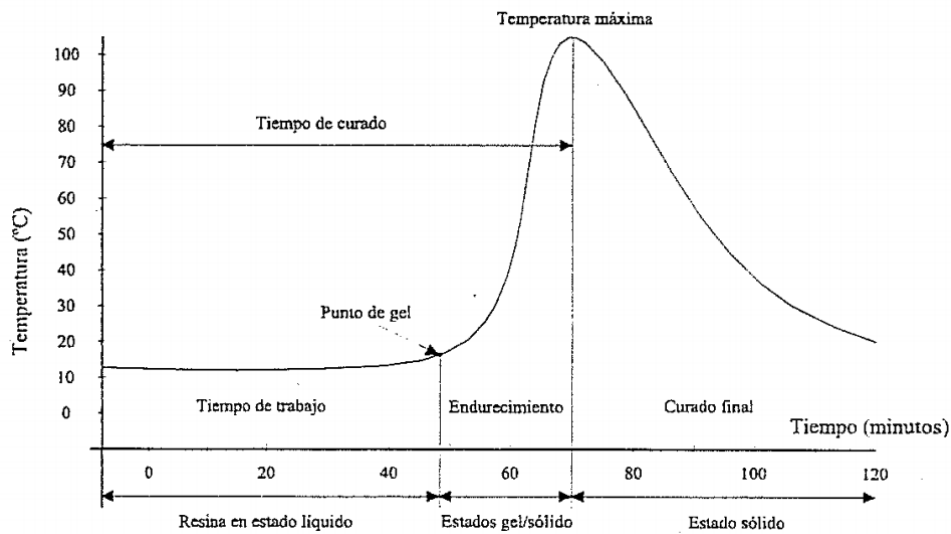


Figura 14. Curva exotérmica característica de una resina (Besednjak, A. 2005).

2.2.1 Interfase

Los esfuerzos a los que somete la pieza final se transmiten entre fibra y matriz a través de la interfase. Esta interfase une y refuerza las capas del compuesto para que no se desprendan. Cuanto más resistente sea la unión, más resistente y rígido será el compuesto. Por otro lado, un exceso de resistencia en la interfase puede aumentar la fragilidad y reducir la resistencia a fractura del compuesto.

Los mecanismos de adhesión se pueden clasificar como:

Adsorción y humectación	Debido a la rugosidad de fibra y matriz, se crean pequeñas cavidades entre las dos superficies que se sellan por acción de la resina creando una unión mecánica.
Interdifusión	Se pasan moléculas de una superficie polimérica a la red de otra superficie polimérica por difusión. Este efecto se produce en la fabricación con prepegs.
Atracción electrostática	Se produce la unión entre dos superficies cargadas una positiva y otra negativa. Este efecto no es de gran importancia por sí solo pero puede combinarse con otros para facilitar la unión.
Enlace químico	Se forma un enlace entre los grupos químicos de fibra y matriz. La fuerza de unión dependerá del número y tipo de enlaces.
Adhesión mecánica	Para que fibra y matriz queden perfectamente unidas es necesario que la resina se adapte perfectamente a todos los recovecos de la fibra. Para ello se necesita una resina que moje completamente la resina.

Tabla 9. Principales mecanismos de adhesión entre fibra y matriz (Miravete, A. 2007).

2.3 CARGAS Y ADITIVOS

Las cargas y aditivos son componentes que se añaden a la resina con la finalidad de mejorar el proceso de fabricación o las cualidades de la pieza final. Entre sus aportaciones más importantes se puede destacar las siguientes:

- Reducir el coste de las materias primas.
- Disminuir el peso de la pieza.
- Controlar la viscosidad de la resina durante el procesos de fabricación.
- Reducir la contracción de la matriz.
- Modificar las propiedades reológicas.
- Aumentar la rigidez.
- Mejorar el acabado superficial de la pieza.

Hay que tener presente en todo momento las indicaciones del fabricante de la resina ya que una cantidad excesiva de estas sustancias podría provocar una ligera disminución de la resistencia a tracción y a flexión.

Estos componentes se pueden clasificar según la siguiente tabla:

Cargas	Reforzantes	Son partículas que se añaden a la resina para evitar las concentraciones de tensiones y disminuir el peso de la pieza final. Las más usadas son las microesferas de vidrio.
	No reforzantes	Son partículas usadas para disminuir el coste del compuesto sin sacrificar sus propiedades. Como ejemplo están los carbonatos, silicatos o sílices. Existen otro tipo de cargas no reforzantes como las cargas ignífugas o las conductoras de calor y electricidad.
Aditivos	Sistemas catalíticos	Son sustancias que aceleran el curado de la resina. Entre otros están los inhibidores, endurecedores, estabilizantes térmicos y antioxidantes.
	Lubrificantes	Son sustancias que modifican las fuerzas de cohesión intermolecular de la resina.
	Agentes de desmoldeo	Son un tipo de lubricantes que disminuyen la adherencia de la superficie del compuesto ayudando a separarla del molde.
	Agentes tixotrópicos	Ayudan a adherir la resina en paredes verticales. El más usado es el polvo de sílice.
	Colorantes	Son sustancias solubles que dan color a la resina.
	Pastas colorantes	Son pigmentos adheridos a una pasta para mezclarse con la resina y darle color.
	Pigmentos	Son sustancias sólidas que se mezclan con las resinas para darles color.
	Agentes anti-ultravioleta	Son sustancias que protegen al compuesto de la acción de la radiación solar.
	Agentes anti-retracción	Son sustancias usadas en procesos de moldeo en caliente para mejorar el acabado superficial de la pieza.
Parafinas	Son sustancias que se añaden en la última etapa del laminado para favorecer el curado.	

Tabla 10. Clasificación de las cargas y aditivos (Besednjak, A. 2005).

2.3 NÚCLEOS

Para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, es frecuente usar núcleos ligeros entre capas de fibra y resina creando una estructura tipo sándwich.

Al separar dos capas de fibra mediante el núcleo se consigue aumentar la inercia de la sección aumentando la rigidez y la resistencia sin aumentar en gran medida el peso y el coste del compuesto (Tabla 11). Es por esto que los compuestos de tipo sándwich son muy utilizados en la industria aeronáutica, automoción, material deportivo...

El núcleo se sitúa entre dos capas de fibra, a modo de sándwich, y se une todo mediante un adhesivo (Figura 15). El adhesivo debe garantizar la perfecta unión entre el núcleo y las capas exteriores de fibra de modo que transmitan los esfuerzos cortantes desde una capa a otra.


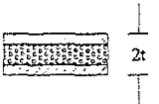
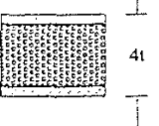
	<i>Construcción monolítica</i>	<i>Construcción sandwich</i>	<i>Construcción sandwich</i>
			
Rigidez relativa	100	700	3700
Resistencia relativa	100	350	925
Peso relativo	100	103	106

Tabla 11. Diferentes tipos de secciones (Besednjak, A. 2005).

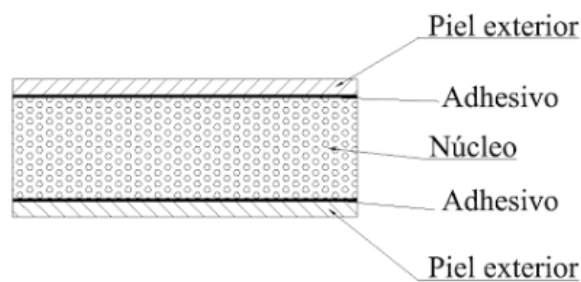


Figura 15. Estructura sándwich (Besednjak, A. 2005).

En la tabla siguiente se describen algunos de los núcleos más usados en materiales compuestos:

Madera de balsa	La madera de balsa es una madera muy rígida y ligera. Para usarla es necesario eliminar su humedad natural para evitar podredumbres internas. Al ser un material poroso tiene una capacidad de absorción de resina muy elevada por lo que es necesario sellarla antes. Debido a su alta rigidez es necesario cortarla en bloque pequeños unidos mediante ligaduras para poder adaptarse a la superficie.
Espumas de cloruro de polivinilo (PVC)	Dentro de todas las espumas, las espumas de PVC son las de mejores propiedades mecánicas y térmicas. Tienen una buena adaptabilidad a cualquier superficie.
Espuma de poliuretano (PU)	Estas espumas tienen buenas propiedades mecánicas aunque inferiores que las espumas de PVC. Sin embargo, a temperatura ambiente, las espumas de PU trabajan mejor e incluso soportan mayor rango de temperatura.
Espuma de poliestireno (PS)	Es una espuma muy ligera con baja resistencia mecánica. Es soluble al estireno por lo tanto no puede usarse con resinas de poliéster y viniléster.
Nido de abeja	Son estructuras que imitan la forma de los nidos de abeja hechas a partir de láminas delgadas de distintos materiales. Los materiales más usados son el aluminio, la fibra de vidrio o papel de aramida impregnados en resina fenólica, el papel y el polipropileno. Son muy ligeras y resistentes, sin embargo, su alto coste y la dificultad para encolarlas limitan su uso.
Fibras sintéticas no tejidas	Es un material de fibras sintéticas no tejidas usadas como núcleo de gran rigidez y bajo coste. Su aplicación difiere al resto de núcleos ya que, en lugar de encolarlas a las pieles exteriores, se aplican sobre ellas como si fuesen una capa más de fibra. Es por esto que presentan una excelente adaptabilidad a la superficie. El grado de absorción de resina dependerá de la destreza del operario.

Tabla 12. Distintos tipos de núcleos (Besednjak, A. 2005).

2.5 ADHESIVOS ESTRUCTURALES

Dada la complejidad de la geometría de algunas piezas que se fabrican a partir de materiales compuestos, es muy común descomponerlos en elementos más sencillos para ensamblarlos posteriormente dando lugar a la pieza final. Para poder llevar a cabo este proceso de ensamblado se recurre al uso de adhesivos estructurales.

Al igual que ocurre en la soldadura en los materiales metálicos, el adhesivo estructural que une un material compuesto debe tener una resistencia mecánica lo suficientemente elevada como para sobrepasar el límite elástico del material a unir sin llegar a romperse.

Por su alto poder de adherencia en cualquier tipo de superficie, poca concentración durante el curado, altas propiedades mecánicas, gran resistencia química y amplio rango de resistencia a la acción de la temperatura; las resinas epoxi son muy usadas en la unión de materiales compuestos.

2.6 RECUBRIMIENTOS

El acabado final del material compuesto es muy importante y no solo estéticamente. Un buen recubrimiento exterior puede ayudar a alargar la vida útil del material. Esto depende del ambiente de trabajo al que se someta la pieza. En la tabla 13 se puede ver el tipo de recubrimiento adecuado para cada situación.

Ambiente de trabajo	Tipo de recubrimiento
Agentes medioambientales	Gel Coats
Agentes abrasivos	Metálicos
	Cerámicos
	Fenólicos
	Epoxi/arena
	Termoplásticos
Fuego	Tejidos cerámicos
	Pinturas intumescentes
	Mats endotérmicos
	Mats de vidrio
	Mats intumescentes
	Sistemas cerámicos-intumescentes
Agentes químicos	PVC
	Polipropileno
	PVDF
	PTFE
	Polietileno

Tabla 13. Clasificación de los recubrimientos según su función (Miravete, 2007).

2.7 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS

2.7.1 Propiedades físicas

2.7.1.1 Fracción volumétrica de fibra

La fracción volumétrica de fibra es la relación volumétrica que ocupa la fibra dentro del compuesto. Es uno de los parámetros más importantes ya que afecta en gran medida a su comportamiento mecánico.

Para obtener el valor de la fracción volumétrica de fibra es necesario determinar la densidad del compuesto y conocer la densidad de la resina y la fibra que lo conforman. Este método considera que la cantidad de huecos es despreciable.

Las fracciones volumétricas de fibra y matriz se pueden calcular como:

$$v_f = \frac{V_f}{V_T} ; \quad v_m = \frac{V_m}{V_T}$$

Donde V_f , V_m , y V_T son el volumen de fibra, matriz y total respectivamente.

Debe cumplirse que:

$$v_f + v_m = 1$$

Teniendo en cuenta la definición de densidad, el volumen total de cada componente es:

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f}; \quad V_m = \frac{m_m}{\rho_m}$$

m_f y m_m son las masas de fibra y matriz y ρ_f y ρ_m sus densidades.

La masa de fibra puede conocerse mediante la superficie de la pieza S y el gramaje de las fibras g_f .

$$m_f = g_f \cdot S$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$v_f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} = \frac{\frac{g_f \cdot S}{\rho_f}}{\frac{g_f \cdot S}{\rho_f} + \frac{m_T - g_f \cdot S}{\rho_m}}$$

2.7.1.2 Densidad del compuesto

La densidad del compuesto puede obtenerse fácilmente gracias a las fracciones volumétricas anteriormente descritas. Sabiendo que la masa total del compuesto es la suma de la masa de fibra y matriz se tiene:

$$m_T = m_f + m_m$$

$$\rho_T \cdot V_T = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m$$

Dividiendo por el volumen total del compuesto V_T :

$$\rho_T = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m$$

2.7.1.3 Volumen de huecos

Sin considerar el compuesto como perfecto y teniendo en cuenta los huecos existentes entre fibra y matriz, se puede determinar el volumen de los huecos como:

$$V_h = 1 - \rho_T \cdot \left(\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \right)$$

La densidad del compuesto puede determinarse empíricamente según la norma ASTM D792-91. Para ello es necesario conocer el peso de la pieza en el aire m_a , y el peso sumergida en agua m_w . Así la densidad del compuesto será:

$$\rho_T = \frac{\rho_w \cdot m_a}{m_a - m_w}$$

2.7.2 Regla de las mezclas

La regla de las mezclas es una herramienta que permite calcular propiedades de los materiales como módulo de elasticidad, densidad, carga de rotura, conductividad térmica y eléctrica; a partir de las características de la fibra y la matriz así como de sus fracciones volumétricas V_f y V_m .

El inconveniente de este sistema es que solo permite el cálculo de las propiedades cuando las fibras se orientan todas en la misma dirección. Para poder calcular las propiedades de un material multi-direccional es necesario recurrir a las teorías de comportamiento mecánico de laminados.

Conociendo el módulo de elasticidad y la deformación unitaria de la fibra y la matriz, se puede calcular el esfuerzo que resiste cada componente como:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f ; \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (\text{Ec. 1})$$

Este esfuerzo debe ser paralelo a la dirección de las fibras.

Considerando el conjunto fibra-matriz se comporta como un único sólido y que tanto la fibra como la matriz tienen la misma deformación unitaria, se llega a la expresión:

$$E_{\parallel} = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f \quad \text{Para esfuerzo paralelo a la fibra.}$$

$$\frac{1}{E_{\perp}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad \text{Para esfuerzo perpendicular a la fibra.}$$

El módulo de Poisson en la dirección de la fibra se puede calcular como:

$$\nu_{ij} = - \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$

Donde i es la dirección de la carga y j la dirección perpendicular.

$$\nu_{21} = V_m \cdot \nu_m + V_f \cdot \nu_f$$

En la dirección perpendicular se puede obtener el módulo de Poisson con ayuda del teorema de reciprocidad como:

$$\nu_{12} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \nu_{21}$$

Donde E_1 y E_2 son el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras y perpendicular a ellas respectivamente.

Suponiendo una adherencia perfecta entre fibra y matriz y un comportamiento elástico, se puede estimar la tensión de rotura por tracción en la dirección de las fibras:

$$\sigma_{\parallel} = E_f \cdot \varepsilon_{\parallel} \cdot f_f + E_m \cdot \varepsilon_{\parallel} \cdot (1 - f_f)$$

Donde f_f es la fracción de fibra.

Esta ecuación supone una deformación lineal de la matriz. Este hecho no ocurre en la realidad, por ello se suele trabajar con la tensión que si lo es.

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_f \cdot f_f + \sigma_m \cdot (1 - f_f) \quad (\text{Ec. 2})$$

Al aproximarse al límite de resistencia del material se produce una alta deformación en el compuesto. Como se ha descrito anteriormente, en ese rango de deformaciones la matriz deja de deformarse linealmente de modo que no contribuye notablemente a la absorción de esfuerzos. Puede aproximarse entonces el módulo elástico en la dirección de la fibra como:

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= V_f \cdot E_f \\ \sigma_{\parallel} &= \sigma_f \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3})$$

Así, a bajos niveles de tensión hay una región que puede ser descrita mediante la regla de las mezclas completas (Ec. 2) y a niveles altos de tensión considerando que solo actúa la fibra (Ec. 3).

2.7.3 Ley de comportamiento de una lámina

Cuando un material compuesto con fibras continuas se somete a la acción de una carga en la dirección de las mismas, tanto matriz como fibras sufren las mismas deformaciones. Si la carga es aplicada en sentido perpendicular a las fibras, estas y la matriz estarán sometidas a la misma tensión (Ashby, M. F. 1996).

La ley de comportamiento de materiales elásticos lineales en el campo tridimensional para un material anisótropo.

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}$$

Donde C es el tensor de constantes elásticas o tensor de rigidez.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{Sim} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{11}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{pmatrix}$$

La expresión anterior se puede particularizar para el caso de un material ortótropo. Un material ortótropo es aquel que tiene simetría elástica en tres direcciones perpendiculares.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{11}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{pmatrix}$$

Invirtiéndola se obtiene la relación que determina el tensor de deformaciones.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{11}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{pmatrix} \quad (Ec. 4)$$

Mediante las ecuaciones de Hooke generalizadas se pueden obtener las constantes elásticas del material.

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{22} + \sigma_{33})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{33})$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\sigma_{33}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

$$\gamma_{12} = 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{12}$$

$$\gamma_{13} = 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{13}$$

$$\gamma_{23} = 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{23}$$

Mediante las ecuaciones de Lamé se pueden determinar los miembros de la matriz de flexibilidad.

$$\sigma_{11} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{11} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$$

$$\sigma_{22} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{22} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$$

$$\sigma_{33} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{33} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$$

$$\tau_{12} = G \cdot \gamma_{12}$$

$$\tau_{13} = G \cdot \gamma_{13}$$

$$\tau_{23} = G \cdot \gamma_{23}$$

2.6.3.1 Tensión plana en láminas según ejes principales

Para el estudio de los materiales compuestos es muy común simplificar las expresiones anteriores para el caso particular de tensión plana ya que es una de las formas más comunes de encontrarlas.

En este estado tensional solo se consideran los esfuerzos en dos dimensiones, suponiendo nulos los esfuerzos en una dimensión perpendicular a estas. Las deformaciones también se simplifican y solo se tiene en cuenta la deformación en la tercera dimensión por acción de los esfuerzos en las dimensiones restantes.

