

Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval

Trabajo Final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Carlos Pérez Alonso

Dirigido por:
Xavier Martínez García

Grado en Ingeniería en Sistemas i Tecnología Naval

Barcelona, Mayo de 2016

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona



Resumen

El proyecto se divide en dos bloques principales. El objetivo de la primera parte es proporcionar una amplia introducción sobre los materiales compuestos en relación al sector naval, en concreto sobre el sector de producción de embarcaciones. En esta sección se pretende aclarar qué elementos son primordiales para poder realizar un laminado adecuado y presentar los procesos de laminación que se están aplicando actualmente. Además es importante conocer los análisis que se realizan sobre dichos laminados, como son por ejemplo, los análisis de rotura o defectos que puedan aparecer durante el proceso de laminación, estudiar el comportamiento de estos frente al fuego o a la fatiga, entre otros. Se estudia a la vez, como repercuten los efectos ambientales sobre los laminados y las técnicas de reciclaje que se están desarrollando. También se determinarán cuales son los ensayos que se realizan sobre las materias primas y qué controles de calidad se llevan a cabo. En esta parte, se estudiará también el uso de los materiales compuestos en la industria naval, para ello se analiza la historia de estos materiales desde sus primeras aplicaciones hasta su uso actual.

Viendo la cantidad de información y lo poco ordenada que está, se decidió realizar esta segunda parte, que consiste en el desarrollo de una página web. En esta plataforma, además de presentar los conceptos teóricos que se han considerado más relevantes, se ha realizado una base de datos con todos los astilleros y empresas de producción de complementos navales con materiales compuestos a nivel nacional, con el fin de potenciar la industria naval. En esta base de datos se podrá ver información básica sobre la empresa además de una pequeña descripción.

Con la intención de crear una página web más productiva, se realizará un seguimiento continuo sobre cursos relacionados con la materia y se hará hincapié a las empresas del sector para que participen en la web, proporcionando ofertas de trabajo relacionadas con los materiales compuestos a la vez que publiquen noticias sobre nuevos productos en los que están trabajando, meritos profesionales, etc.

Abstract

The project is divided into two main blocks. The aim of this first part is to provide a comprehensive introduction on composite materials in relation with the shipbuilding sector, particularly in crafts production sector. This section clarifies the elements that are essential to make a suitable laminate and present the processes that are currently being implemented. Additionally, it is important to know the analyses performed on them, such as, for example, the rupture modes or defects that may arise during the lamination process, study the behavior of these against fire or fatigue, among others. Also, it is studied the impact of environmental effects on laminates and recycling techniques that are being developed. Moreover, determine which are the tests performed on raw materials and quality controls are carried out. In this part, it will be also described the use of composite materials in the shipbuilding industry, the story line of these materials is analyzed from its first applications to its current use.

Seeing so much information, so disorganized, it was decided to develop this second part, which it consists in the development of a website. On the website besides to presenting the theoretical concepts that have been considered most relevant, it has been developed a database with all shipyards and companies that produce naval accessories with composite materials on national level in order to enhance the naval industry. In this database, it is possible to find basic information about the company along with a brief description.

With the intention of creating a more productive site, it will have made a continuous research about courses related to the subject, it will emphasize companies in the sector to participate in website, providing job related with composite materials, and it will be published news about new products that are working, professional merits, etc.

Tabla de contenidos

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
LISTADO DE FIGURAS	VIII
LISTADO DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
BLOQUE 1	
CAPÍTULO 1. LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	3
1.1 DEFINICIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS	3
1.2 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS.....	4
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	6
1.4 COMPUESTOS REFORZADOS POR FIBRAS	7
1.4.1 <i>Concepto Matriz-Refuerzo</i>	7
1.4.2 <i>Concepto de matriz en los materiales compuestos</i>	7
1.5 MATRICES TERMOESTABLES.....	8
1.5.1 <i>Tipos de matriz termoestable</i>	8
1.5.2 <i>Proceso de curado de la resina</i>	12
1.5.3 <i>Recubrimientos</i>	13
1.6 MATERIALES DE REFUERZO	14
1.6.1 <i>Diseño de materiales de refuerzo</i>	14
1.6.2 <i>Tipos de fibras de refuerzo</i>	15
1.6.2.1 <i>Fibra de vidrio</i>	15
1.6.2.2 <i>Fibra de carbono</i>	17
1.6.2.3 <i>Fibras aramídicas (orgánicas)</i>	18
1.6.3 <i>Disposición de las fibras</i>	19
1.7 CARGAS Y ADITIVOS	20
1.8 MATERIALES PARA NÚCLEOS DE SÁNDWICH.....	21
1.8.1 <i>Nido de abeja</i>	22
1.8.2 <i>Madera de balsa</i>	23
1.8.3 <i>Espumas sintéticas</i>	23
1.8.4 <i>Fire Coremat</i>	23
1.9 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	24
CAPÍTULO 2. PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	25
2.1 MOLDEO POR CONTACTO.....	25
2.1.1 <i>Laminado manual</i>	25
2.1.2 <i>Proyección simultánea</i>	27
2.1.3 <i>Moldeo con impregnadores</i>	29
2.2. TÉCNICAS DE MOLDEO ASISTIDAS POR VACÍO.....	30

2.2.1 Laminado manual asistido por vacío.....	31
2.2.2 Laminado con Pre-impregnados	32
2.2.3 Pre-impregnados parciales	33
2.3 MOLDEO POR VÍA LÍQUIDA.....	34
2.3.1 RTM	34
2.3.2 Infusión	36
2.4 MOLDEO CON AUTOCLAVE.....	38
2.5 ENROLLAMIENTO FILAMENTARIO (MÁSTILES)	39
2.6 MOLDEO POR ESTAMPACIÓN DE TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS	41
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS	43
3.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS LAMINADOS.....	43
3.2 ROTURA DE LAMINADOS.....	44
3.2.1 Relación resistencia/tensión	44
3.2.1.1 Criterio de la máxima tensión.....	45
3.2.1.2 Criterio de la máxima deformación	45
3.2.1.3 Criterio cuadrático en el espacio de tensiones.....	46
3.2.1.4 Criterio cuadrático en el espacio de deformaciones	47
3.2.2 Roturas sucesivas de lámina	47
3.2.3 Coeficientes de seguridad.....	48
3.3 DEFECTOLOGÍA TÍPICA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	48
CAPÍTULO 4. COMPORTAMIENTO.....	51
4.1 EFECTOS AMBIENTALES.....	51
4.1.1 Exposición a un ambiente húmedo o un líquido	51
4.1.2 Degradación debida a las radiaciones ultravioletas del sol	51
4.1.3 Ataques químicos	52
4.1.4 Envejecimiento	52
4.2 COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO.....	52
4.3 COMPORTAMIENTO FRENTE A FATIGA.....	53
4.3.1 Mecanismos de degradación por fatiga.....	53
4.3.1.1 El proceso de fatiga	53
4.3.1.2 Mecanismo de degradación por fatiga.....	54
4.4 RECICLAJE DE MATERIALES COMPUESTOS.....	54
4.4.1 Reciclado de materiales compuestos de fibra de vidrio y matriz termoestable.....	55
4.4.1.1 Amolado simple del SMC	55
4.4.1.2 Degradación química selectiva de fragmentos de SMC	55
4.4.1.3 Pirólisis de fragmentos de SMC	56
4.4.1.4 Incineración en recuperación de energía.....	56
4.4.2 Reciclado de materiales compuestos carbono/epoxi.....	56
CAPÍTULO 5. ENSAYOS Y CALIDAD	57
5.1 ENSAYOS SOBRE LAS MATERIAS PRIMAS	58
5.1.1 Ensayos y control sobre las fibras	58
5.1.2 Control de matrices	58
5.1.3 Control de la interfase	59
5.2 CONTROL DEL MATERIAL COMPUESTO	60
5.2.1 Control de probetas.....	60
5.2.2 Ensayos destructivos sobre las piezas	60

5.2.3 Ensayos no destructivos	61
CAPÍTULO 6. LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA NAVAL	63
6.1. INTRODUCCIÓN	63
6.2. APLICACIONES NAVALES DE LOS COMPOSITES	64
6.3. COMPONENTES ESTRUCTURALES EN BUQUES	68
6.4. OCIO, COMPETICIÓN Y COMERCIO DE BUQUES DE MATERIALES COMPUESTOS	70
6.5. APLICACIONES OFFSHORE DE LOS COMPOSITES	73
6.6 APLICACIONES ACTUALES	74
<u>BLOQUE 2</u>	
NAVAL COMPOSITES	77
SOBRE NOSOTROS	77
MATERIALES COMPUESTOS	78
ASTILLEROS	78
COMPLEMENTOS NAVALES	79
CURSOS	80
NOTICIAS	81
EMPLEO	81
CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84

Listado de figuras

FIGURA 1. CURVA EXOTÉRMICA CARACTERÍSTICA DE UNA RESINA - MATERIALES COMPUESTOS (ALEJANDO BASEDNJAK)	12
FIGURA 2. EJEMPLO DE ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS - TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS	14
FIGURA 3. (A) MAT DE FIBRAS DE CORTADAS. (B) MAT DE FIBRAS CONTINUAS - MATERIALES COMPUESTOS (ALEJANDO BASEDNJAK) ...	19
FIGURA 4. DIFERENTES TIPOS DE TEJIDOS, (1) TELA O TAFETÁN, (2) SARGA, (3) SATÉN	20
FIGURA 5. ENSAMBLADO BIAIXIAL - MATERIALES COMPUESTOS (ALEJANDO BASEDNJAK)	20
FIGURA 6. ELEMENTOS ESTRUCTURA SÁNDWICH - NAFEMS BENCHMARK COMPOSITE TEST R0031/3.....	21
FIGURA 7. COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA SÁNDWICH	22
FIGURA 8. EJEMPLO DE NÚCLEO "NIDO DE ABEJA"	22
FIGURA 9. CABEZAL DE PROYECCIÓN SIMULTÁNEA. - MATERIALES COMPUESTOS, PROCESOS DE FABRICACIÓN. ALEJANDRO BASEDNJAK ...	28
FIGURA 10. ESQUEMA EQUIPO DE IMPREGNACIÓN MANUAL. - MATERIALES COMPUESTOS. ALEJANDRO BASEDNJAK	29
FIGURA 11. ESQUEMA EQUIPO DE VACÍO	31
FIGURA 12. GENERACIÓN DE VACÍO EN EL LAMINADO. - MATERIALES COMPUESTOS (ANTONIO MIRAVETE)	31
FIGURA 13. MATERIALES FUNGIBLES DEL MÉTODO DE LAMINADO ASISTIDO POR VACÍO	32
FIGURA 14. ESTRUCTURA DEL MOLDE PARA EL MÉTODO DE MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM).	34
FIGURA 15. MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM). INYECCIÓN PUNTUAL.....	36
FIGURA 16. ESTRUCTURA DEL MOLDE PARA EL MÉTODO DE MOLDEO POR INFUSIÓN	37
FIGURA 17. AUTOCLAVE PARA ASTILLEROS NAVALES. ITALMATIC.	39
FIGURA 18. DIFERENTES TÉCNICAS DE BOBINADO. A) HELICOIDAL, B) CIRCULAR Y C) POLAR.....	39
FIGURA 19. MOLDEO POR ENROLLAMIENTO FILAMENTARIO.	40
FIGURA 20. CRITERIO DE LA MÁXIMA DEFORMACIÓN DE UNA LÁMINA ORTÓTropa.	45
FIGURA 21. LUGAR GEOMÉTRICO DE ROTURA-PRIMERA-LAMINA USANDO EL CRITERIO DE MÁXIMA DEFORMACIÓN.....	47
FIGURA 22. DEFECTO POR DELAMINACIÓN.	49
FIGURA 23. INCLUSIONES EN EL LAMINADO.	49
FIGURA 24. EJEMPLO DE POROSIDAD UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA.	50
FIGURA 25. BARCOS DE COMPOSITE. (A) EL BUQUE "SANDOWN CLASS MINEHUNTER" CONSTRUIDO CON UNA SOLA CAPA (SINGLE-SKIN). (B) EL BUQUE "HUON CLASS MINEHUNTER" CON CONSTRUCCIÓN EN MONOCASCO. (C) EL BUQUE "BAY CLASS MINEHUNTER" CON CASCO COMPUESTO EN SÁNDWICH.....	65
FIGURA 26. EL "SKJØLD CLASS" BARCO DE PATRULLA.....	66
FIGURA 27. VISBY CLASS CORVETTE	67
FIGURA 28. LA FAYATTE, FRAGATA CON LA SUPERESTRUCTURA EN COMPOSITE EN LA SECCIÓN QUE SE MUESTRA EN EL CÍRCULO.	68
FIGURA 29. MASTIL AEM/S DE COMPOSITE EN EL BUQUE USS ARTHUR W. RADFORD.....	69
FIGURA 30. BARCOS CONSTRUIDOS CASI EN SU TOTALIDAD CON MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS. (A) 2000 TEAM NEW ZEALAND IACC YATE. (B) BARCO DE REGATAS SERIE F- 2	71
FIGURA 31. EJEMPLO DE INFORMACIÓN SOBRE ASTILLEROS - NAVAL COMPOSITES	79
FIGURA 32. EJEMPLO DE INFORMACIÓN SOBRE EMPRESAS PRODUCCIÓN COMPLEMENTOS NAVALES - NAVAL COMPOSITES	80
FIGURA 33. EJEMPLO DE INFORMACIÓN SOBRE CURSOS - NAVAL COMPOSITES.....	80
FIGURA 34. EJEMPLO DE NOTICIAS - NAVAL COMPOSITES.....	81
FIGURA 35. EJEMPLO DE EMPLEOS - NAVAL COMPOSITES	82

Listado de tablas

TABLA 1. PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXI. - MIRAVETE (1990)	11
TABLA 2. TABLA COMPARATIVA DE LAS PROPIEDADES DE LAS RESINAS.....	11
TABLA 3. PROPIEDADES DE DISTINTOS TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO - MIRAVETE (1990).....	16
TABLA 4. PROPIEDADES DE DIFERENTES FIBRAS DE CARBONO. - MIRAVETE (1990)	17
TABLA 5. PROPIEDADES DE DIFERENTES FIBRAS ARAMÍDICAS. - MIRAVETE (1990)	18
TABLA 6. LISTA DE LAS EMBARCACIONES QUE SE FABRICARON CON PRFV - ASM HANDBOOK.....	64

Introducción

Los materiales compuestos tienen una gran proyección dentro del mundo de la náutica actual debido a sus excelentes propiedades, entre ellas la relación rigidez-peso y resistencia-peso, además estos están sometidos a constantes análisis y procesos de mejora con la intención de conseguir un material más óptimo para futuras aplicaciones.