Esto implica que:

$$\sigma_{33} = 0; \tau_{13} = 0; \tau_{23} = 0; \gamma_{23} = 0; \gamma_{13} = 0; \epsilon_{33} = -\frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

Esto simplifica en gran medida la ecuación matricial 4:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{11}/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

Donde:

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}; S_{22} = \frac{1}{E_{22}}; S_{33} = \frac{1}{G_{12}}; S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{12}}{E_{22}}$$

Invertiendo la matriz de rigidez se obtiene la matriz de tensión tal que así:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot Q_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{11}/2 \end{pmatrix} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}^2}; Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}^2}; Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_{11}}{1 - \nu_{12}^2}; Q_{33} = G_{12};$$

2.7.3.1 Tensión plana en láminas según cualquier dirección

El espesor de una lámina de un material compuesto oscila entre 0,1 y 1,5 mm. Por ello, se combinan distintas láminas hasta conseguir la sección necesaria. Estas capas de fibra pueden ser alineadas en la misma dirección pero lo ideal es combinarlas en distintas direcciones para armar el compuesto en todas las direcciones.

Para expresar la relación entre los esfuerzos en las direcciones principales 1 y 2 y unas direcciones auxiliares X e Y desplazadas un ángulo θ de las anteriores se plantea la siguiente ecuación matricial con ayuda de la matriz de transporte o cambio de base:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (Ec. 6)$$

Los esfuerzos en estas nuevas direcciones producen unas deformaciones en las direcciones principales de valor:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (Ec. 7)$$

A partir de las ecuaciones 5, 6 y 7 se obtiene:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}; \\ & \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{pmatrix} \\ & \cdot \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}; \quad (Ec. 8) \end{aligned}$$

Para el caso en que los ejes X e Y coincidan con los ejes principales 1 y 2, se igualan las ecuaciones 5 y 8. Esto da lugar a:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot Q_{33} \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{pmatrix} \\ & \cdot \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Desarrollando esta ecuación matricial se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Q_{xx} = Q_{11} \cdot \cos^4 \theta + Q_{22} \cdot \sin^4 \theta + 2 \cdot Q_{12} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + 4 \cdot Q_{33} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta;$$

$$Q_{yy} = Q_{11} \cdot \sin^4 \theta + Q_{22} \cdot \cos^4 \theta + 2 \cdot Q_{12} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + 4 \cdot Q_{33} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta;$$

$$Q_{xy} = (Q_{11} + Q_{22}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta - 2 \cdot (Q_{12} + Q_{33}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + Q_{33} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta);$$

$$Q_{xz} = (Q_{11} + Q_{22} - 4 \cdot Q_{33}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta);$$

$$Q_{yz} = (Q_{11} - Q_{22} - 2 \cdot Q_{33}) \cdot \cos^3 \theta \cdot \sin \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{33}) \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta;$$

$$Q_{zz} = (Q_{11} - Q_{22} - 2 \cdot Q_{33}) \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{33}) \cdot \cos^3 \theta \cdot \sin \theta;$$

Del mismo modo se puede desarrollar el sistema de ecuaciones a partir de la matriz de flexibilidad para obtener:

$$S_{xx} = S_{11} \cdot \cos^4 \theta + S_{22} \cdot \sin^4 \theta + 2 \cdot S_{12} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{33} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta;$$

$$S_{yy} = S_{11} \cdot \sin^4 \theta + S_{22} \cdot \cos^4 \theta + 2 \cdot S_{12} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{33} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta;$$

$$S_{xy} = (S_{11} + S_{22} - S_{33}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + S_{12} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta);$$

$$S_{xz} = (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot \cos^3 \theta \cdot \sin \theta - (2 \cdot S_{22} - 2 \cdot S_{12} + S_{33}) \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta;$$

$$S_{yz} = (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta - (-2 \cdot S_{12} + 2 \cdot S_{22} - 2 \cdot S_{33}) \cdot \cos^3 \theta \cdot \sin \theta;$$

$$S_{zz} = (4 \cdot S_{11} + 4 \cdot S_{22} - 8 \cdot S_{12} - 2 \cdot S_{33}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + S_{33} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta);$$

A partir del término S_{11} de la matriz de rigidez se puede hallar el módulo de elasticidad en una dirección X:

$$E_{xx} = \frac{1}{S_{xx}} = \frac{E_1}{\cos^4 \theta + \frac{E_1}{E_2} \cdot \sin^4 \theta + \left(-2 \cdot \nu_{12} + \frac{E_1}{G_{12}}\right) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta};$$

Gracias a esta expresión se puede determinar el módulo elástico en cualquier dirección. Esta herramienta es muy útil para el cálculo de laminados con distintas orientaciones de capas.

2.7.3.2 Relación entre las constantes ingenieriles y términos de la matriz de rigidez

Los términos de la matriz de rigidez y las constantes ingenieriles coinciden solo cuando la orientación de la lámina es 0° o 90° . Si la orientación es 0° la probeta trabaja completamente a tracción; si es 90° trabaja a cortadura; sin embargo, para el resto de valores intermedios se produce un estado de tracción-cortadura. Esto ocasiona una deformación angular que disminuye las constantes ingenieriles.

En las figuras 16, 17 y 18 puede verse este efecto para tres direcciones principales distintas:

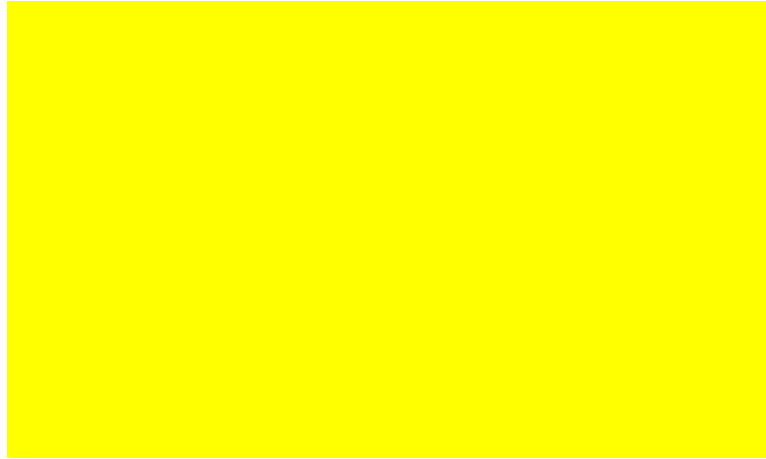


Figura 16. Relación entre la constante ingenieril E_1 y el término Q_{11} de la matriz de rigidez (Miravete, A. 2007).



Figura 17. Relación entre la constante ingenieril E_2 y el término Q_{22} de la matriz de rigidez (Miravete, A. 2007).

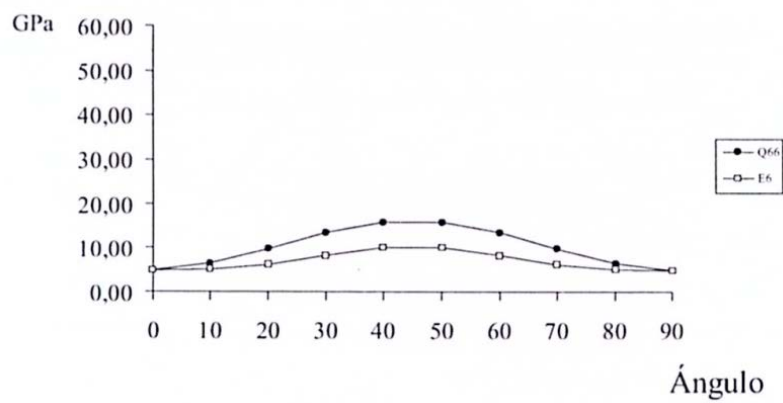


Figura 18. Relación entre la constante ingenieril E_3 y el término Q_{33} de la matriz de rigidez (Miravete, A. 2007).

2.7.3.3 Teoría de placas laminadas

La teoría clásica de placas laminadas estudia los fenómenos de tensión plana y flexión teniendo en cuenta las componentes planas de deformación ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 y las curvaturas k_1 , k_2 y k_3 . Desprecia los efectos de la deformación normal y de cortadura interplanar.

Para que el modelo sea válido debe cumplirse que:

- Las flechas producidas son pequeñas.
- La deformación es lineal a lo largo del espesor del laminado.
- Cada lamina se deforma solidariamente con el resto de capas.
- La relación entre la longitud y el espesor satisface la expresión : $L/e > 10$.

Tensión plana en placas simétricas

Los laminados simétricos constituyen el caso más sencillo de estudio de laminados. Para considerar un laminado como simétrico, cada capa de fibra debe estar alineada en la misma dirección que su simétrica respecto al centro del compuesto. Para el estudio del comportamiento del laminado únicamente es necesario tener en cuenta las componentes planas de deformación: ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 .

Los esfuerzos en el material por unidad de anchura vienen definidos como:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz = \int_h (Q) dz \{\epsilon\} + \int_h (Q) z dz \{k\}$$

Para placas simétricas sometidas a tensión plana se desprecia la componente de curvatura. Con lo cual, la expresión anterior puede desarrollarse del modo siguiente:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

Donde:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$z_0 = -\frac{h}{2}$$

$$z_k = z_{k-1} + h_k$$

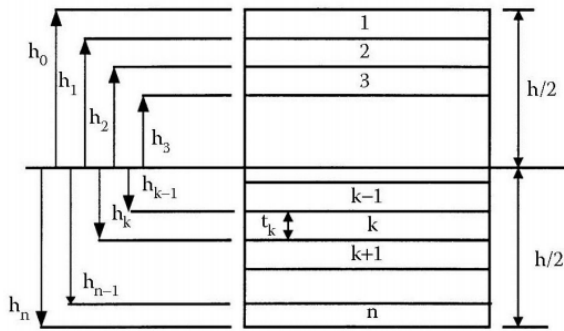


Figura 19. Coordenadas de localización de láminas en un laminado (Blanco, F. 2004).

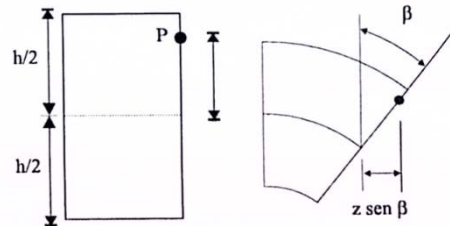


Figura 20. Deformación de una placa delgada (Miravete, A. 2007).

Flexión en placas simétricas

En laminados simétricos sometidos únicamente a esfuerzos de flexión en el plano del laminado solo se tiene en cuenta las curvaturas k_1 , k_2 y k_3 .

Los momentos en el material por unidad de anchura vienen definidos como:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z dz = \int_h (Q) z dz \{\epsilon\} = \int_h (Q) z^2 dz \{k\}$$

Desarrollando esta expresión se tiene:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix}$$

Donde:

$$B_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

$$z_0 = -\frac{h}{2}$$

$$z_k = z_{k-1} + h_k$$

Esfuerzos y flechas en vigas

Un alto porcentaje de las estructuras realizadas en materiales compuestos tiene un comportamiento similar al de una placa es por ello que está muy desarrollado el estudio de esta configuración. En las figuras 21 y 22 se recoge una relación de los esfuerzos más comunes y flechas que estos producen en vigas con distintas condiciones de contorno y carga.

Figura 21. Cortantes y flechas en vigas con distintas condiciones de carga y contorno (Miravete, A. 2007).


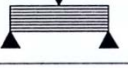
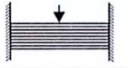

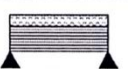
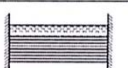
TIPO DE CARGA	M_{max}	M^*	δ_{max}	δ^*
	PL	1	$PL^3/3E^fI$	1
	$PL/4$	$1/4$	$PL^3/48E^fI$	$1/16$
	$PL/8$	$1/8$	$PL^3/192E^fI$	$1/64$
	$qL^2/2$	1	$qL^4/8E^fI$	1
	$qL^2/8$	$1/4$	$5qL^4/384E^fI$	$5/48$
	$qL^2/12$	$1/6$	$qL^4/384E^fI$	$1/48$

Figura 22. Momentos y flechas en vigas con distintas condiciones de carga y contorno (Miravete, A. 2007).

2.7.3.4 Teoría de estructuras tipo sándwich

Las estructuras tipo sándwich son laminados a partir de dos laminados exteriores y un núcleo ligero en el centro. Este tipo de estructuras son muy eficientes a flexión y a compresión. Para un laminado simétrico con alma simétrica, las deformaciones y las tensiones se distribuyen en la sección del modo siguiente:

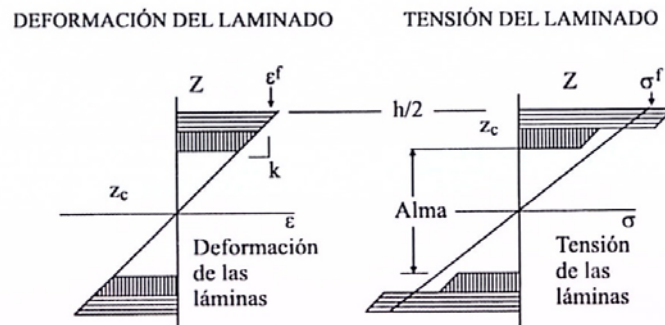


Figura 23. Deformaciones y tensiones en las pieles de una estructura sándwich (Miravete, A. 2007).

La rigidez a flexión puede obtenerse como:

$$(B) = 2 \int_{z_c}^{h/2} (Q) z^2 dz$$

Donde z_c es la parte superior del alma.

Para el estudio de laminados simétricos, esta ecuación puede simplificarse como un sumatorio de la mitad superior del laminado, con superíndice j , desde la superficie superior del alma z_c hasta la superficie superior del laminado.

$$(B) = \frac{2}{3} \sum_{j=c}^{m/2} (Q')^{(j)} (z_j^3 - z_{j-1}^3)$$

Otra forma de obtener las propiedades del laminado es calcular el sumatorio lámina a lámina, con superíndice t :

$$(B) = \frac{2h_0^3}{3} \sum_{t=c}^{m/2} (Q')^{(t)} (t^3 - (t-1)^3)$$

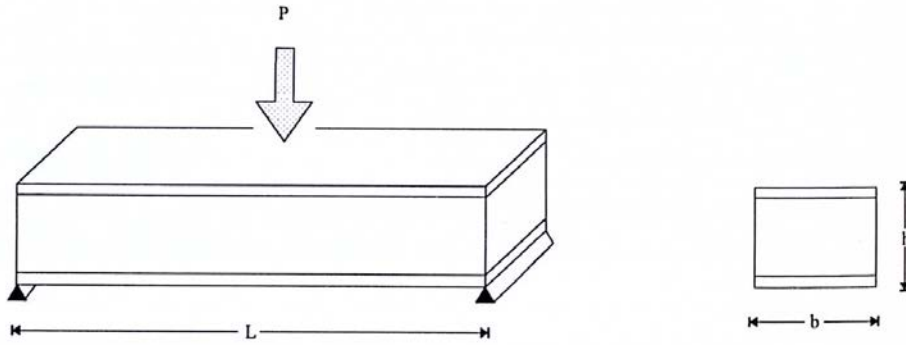


Figura 24. Viga sándwich biapoyada con carga puntual en el centro (Miravete, A. 2007).

Las deformaciones a lo largo del espesor del sándwich son lineales y continuas. Además, si el laminado es simétrico, la deformación será nula en el centro del sándwich (Figura 25).

Las tensiones son lineales dentro de cada lámina. Esto es debido a que, por su orientación, cada lámina tiene una rigidez distinta. En el núcleo, la rigidez es prácticamente nula. En la figura 26 puede observarse la distribución de tensiones para un laminado sándwich simétrico con pieles exteriores 0/90.

La distribución de tensiones de cortadura interlaminar es continua a lo largo del espesor del sándwich. A partir de la cara superior del núcleo comienza a disminuir hasta hacerse nula en la superficie del laminado (Figura 27).

En la figura 28 puede verse la gráfica que muestra la relación resistencia/tracción en función de la longitud/espesor de una viga biapoyada cargada puntualmente en el centro. La viga en cuestión es un compuesto sándwich con laminados unidireccionales de fibra de vidrio. Se observa que para una relación L/e menor que 70, el compuesto se comporta como un sándwich grueso y el fallo se produce por cortadura interlaminar. Sin embargo, a partir de este valor el compuesto falla por flexión.

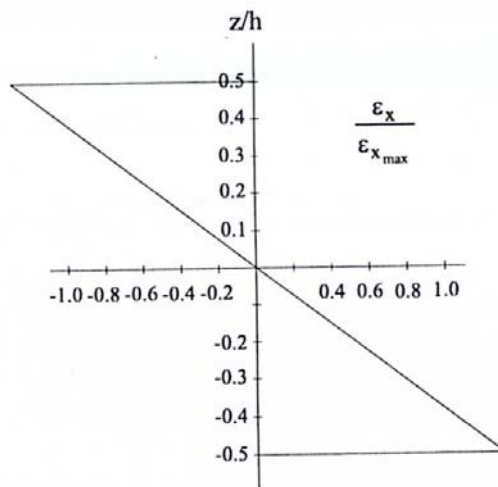


Figura 25. Distribución de deformaciones para una estructura sándwich (Miravete, A. 2007).

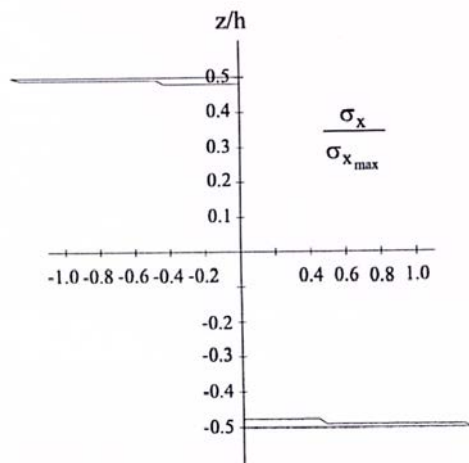


Figura 26. Distribución de tensiones para una estructura sándwich (Miravete, A. 2007).

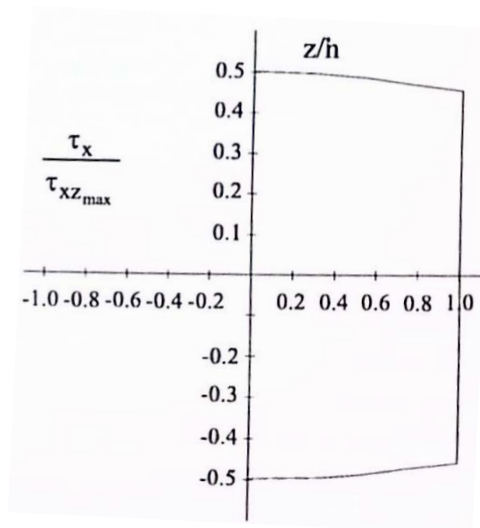


Figura 27. Distribución de tensiones de cortadura interlaminar a lo largo del espesor para una estructura sándwich (Miravete, A. 2007).