Estos materiales han modernizado la industria naval ya que han proporcionado grandes mejoras en diferentes aspectos, por ejemplo, entre otras cosas, han mejorado el diseño de las formas de los cascos o han reducido los costes de mantenimiento gracias a las buenas propiedades que poseen estos contra la corrosión. Además, al crear estructuras con composite se consiguen que estas sean mucho más livianas que las fabricadas con otros materiales, como son el acero y el aluminio, y esto se traduce en un ahorro de combustible.

Estos materiales se pueden considerar el futuro de la industria naval, sin desvalorar los otros materiales que se emplean. El hecho de trabajar con materiales compuestos facilita a las empresas poder hacer una producción en cadena mucho más económica, cosa que es un punto a favor para su uso, ya que con un simple molde se puede llegar a fabricar una gran cantidad de piezas del mismo producto.

Después de haber visto la situación actual y el tipo de material de fabricación en el sector naval, se podría decir que alrededor de un noventa por ciento de las empresas nacionales de construcción de embarcaciones de pequeña y mediana eslora, trabajan con composite, hecho que pone en manifiesto la importancia de estos materiales en el sector naval actual.

Este proyecto se divide en dos bloques, en el primer bloque se proporcionará información sobre los materiales compuestos. Este bloque está dividido en seis capítulos en los que se reflejará en cada uno de ellos la información que se ha considerado más relevante y de forma detallada.

Con el capítulo 1, titulado "Los materiales compuestos", se ha pretendido aclarar el significado de material compuesto, es decir, proporcionar una definición detallada sobre estos y presentar las partes que se necesitan para poder producirlo, a la vez que se determinarán los tipos de elementos que hay para cada parte que conforma un composite. En el capítulo 2, se pretende presentar los tipos de procesos de fabricación que se llevan a cabo en la industria naval. Los capítulos 3, 4 y 5 representan la parte más analítica de este proyecto ya que se tratarán temas más específicos de los materiales compuestos, como es el caso del estudio sobre análisis que se realizan sobre estos, su comportamiento frente a distintos factores, y ensayos y controles de calidad que se llevan a cabo sobre estos. Finalmente, en el capítulo 6, con el que concluiremos este primer bloque, se hablará sobre los materiales compuestos en la industria naval, en el que se podrá ver un poco de su historia y evolución,

no solo en la producción de embarcaciones sino que se mostrarán cuales son las aplicaciones de estos en diferentes ámbitos del mundo naval, como por ejemplo, en el campo de la competición o en estructuras offshore. Finalmente se dará una visión general de sus aplicaciones actuales.

En el segundo bloque se reflejará la información que aparece en "Naval Composites". Después de comprobar la cantidad de información que había sobre estos y lo desordenada que estaba, decidí marcarme como objetivo crear una plataforma virtual sobre los materiales compuestos en el mundo naval para recolectar y difundir información y promocionar a distintas empresas del sector.

Para poder alcanzar los objetivos seleccionados de este trabajo se ha seguido una metodología basada en el desarrollo de las diferentes fases que se relacionan a continuación.

1a Fase: Obtención de información general sobre los materiales compuestos.

2a Fase: Obtención de datos sobre los orígenes de los materiales compuestos.

3a Fase: Obtención de información sobre el presente de los materiales compuestos.

4a Fase: Búsqueda de empresas que trabajan con los materiales compuestos a nivel nacional.

5a Fase: Análisis y organización de la información recopilada en primera persona e ilustración de esta en una nueva plataforma virtual.

Capítulo 1. Los materiales compuestos

1.1 Definición de materiales compuestos

Se definen como las combinaciones de dos o más materiales a partir de una unión química o no química. Estos materiales que forman el compuesto poseen propiedades mejores que las que presentan los materiales componentes por sí solos.

Los componentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de refuerzo), por lo que hace que sus propiedades no serán las mismas en todo su volumen.

Si se analiza el compuesto, se pueden diferenciar dos fases:

- La fase continua, constituida por la **matriz** y es la que actúa como ligante.
- La fase discontinua, también llamado **refuerzo** y es el elemento resistente.

Dado que los materiales compuestos usados en la construcción naval combinan resinas con fibras de refuerzo, las propiedades del material resultante combinarán de alguna manera las propiedades de cada uno de estos dos componentes.

Las propiedades del material compuesto estarán determinadas por:

- Las propiedades de la fibra
- Las propiedades de la matriz
- La relación entre la cantidad de fibra y de resina en el material
- La geometría y orientación de las fibras en el compuesto

La mayoría de los materiales compuestos poseen una alta resistencia mecánica al mismo tiempo que una baja densidad, lo cual permite realizar estructuras y dispositivos resistentes y a la vez livianos.

Hay que determinar algunas consideraciones para concretar que se entiende como material compuesto:

- No se considera un compuesto aquellos materiales tradicionales o macroscópicamente homogéneos, ya que como se ha mencionado anteriormente, la interfase de los materiales que componen el compuesto debe de poder ser identificables por medios físicos. Un ejemplo de estos sería las aleaciones metálicas.

- El material compuesto debe estar formado por dos o más fases constituyentes física y/o químicamente diferentes, dispuestos de forma adecuada y separados por una interfase. Por lo tanto no deben tener continuidad fenomenológica, de modo que los materiales cerámicos, por ejemplo, a pesar de estar compuestos por varios componentes cristalinos y amorfos, no son considerados materiales compuestos ya que son continuos fenomenológicamente hablando.

1.2 Tipos de materiales compuestos

a) Clasificación de los materiales compuestos en función del tipo de matriz:

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

Materiales compuestos de matriz metálica (MMC):

Estos materiales tienen una alta resistencia y muy bajo peso. Se pueden clasificar tres grandes grupos de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: reforzados con fibra continua, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas.

Un ejemplo de estos materiales serían las aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro.

Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC):

Tienen mejores propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales, especialmente en rangos de bajas temperaturas. Estos también se clasifican en función del tipo de refuerzos que tenga: reforzados con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas y reforzadas con partículas.

Las fibras de refuerzo que se combinan con las matrices cerámicas son las de carburo de silicio y las de óxido de aluminio, y en el caso de las fibras discontinuas y partículas se utilizan como refuerzo agujas cerámicas de carburo de silicio.

Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC):

Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y a causa de sus propiedades físicas, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas. Son aquellos materiales en los cuales la matriz está constituida por un polímero y el refuerzo es algún tipo de fibra, ya sea orgánica o inorgánica. Dentro de este tipo de materiales compuestos, podemos destacar los termoestables y los termoplásticos. En concreto los termoestables son los más usados en la construcción de embarcaciones.

b) Clasificación de los materiales compuestos en función de la forma que posea el refuerzo:

- Compuestos reforzados por partículas
- Compuestos reforzados por fibras
- Compuestos estructurales

Compuestos reforzados con partículas:

En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga.

Los compuestos reforzados con partículas, se subdividen en reforzados con partículas grandes y endurecidos por dispersión.

- **Compuestos endurecidos por dispersión:** Son aquellos en los cuales las partículas poseen de 10 a 250 *nm* de diámetro dispersos en la matriz de forma homogénea. Debido a que estas partículas dificultan el movimiento de las dislocaciones, producen un efecto de endurecimiento notable en el material con pequeñas cantidades. Tienen mejor resistencia a la fluencia que los metales y algunas aleaciones.
- **Compuestos reforzados con partículas grandes:** El término grande se utiliza para indicar que las interacciones entre la matriz y las partículas son a nivel macroscópico. Las partículas restringen los movimientos de la matriz que les rodea y van a soportar una parte importante de las fuerzas que se ejercen sobre ella. Su efectividad aumenta con la cohesión matriz-partícula que se establezca.

Las partículas pueden ser de geometrías diferentes, pero se debe tratar de que presenten la misma dimensión en todas las direcciones, para evitar orientaciones con mayor fragilidad.

Compuestos reforzados por fibras

Los materiales reforzados por fibras son los composites más importantes desde el punto de vista tecnológico. El objetivo es conseguir materiales con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso. Esta relación se consigue empleando materiales ligeros tanto en la matriz como en las fibras, siempre que estas cumplan con las propiedades mecánicas que se quieren otorgar al composite.

Entre los factores que se tienen que tener en cuenta a la hora de diseñar estos materiales se encuentran: la longitud, el diámetro de la fibra, orientación, concentración y propiedades de las fibras, las propiedades de la matriz y la conexión entre las fibras y la matriz.

Compuestos estructurales:

Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales. Se clasifican los compuestos estructurales en:

- **Compuestos laminares:** se caracterizan por su elevada resistencia en todas las direcciones, siendo además ligeros y de bajo coste. Tienen propiedades térmicas interesantes y generalmente se diseñan para que su resistencia a la abrasión y la corrosión sean buenas.

Los más conocidos son los laminados, que están formados por laminas que se apilan y se pegan entre sí de manera que las direcciones de las fibras con mayor resistencia se vayan alternando, de esta manera se consigue un laminado más resistente en todas las direcciones. El adhesivo que se utiliza para unir las láminas es un polímero que endurece por calentamiento y presión.

- **Estructura sandwich:** esta estructura son un tipo de lámina, en la que el núcleo central es de baja resistencia. Está constituida por dos caras externas resistentes, y entre estas dos se interpone un núcleo que es un material ligero y por lo general de baja densidad, que tiene la función de mantener separadas las caras exteriores, brindar aislamiento térmico y transmitir los esfuerzos cortantes de una cara a la opuesta. El núcleo aumenta el espesor de la estructura, y a lo referente al peso no se modifica demasiado ya que como se ha mencionado anteriormente es un material ligero. Con todo esto conseguimos un material mucho más resistente.
- **Estructuras no-laminares:** en este tipo de estructura las fibras se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda la sección transversal. El refuerzo se impregna de resina líquida al pasar a través de un baño o a través de una zona donde la resina se proyecta con inyectoros. Finalmente el refuerzo impregnado se adapta a la estructura del molde. Un ejemplo de este tipo de estructuras son los perfiles pultrusionados.

1.3 Características de los materiales compuestos

Las principales características de los materiales compuestos son:

Alta resistencia: Los materiales compuestos tienen una alta resistencia en relación a su peso. Con esto se puede deducir que las estructuras serán más livianas. Como se ha dicho anteriormente, en función del tipo de refuerzo y matriz que se usen se obtendrán unas propiedades mecánicas determinadas, por lo tanto, se podrá ajustar su resistencia para cumplir con una especificación concreta.

Baja densidad: Los materiales compuestos proporcionan una buena resistencia por unidad de peso, no como en el caso de los metales, ya que su densidad es mayor.

Flexibilidad de formas: Debido a que las fibras de refuerzo se pueden trabajar con mayor facilidad que otros materiales antes del proceso de curado de la matriz, se pueden realizar una gran variedad de formas y acabados.

Alta resistencia dieléctrica: Los materiales compuestos son aislantes eléctricos.

Gran capacidad de consolidación de partes: Los materiales compuestos permiten el ensamblaje de componentes, reduciendo así el número de elementos y por lo tanto, necesitando menor número de uniones. Todo ello conlleva una reducción considerable de peso y coste.

Resistencia a la corrosión: Esta propiedad viene determinada por el tipo de matriz que se utiliza. De esta manera se puede seleccionar matrices con resistencia a cualquier medio corrosivo. Gracias a esto, podemos obtener estructuras más duraderas en el tiempo y sin la necesidad de realizar un gran mantenimiento.

Reducción de costes de mantenimiento: Viene asociada por la resistencia a la corrosión que presentan estos materiales compuestos y la durabilidad en el tiempo, ya que como se ha mencionado, estos

materiales presentan muy buena resistencia a la corrosión, lo que conlleva en un ahorro en tareas de mantenimiento y costes de reparación.

Comportamiento a fatiga: El comportamiento a la fatiga de los compuestos es bueno. Al ser materiales amorfos, es decir, no tienen una estructura ordenada, no sufren los mismos efectos de fatiga que los metales y su resistencia es mayor. No obstante, sí que pueden tener problemas de fatiga los compuestos laminados que, frente a cargas cíclicas, pueden sufrir delaminaciones.

1.4 Compuestos reforzados por fibras

En el sector naval los materiales compuestos suelen ir reforzados por fibras y no por partículas. Por esta razón se desarrollarán los tipos de matrices y refuerzos que podemos encontrar en este sector.

1.4.1 Concepto Matriz-Refuerzo

De la combinación matriz-refuerzo, el refuerzo es el que otorga las principales propiedades resistentes al nuevo material. De hecho, las fibras de refuerzo ya constituyen por sí solas el elemento resistente al material, sin embargo su eficiencia no es la óptima. Por lo tanto es necesario combinarlas con una matriz que las proteja de factores externos y les transfiera las cargas aplicadas sobre la estructura.

La adherencia entre la fibra y la matriz debe ser máxima, tanto para evitar su deterioro (arrancado, delaminaciones, etc.), como para que la transmisión de la carga de la matriz a las fibras sea óptima. Normalmente, con matrices poliméricas y metálicas la adherencia es muy buena. No obstante, también puede utilizarse recubrimientos para las fibras que favorecen sus enlaces con la matriz. Así, las fibras de vidrio y carbono suelen recubrirse de algún material orgánico (silanos, generalmente) para mejorar sus enlaces con los polímeros. También se tiene que tener en cuenta que, si la fibra y la matriz no presentan similares respuestas térmicas (expansión-contracción) los enlaces romperán con mayor facilidad.

1.4.2 Concepto de matriz en los materiales compuestos

En los materiales compuestos podemos encontrar diferentes tipos de matrices como pueden ser: matrices metálicas, cerámicas y poliméricas entre otras. En el sector naval las matrices más usadas para la realización de elementos del buque como pueden ser cascos, cubierta, mástiles, etc. son las matrices poliméricas, y por lo tanto en este apartado solo haremos mención a este tipo de matriz.

Los polímeros que forman las matrices poliméricas se pueden clasificar por su origen:

- a) **Polímeros naturales:** Como polímeros naturales podemos mencionar la lana, la seda, la celulosa, el caucho natural, etc.
- b) **Polímeros sintéticos:** como polímeros sintéticos podemos mencionar los plásticos, el caucho sintético, las pinturas y recubrimientos, los adhesivos, los pegamentos, las resinas endurecibles, etc.