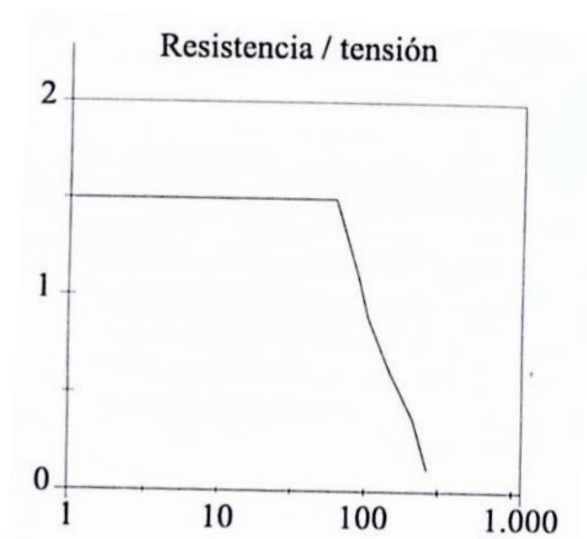


Figura 28. Relación entre resistencia/tensión y L/e en un laminado de fibra de vidrio con núcleo sándwich (Miravete, A. 2007).

Estudio de la placa sándwich biapoyada

Los esfuerzos en una placa sándwich rectangular como la de la figura 24, sometida a flexión cilíndrica, pueden obtenerse según las siguientes expresiones:

$$\sigma_f = \frac{M}{be(h - e)}$$

$$\tau_c = \frac{Q}{b(h - e)}$$

σ_f es la tensión máxima de flexión. Esta se produce en las pieles exteriores. τ_c es la tensión máxima de cortadura y tiene lugar en el centro del núcleo.

El desplazamiento máximo tiene lugar en el centro de la placa. Este desplazamiento tiene dos componentes, una debida a la acción de la flexión y la otra por el cortante:

$$w_T = w_f + w_c$$

$$w_f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$w_c = \frac{P \cdot l}{4 \cdot A \cdot G} = \frac{P \cdot l}{4 \cdot (h - e)b \cdot G}$$

En la figura 29 pueden verse un resumen de los principales modos de fallo de las estructuras sándwich.

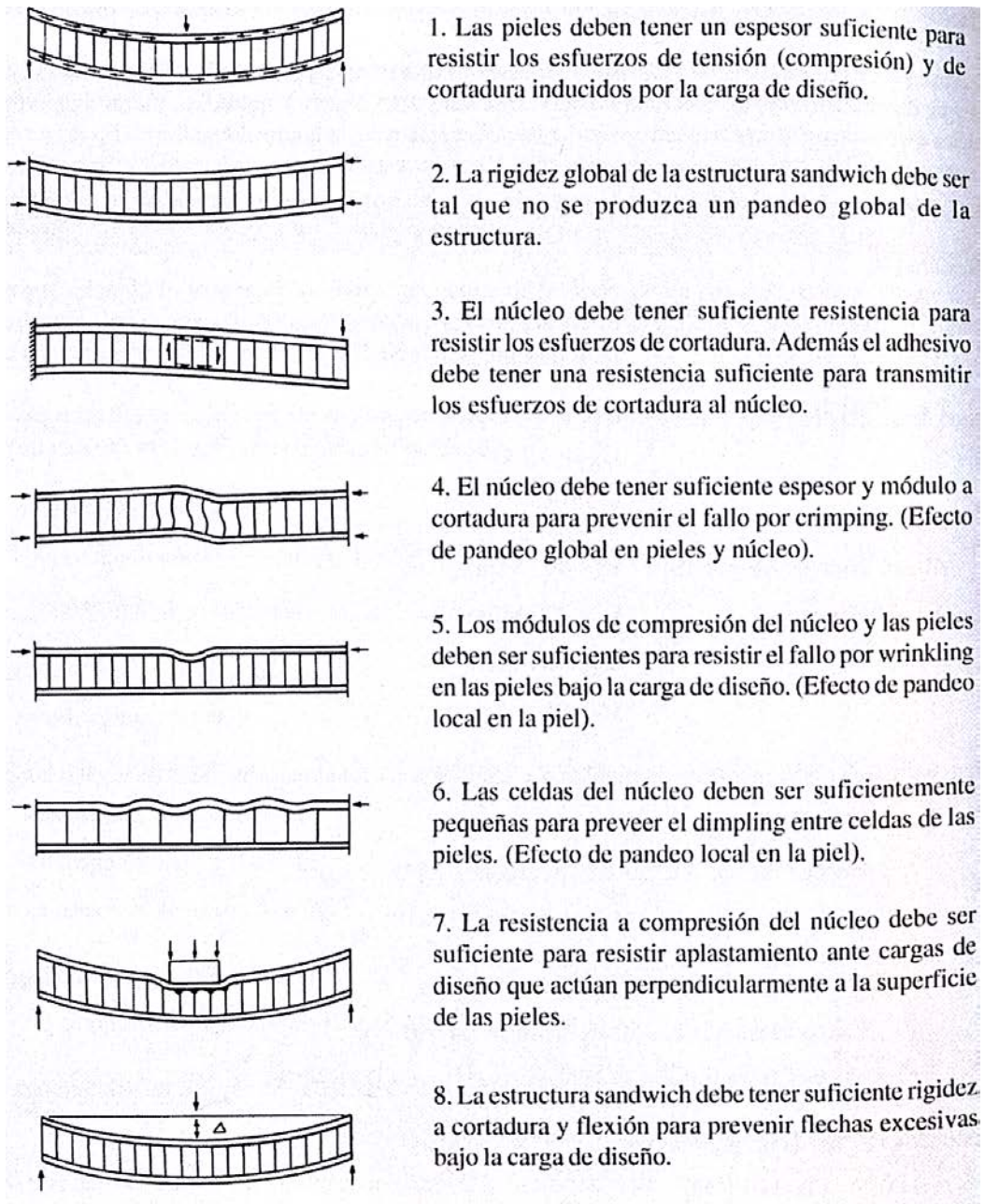


Figura 29. Modos de fallo en estructuras tipo sándwich (Miravete, A. 2007).

2.8 PROCESOS DE FABRICACIÓN

En la fabricación con materiales simples se parte de uno o varios materiales que mediante un proceso de fabricación dan lugar a un producto final. A diferencia de estos materiales, tanto la pieza a fabricar como el propio material surgen al mismo tiempo. La elección del proceso de fabricación juega un papel clave para la obtención del producto ya que este proceso determinará las propiedades del material.

En las tablas 14 y 15 se muestran los procesos de fabricación más importantes usados en la fabricación de materiales compuestos. Las propiedades más importantes de cada método pueden verse en las tablas 16 y 17.

TIPO DE MOLDE	PROCESO	DESCRIPCIÓN
MOLDE ABIERTO	MOLDEO POR VACÍO CON AUTOCLAVE CON PREIMPREGNADOS	En este proceso se usa un tipo de fibra preimpregnada de resina y en un estado de "semicurado" que al someterse a las altas temperaturas y presiones del autoclave cura sin necesidad de un molde cerrado
	PROCESADO DE PREIMPREGNADOS SIN AUTOCLAVE	Es un proceso similar al anterior pero el curado se realiza en horno, con lámparas de calor, vapor, microondas o inducción.
	COLOCACIÓN AUTOMÁTICA DE CINTAS Y FIBRAS PREIMPREGNADAS	Las mechas de fibra preimpregnadas se distribuyen directamente sobre el molde por medio de automatismos.
	ENROLLAMIENTO FILAMENTARIO	El filamento se enrolla automáticamente alrededor de un mandril y en la dirección especificada (0°, 45°, 90°...). Es un proceso exclusivo para figuras de revolución.
	MOLDEO POR CONTACTO A MANO	De forma manual, un operario especializado deposita la fibra sobre un molde para posteriormente impregnarlo con resina. Para acelerar el curado se usa un agente catalítico mezclado con la resina.
	MOLDEO POR PROYECCIÓN SIMULTÁNEA	Es una variante del proceso anterior en el que el operario deposita fibra, resina y catalizador sobre el molde al mismo tiempo con ayuda de una pistola de aire a presión.
	CENTRIFUGACIÓN	Se coloca la fibra dentro de un molde interior cilíndrico y se hace girar. Por medio de un dispensador desplazable se suministra resina y catalizador que gracias a la acción de la fuerza centrífuga impregna y compacta la fibra. Es un proceso exclusivo para figuras de revolución.

Tabla 14. Procesos de fabricación de materiales compuestos con molde abierto (Miravete, A. 2007).

TIPO DE MOLDE	PROCESO	DESCRIPCIÓN
MOLDE CERRADO	PULTRUSIÓN	Es un proceso que permite obtener perfiles continuos de sección constante de forma similar a las extrusión. Se hace pasar la fibra por un proceso de impregnado y posteriormente se arrastra por un molde continuo hasta completar su curado.
	PRENSA EN FRÍO	Este proceso es una alternativa de bajo costo del proceso SMC. Usa una molde inferior sobre el que se coloca la fibra y la resina que son compactadas con ayuda de una prensa móvil y sin aporte de calor.
	PRENSA EN CALIENTE	La prensa en caliente es una variante de la prensa en frio con la diferencia de que tanto el molde inferior como la prensa móvil son metálicas para resistir el aporte de calor.
	SISTEMA DE MOLDEO DE COMPUESTOS (SMC)	Es un método de moldeo por termo-compresión de preimpregnados que son procesados mediante un molde inferior y una prensa móvil metálicos con aplicación de calor.
	INYECCIÓN CON MOLDEO DE COMPUESTOS (BMC)	Fibra, resina y relleno son procesadas independientemente para su posterior mezclado. Esta mezcla se inyecta sobre un molde metálico caliente y se compacta mediante prensa metálica.
	MOLDEO POR INYECCIÓN DE TERMOESTABLES	Se vierten en una tolva fibra y resina en forma granulada. Estos se mezclan en un tornillo sinfín con aporte de calor hasta llegar a un molde metálico también calentado.
	RIM	Resina y catalizador son almacenadas en recipientes independientes. Ambos elementos son bombeados y mezclados para introducirlos en un molde cerrados hasta finalizar su curado.
	RRIM	Es una variante del proceso anterior que incorpora fibra molida a la mezcla en un porcentaje entorno al 20%
	SRIM	Es un proceso similar a los anteriores salvo que el material de refuerzo se encuentra localizado en el interior del molde, de modo que se consiguen piezas más resistentes.
	RTM	En este proceso se dispone la fibra de refuerzo sobre un molde metálico cerrado para posteriormente inyectar un flujo de resina a la vez que se aplica calor para acelerar el curado.
INFUSIÓN	Es una variación del RTM en el que la resina es succionada en lugar de inyectada.	

Tabla 15. Procesos de fabricación de materiales compuestos con molde cerrado (Miravete, A. 2007).

Contenedor para baterías de motocicleta eléctrica, en compuesto fibra-resina

Proceso	Ventajas	Inconvenientes	Máx presión	Máx Temp / viscosidad	Ciclo / rango V_f	Maquinaria	Uillaje
Pre-impregnación/vacío	Propiedades mecánicas muy elevadas, espesores y fracción F/M exactos	Coste materia prima elevado	1 - 10 bares	400 °C 5-10 p	2-10 horas 50%-70%	Autoclave, horno	El molde es una única pieza en preimpregnado o metálica
Enrollamiento	Proceso automático, propiedades mecánicas elevadas	Mal acabado exterior	No hay presión	Ambiente-200 °C 3.5-15 p	1-24 horas 40%-65%	Máquina de enrollamiento	El molde es una única pieza cilíndrica en metal, madera, epoxi, yeso o sal fundible
Método de contacto	No presenta limitaciones en cuanto a forma y dimensiones de la pieza	Propiedades mecánicas bajas, espesores y fracción F/M variable, coste laboral elevado	No hay presión	Ambiente-100 °C 10-15 p	5 horas-7 días 20%-40%	No se requiere maquinaria	El molde es una única pieza en MC, madera, escayola o metal
Método de Proyección	No presenta limitaciones en cuanto a formas y dimensiones de la pieza	Propiedades mecánicas muy bajas, espesores y fracción F/M variable, coste laboral alto	0-1 bar	Ambiente-100 °C 5-10 p	5-50 horas 15%-30%	Máquina de proyección	Molde metálico o de fibra de vidrio con poliéster
Centrifugación	Proceso automatizado, superficie exterior lisa	Elevados costes de maquinaria, series cortas	No hay presión	Ambiente-100 °C 5-10 p	1-24 horas 20%-50%	Maquinaria de centrifugación	El molde es una única pieza cilíndrica metálica

Tabla 16. Propiedades de algunos procesos de fabricación de materiales compuestos con molde abierto (Miravete, A. 2007).

Contenedor para baterías de motocicleta eléctrica, en compuesto fibra-resina

Proceso	Ventajas	Inconvenientes	Máx presión	Máx Temp / viscosidad	Ciclo / rango V _f	Maquinaria	Utillaje
Pultrusión	Proceso continuo y propiedades mecánicas altas	Solo se pueden hacer perfiles	No hay presión	180 °C 4-6 p	5-30 metros/min 30%-50%	Maquinaria de pultrusión	Molde y contramolde metálicos calefactados
Prensa en frío	Dos caras lisas, inversiones bajas	Propiedades mecánicas bajas, ciclo de moldeo largo	1-5 bares	100 °C 5-10 p	5-10 min 20%-40%	Prensa de acción rápida	Molde y contramolde de vidrio y poliéster o metálicos
Prensa en caliente	Alta calidad	Costes de maquinaria y utillaje elevados	1-10 bares	200 °C 5-10 p	5-20 min 20%-40%	Prensa	Molde y contramolde metálicos calentados
SMC	Ideal para series muy largas	Costes de maquinaria y utillaje elevado	40 - 80 bares	120 - 160 °C 100-1000 p	1-10 min 20%-50%	Prensa y dispensador de SMC	Molde y contramolde metálicos calentados
BMC	Ideal para series muy largas	Costes de maquinaria y utillaje elevado	100 bares	200 °C 100-1000 p	1-10 min 20%-40%	Prensa y dispensador de BMC	Molde y contramolde metálicos calentados
Inyección	Series muy largas	Propiedades mecánicas bajas, coste de maquinaria elevado	300-3000 bares	200-400 °C	1-5 minutos 10%-20%	Máquina de inyección	Molde y contramolde metálicos
RIM, RRIM Y SRIM	Series muy largas	Propiedades mecánicas bajas, coste de maquinaria elevado	10 bares	200 °C 1 p	1-5 min 15%-40%	Maquinaria de inyección y prensa	Molde y contramolde metálicos.
RTM	Libertad de formas y dimensiones, propiedades mecánicas altas.	Series medias	1-7 bares	250 °C 3-5 p	5horas-7días 20%-60%	Máquina de transferencia de resina	Molde y contramolde metálico para alta presión o MC para baja presión. Bolsa de vacío
Infusión	Libertad de formas y propiedades mecánicas altas	Series medias. Necesidad de mano de obra cualificada.	1 bar	60 °C 3-5 p	5horas-7días 20%-60%	Bomba de vacío	Molde de vidrio y poliéster o metálicos. Bolsa de vacío

Tabla 17. Propiedades de algunos procesos de fabricación de materiales compuestos con molde cerrado (Miravete, A. 2007).

3. MATERIALES

En este apartado se recogen tanto los materiales como los equipos que intervienen en el proceso de fabricación ordenados según el momento de su utilización.

3.1 MADERA DE DM

La madera de DM o densidad media es una madera artificial elaborada a partir de fibras de madera como viruta o serrín de pino y resina sintética (Figura 30). La mezcla obtenida es sometida a un proceso de termo-compresión.

Esta madera presenta una estructura uniforme y homogénea. A diferencia de otras maderas artificiales como el aglomerado, su textura lisa le da un acabado perfecto en sus caras y cantos. Al igual que la madera natural se puede fresar y tallar. Además, su estabilidad dimensional es muy superior a la madera natural. Sin embargo, su peso es más elevado.

La madera de DM es muy usada en la industria del mueble ya que su superficie lisa y compacta es excelente para lacar. Por su buena disposición al mecanizado también es muy usada en la fabricación de puertas o molduras en relieve.

Por todo esto, este tipo de madera puede servir como molde para figuras poco complejas y con muchas caras planas.

3.2 COLA VINILICA PVA

La cola vinílica, PVA o cola blanca, es un adhesivo obtenido por polimerización del acetato de vinilo (Figura 31). Sirve para unir materiales porosos como la madera, el papel o el corcho. Por ello puede ser empleado en la unión de las paredes de madera de DM que formarán el molde.

3.3 TIRAFONDOS

El tirafondo es un tornillo de rosca cónica que sirve para unir elementos sin rosca ya que es el propio tornillo el que realiza la rosca a medida que avanza (Figura 32). Es muy usado en carpintería en uniones desmontables.

Ya que en los procesos de vacío se someten los moldes a altas presiones, tanto tirafondos como cola blanca deberán garantizar la unión de las láminas de DM en todo momento.



Figura 30. Tableros de madera de DM.



Figura 31. Cola PVA Rayt.

Figura 32. Tirafondo para madera.

3.4 ESMALTE DE POLIURETANO ESMALPOLY 2/C AR

Esmalpoly 2/C AR es un esmalte acrílico de poliuretano de dos componentes que cataliza con isocianato alifático. Se emplea como capa de terminación en procesos de protección de elementos expuestos a la intemperie, atmósferas industriales, ambiente marino, atmósferas agresivas, salpicaduras de aceites, ácidos y álcalis. Ofrece gran resistencia a la abrasión, productos químicos y humedad.

Gracias a su alto brillo es ideal como capa final en moldes de todo tipo.



Figura 33. Esmalte de poliuretano Esmalpoly 2/C AR.

3.5 SELLADOR SEALER GP-034

Este sellador es un tapaporos para modelos y moldes de composite que al polimerizar forma una película transparente, flexible y de alta consistencia. Mejora el comportamiento del desmoldeante ya que sella la superficie del molde formando un escudo protector y evitando tanto el rechupe de micro-poros como la adhesión física o química. Se deben aplicar de 4 a 6 capas del sellador a mano mediante trapo suave de algodón o papel de cocina.



Figura 34. Sellador Sealer GP-034 (<http://www.resinascastro.com/>).

Modo de uso:

1. Aplicar el sellador en una zona pequeña con un trapo suave.
2. Frotar hasta dejar la superficie seca.
3. Repetir el proceso en la superficie total a sellar.
4. Esperar 15 minutos para aplicar capas siguientes.
5. Tras la última capa, esperar al menos 30 minutos antes de aplicar el desmoldeante.

Molde de metal	2
Molde de cristal	3
Molde de poliéster	4
Molde Epoxi	6 o más
Moldes nuevos	4

Tabla 18. Número de capas de sellador recomendadas según el tipo de molde (Zyvax).