O se pueden clasificar según el comportamiento térmico del polímero, es decir, en la termo-dependencia de sus propiedades, tenemos:

1. **Termoplásticos:** Son polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, permitiendo su moldeabilidad en la forma deseada, que quedará preservada al enfriarse.
2. **Elastómeros:** Son polímeros que poseen cadenas con mucha libertad de movimiento molecular (flexibilidad).
3. **Termoestables:** Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados. Molecularmente hablando tienen una estructura entrecruzada y por lo tanto tienden a ser resinas de mucha rigidez, y al someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero. A temperatura ambiente son duros y frágiles.

En la construcción naval, tal y como se ha mencionado anteriormente, las matrices más usadas para los procesos de fabricación con materiales son las matrices poliméricas, y en especial las matrices termoestables. Esto es así ya que este tipo de matriz no necesita de grandes inversiones en moldes ni controles de temperatura, ya que la mayoría de resinas de este tipo curan a temperatura ambiente. También se usan matrices termoplásticas para la construcción de piezas pequeñas.

1.5 Matrices termoestables

Un polímero termoestable es aquel que no reblandece ni fluye una vez ya ha curado, por mucho que se aumente la temperatura llega antes a descomponerse que a fluir. Tampoco hay una sustancia química que permita disolverlo. Por este motivo, son materiales que una vez curados no pueden ser refundidos o reprocesados.

El estado inicial de las matrices termoestables es un líquido viscoso, que por efecto de una reacción endurecimiento pasa por un estado de gel y se transforma finalmente en un sólido. Según el grado de esta reticulación se definen la fragilidad y resistencia a la temperatura del producto final. A mayor grado, mas resistencia térmica, mayor fragilidad y, en contrapartida, menor capacidad de absorción de energía, menor alargamiento a la rotura, y menor resistencia química. Por lo tanto, se tiene que tener muy en cuenta estos factores a la hora del procesado de un producto que esté formado con matrices termoestables.

Las principales ventajas que ofrecen las matrices termoestables en el producto final son: Alta rigidez, bajo peso, alta estabilidad dimensional, alta estabilidad térmica, resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga y buenas propiedades como aislante térmico y eléctrico.

1.5.1 Tipos de matriz termoestable

Las resinas más utilizadas en el sector naval son:

- a) Resinas poliéster
- b) Resinas viniléster
- c) Resinas epoxi

a) Resinas de poliéster

Son las resinas más utilizadas de entre todas las matrices termoestables y, dadas sus características, son las más utilizadas en la construcción de embarcaciones en serie. Otra de las razones de que sea la más usada es su reducido coste a comparación de las otras matrices.

En líneas generales estas resinas presentan baja temperatura de transición vítrea, y su resistencia y rigidez no son muy elevadas. Durante el endurecimiento tienden a contraerse (entre el 6 y el 10%), siendo este uno de sus puntos débiles. La viscosidad a temperatura ambiente, para resinas de laminados manuales, ronda los 300 cPs, aunque existen resinas específicas, como las de infusión, en las cuales la viscosidad se establece en torno a 100 cPs.

En las resinas de poliéster el acelerante o acelerador se llama **octoato de cobalto** y el catalizador se llama **mek (metil-etil-cetona) peróxido**.

La Caducidad aproximada de la resina de poliéster es de 6 meses .Si se ha abierto el envase la vida del producto será mucho menor. Para su conservación se debe evitar la humedad, la alta temperatura y la luz solar.

Tiene una ebullición inferior a los 60º C, su disolvente que es el estireno, tiene un punto de inflamación de 33º por ello es muy recomendable guardar las resinas lejos de cualquier foco inflamable.

Tipos de resinas poliéster:

Dependiendo del tipo de alcoholes y ácidos de los que se parta, se obtienen diferentes tipos de resinas poliéster. Según la naturaleza de sus monómeros constituyentes, se dividen en:

Ortoftálicas: constituyen las más frecuentes y las de menor coste entre las resinas de poliéster. Absorben hasta un 2.5% de agua en inmersiones prolongadas. De utilización general.

Isoftálicas: tienen mejores propiedades mecánicas que las ortoftálicas, y mejor resistencia en ambientes marinos (menor absorción). La mayoría de gel coats de uso naval se formulan en base isoftálica.

Bisfenólicas: tienen mejores propiedades mecánicas y químicas que las resinas ortoftálicas e isoftálicas, aunque un elevado coste. Es la resina más idónea entre las poliéster para medios corrosivos.

b) Resinas viniléster

Las resinas viniléster se puede definir como una resina intermedia entre la epoxi y la poliéster, ya que de las resinas epoxi se adquieren sus buenas propiedades físico-químicas y de las resinas poliéster heredan sus ciclos de curado relativamente cortos.

Estas resinas son el resultado de una reacción de *poliadición* de una resina epoxi sobre un ácido insaturado acrílico o metacrílico, que proporciona una insaturación en su cadena. De una manera análoga a las resinas de poliéster, el material extraído de esta reacción se disuelve en estireno para reducir su viscosidad y facilitar su empleo en procesos posteriores.

Las resinas viniléster poseen mejores propiedades mecánicas, químicas y térmicas que las de poliéster; poseen un alto grado de resiliencia (energía de deformación que puede ser recuperada de un cuerpo

deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación), buena resistencia a la fatiga y la contracción durante el curado es menor que el de las resinas de poliéster (1%).

Las viscosidades son similares a las resinas de poliéster, lo que facilita la impregnación y manipulación durante el moldeo. Presentan también buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, y buena resistencia al fuego, aunque no son auto-extinguibles (puede obtenerse por modificaciones).

En la industria naval se utilizan fundamentalmente para la construcción de cascos de embarcaciones o piezas que se encuentran sumergidas constantemente. También se emplea en combinaciones con resinas de poliéster en las primeras capas de laminado para evitar osmosis, y en la fabricación de depósitos, tanques, tuberías y otras piezas que por su finalidad y ubicación requieren alta resistencia química.

Aunque se tiene que mencionar que estas son menos utilizadas que las poliéster ya que son más caras.

c) Resinas epoxi

Las resinas *epoxi* son las resinas más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad, básicamente porque poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster y de viniléster. Tienen una buena capacidad de adhesión y por lo tanto se obtienen laminados con un elevado contenido de fibra.

Las resinas epoxi son resinas termoendurecibles. Se basan en los llamados epóxidos (generalmente bisfenol A), que endurecen por poliadición al reaccionar con los agentes de curado que son normalmente anhídridos difuncionales o aminas. Por lo tanto, las características finales de la resina dependerán del tipo de epóxido y del agente de reticulación.

La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas.

La mayoría de las resinas epoxi necesitan la aportación de calor externo para que curen, a través de un proceso de curado o post-curado.

Clasificación de las resinas epoxi

La mayoría de resinas epoxi están basadas en tres estructuras químicas:

- **TGMDA (tetraglicidil metilen dianilina):** Tiene una alta densidad de endurecimiento y eso da lugar a un alto valor del módulo de Young y una alta temperatura de servicio.
- **DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A):** Es la resina más utilizada actualmente. Esta resina es elaborada por reacción de bisfenol A con epiclorohidrina. El curado de esta resina tiene una mayor deformación a rotura y también una menor absorción de agua.
- **Fenol-formaldehído epoxi novolaca:** Curan a mayor densidad de entrecruzamiento que TGMDA. La adición de Novolaca a la formulación de la resina incrementa la T_g pero disminuye la deformación de la rotura.

La principal diferencia entre las moléculas es que las TGMDA y las novolacas curan a una densidad de entrecruzamiento mayor que la epoxi Bisfenol A, la cual presenta altos valores de módulo de Young y temperatura de transición vítrea (T_g) pero bajos valores de deformación a la rotura.

En la siguiente tabla podemos observar una comparativa entre las principales propiedades de las resinas epoxi más utilizadas:

Tipo de resina epoxi	Propiedad característica
TGMDA	Alto módulo de elasticidad Baja deformación a rotura Alta temperatura de servicio
DGEBA	Menores propiedades mecánicas que la TGMDA Mayor deformación a rotura Menor absorción de agua
Fenolformaldehido epoxi novolaca	Menor deformación a rotura

Tabla 1. Propiedades de las resinas epoxi. - Miravete (1990)

Propiedades de la resina epoxi:

- Buenas propiedades mecánicas hasta 180°C.
- Buena resistencia a los agentes químicos.
- Buena resistencia al ataque de agentes corrosivos.
- Baja contracción durante el curado (0-1%).
- Buenas propiedades eléctricas y térmicas.
- Proporcionan un buen aislamiento eléctrico.
- La viscosidad de las resinas epoxi es muy elevada.
- Humectación y adherencia óptima.

d) Tabla comparativa de las propiedades de las resinas anteriores

Resina	Densidad	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Contracción volumétrica	Alargamiento a la rotura	Resistencia térmica	Viscosidad
Poliéster	1,22	60/85 MPa	4,2/4,8 GPa	7-9 %	2,5 %	60/130 °C	350/1000 cps
Viniléster	1,12	81 MPa	3,3/3,5 GPa	3-6 %	6 %	100/140 °C	350/500 cps
Epoxi	1,10	90 MPa	7 GPa	1,5 %	1,5 %	60/200 °C	350/900 cps

Tabla 2. Tabla comparativa de las propiedades de las resinas

1.5.2 Proceso de curado de la resina

Se entiende por proceso de curado de la resina como el proceso de transformación de la resina de un estado líquido inicial a un estado sólido. Para que esto se produzca es necesaria la adición de unas sustancias como el catalizador y el acelerador que hacen la función de activar el proceso de endurecimiento de la resina.

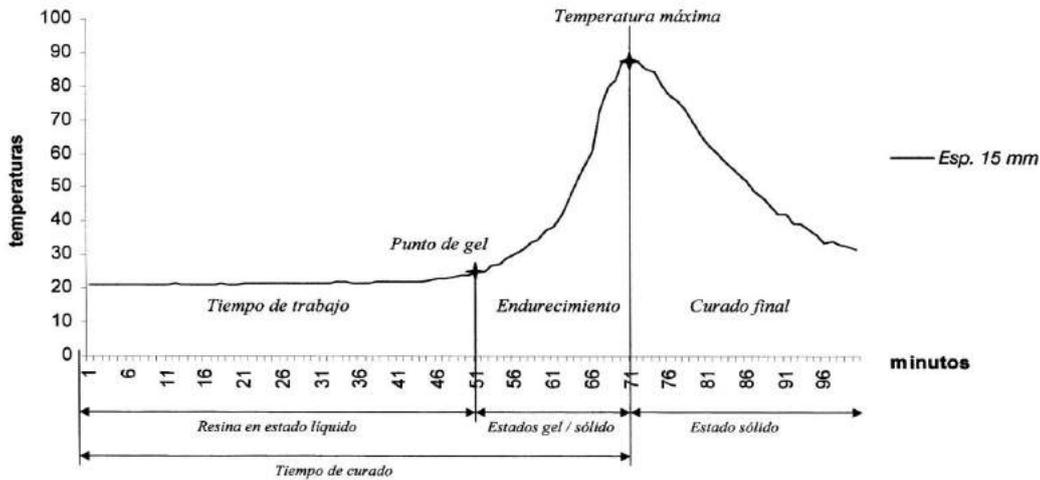


Figura 1. Curva exotérmica característica de una resina - Materiales compuestos (Alejandro Basednjak)

Como se puede ver en la figura anterior, se distinguen distintas fases durante el proceso de curado. Estas fases son:

1. **Tiempo de trabajo:** En el momento que se le añade el catalizador a la resina empieza la primera fase del proceso de curado. En esta fase es donde podemos distribuir la resina en el molde durante el proceso de laminado de la pieza, ya que la resina aun no presenta dificultades para fluir. A medida que pasa el tiempo la viscosidad va aumentando hasta llegar el llamado **punto de gel**, que es el punto en el que la resina se transforma en un gel que imposibilita seguir impregnando el molde. Este tiempo de trabajo viene condicionado por los porcentajes de catalizador que se suministran a la mezcla, la temperatura ambiente y el espesor del laminado.
2. **Fase de endurecimiento:** Una vez pasado el punto de gel la mezcla empieza a endurecerse desprendiendo calor de forma exotérmica hasta llegar a la temperatura máxima.
3. **Curado final:** Una vez se alcanza la temperatura máxima, esta empieza a descender hasta llegar a la temperatura ambiente donde se encuentra la mezcla ya como un sólido.

Durante el proceso de curado de una resina termoestable también puede ocurrir otro fenómeno llamado vitrificación. En ella el material pasa de un estado líquido o de gel elástico (si se produce después del punto de gel) a uno vítreo. Ello ocurre cuando la temperatura de transición vítrea del material se hace igual a la de curado. A partir de entonces, debido a la rigidez del material, la reacción progresa muy lentamente. Esta transformación es reversible y el termoestable puede desvitrificarse si es calentado, con lo que la reacción puede continuar.

Los factores que intervienen durante el curado son:

- Tipo de resina
- Temperatura del ambiente de trabajo (ideal 17-22º C)
- Naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador
- Espesor del laminado
- Procesos de curado o postcurado
- Humedad relativa ambiente
- Presencia o ausencia de cargas
- Luz solar

1.5.3 Recubrimientos

Los recubrimientos son productos que se aplican a la superficie del laminado con la intención de obtener un mejor acabado y a la vez protegerla de los problemas típicos medio-ambientales, como son ataques químicos, agua y humedad.

Los principales recubrimientos que se usan en la construcción naval son el gelcoat y el topcoat.

Gelcoat:

Es la primera capa que se aplica al molde preparado, y constituye el acabado de una de las superficies del laminado, proporcionándole protección contra productos químicos, la intemperie o la humedad.

Los gelcoats son resinas de poliéster, normalmente isoftálicas, con pigmentos y aditivos en suspensión. Aunque el uso del gelcoat es opcional ya que el color final de la pieza se puede obtener por otros métodos, se deberá de usar cuando queramos que el acabado superficial reúna las siguientes características:

- Calidad y estabilidad de color
- Resistencia a la intemperie
- Resistencia al agua
- Resistencia al color
- Resistencia a la abrasión
- Ausencia de la porosidad superficial
- Alto brillo, permanente en el tiempo
- Resistencia a los productos químicos

Topcoat

El topcoat es un producto similar al gelcoat que se aplica en la última capa del laminado para evitar que la superficie de interfase este en contacto con la humedad presente en el aire. A diferencia del gelcoat, el topcoat contiene en su composición una pequeña cantidad de parafina. Durante el proceso de curado, la parafina emigra hacia el exterior, conformando una delgada película que impide el contacto de la resina con la humedad ambiente. Así, el topcoat facilita y garantiza el curado de la última capa.