3.6 DESMOLDEANTE FLEXZ

Este desmoldeante semipermanente tiene una capacidad alta de desmoldeo. Puede ser aplicado tanto con trapo como a pistola. Es válido para cualquier tipo de molde y proceso. Su acabado brillante reduce los tiempos de preparación del molde. Antes de aplicar el desmoldeante es necesario aplicar sellador para que realice su función correctamente.



Figura 35. Desmoldeante Flexz (<http://www.resinacastro.com/>).

3.7 CERA DESMOLDEANTE MIRROR GLAZE MEGUIARS

Esta cera desmoldeante se puede usar en fabricación de piezas con molde con cualquier tipo de resinas termoestables. Se puede usar sobre molde de madera, escayola, fibra o metal. Está especialmente diseñada para procesos de laminado por contacto a mano, proyección simultánea y RTM.



Figura 36. Cera desmoldeante Mirror Glaze.

Porcentaje de sólidos	28-30%
Color	Amarillento
Densidad	0,76 g/cm ³ a 60 °C
Viscosidad	Pasta a 25 °C
Olor	Tipo de hidrocarburo alifático
Punto de inflamación	37,8 °C
Caducidad	1 año

Tabla 19. Principales propiedades de la cera desmoldeante Mirror Glaze (Meguiars).

Modo de uso:

1. Aplicar sobre un molde limpio una capa fina y dejar secar entre 15 y 20 minutos a temperatura de 23 °C.
2. Pulir con trapos de algodón.
3. Aplicar tres capas hasta que la superficie esté lustrosa y sellada.
4. Moldear piezas hasta que una de las piezas muestre mayor resistencia al desmoldeo y aplicar de nuevo de 2 a 3 capas.

3.8 TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono es el material más importante, junto con la resina epoxi, que componen el material compuesto. Como se detalla en el punto anterior de este documento, la fibra de carbono se compone de hebras de carbono debidamente entrelazadas. Gracias a su alta resistencia puede llegar a soportar una carga elevada.

Sin embargo, la fibra solo ofrece resistencia en la dirección longitudinal. Es por ello que suele encontrarse en el mercado en forma de tejido. De las distintas configuraciones existentes, se ha optado por un tejido tipo Sarga para las capas exteriores del compuesto y tejido triaxial para las capas interiores.

3.8.1 TEJIDO SARGA 200 g/m²

El tejido sarga es un tipo ligamento en el que los hilos de la trama se entrelazan en la urdimbre de forma escalonada, saltándose dos hilos de la urdimbre. Este tipo de tejido es el que da el típico acabado de fibra de carbono en forma de diagonal (Figura 37).

Es un tejido muy recomendado para aplicaciones cosméticas ya que cuenta con un ensimaje que le confiere un gran acabado superficial. Debido a su disposición biaxial, permite un mejor reparto de las cargas por la superficie del material compuesto. Sus características principales quedan recogidas en la tabla 20.

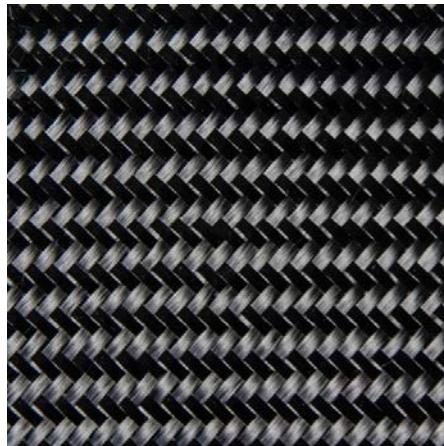


Figura 37. Fibra de carbono Sarga 200g/m².

Tipo de suministro	1 m ²
Peso	200g/m ²
Espesor	0,3 mm
Densidad	1,79 g/cm ³
Tipo de hilo	3k 200 tex
Módulo de Elasticidad	235 GPa
Resistencia a la tracción	4.400 MPa

Tabla 20. Ficha técnica de la fibra de carbono Sarga 200g/m².

3.8.2 TEJIDO TRIAXIAL de 450g/m²

Este tejido (Figura 38) se compone de tres laminas de fibra de carbono Torayca T700S, una fibra de alta resistencia y módulo de elasticidad medio. Está diseñada para aplicaciones de alta resistencia a la tracción como recipientes a presión, uso recreativo e industrial.

El tejido se compone fibras de 7µm en mechas de 12K de 800 tex (800g/1000m). Se entrelazan en tres capas distintas con una constitución 0/-45/+45 (Figura 39). De este modo ofrece mayor resistencia en dos direcciones distintas.



Figura 38. Fibra de carbono triaxial 0/-45/45 450g/m².

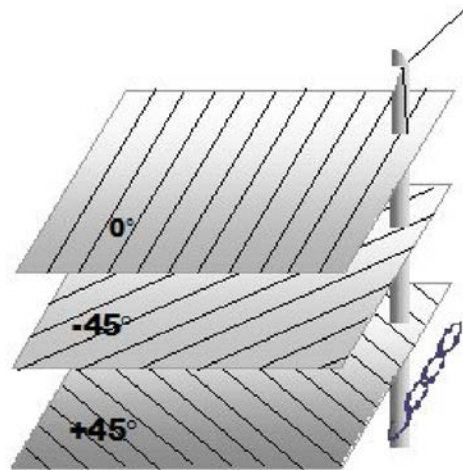


Figura 39. Disposición de las capas del tejido triaxial (Formax).

Tipo de suministro	1,5 m ²
Densidad superficial	450g/m ²
Espesor	0,4 mm
Densidad volumétrica	1,80 g/cm ³
Tipo de hilo	3k 200 tex
Módulo de Elasticidad	230 GPa
Resistencia a la tracción	4.900 MPa
Deformación	2,1%
Resistividad eléctrica	0,0016 Ω·cm

Tabla 21. Ficha técnica de la fibra de carbono triaxial 0/-45/45 450g/m².

Resistencia a la tracción a 0°	2.550 MPa
Resistencia a la tracción a 90°	69 MPa
Módulo de Elasticidad	135 GPa
Deformación	1,7%
Resistencia a la compresión	1.470 MPa
Resistencia a la flexión	1.670 MPa
Módulo de Elasticidad a flexión	120 GPa

Tabla 22. Propiedades del compuesto con Resina Epoxi Toray con 60% en volumen de fibra (Torayca).

3.9 NÚCLEO SANDWICH SORIC XF 3mm

El núcleo Soric XF es una estructura ligera compuesta por celdas hexagonales de poliéster que se usa para aumentar la inercia de la sección del material compuesto sin comprometer su peso (Figura 40). Es muy usado en procesos de molde cerrado como infusión o RTM. Por ello debe resistir la presión de vacío o inyección de estos procesos. Se puede combinar con cualquier tipo de resina: poliéster, viniléster, fenólica, epoxi, etc.

Este componente se sitúa entre las capas interiores y exteriores que componen la pared del contenedor salvo en unas pequeñas aberturas en la cara superior e inferior del molde destinadas a ventilación de baterías.

Ya que estas zonas se encuentran en posición vertical y no soportan grandes esfuerzos, no necesitan mayor inercia. Por tanto se puede prescindir del efecto que el núcleo proporciona.

Figura 40. Núcleo Soric XF de 3mm.

En la siguiente tabla se recogen las propiedades más importantes de núcleo Soric XF.

Espesor (mm)	3
Largo (m)	1
Ancho (m)	1,27
Espesor a 0,8 bares (%)	<10
Temperatura máx (°C)	170
Absorción de resina (kg/m ²)	1,4
Peso en seco (g/m ²)	180
Densidad impregnado (kg/m ³)	600

Tabla 23. Datasheet Soric XF.

Resistencia a la flexión (MPa)	8
Módulo de flexión (MPa)	800
Resistencia a tracción a través de las capas (MPa)	4
Fuerza de compresión para una deformación del 10% (MPa)	8
Fuerza de corte (MPa)	3,5
Módulo de corte (MPa)	35

Tabla 24. Propiedades mecánicas del núcleo Soric XF de 3mm.

3.10 ADHESIVO DE POSICIONAMIENTO EN SPRAY AIRTAC 2E

Airtac 2E es un spray adhesivo para fijaciones temporales. Se usa en procesos de infusión y RTM para fijar capas de tejido en pared vertical o entre otras capas sin que se muevan al hacer el vacío. Es ideal para aplicaciones sobre utillajes, como la fijación temporal de detalles y patrones de fabricación.



Figura 41. Adhesivo de posicionamiento en spray Airtac 2e .

Este adhesivo no satura el tejido y permite que la resina circule correctamente durante el proceso de fabricación sin alterarlo. Puede usarse con resinas de poliéster, epoxi, viniléster o resinas uretano-acrílicas.

Modo de uso:

1. Pulverizar el spray a una distancia mínima de 30 cm.
2. Tras aplicarlo, esperar 15 segundos para permitir que el disolvente se evapore.
3. Unir las piezas haciendo presión varios segundos.

3.11 MALLA DE DISTRIBUCIÓN TEJIDA CON FILM DESMLDANTE PERFORADO INFUPLEX FLONET

Esta malla de distribución es ideal para procesos de infusión y vacío con resinas de poliéster, uretano acrilato, viniléster y epoxi. Esta malla se compone de dos capas diferenciadas. Una de ellas es una malla de color amarillo que sirve para evitar que la bolsa de vacío quede adherida a la fibra y estrangular el flujo de resina. La otra capa es un film desmoldeante azul para facilitar la retirada de la malla de distribución. Este film está micro-perforado para no afectar al flujo de resina.

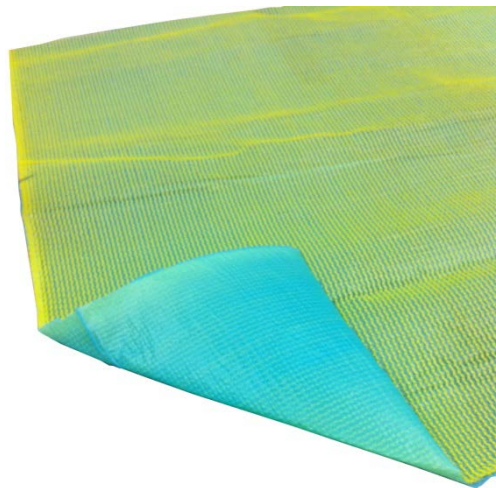


Figura 42. Malla en amarillo, film desmoldeante en azul.

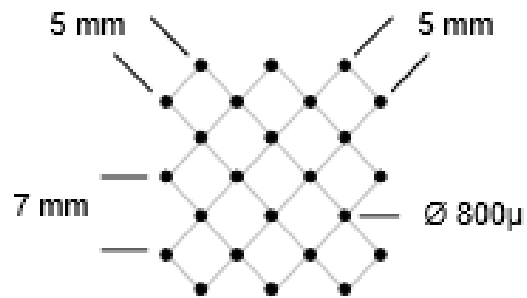


Figura 43. Disposición de las micro-perforaciones del film desmoldeante (Infuplex 2012).

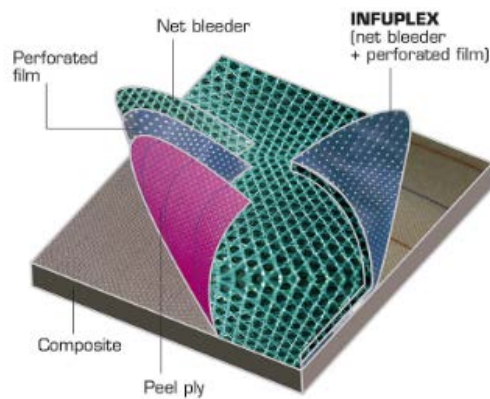


Figura 44. Colocación de la malla de distribución en el proceso de fabricación (Infuplex 2012).

3.12 CANAL PLANO DE INFUSIÓN DIADRAIN

El canal plano es un recurso que facilita el proceso de infusión. Se compone de una línea de 50 mm de ancho que incorpora un bleeder o malla que no colapsa con el vacío y una cobertura tejida muy fina que recubre la malla plástica. Con esto se consigue que la resina circule más rápidamente por su interior y se pueda conducir a zonas de difícil acceso para la misma.

Puede ser usada en procesos de infusión y compactación con cualquier tipo de resinas termoestables siempre que no se sobrepase su temperatura máxima de servicio, 80 °C.



Figura 45. Sección del canal plano de infusión.



Figura 46. Canal plano de infusión.

Su uso trae consigo las siguientes ventajas:

- Protege de marcas la superficie del laminado.
- Minimiza el desperdicio de resina.
- Reduce las zonas secas de resina.
- Se minimiza el consumo del material.

3.13 MASILLA DE CIERRE PARA BOLSA DE VACÍO LSM7000

Esta masilla de cierre es un material adhesivo gomoso para pegar y sellar las bolsas de vacío. Debe garantizar hermeticidad entre bolsa de vacío y molde no solo durante el proceso de fabricación, también en el curado de la resina. No daña la superficie del molde. Se distribuye en rollos de 12 mm x 3 mm x 12,5 m lineales.



Figura 47. Masilla de cierre para bolsa de vacío.

3.14 BOLSA DE VACÍO TUBULAR DE 50 MICRAS

La bolsa de vacío tubular es una bolsa de poliamida para aplicaciones de infusión y compactación al vacío de 50 μm de espesor. Resiste cualquier tipo de resina incluso el curado en horno de preimpregnados hasta una temperatura de 180 °C. Se suministra en rollos de 1,2 m.

Una vez iniciado el proceso de infusión o vacío, esta bolsa hace de molde exterior ya que compacta la fibra durante el curado de la resina.



Figura 48. Bolsa de vacío tubular de 50 micras.

3.15 TUBO DE ESPIRAL POLIETILENO 1/2" (12,7 mm)

El tubo de espiral (Figura 49) es un tubo de plástico flexible translúcido para infusión de todo tipo de resinas termoestables y para la generación de vacío. Se inserta entre el molde y la bolsa de vacío para servir de entrada y salida de aire o resina durante el proceso de infusión o RTM. Gracias a corte helicoidal que tiene a lo largo del mismo, facilita el flujo a través de sus paredes.

3.16 TUBO DE ABSORCIÓN DE 12 mm

Este tubo (Figura 50) es un conducto de plástico de polietileno de baja densidad para absorción de resinas de tipo termoestable en procesos de infusión y vacío en moldes. Conecta la toma de vacío con el tubo espiral con ayuda de conexiones plásticas para introducir la resina en el interior o sacar el aire, según el proceso de fabricación elegido.

3.17 CONEXIÓN EN "T" PARA TUBERIA DE 10 mm

Se trata de una conexión T para tuberías de diámetro interior 10 mm (Figura 51). Es usado en procesos de infusión y vacío en bifurcaciones de tuberías. Soporta una temperatura máxima de 90 °C. Su función es conectar los tubos por donde circula el aire y la resina del proceso de infusión o vacío.

3.18 VÁLVULA DE PASO DE RESINA DE 10 mm

Es una válvula plástica de rosca para controlar el paso de resina en procesos de infusión (Figura 52). En procesos de infusión, es recomendable disponer de varias entradas independientes de resina que pueden gestionarse mediante este tipo de válvulas para conducir el flujo de resina a través del molde.



Figura 49. Tubo de espiral polietileno 1/2" (12,7 mm).



Figura 50. Tubo de absorción de 12 mm.



Figura 51. Conexión en "t" para tubería de 10 mm.



Figura 52. Válvula de paso de resina de 10 mm.

3.19 RESINA EPOXI

La resina epoxi actúa como matriz del compuesto. Une y rigidiza la fibra ya que esta, por sí sola no es capaz de ofrecer resistencia a compresión o a flexión.

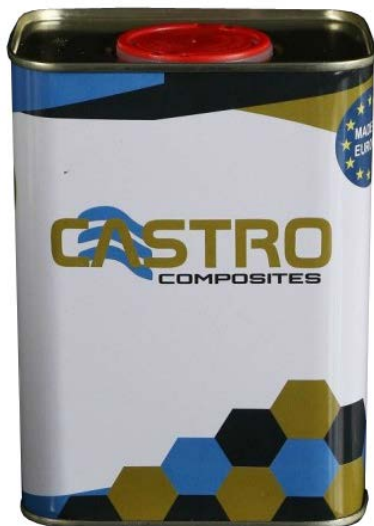


Figura 53. Resina epoxi Resoltech 1050.



Figura 54. Catalizador Resoltech 1060S

3.19.1 RESINA EPOXI RESOLTECH 1050 PARA INFUSIÓN

Esta resina es una resina epoxi de baja viscosidad para fabricación de piezas composite de altas prestaciones con fibras de refuerzo como vidrio, carbono o kevlar. Debido a su baja viscosidad es ideal para la fabricación de piezas estructurales por contacto a mano, infusión y moldeo por inyección ya que facilita la impregnación y mejora la resistencia interlaminar.

Por si mismo no tiene capacidad de curado pero puede ser combinada con 6 endurecedores distintos para dar una mezcla con un tiempo de gel de entre 10 minutos y 14 horas. Para acelerar el proceso, se puede realizar un curado a 40°C aunque lo ideal es realizarlo a 60°C ya que se obtienen las propiedades óptimas del compuesto.

Se suministra en envase metálico para evitar reacciones con el propio recipiente. Puede adquirirse en envases de 1 o 5 kg (Figura 53).

3.19.2 ENDURECEDOR RESOLTECH 1056S

El endurecedor es un agente catalítico que produce una reacción exotérmica al reaccionar con la resina. Este aumento de la temperatura acelera el curado de la resina. Debe combinarse con la resina en una relación de mezcla en peso de 100:35. Este componente se suministra en envases de plástico de 350g para que cumpla la proporción anterior con la resina (Figura 54).

Según el tipo de endurecedor, este proceso será más rápido o más lento. Esto dependerá del tiempo necesario para el proceso de impregnación de la fibra. Para la fabricación de piezas de pequeñas dimensiones o formas sencillas se pueden usar endurecedores que reaccionen con la resina para dar una mezcla con mayor temperatura de gel. Por el contrario, para piezas de gran tamaño o formas complejas, es deseable el uso de endurecedores que al reaccionar con la resina produzcan una mezcla con menor temperatura de gel. Con ello se consigue retardar el proceso de curado y facilitar la impregnación de la fibra.

3.19.3 MEZCLA DE RESINA EPOXI RESOLTECH 1050 Y ENDURECEDOR 1056S

Una vez mezclados ambos componentes en la proporción adecuada se obtiene la matriz del compuesto.

Sus propiedades son:

	Resina Resoltech 1050	Endurecedor 1056S	Mezcla 100:35
Densidad	1,14	0,97	1,1
Viscosidad (mPas)	1000	40	462

Tabla 25. Densidad y viscosidad de resina Resoltech 1050/1056S (Resoltech, 2015).