En cuanto a la composición química de los topcoats son resinas de base poliéster o viniléster a las cuales se le añaden pigmentos y aditivos en suspensión.

Cuando se desea realizar un laminado sobre una superficie pintada con topcoat, debe eliminarse esta película por medio de abrasivos, para garantizar así una buena adhesión al laminado base.

1.6 Materiales de refuerzo

En la construcción naval, los materiales de refuerzo que se emplean para la elaboración del material compuesto son las fibras. Este componente es el que aporta la resistencia mecánica, rigidez y dureza al material.

El hecho de ser reforzado por fibras ofrece la posibilidad de poder variar las propiedades mecánicas del material si se tiene en cuenta elementos de diseño como pueden ser la longitud de la fibra, el diámetro, orientación, etc.

1.6.1 Diseño de materiales de refuerzo

En función de las propiedades finales que queramos obtener en un laminado, se tendrán que tener en cuenta los siguientes factores:

- **Longitud y diámetro de la fibra:**

Las fibras pueden ser cortas y largas o continuas. La resistencia del compuesto mejora cuando la relación L/D es grande, donde L es la longitud de la fibra y D el diámetro.

Existe un valor de longitud de fibra crítica (L_c) donde se aumenta la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica de la fibra va en función del tipo de material.

Las fibras con $L \gg L_c$ (normalmente $L > 15 L_c$) se denominan *continuas*; y las fibras de menor longitud se denominan *discontinuas* o *fibras cortas*.

- **Orientación de las fibras:**

Las fibras de refuerzo se pueden orientar de diversas maneras en la matriz. Se pueden encontrar tres formas distintas de orientación de las fibras que son:

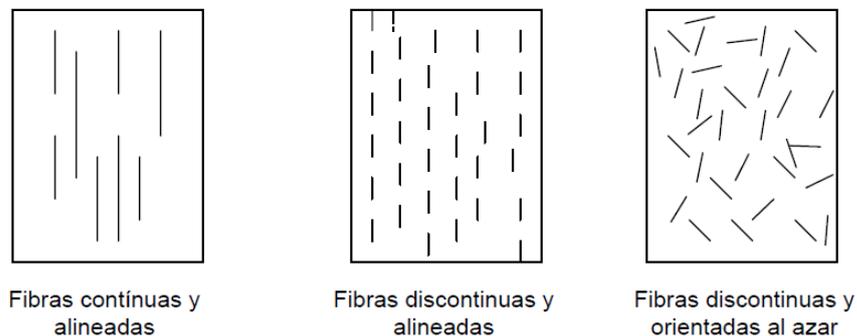


Figura 2. Ejemplo de orientación de las fibras - Tecnología de los plásticos

Una de las características únicas de los compuestos reforzados con fibra es que sus propiedades se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes. En la matriz se pueden introducir fibras largas y continuas en varias direcciones, perpendiculares entre sí (capas de $0^\circ/90^\circ$) y de esta forma la matriz obtiene buena resistencia en las dos direcciones perpendiculares. Pueden haber disposiciones más complejas (como capas de $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) que proporcionan refuerzo en varias direcciones. Y, en una situación ideal, se pueden poner las

fibras siguiendo la dirección de máximas tensiones en la estructura (estas disposiciones requieren de cálculos específicos para determinar dichas direcciones).

- **La cantidad de fibras:**

Una gran cantidad de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del material compuesto, ya que son los que poseen las propiedades mecánicas del material. Pero un porcentaje de volumen de fibras mayor al 80% no es recomendable ya que las fibras ya no quedan envueltas totalmente por la matriz y por lo tanto la transferencia de las cargas deja de ser eficiente.

- **Propiedades de las fibras:**

Como ya se ha mencionado anteriormente, las fibras son las que proporcionan las propiedades mecánicas al producto final y por lo tanto se tienen que tener presentes las distintas prestaciones que proporcionan cada tipo de fibra (vidrio, carbono, Kevlar).

- **Propiedades de la matriz:**

La matriz tiene diferentes funciones, entre ellas están las de mantener las fibras en la posición adecuada, transferir las cargas que soporta el material a las fibras, etc. Las matrices más usadas en la construcción naval son las poliméricas. La matriz también proporciona al laminado final las propiedades químicas, eléctricas y térmicas.

1.6.2 Tipos de fibras de refuerzo

Las fibras más utilizadas en el sector naval para la producción de materiales compuestos son los siguientes:

1.6.2.1 Fibra de vidrio

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, esto se debe gracias a sus buenas características mecánicas, su gran disponibilidad de obtención y su bajo coste. Todos estos factores favorecen a este tipo de fibra para ser el material principal en la construcción de la mayoría de buques de pequeña eslora.

Las fibras de vidrio están constituidas fundamentalmente por sílice, que se combina con diferentes óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y que en función de sus respectivos porcentajes permiten modificar las características de la fibra resultante.

Tipos de fibra de vidrio:

Vidrio A (Alto contenido en álcali): Tiene alto contenido en sílice, es sensible a la humedad pero posee buena resistencia al ataque de soluciones químicas y ácidas.

Vidrio B (Boro): Contiene borosilicato de calcio de poco volumen en álcalis. Tiene una alta durabilidad y buenas propiedades eléctricas.

Vidrio C (Químico): Ofrece alta resistencia frente a los agentes químicos. Debido a su alta resistencia química se suelen emplear en las capas superficiales del laminado. Propiedades mecánicas entre vidrio A y E.

Vidrio D (Dieléctrico): debido a sus propiedades dieléctricas (pérdidas eléctricas muy débiles) se utiliza para componentes electrónicos y de telecomunicaciones.

Vidrio E (Eléctrico): Es el tipo de fibra de vidrio más utilizado en materiales compuestos. En cuanto a sus propiedades destacan su alta densidad, gran resistencia a la humedad, buenas propiedades eléctricas y buenas cualidades de rigidez, resistencia y desgaste. Esta muy utilizada en aplicaciones navales, aeronáuticas, automoción, etc.

Vidrio R o S (Resistencia): este tipo de fibra es empleado en estructuras de elevadas características mecánicas debido a que presenta una resistencia a la tracción y un modulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio. Su principal campo de aplicación se encuentra en los campos militares y aeroespaciales.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5 - 13	10 - 20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Modulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4 - 4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8,6	5	5,1	5

Tabla 3. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio - Miravete (1990)

Propiedades de la fibra de vidrio:

De las características de la fibra de vidrio, podemos destacar:

- Alta adherencia fibra-matriz
- Excelente resistencia mecánica específica (resistencia a la tracción / densidad)
- Resistentes a la humedad
- Bajo coeficiente de dilatación
- Resistentes al ataque de agentes químicos
- Buen aislante eléctrico
- Débil conductividad térmica
- Incombustibles
- Imputrescibles
- Bajo coste

1.6.2.2 Fibra de carbono

La fibra de carbono que utilizamos en la actualidad como refuerzo de materiales compuestos se fabrica a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo (PAN), a través de un complejo proceso de calentamiento.

La fibra de carbono es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica.

Las fibras de carbono tienen alta resistencia mecánica y alta rigidez, pero son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía.

Su densidad es baja, lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas o por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas.

Tienen un coste más elevado que el de las fibras de vidrio.