Es interesante destacar algunas propiedades de la reacción como:

-Reactividad:

Tiempo de gel para 70ml a 23°C	37 minutos
Temperatura a pico exotérmico para 70ml a 23°C	184 °C
Tiempo de gel para film de 2mm a 23°C	3 hora y 10 minutos

Tabla 26. Tiempo de gel de resina Resoltech 1050/1056S (Resoltech, 2015).

-Curado y postcurado:

Curado 14 días a 23°C	T _G 49,1°C	Dureza Shore D 89
Curado 16 horas a 60°C	T _G 66,7°C	Dureza Shore D 90

Tabla 27. Temperatura de gel de resina Resoltech 1050/1056S para distintos curados (Resoltech, 2015).

-Propiedades Mecánicas:

Módulo de Elasticidad (GPa)		Máxima Resistencia (MPa)		Elongación a rotura (%)	
Curado 14 días a 23°C	Curado 16 horas a 60°C	Curado 14 días a 23°C	Curado 16 horas a 60°C	Curado 14 días a 23°C	Curado 16 horas a 60°C
3,52	3,42	72,1	113,6	2,2	5

Tabla 28. Propiedades mecánicas de resina Resoltech 1050/1056S (Resoltech, 2015).

3.20 ADHESIVO EPOXI ESTRUCTURAL C-PATCH

C-Patch es un adhesivo epoxi para unir laminados. Tiene gran poder de adherencia e incluso soporta condiciones extremas de temperatura y humedad, seca y cura incluso bajo agua. Se aplica con pistola de silicona convencional.

En la tabla siguiente se recoge una breve ficha técnica suministrada por el fabricante.

Densidad	1g/cm ³
Viscosidad	3.700 MPa.s.
T. Gel 70g a 25 °C	25 min
T. Gel 5mm a 25 °C	60 min
T de pegado a 25 °C	2-4 horas
Resistencia a la propagación de grietas	10,51kN
Resistencia al fallo interlaminar	0,482 kJ/m ²
Resistencia a cortante en acero	30,49 MPa

Tabla 29. Propiedades del adhesivo estructural epoxi C-Patch.

Mediante este adhesivo se unirán las paredes que separan los compartimentos interiores del contenedor ya que no se pueden realizar en un único proceso.

3.21 URKI-PROTEC COAT

Urki-protec es un recubrimiento de caucho que proporciona una capa dura, fuerte y de larga duración. Ofrece una protección contra gravilla, sal, humedad y oxidación. Es aislante térmico, acústico y eléctrico. Resiste las vibraciones del motor. Este recubrimiento se usa como protección en bajos de automóviles por su buena resistencia al desgaste. Es por ello que es un producto ideal para el interior del contenedor de baterías.



Figura 55. Adhesivo epoxi estructural C-Patch.



Figura 56. Recubrimiento Urki-protec.

3.22 EPI

Los EPI son los Equipo de Protección Individual. Estos deben garantizar en todo momento la seguridad del operario en el ambiente de trabajo ante la acción de:

- Agresiones mecánicas superficiales.
- Aerosoles sólidos y líquidos, gases irritantes, peligrosos, tóxicos o radiotóxicos.
- Riesgos en que se incurra durante manipulación de piezas calientes que no expongan al usuario a temperaturas superiores a 50°C.
- Agentes atmosféricos que no sean ni excepcionales ni extremos.

A continuación puede verse una serie de equipos de uso recomendado para las labores de fabricación con materiales compuestos.



Figura 58. Guantes de goma.



Figura 59. Mascarilla.



Figura 60. Mono protector.

4. MÁQUINAS Y EQUIPOS

En este apartado se describen los equipos más importantes que intervienen en la fabricación del contenedor de baterías desde la fabricación del molde hasta el estudio de calidad.

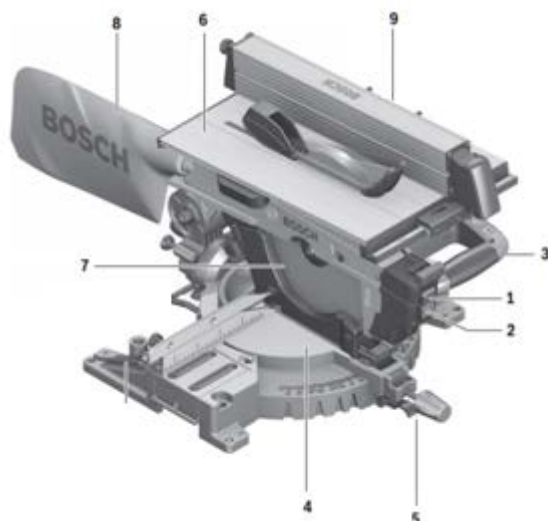
4.1 INGLETADORA BOSCH GM-12 JL

La ingletadora es una herramienta de corte para todo tipo de materiales: madera, metal, plástico, etc. Es una herramienta de alta precisión que permite realizar cortes angulares y transversales. La ingletadora Bosch GM-12 JL combina sierra de mesa e ingletadora en un único equipo. Consta de un motor de 1.800 W que hace girar un disco dentado de metal afilado. El motor se encuentra anclado a un brazo que puede dejarse móvil o fijo para usarla como ingletadora o como sierra de mesa.

Como ingletadora puede realizar cortes rectos o en ángulo en piezas de pequeñas dimensiones. Además de realizar ingletes en distintos ángulos girando el brazo basculante. Como sierra de mesa puede hacer cortes rectos o canaladuras en piezas de grandes dimensiones.

Es necesario tener en cuenta una serie de medidas de seguridad al usar la ingletadora:

- Usar guantes y gafas de protección para protegerse del polvo y las virutas desprendidas.
- Usar vestimenta de trabajo adecuada, evitando ropa amplia y accesorios colgantes.
- Trabajar sobre una base firme.
- Mantener la zona de trabajo siempre limpia y bien iluminada.



1. Botón de desconexión
2. Botón de conexión
3. Mango
4. Mesa de corte
5. Regulador de inclinación
6. Mesa de corte superior
7. Hoja de sierra
8. Saco colector de polvo
9. Motor

Figura 61. Componentes principales de la ingletadora Bosch GM-12 JL (Robert Bosch Power Tools GmbH. 2014).

Capacidad de corte a 0°	95 x 150 mm
Capacidad de corte a 45°	95 x 90 mm
Ajuste para cortes a inglete	48° Izqda. / 48° Dcha.
Ajuste de inclinación	47° Izqda. / 2° Dcha.
Profundidad x Longitud x Altura	66 x 55 x 40 cm
Velocidad de giro en vacío	3.800 r.p.m.
Ø del disco de sierra	305 mm
Ø interior del disco de la sierra	30 mm
Peso	21 kg
Potencia absorbida	1.800 W

Tabla 30. Propiedades de la ingletadora Bosch GM-12 JL (<http://www.bosch-professional.com/>).



Figura 62. Ingletadora Bosch GM-12 JL.



Figura 63. Taladro Black&Decker BD562.

4.2 TALADRO

El taladro es una máquina herramienta para el mecanizado de agujeros sobre prácticamente cualquier superficie gracias al movimiento rotatorio de una broca especializada. Este se usa en la fabricación del molde de madera de DM y en el mecanizado de los agujeros de ventilación del contenedor.

Capacidad de taladrado en madera	32 mm
Capacidad de taladrado en metal	13 mm
Capacidad de taladrado en mampostería	16 mm
Par máximo	16Nm
Percutor	Si
Velocidad de giro en vacío	3.100 r.p.m.
Peso	3,5 kg
Potencia absorbida	400 W

Tabla 31. Características del taladro Black&Decker BD562 (<http://www.blackanddecker.es/>).

4.3 LIJADORA ORBITAL

La lijadora orbital es una máquina herramienta para mejorar la calidad superficial de las piezas. Su plato de lijado se desplaza en órbitas aleatorias de modo que se evita que el abrasivo se deslice por el mismo trayecto. Esto confiere un acabado excelente. Se suele combinar con distintos granulados progresivamente de mayor a menor tamaño de grano.

Aplicaciones principales:

- Lijado perfecto en pinturas, madera y plásticos.
- Lijado previo al pulido.
- Lijado de acabado de materiales minerales.
- Lijado de acabado de superficies de brillo intenso para pulir.
- Lijado de acabado de superficies de madera.
- Lijado de acabado de pigmentos de carga.

Órbita	3 mm
Velocidad de giro	4.000-10.000 r.p.m.
Ø del plato	150 mm
Peso	1,8 kg
Potencia absorbida	310 W

Tabla 32. Características técnicas de la lijadora orbital Festool ETS 150/3 EQ (<http://www.festooltiendaonline.es/>)



Figura 64. Lijadora orbital Festool ETS 150/3 EQ

4.4 COMPRESOR Y PISTOLA DE PINTURA

La pistola de pintura es una herramienta para el aplicado de pintura aerográfica de gravedad para trabajos de alta calidad. Incorpora una boquilla con aguja de acero inoxidable de gran precisión. Gracias a su diseño obtiene un patrón perfecto de atomización puede aplicar un amplio abanico de recubrimientos debido a su boquilla regulable.

Esta pistola se conecta a un compresor que suministra un caudal constante de aire comprimido (Figura 66). Esta herramienta comprime aire gracias a un pintón y lo almacena en un depósito de 50 litros de capacidad.



Figura 65. Pistola aerográfica de gravedad HVLP Besa G-2005.



Figura 66. Compresor Sagola de 50l.

4.5 TIJERAS

Las tijeras Airtech son unas tijeras de acero inoxidable 440C diseñadas para el corte de telas de compuestos a base de fibras de carbono, vidrio, kevlar, etc. Tiene unas asas amplias para reducir el esfuerzo y unas hojas anchas para cortes pesados. Además, están diseñadas para cortar sobre mesa con lo cual facilitan el corte.

Figura 67. Tijeras Airtech para corte de fibras.

4.7 BOMBA DE VACÍO

La bomba de vacío usada en procesos de infusión o de vacío en fabricación de materiales compuestos. Este equipo crea una depresión para adsorber el aire que queda entre molde y bolsa de vacío en procesos como RTM o para absorber resina en infusión. La bomba usada para la fabricación del contenedor de baterías es una bomba Edwards Two Stages 80 con control manual de presión. Incorpora tres tomas distintas independientes.

Volumen	80 m ³ /h
Velocidad de giro	1.420 r.p.m.
Presión	0,1 Pa
Peso	105 kg
Potencia absorbida	1.100 W

Tabla 33. Características bomba Edwards Two Stages 80 (Edwards Limited 2007).



Figura 68. Bomba de vacío Edwards Two Stages 80.



Figura 69. Trampa de resina para proceso de infusión.

4.8 TRAMPA ATRAPA RESINA

La trampa de resina es un útil diseñado para recoger el exceso de resina durante los procesos de fabricación de materiales compuestos por infusión. La trampa tiene una entrada de vacío y otra de resina equipada con válvula de seguridad. En su interior se aloja un vaso de retención de residuos donde queda atrapada la resina. Gracias a este mecanismo se evita que la resina penetre en la bomba de vacío y la dañe.

4.9 CALEFACTOR

El calefactor es un equipo compacto de producción de calor con una potencia de 2.000W para mejorar los procesos de curado y postcurado de la resina.

Figura 70. Calefactor Honeywell FH-973 E.

4.10 AMOLADORA ANGULAR

La amoladora es una máquina herramienta diseñada para cortar, esmerilar y pulir una gran cantidad de materiales. Consta de un motor que hace girar la cabeza, donde se acopla la muela, mediante engranajes. Aunque tiene muchos usos, uno de sus usos principales es la eliminación de material sobrante, ya sea madera, metal, plástico, mampostería, etc.

Velocidad de giro	6.000-11.000 r.p.m.
Ø del disco	115 mm
Peso	1,8 kg
Potencia absorbida	700 W

Tabla 34. Características amoladora Skil 9002(<http://www.herramientaskil.com/>).



Figura 71. Amoladora angular Skil 9002.

4.11 PISTOLA APLICADORA DE SILICONA

Una de las formas más comunes de unir piezas de materiales compuestos que no se pueden fabricar de una pieza es la unión por adhesivo. Aunque este adhesivo debe tener unas características excepcionales, puede ser aplicado mediante una pistola aplicadora de silicona siempre y cuando se suministre en envase universal.

Esta pistola consta de un cilindro abierto donde se posiciona el adhesivo. Un resorte activado por gatillo que presiona la parte inferior del tubo adhesivo haciéndolo salir.



Figura 72. Pistola aplicadora de silicona.

4.13 PRENSA 30 kN

El centro de ensayos mecánicos MTS Criterion 43 es un equipo para realizar ensayos de tracción, flexión, fluencia... con una carga máxima de 30 kN. Tiene una configuración de mesa en dos columnas y puede ser controlado por el software MTS TestSuite. Además incorpora una amplia biblioteca de ensayos para multitud de materiales, función de rampa, función de escalón, etc.

Consta de accionamiento no apretado; control en bucle cerrado de alta resolución; soporte anti-rotación; comprobación automática de la posición del cabezal, sobrecarga, sobre-temperatura y sobretensión.

Este equipo está especialmente indicado para componentes pequeños, plásticos reforzados, metales, composites, elastómeros, biomateriales, adhesivos, espumas o productos de papel.

Carga máxima	30kN
Velocidad máxima de test	1020 mm/min
Resolución de posición	$6 \cdot 10^5$ mm
Potencia absorbida	2.400 W
Peso	305 kg

Tabla 35. Características técnicas centro de ensayos MTS Criterion 43.



Figura 73. MTS Criterion 43.

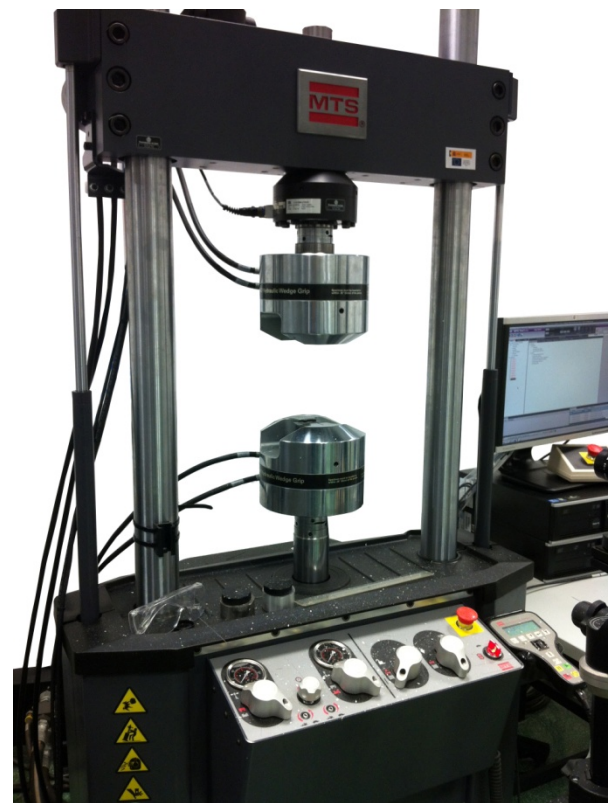


Figura 74. MTS Landmark.

4.12 PRENSA HIDRAULICA 100 kN

Este centro de ensayos es un equipo similar al anterior de mayor capacidad. La diferencia principal es que la prensa del centro MTS Landmark está accionada hidráulicamente lo que le permite realizar ensayos estáticos y dinámicos muy versátiles. Está indicada para pruebas de mayor carga que la anterior y materiales de todo tipo como plásticos, elastómeros, aluminio, aceros, super-aleaciones, materiales compuestos, etc.

4.13 ÚTIL PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS

Para realizar el ensayo de flexión se recurre a un equipo de flexión es tres puntos según indica la norma ASTM D-790. Este consta de una mordaza inferior que se coloca en la garra del centro de ensayos. Sobre esta mordaza se acoplan dos barras que forman un carril, a través del cual se desplazan dos columnas de canto redondeado sobre las que se apoyará la probeta. Con este sistema se desea conseguir la posibilidad de realizar ensayos con varias longitudes de flexión. Por otro lado hay una pequeña placa con punta redondeada que se coloca en la garra superior del centro de ensayos, que transmitirá la carga a la probeta cuando baje. Este equipo ha sido diseñado por miembros de la Universidad de Jaén.



Figura 75. Útil para ensayo de flexión en 3 puntos.

4.14 CÁMARA

Para la mejor caracterización del compuesto se combina el ensayo de tracción con el método DIC de correlación digital de imágenes. Para ello se necesita de una cámara de alta resolución conectada a un PC.

4.15 ORDENADOR

Las imágenes adquiridas por la cámara se procesan en un PC junto con la señal obtenida por la célula de carga del centro de ensayo.



Figura 76. Cámara Stingray.



Figura 77. PC portátil.

4.16 BÁSCULA

Para poder realizar una correcta mezcla entre resina y catalizador es necesaria una buena precisión en las cantidades. Por ello es necesario llevar a cabo un proceso minucioso de pesaje en una báscula. Además, este equipo se usa para caracterizar el peso del compuesto.



Figura 78. Báscula Cobos.

5. PROCESO DE FABRICACIÓN

En este apartado se describe el proceso llevado a cabo para la fabricación del contenedor porta-baterías en material compuesto se ha optado por el método de infusión al vacío. Como se puede ver en la tabla 17, este método es muy versátil ya que permite obtener laminados con formas muy variadas. Sin embargo, cuando más complejas sean esas formas más complejo será el proceso.

En este proceso, la resina es succionada por una bomba de vacío hasta el molde donde se encuentra dispuesta la fibra. Este molde se compone de un molde rígido y otro flexible que se compacta por la acción de la depresión creada por la bomba. La aspiración favorece la circulación del flujo de resina a través de la fibra a la vez que se compacta. Una trampa de resina evita que la resina pueda entrar a la bomba y dañar el equipo (Figura 79).

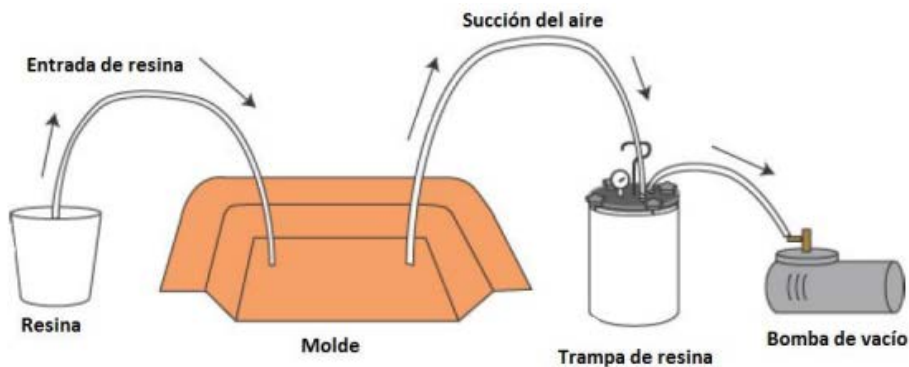


Figura 79. Proceso de infusión para fabricación de material compuesto (Vega, H. 2014).

Uno de los aspectos principales para la elección de este método es la buena relación fibra-resina que se obtiene, aproximadamente un 60% en volumen de fibra. Esta concentración confiere al material compuesto unas propiedades mecánicas altas además de hacerlo ligero.

Otro aspecto importante a considerar es que el proceso no necesita maquinaria altamente especializada, ni condiciones de temperatura y presión elevadas para el curado (1 bar - 60 °C).

A lo largo de este apartado se detalla todo el proceso de fabricación para la obtención del contenedor porta-baterías desde el diseño del molde hasta el estudio de calidad final.

5.1 FABRICACIÓN DEL MOLDE

Dentro del proceso de fabricación del contenedor, la fabricación del molde es uno de los procesos más importante ya que de este molde depende la geometría final de la pieza terminada.

Este molde generalmente suele fabricarse en materiales metálicos o en fibra de vidrio. Sin embargo, ya que en el proceso de infusión no se consiguen altas temperaturas, se pueden descargar los moldes metálicos ya que estos son más costosos y más complejos de elaborar.

Otro tipo de molde muy común es el molde en fibra y resina. Este molde se lamina del mismo modo que se lamina el compuesto de fibra de carbono y resina epoxi, por tanto se necesitaría otro molde para fabricar el molde ya que este por sí mismo no se puede moldear. Este segundo molde puede obtenerse fácilmente a partir de polímeros como el poliestireno.

Descartadas las opciones anteriores, se presenta la posibilidad de fabricación del molde en madera DM o densidad media. En el punto 3.1 se detallan algunas características de este material como su buena calidad superficial o la planicidad de sus caras por las que es idóneo para moldes con forma prismática.

Dada la geometría de la pieza, se considera fabricar el cajón como una única pieza a partir del cascarón exterior sobre el que se anexionan las barreras interiores mediante adhesivo.

La estructura del molde se compone de dos cubos principales donde se situarán las baterías y dos pequeños cajones para albergar dos contactores de las baterías. En el plano 1 puede verse la geometría del contenedor de baterías.

Uno de los requerimientos para el desmoldado es que las paredes cuenten con una pendiente de, al menos, el 3%. Esta pendiente produciría una pieza con forma piramidal, creando huecos en el interior del contenedor inutilizables donde cada milímetro debe ser aprovechado al máximo.

Para solucionar este problema se plantea la fabricación de un molde desechable en varias partes de modo que se facilite el desmoldeo sin modificar la geometría de la pieza. Este sistema favorece la opción del molde en DM.

A partir de las solicitudes interiores de capacidad y una estimación del espesor de las paredes del material compuesto se diseña el molde final. Las medidas interiores vienen impuestas por la geometría de la motocicleta y las dimensiones de las baterías mientras que el espesor de las paredes se estima a partir de las indicaciones del fabricante de fibra (3,3 mm aprox.).

Una vez claras las dimensiones del molde se procede a su descomposición en paneles sencillos. Estos se unen mediante cola de contacto y tirafondos. Para facilitar la inserción de tirafondos se practican taladros en las paredes del tablero. Esto evita deformaciones en las paredes del molde. Los paneles que conforman las paredes del molde se obtienen mediante el corte del tablero de DM de 12 mm en una ingletadora (Figura 62).

En el punto 4.1 se describen una serie de acciones que son necesarias tener en cuenta antes de realizar este proceso de corte, no olvidando nunca protegerse mediante gafas y guantes del riesgo producido por las virutas de madera.

Tras el corte de todos los paneles que componen el molde se procede a su unión asegurándose en todo momento que se respetan las dimensiones requeridas. Además se añaden refuerzos exteriores para rigidizar las paredes del molde.

Ya que el proceso de fabricación del compuesto se realiza al vacío, es necesario que el molde sea completamente hermético, para ello se recubren las esquinas con masilla de poliéster.

Una vez realizado este proceso se realiza un lijado fino de las paredes del molde para facilitar la adherencia de la pintura de poliuretano. Se redondean las esquinas y vértices del molde para facilitar el proceso de infusión.

A continuación, y tras eliminar los restos del lijado, se procede a la aplicación de una capa de pintura de poliuretano. Esta capa de pintura da brillo a las paredes del molde y mejora su sellado. Se aplica mediante pistola y compresor, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Para este proceso es necesario el uso de los EPI descritos en el apartado 3.22.

Tras dos días de secado se aplica una segunda capa de poliuretano. Es necesario esperar al menos una semana antes de usar el molde para que la capa de poliuretano quede completamente seca, según indica el fabricante.

Para el molde de la tapa superior se sigue el mismo proceso.

Ambos moldes se reservan en un lugar limpio y seco hasta uso. Antes de su uso es necesario aplicar los agentes de desmoldado para poder separar el laminado del molde sin problemas según indica el fabricante.

En primer lugar se proyecta una capa de sellador Sealer GP-034 (Figura 34) mediante pistola de pintar y compresor. Este componente multiplica el efecto del desmoldeante ya que crea una superficie extremadamente lisa sobre la que aplicar el desmoldeante Flexz Z5.0 (Figura 35). Del mismo modo se aplica el desmoldeante que crea una fina película transparente antiadherente. Para llevar a cabo estos dos procesos es necesario el uso de EPI.

Para finalizar la lubricación del molde se aplica la cera desmoldeante (Figura 36) según las indicaciones del punto 3.7 de este documento.



Figura 80. Fabricación de molde en madera DM de 12 mm.

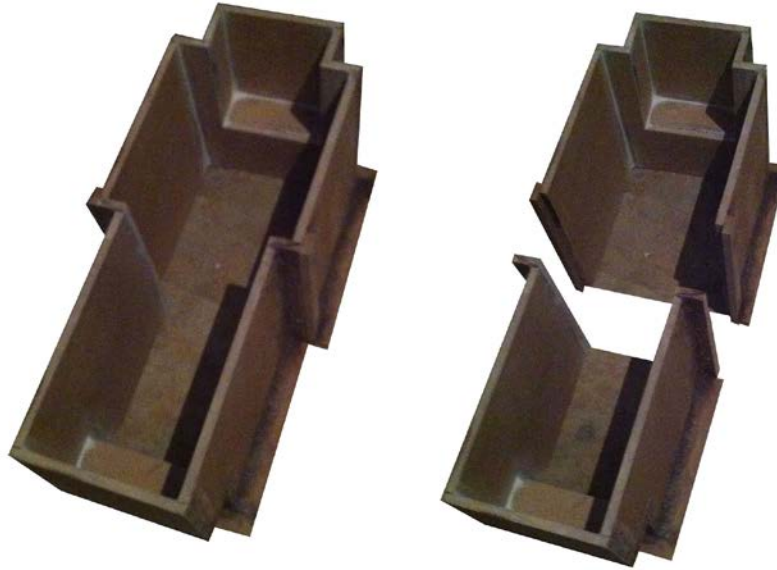


Figura 81. Molde para fabricación de material compuesto en dos partes.

5.2 PREPARACIÓN DE LA FIBRA

Una vez terminada la preparación del molde se procede al diseño del patrones de fibra de carbono. Uno de los principales problemas a la hora de distribuir la fibra sobre el molde es que se adapte perfectamente a él sin pliegues ni arrugas que deformen la dirección de la fibra y reduzcan las propiedades mecánicas del material.

Para evitar este problema se siguen unos patrones de corte, previamente diseñados, para recortar el tejido de carbono de tal forma que se adapte perfectamente a las paredes. Ya que el compuesto es un laminado a partir de distintas capas de fibra, cada capa llevará un patrón distinto de modo que no coincidan siempre los cortes de cada capa en la misma arista del molde. Esto crearía un concentrador de tensiones que debilitaría el compuesto en esa zona. Los patrones de corte se muestran en los planos 5 y 6.

Antes de iniciar este proceso es recomendable el uso de gafas protectoras y guantes ya que la fibra de carbono lleva adherida pequeñas partículas de carbón que pueden causar picores al operario.

Conocida la secuencia de capas en el laminado (Figura 82) se procede al corte de cada una. Ya que el molde es exterior se procede al patronaje y corte de capas desde la capa exterior a la interior. Por tratarse de un laminado simétrico puede invertirse el orden de capas ya que el resultado será el mismo.

En primer lugar se desenrolla una manta de tejido sarga sobre una superficie plana y limpia. Con ayuda de regla y escuadra se transfiere el patrón a la tela y se realizan los cortes necesarios para los pliegues con tijeras para el corte de fibra (Figura 67)*.

*Nota: Para evitar el deshilachado del tejido se usó cinta de carroceros, sin embargo se vio que la cinta era perjudicial ya que es difícil de despegar.

Una vez cortada la tela, se procede a su colocación dentro del molde, previamente lubricado, con ayuda del espray adhesivo Airtac (Figura 41). Se pulverizan pequeños puntos estratégicos con adhesivo para fijar la tela en zonas de mala sujeción.

Este paso se repite con cada capa que conforma el compuesto hasta completar el laminado teniendo en cuenta el uso de patrones distintos. Es conveniente el uso del adhesivo entre capas para garantizar que no se desprendan antes del proceso de infusión.

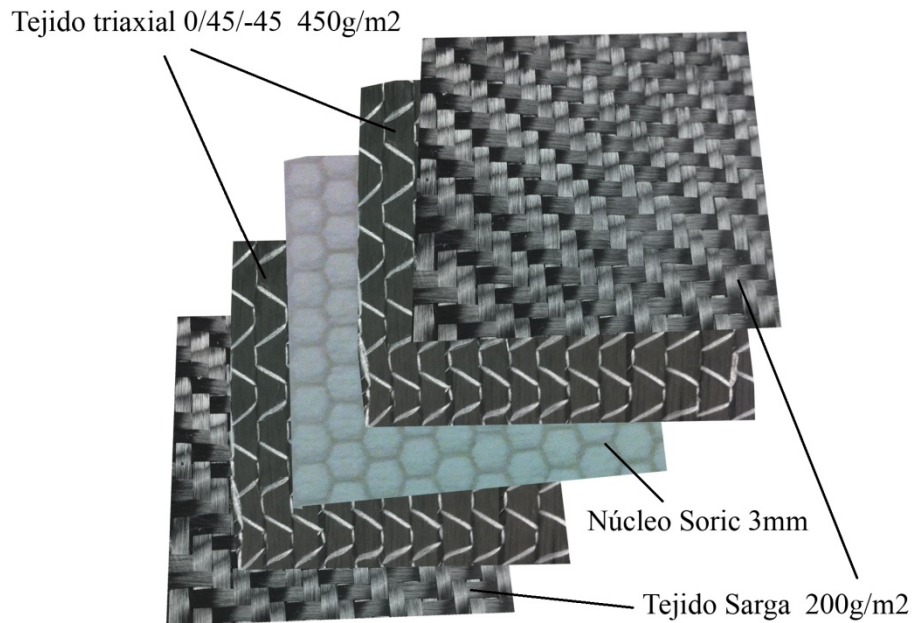


Figura 82. Secuencia de capas que conforma el compuesto.

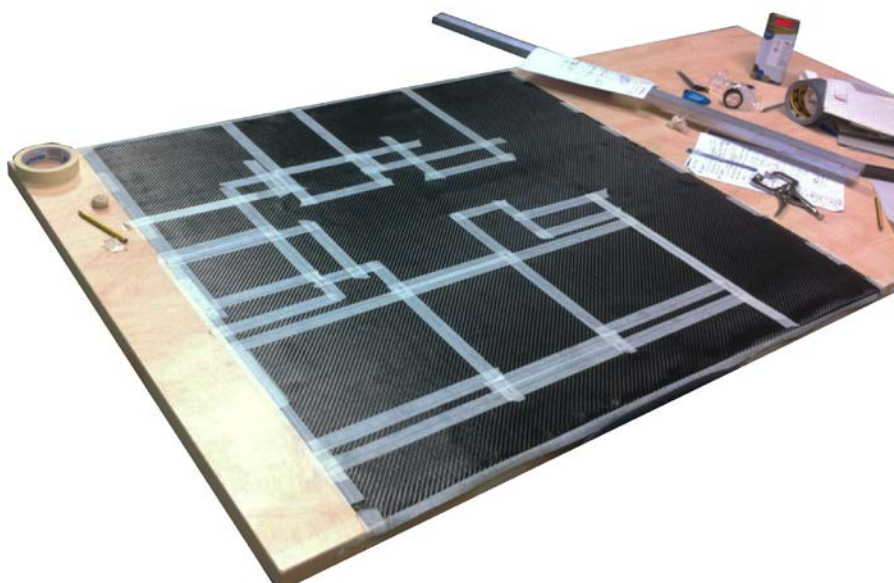


Figura 83. Obtención de patrones de tela de fibra de carbono.



Figura 84. Colocación de distintas capas de fibra de carbono y núcleo.

5.3 ELEMENTOS AUXILIARES DEL PROCESO DE INFUSIÓN

En este punto se inicia el proceso de infusión. Para ello se usa una metodología y unos materiales propios de este método. En primer lugar se corta la malla de distribución (Figura 42) de forma similar a la fibra. Esta malla de distribución tiene dos objetivos, el primero es crear una superficie lisa para el desmoldeo del compuesto (capa azul) y el segundo es crear una superficie rugosa que impida que el vacío corte el flujo de resina (malla amarilla).

Se coloca la malla de modo que la capa azul esté en contacto con la fibra y la capa amarilla quede en la superficie del molde. Es muy habitual el uso de Peel-ply en este punto del proceso, sin embargo, se deshecha esta opción ya que la capa azul de la malla de distribución produce el mismo efecto.

Sobre la malla de distribución se coloca el canal plano de infusión (Figuras 45 y 46). Esta canal se dispone longitudinal y transversalmente sobre la malla para conducir el flujo de resina desde un extremo del molde a otro. Con esto se consigue una mejor impregnación y un proceso más rápido.

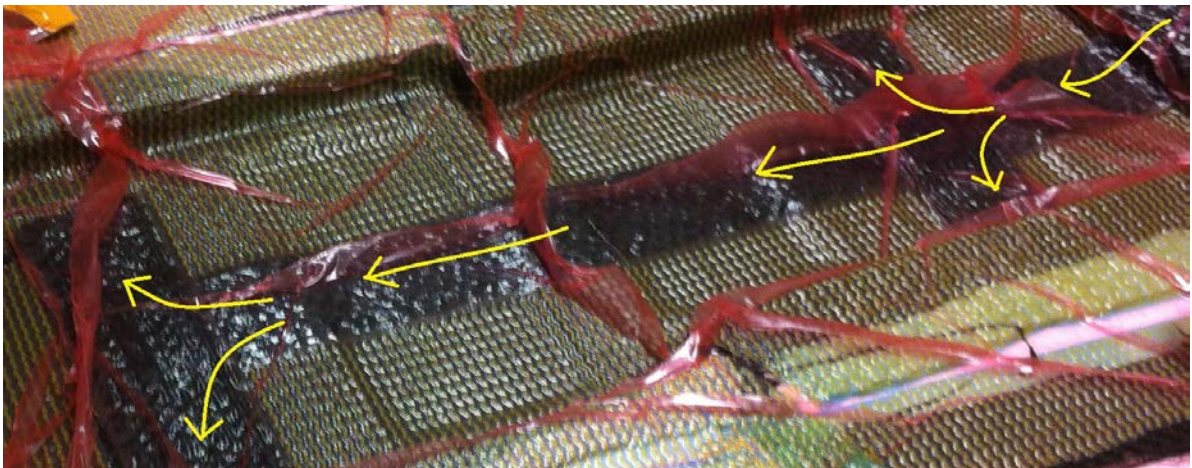


Figura 85. Flujo de resina circulando por el canal de infusión.

El siguiente paso es colocar perimetralmente sobre el molde la masilla de cierre (Figura 47), también conocida como "Tacky Tape". Para llevar a cabo este proceso es necesario un control minucioso para que no se formen burbujas o pliegues que hagan perder la estanqueidad al conjunto. No hay que retirar el papel protector de la cinta hasta el paso siguiente.

Una vez colocada la masilla de cierre se procede al corte de la bolsa de vacío (Figura 48) de tal forma que quede exceso de material para que se adapte bien al molde. No importa si quedan pliegues o arrugas ya que la malla de distribución evitará que estas se marquen en el compuesto. Lo importante es haya bolsa de sobra para que esta se adapte perfectamente a todos los huecos. Este efecto puede verse en la imagen anterior.

A continuación comienza a retirarse parcialmente el papel protector de la masilla de cierre para pegar la bolsa de vacío. Se comienza pegando la bolsa desde el centro de cada lado del molda hacia las esquinas. Para este proceso se requiere una destreza especial del operario que irá realizando pliegues en la bolsa para adaptarla mejor (Figura 87).

Antes de cerrar completamente la bolsa se colocan tubos de espiral y conexiones en "T", que serán la zona de entrada y salida de resina y aire. Se debe garantizar la estanqueidad a través de las conexiones y la bolsa fijándolas con masilla de cierre. Finalmente un tubo cerrado conducirá el flujo de resina y aire dentro y fuera del molde respectivamente.



Figura 86. Colocación de la bolsa de vacío.



Figura 87. Pliegue en bolsa de vacío.

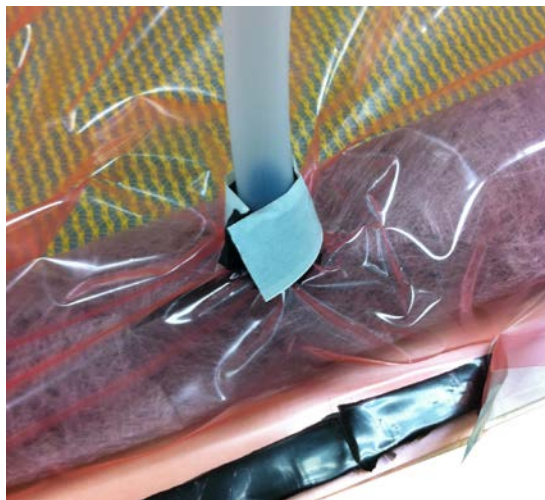


Figura 88. Colocación de conexión en "T".

Para finalizar la preparación del proceso de infusión se conecta al tubo de entrada de resina una válvula de paso (Figura 52) para regular el paso de resina. El tubo de salida se conecta a la trampa de resina (Figura 69) para retener las posibles fugas de resina. Por último se conecta la trampa a la bomba de vacío (Figura 68) y todo queda listo para iniciar el proceso de infusión a falta de preparar la resina.

5.4 PREPARACIÓN DE LA RESINA

Se prepara la mezcla resina-catalizador en razón 100:35 en peso según indica el fabricante (Figuras 89 a 94). Este proceso se realiza con EPI y si es posible en espacios ventilados ya que son sustancias altamente tóxicas y debe garantizarse la integridad del operario.

Teniendo en cuenta la superficie del molde, el espesor del compuesto y que en los procesos de infusión el volumen de resina en el compuesto es próximo al 40% puede estimarse la cantidad de resina y catalizador aproximadamente. Experimentalmente se ha observado que el consumo de resina puede rondar el doble del teórico debido a pérdidas en tubos, canales planos, superficies sangrantes, paredes del molde, etc.



Figura 89. Paso 1: Pesado del recipiente.



Figura 90. Paso 2: Tara de la báscula.



Figura 91. Paso 3: Pesado de la resina.



Figura 92. Paso 4: Tara de la báscula.



Figura 93. Paso 5: Pesado de la resina en razón 100:35.



Figura 94. Paso 6: Mezclado de la resina.

Según las propiedades de la mezcla (Tabla 26) el tiempo de gel para 70 ml a temperatura ambiente es de 37 minutos. Este es el tiempo del que se dispone antes de que comience a solidificarse la resina en el vaso de mezcla. Para film de 2 mm el tiempo de gel es superior, esto es debido a que la reacción catalítica se inicia antes en mayores volúmenes de resina.

Antes de iniciar la infusión de la resina se practica el vacío en el molde cerrando previamente la válvula de entrada de resina. Tras esto, se introduce el tubo de resina en el vaso y se abre la llave para que la resina circule hacia el interior del molde (Figura 96).

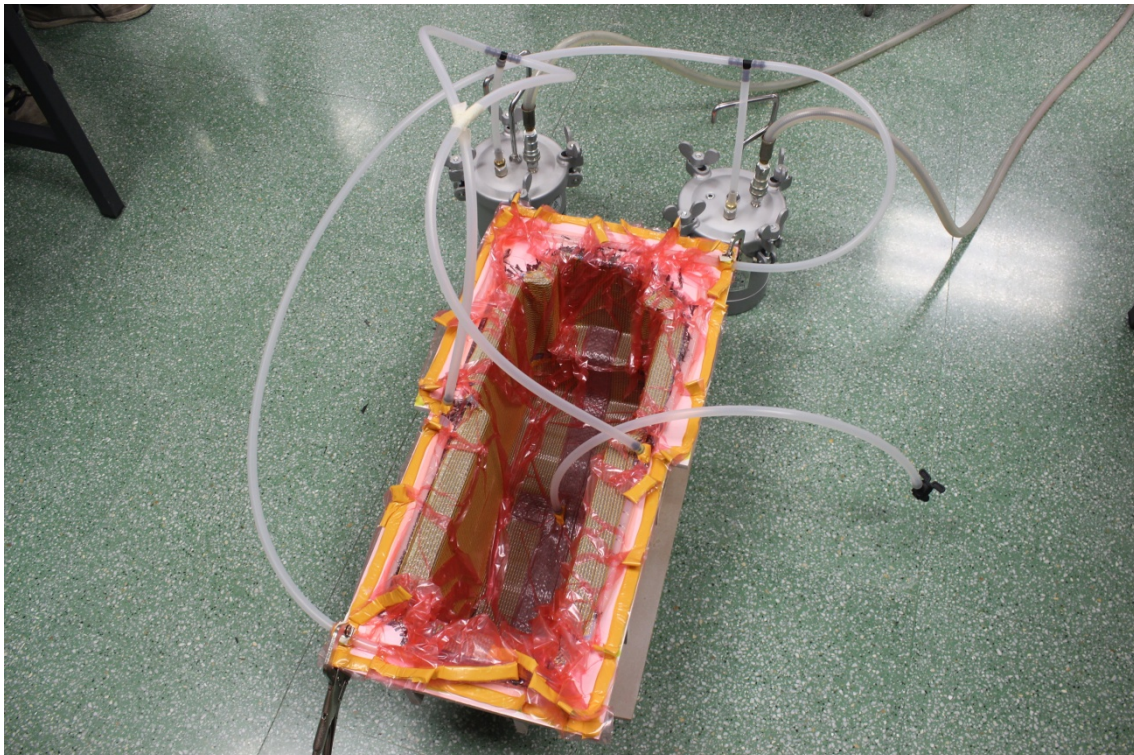


Figura 95. Proceso de vacío antes de infusión.



Figura 96. Inicio de proceso de infusión en la fabricación de la tapa del contenedor.



Figura 97. Impregnado de la fibra.

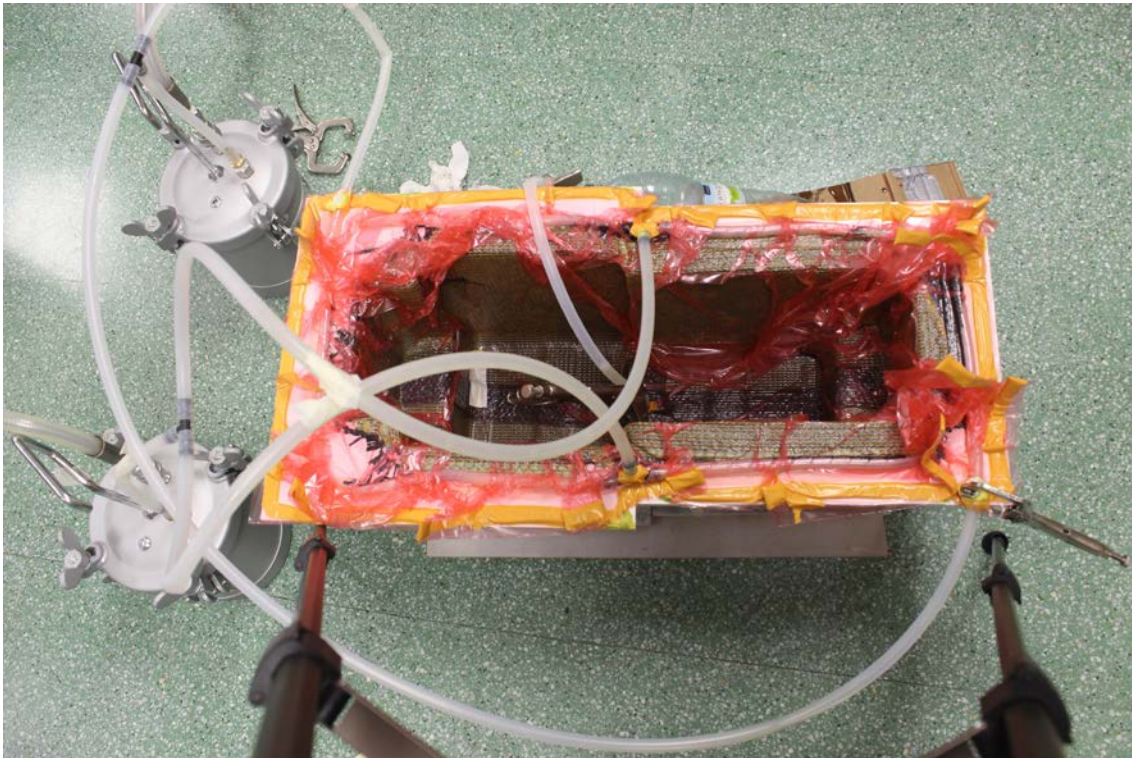


Figura 98. Entrada de resina en el molde y salida de aire.

Para ayudar al curado de la resina se dispone un equipo calefactor en la dirección del molde, situado a unos 30 cm. Ya que este recipiente se realizó en los últimos días de verano, cuando las temperaturas aún eran elevadas, se realiza un post-curado al sol para favorecer el proceso.

Tras esto se realiza el desmoldado. En primer lugar se elimina el material de infusión y a continuación se procede al desmoldado de la pieza. Para ello se eliminan los tirafondos que unen las partes del molde y se tira de ellas con precaución de no dañar la pieza final.

Una vez desmoldado se procede al desbastado de la pieza eliminando material sobrante con ayuda de la amoladora. También se practican los agujeros para la ventilación de baterías y se completa la fabricación del contenedor de baterías colocando las paredes interiores del molde previamente fabricadas de manera similar a la envolvente principal y a la tapa. Estas paredes se unen a la geometría principal mediante adhesivo epoxi (Figura 55) aplicado con pistola de silicona (Figura 72).

Transcurrido el tiempo recomendado por el fabricante para el secado del adhesivo de 2 a 4 horas (Tabla 29) se aplica una capa de protector de caucho (Figura 56).



Figura 99. Proceso de desmoldado.

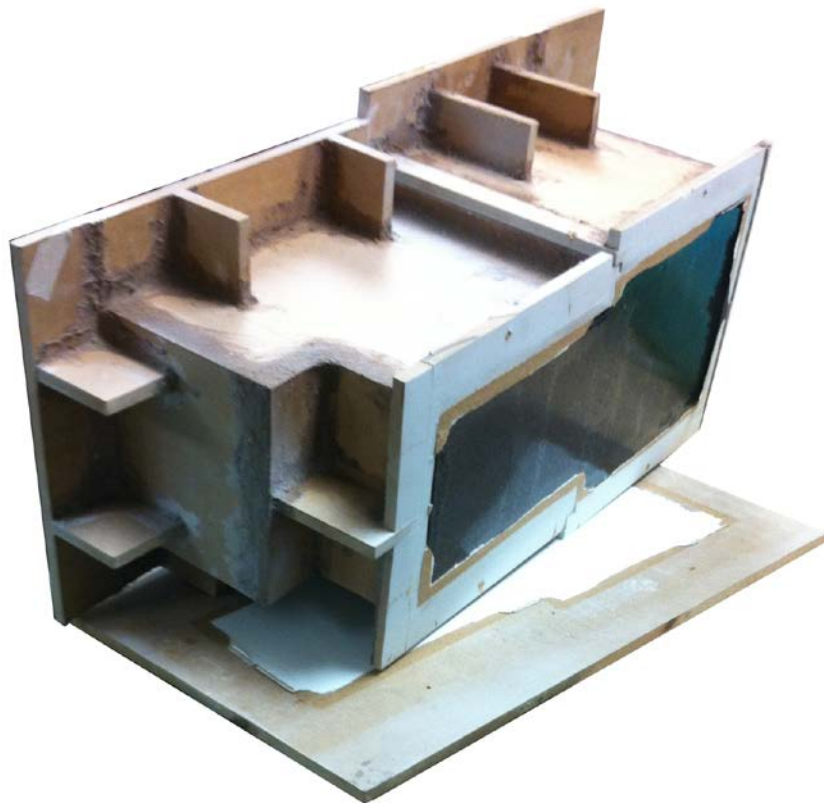


Figura 100. Proceso de desmoldado.



Figura 101. Contenedor de fibra de carbono tras su desmoldado.

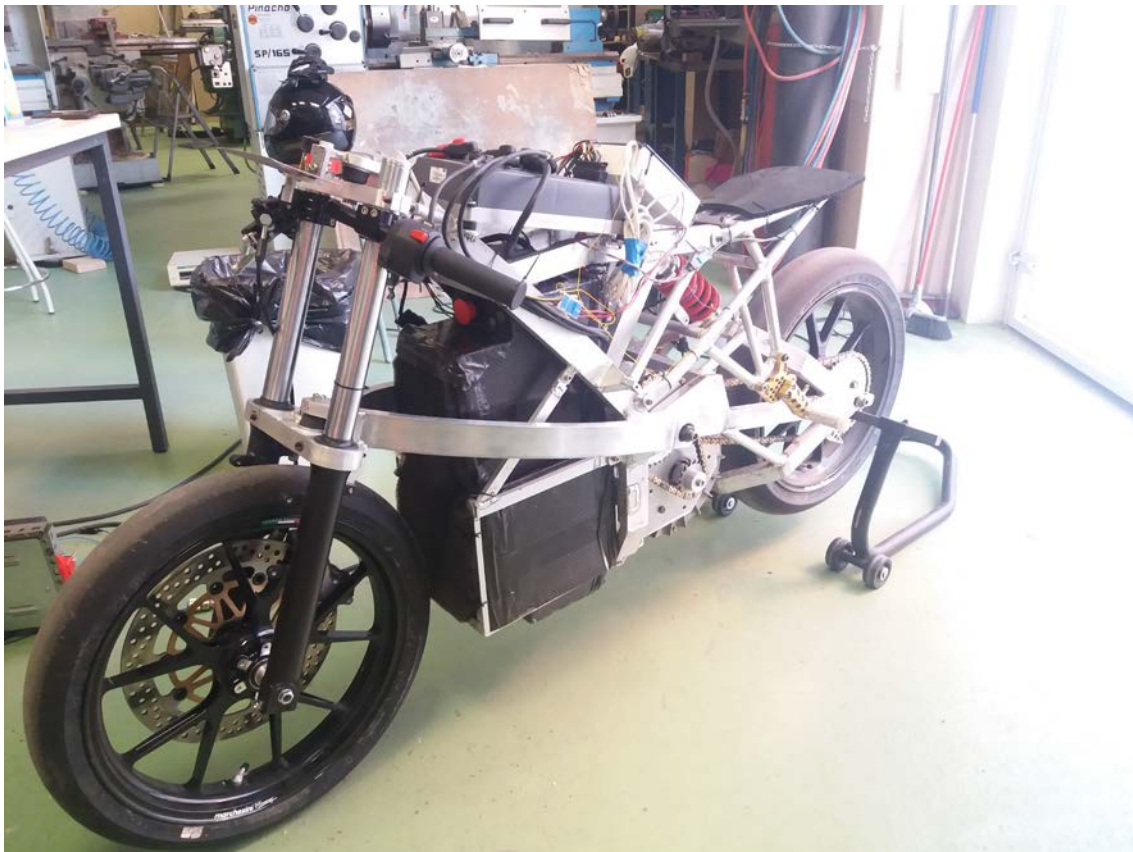


Figura 102. Instalación del contenedor de baterías en motocicleta eléctrica por miembros del equipo EPSUJA-Team.

6. ENSAYOS Y DISCURSIÓN

Para valorar el comportamiento del material compuesto obtenido se han realizado dos tipos de ensayos distintos: Un ensayo de tracción y un ensayo de flexión en tres puntos.

6.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción es un mecanismo para caracterizar las propiedades mecánicas de materiales. Para ello, una probeta normalizadas se introduce en un centro de ensayo como el de la figura 74 fijando cada uno de sus extremos a una mordaza. Para que el ensayo sea fiable es necesario colocar unas placas en los extremos de las probetas llamadas tocones para evitar que las mordazas dañen la probeta y disminuyan sus propiedades. Mediante cilindros móviles se tira axialmente de la probeta a velocidad constante generándose un esfuerzo de tensión variable.

Un sensor dinamométrico mide en todo momento la tensión a la que la probeta es sometida y transmite una señal eléctrica que debe ser procesada mediante un transductor. Gracias a esto podemos medir fuerza y desplazamiento con lo que se podría obtener y deformación vertical para caracterizar un material isótropo. Sin embargo, para materiales ortótropos, como los compuestos a base de fibra, es necesario conocer la deformación horizontal. Es por ello que recurrimos a la técnica DIC.

Esta técnica combina la señal eléctrica recibida por la prensa y una señal digital generada por una cámara de alta resolución que graba en todo momento el ensayo. Digitalmente se colocan unas galgas sobre la imagen que la cámara muestra y se pueden obtener las deformaciones verticales y horizontales de la probeta (Figura 105). Para ello es necesario una preparación especial de las probetas. Deben ser pintadas un patrón aleatorio de puntitos (Figura 106) de modo que las galgas digitales midan el desplazamiento de los mismos.

Para la realización de los ensayos se siguen las siguientes variables:

Tamaño de la probeta	250 x 25 mm
Longitud de la galga vertical	50 mm
Longitud de la galga horizontal	18'3 mm
Velocidad de ensayo	2mm/min

Tabla 36. Variables tomadas para el ensayo de tracción.

En este apartado se estudia el comportamiento de 1 probeta con la configuración $[0, \pm 45, \pm 45, 0]$ obtenido por infusión.

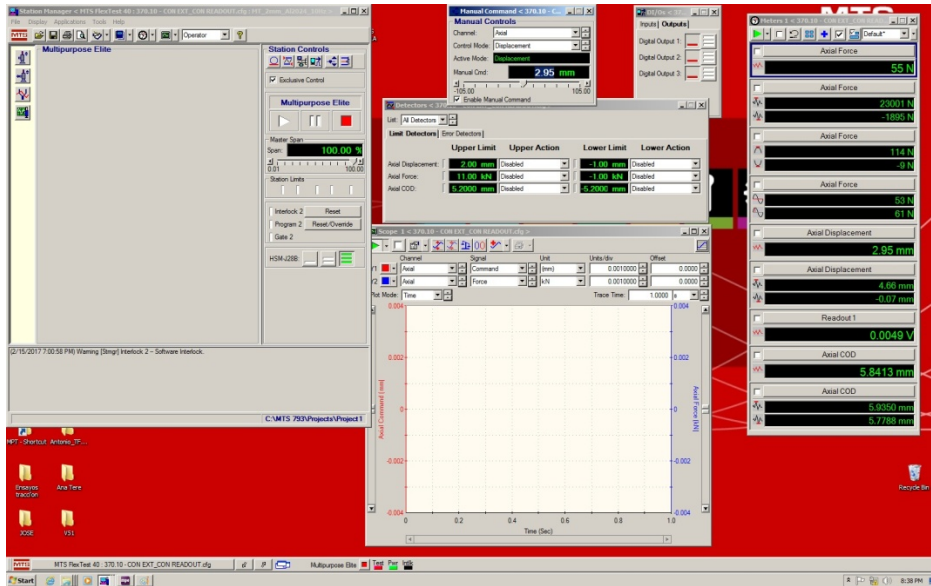


Figura 103. Software Station Manager para controlar el circuito hidráulico de la prensa.

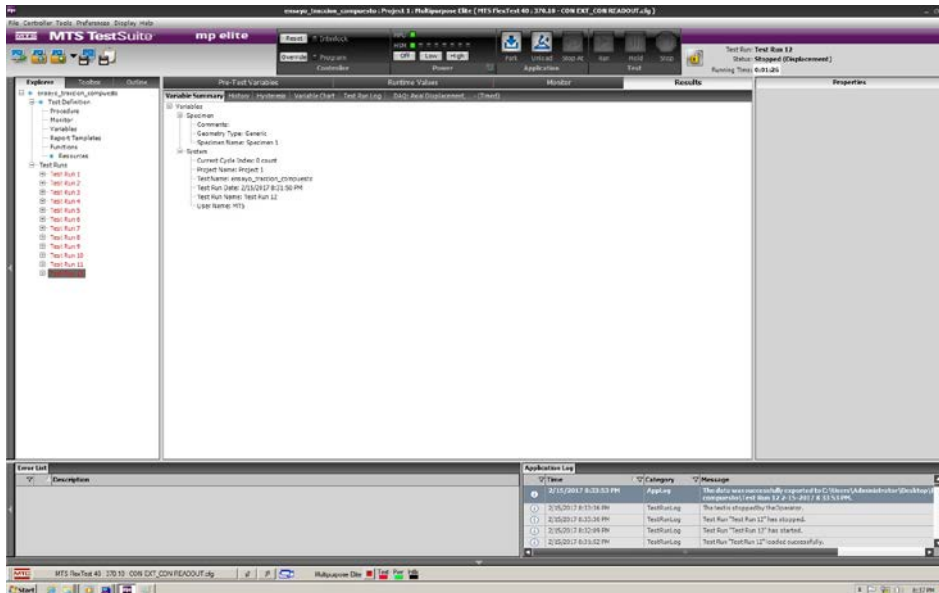


Figura 104. Software Station Manager para controlar el tipo y las variables del ensayo.

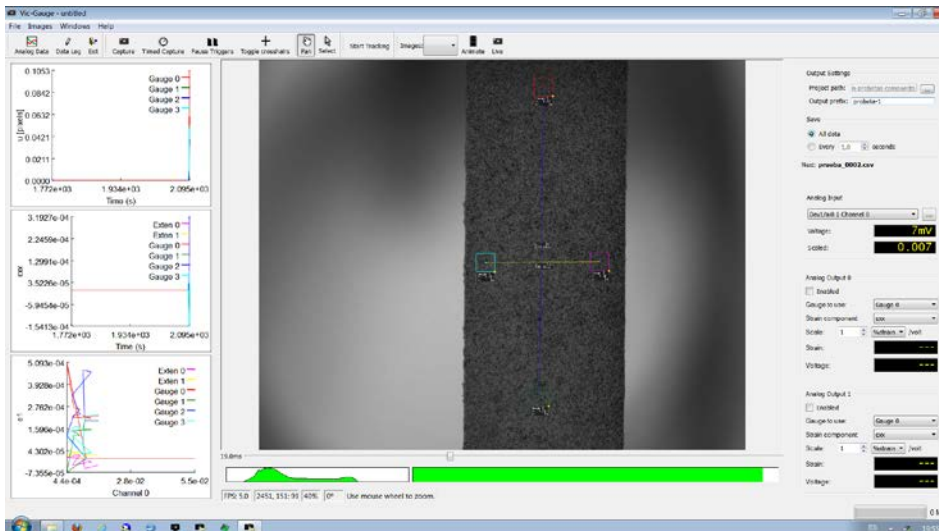


Figura 105. Galgas extensiométricas digitales para medir la deformación vertical y horizontal. Método DIC.



Figura 106. Pintado de moteado en probetas.



Figura 107. Probetas tras el fallo mecánico.

Para analizar los datos obtenidos a partir del ensayo: Fuerza-Alargamiento; es necesario procesarlos para obtener el diagrama Tensión-Deformación. Para ello se divide la fuerza entre la sección de fibra y el alargamiento vertical y horizontal entre la longitud de cada galga: 50 mm y 18'3 mm respectivamente.

En la siguiente figura se muestra la gráfica Tensión (Pa) - Deformación para la probeta indicada anteriormente:

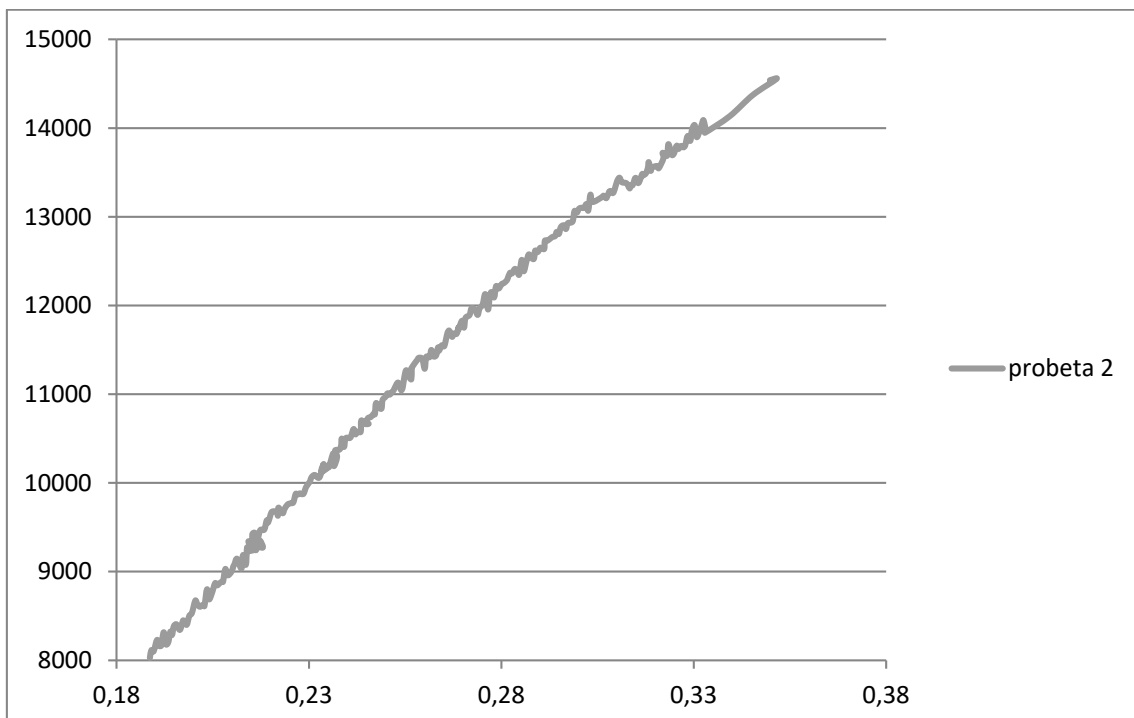


Figura 108. Diagrama Tensión - Deformación para una probeta [0,45,-45,-45,45,0] de fibra de carbono y resina epoxi.

El módulo de elasticidad de la probeta coincide con la tangente a dicha curva. Para ello nos centramos en la parte inicial de la gráfica donde el comportamiento es más lineal, obteniendo un valor de 45,341 GPa.

También podemos obtener el módulo de Poisson a partir de las deformaciones verticales y horizontales como:

$$\nu_{12} = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$$

Obteniendo un valor promedio de $\nu_{12} = 0,4515$

Por tanto se puede determinar el módulo elástico en la dirección perpendicular a la carga como:

$$E_2 = E_1 \cdot \nu_{12} = 20,47 \text{ GPa}$$

Propiedades físicas de la probeta

Para determinar la fracción volumétrica de fibra se estudia una probeta de dimensiones 25x250mm y 8,2 g. La superficie de fibra es:

$$S_f = 25 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} = 6.250 \text{ mm}^2$$

Esta probeta se compone de dos tejidos triaxiales (0/45/-45) cuyas propiedades se indican en la tabla 21. Teniendo en cuenta que la densidad superficial de cada una de las láminas es de 150 g/m² y la densidad es 1,8 g/cm³, se puede obtener el espesor de cada lámina como:

$$e_f = \frac{150 \text{ g/m}^2}{1,8 \text{ g/cm}^3} = \frac{0.00015 \text{ g/mm}^2}{0.0018 \text{ g/mm}^3} = 0,0833 \text{ mm}$$

Por tanto el volumen de cada capa de fibra es:

$$V_{f0^\circ} = V_{f45^\circ} = V_{f-45^\circ} = 6.250 \text{ mm}^2 \cdot 0,0833 \text{ mm} = 520,83 \text{ mm}^3$$

Ya que la probeta tiene dos capas, cada una con tres tejidos, el volumen total de fibra es:

$$V_f = 6 \cdot 520,83 \text{ mm}^3 = 3.125 \text{ mm}^3$$

Como se puede ver en la tabla 25, la densidad de la resina Resoltech 1050 combinada con el endurecedor 1056S en proporción 100:35.

$$V_T = \frac{m_T}{\rho_T} = \frac{m_T}{\nu_f \cdot \rho_f + \nu_m \cdot \rho_m} = \frac{m_T}{\nu_f \cdot \rho_f + (1 - \nu_f) \cdot \rho_m} = \frac{m_T}{\nu_f \cdot (\rho_f - \rho_m) + \rho_m}$$

Sustituyendo la fracción volumétrica de fibra en la ecuación anterior:

$$\nu_f = \frac{V_f}{V_T}$$

$$V_T = \frac{m_T}{\frac{V_f}{V_T} \cdot (\rho_f - \rho_m) + \rho_m} = \frac{V_T \cdot m_T}{V_f \cdot (\rho_f - \rho_m) + V_T \cdot \rho_m}$$

$$V_f \cdot (\rho_f - \rho_m) + V_T \cdot \rho_m = m_T$$

$$V_T = \frac{m_T - V_f \cdot (\rho_f - \rho_m)}{\rho_m} = \frac{8,2g - 3.125mm^3 \cdot (0,0018 \frac{g}{mm^3} - 0,0011 \frac{g}{mm^3})}{0,0011 \frac{g}{mm^3}}$$

$$V_T = 5.465,91mm^3$$

Por tanto, la fracción de fibra es:

$$v_f = \frac{V_f}{V_T} = \frac{3.125mm^3}{5.465,91mm^3} = 0,57$$

Esta fracción de fibra equivale a 6 capas distintas:

- 2 capas a $0^\circ \rightarrow v_{f0^\circ} = 0,19$
- 2 capas a $45^\circ \rightarrow v_{f45^\circ} = 0,19$
- 2 capas a $-45^\circ \rightarrow v_{f-45^\circ} = 0,19$

La fracción de resina equivale al volumen unitario restante:

$$v_m = 1 - v_f = 0,43$$

El módulo de elasticidad se puede determinar mediante la regla de las mezclas como:

$$E = E_{f0^\circ} \cdot v_{f0^\circ} + E_{f45^\circ} \cdot v_{f45^\circ} + E_{f-45^\circ} \cdot v_{f-45^\circ} + E_m \cdot v_m$$

Despreciando los términos a 45° , ya que a tracción no soportan esfuerzo, se tiene:

$$E = E_{f0^\circ} \cdot v_{f0^\circ} + E_m \cdot v_m$$

$$E = 230 \text{ GPa} \cdot 0,19 + 3,52 \text{ GPa} \cdot 0,43 = 45,2136 \text{ GPa}$$

6.2 ENSAYO DE FLEXIÓN

A diferencia del ensayo anterior este tipo de ensayo no tiene interés para el cálculo de propiedades de los materiales. Sin embargo es muy usado como control de calidad.

Existen dos modalidades de ensayos de flexión: el ensayo a 3 puntos y el ensayo a 4 puntos. En el primero se estudia la curvatura del material biapoyado sometido al esfuerzo de una carga puntual en el centro mientras que en el segundo se somete a dos cargas puntuales. El ensayo de tres puntos viene recomendado para materiales rígidos y el de cuatro para materiales flexibles con mayor deflexión. Ya que la estructura de fibra de carbono y epoxi con núcleo sándwich es muy rígida se procederá según la primera modalidad.

Este tipo de ensayo, donde se requiere menor esfuerzo, se realiza en la prensa de 30 kN (Figura 73) ya que aunque puede realizar menor esfuerzo, al tener un rango menor de trabajo será más precisa.

Con ayuda del útil para ensayos de tres puntos (Figura 75) se estudia el comportamiento de una probeta de fibra de carbono y resina epoxi [0,45,-45,N,-45,45,0] de 230x15mm.

Para ello se dispone el útil sobre la garra inferior y se fija a ella. A continuación se coloca la placa redondeada que actúa como carga puntual sobre la garra superior. Tras ello, se ajusta la distancia entre las columnas móviles a la longitud deseada. En este caso $L = 200$ mm.

Una vez ajustado el útil y la carga se encuentre correctamente centrada se coloca la probeta en su posición y tras ajustar las variables que intervienen en el proceso, comienza el ensayo. En este ensayo la garra superior baja a velocidad constante produciendo un esfuerzo de flexión variable a lo largo del desplazamiento. Al igual que con el equipo del ensayo de tracción, un sensor dinamométrico transfiere una señal eléctrica que es proporcional a la fuerza ejercida y un transductor interpreta el valor de la carga.

Este ensayo arroja un fichero con el valor del desplazamiento en mm y la fuerza en kN de cada instante del ensayo. Para transformar estas magnitudes a esfuerzos de flexión y cortante se recurre a las siguientes fórmulas:

$$\sigma_f = \frac{M}{be(h - e)}$$

$$\tau_c = \frac{Q}{b(h - e)}$$

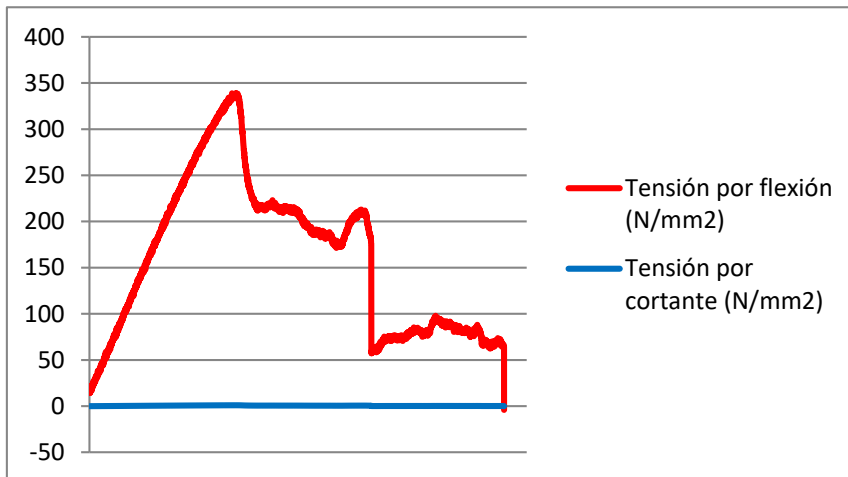


Figura 109. Ensayo de flexión en 3 puntos de una probeta de fibra de carbono y resina epoxi con núcleo sándwich [0,45,-45,N,-45,45,0].

El máximo valor de flexión se produce para una carga de 91,5 N. Esto produce un esfuerzo flectante de 339,02 N/mm² y un esfuerzo cortante de 1,02 N/mm²

Para el caso del contenedor de baterías, el caso más desfavorable sería una luz de 160 mm que soporte una carga puntual de 11 kg en el centro.

Cada batería pesa 0,84 kg. En el caso más desfavorable existen 11 baterías en 160 mm. Esto puede considerarse como una carga uniformemente distribuida de valor:

$$q = \frac{0,84 \frac{kg}{bat} \cdot 11 bat}{160 mm} = 0,05775 \frac{kg}{mm} = 0,5775 N/mm$$

Como muestra la tabla de la figuras 21 y 22, el momento y el cortante máximo en una placa biempotrada con una carga distribuida uniforme viene dado por las expresiones:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{q \cdot l^2}{12} = \frac{0,5775 N/mm \cdot (160mm)^2}{12} = 1.232 N \cdot mm$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{0,5775 N/mm \cdot 160mm}{2} = 46,2 N \cdot mm$$

Por tanto:

$$\sigma_f = \frac{M}{be(h - e)} = \frac{1.232 N \cdot mm}{0,3 mm \cdot 15 mm(3,3 mm - 0,3 mm)} = 91,25 \frac{N}{mm^2} \ll 339,02 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_c = \frac{Q \cdot l}{2b(h - e)} = \frac{0,5775 \frac{N}{mm} \cdot 160 mm}{2 \cdot 15 mm(3,3 mm - 0,3 mm)} = 1,02 N/mm$$

7. CONCLUSIONES

Para mí ha sido todo un reto trabajar con materiales compuestos. A diferencia de los materiales tradicionales como hierro, acero o aluminio; es muy difícil determinar sus propiedades. Existen un gran número de variables que intervienen en el proceso y que su mala gestión podría ocasionar una disminución considerable de las propiedades mecánicas.

Sin embargo, está claro que los materiales compuestos son una apuesta de futuro ya que cada vez más se tiende a aumentar el rendimiento de los procesos y como no, en esto influye en gran medida el peso de los equipos. Cada vez se tiende a materiales más ligeros, por ello los materiales compuestos juegan un papel clave.

En las últimas décadas se ha reducido el coste de estas materias primas y de los procesos para fabricar con ellas. En este Trabajo Fin de Máster, ha quedado demostrado como se pueden conseguir piezas a pequeña escala de buena calidad y alto rendimiento con procesos sencillos.

Debido a la falta de tiempo no se ha podido profundizar demasiado en el estudio de resistencia de materiales pero se ha realizado un alto número de ensayos sobre distintas configuraciones de probetas que dejan una puerta abierta para seguir explorando.

VOCABULARIO

Autoclave: Horno a presión usado en fabricación de materiales compuestos.

Bleeder: Es una malla interna del canal rápido que permite la circulación libre de la resina en el proceso de infusión.

DIC: "Correlación Digital de Imágenes". Es un método que relaciona la señal eléctrica que producen los esfuerzos con la deformación física captada por cámaras de alta resolución.

EPI: Equipos de Protección Individual que garantizan la seguridad del operario en ambientes de trabajo peligrosos.

Gel Coats: Recubrimiento aplicado sobre materiales compuestos para crear una superficie fina y uniforme.

MC: Material compuesto

Ortótropo: Material con dos o tres ejes ortogonales entre sí de forma que sus propiedades mecánicas son, en general, diferentes en cada uno de esos ejes.

Peel-ply: Tela sintética usada en procesos de infusión y vacío para crear una superficie lisa y facilitar el desmoldado.

Preimpregnado, pre-peg: Material compuesto de fibra y resina en estado no activado que cura mediante proceso de termo-compresión.

RTM: "Resin Transfer Molding" Proceso de fabricación para materiales compuestos.

Tacky Tape: Cinta adhesiva de doble cara usada en procesos de vacío para la fabricación de materiales compuestos. Esta cinta adhiere y sella la bolsa de vacío con el molde rígido.

BIBLIOGRAFIA

Ashby, M.F. y Jones, D. R. "Engineering materials" 2ª Edición. Elsevier Science. Oxford. University of Cambridge 1996 .

Besednjak Dietrich, A. "Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones". Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña 2005.

Blanco Álvarez, F. " Apuntes de la asignatura de Materiales Poliméricos y Compuestos " Universidad de Oviedo 2004.

Hull, D. "Materiales compuestos". Editorial Reverté 1987.

Miravete, A. "Materiales Compuestos". Editorial Reverté 2007.

Niu Michael, C. Y. "Composite Airframe Structures". Editorial Reviews 1992.

NTP 133: Tronzadora - Ingletadora

NORMATIVA

Norma UNE-EN 2561 Material aeroespacial. Plásticos reforzado de fibra de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra. Junio 1996.

Norma UNE-EN 2562 Material aeroespacial. Plásticos reforzado de fibra de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra.



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Octubre 1997.

ASTM D-790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

ASTM D-3039/D 3039 M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

REFERENCIAS ON-LINE

Lucintel. "Growth Opportunities in Carbon Fiber Market 2010- 2015" April 2010

http://www.lucintel.com/carbon_fiber_market.aspx

<http://www.resinascastro.com>