Tipos de fibra de carbono:

Según la temperatura del tratamiento, podemos distinguir diferentes tipos de fibra de carbono:

Fibras de alto módulo (HM): Es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento. Estas fibras presentan un módulo de elasticidad muy alto. Coste elevado, bajo alargamiento a la rotura.

Fibras de alta resistencia (HR): Es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a la tracción, con valores superiores a 300 GPa.

Fibras de carbono (III) o fibra estándar: Es la más barata, la rigidez es menor que en las anteriores pero la resistencia es buena. La temperatura de tratamiento es más baja que las anteriores.

Tipo	Alta resistencia (HR)	Alto modulo (HM)	III
Diámetro de hilo (μm)	8	7	7-8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Modulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2,6-5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,59	2,59

Tabla 4. Propiedades de diferentes fibras de carbono. - Miravete (1990)

Propiedades de la fibra de carbono:

Las mejores propiedades mecánicas de las fibras de carbono se obtienen al asociar las fibras de carbono con matrices del tipo epoxi. De la fibra de carbono se tienen que destacar:

- Elevada resistencia y rigidez específica
- Coeficiente de dilatación muy bajo
- Gran estabilidad dimensional
- Buena conductividad térmica
- Buena conductividad eléctrica
- Buena resistencia a la fatiga
- Baja resistencia al roce
- No presenta plasticidad
- Coste más elevado que la fibra de vidrio
- Baja resistencia al impacto
- No se ven afectadas por el contacto con agua de mar

1.6.2.3 Fibras aramídicas (orgánicas)

La aramida es un filamento orgánico que proviene de ciertos derivados del petróleo. Su nombre se deriva de las funciones orgánicas que poseen: aromático y amida. El nombre comercial que se le otorga a las fibras de aramida descubiertas por Du Pont en el año 1965 es **Kevlar**.

Este tipo de fibra se aplica en campos en los que se requiere una alta resistencia a la tracción con bajo peso y elevada resistencia al impacto del material. Este material es usado en la fabricación de cascos de embarcaciones pero en menor medida que la fibra de carbono y mucho menos que la fibra de vidrio.

Tipos de fibras de aramida:

Las tres principales fibras de aramida comercializadas por Du Pont son:

Kevlar RI: Se aplica para el cordaje de refuerzo de neumáticos

Kevlar 29: alta resistencia, baja densidad y módulo elástico intermedio. Su uso fundamental se orienta a protección balística, confección de cuerdas y cables.

Kevlar 49: alta resistencia, alto módulo y baja densidad. Es el tipo de fibra más apto para combinar con diferentes matrices en la confección de materiales compuestos. Esta variante comercial es la que se utiliza en la construcción naval.

Tipo	Kevlar 29	Kevlar 49
Diámetro de hilo (μm)	12	12
Densidad (Kg/m^3)	1440	1450
Módulo de elasticidad (GPa)	60	128
Resistencia a tracción (GPa)	1,92	2,49 - 3,6
Elongación a la rotura (%)	41	88

Tabla 5. Propiedades de diferentes fibras aramídicas. - Miravete (1990)

Propiedades de las fibras aramídicas:

- Alta resistencia específica a la tracción
- Alto módulo de elasticidad y baja elongación a la rotura
- Presentan una gran tenacidad
- Alta resistencia al impacto
- Alta capacidad de absorción de energía
- Químicamente bastante estable, aunque susceptible de ser atacado por ácidos fuertes
- Resistentes a las llamas y auto-extinguibles
- Baja resistencia a compresión y flexión
- Buena resistencia a la fatiga
- Elevada resistencia térmica. Temperatura de descomposición superior a 420º C
- Baja adherencia a determinadas matrices, como en el caso de las termoplásticas

1.6.3 Disposición de las fibras

Las diferentes estructuras textiles que se utilizan en el proceso de laminado de piezas son:

- **MAT de superficie:** También llamado velo de superficie, es un fieltro de vidrio C de bajo gramaje que oscilan entre 25 y 80 gr/m². El velo de superficie se coloca en contacto con el gelcoat, con la intención de dar mayor resistencia a la película de gelcoat y generar una barrera química frente al ambiente exterior, y esto es así ya que al tener tan bajo gramaje la absorción de resina es mayor y eso es lo que le proporciona las características anteriores.

- **MAT de fibras cortadas:** Son fieltros de hilos cortados a una longitud determinada, por lo general entre 40 y 50 mm aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Podemos encontrar en el mercado MAT de diferentes gramajes.

- **MAT de fibras continuas:** Se presenta de forma similar a la de los MATS de hilos cortados en cuanto a gramaje. La diferencia principal entre las dos es su nivel de deformabilidad, ya que por su estructura es posible realizar preformas profundas con un alargamiento regular del MAT en todas las direcciones.

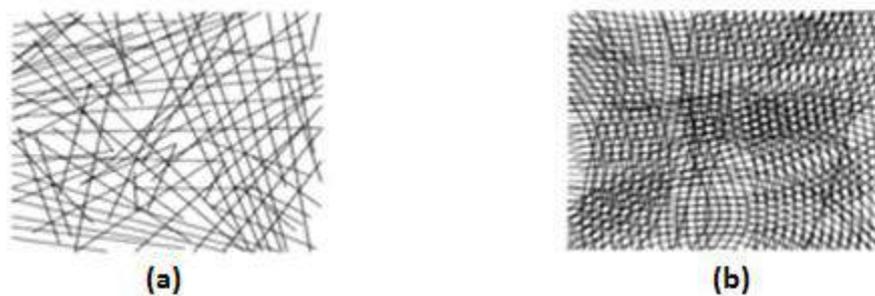


Figura 3. (a) MAT de fibras de cortadas. (b) MAT de fibras continuas - Materiales compuestos (Alejandro Basednjak)

- **Tejidos:** Son estructuras textiles en las cuales durante su fabricación se cruzan diferentes fibras perpendicularmente, denominadas trama y urdimbre. Los hilos de urdimbre van por el sentido longitudinal del rollo, y los de trama, los que atraviesan de forma perpendicular, dando lugar a puntos de entrecruzamiento denominados ligamentos.

Las direcciones resistentes se encuentran generalmente orientadas en las direcciones de trama y urdimbre (0º y 90º).

Diferentes tipos de tejidos:

- Tela o tafetán
- Satén
- Sarga

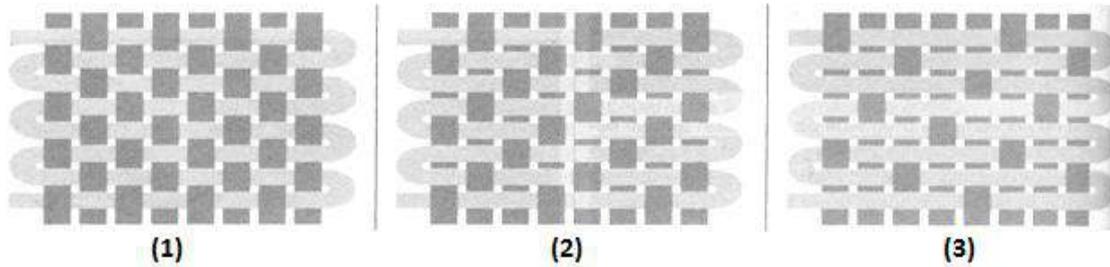


Figura 4. Diferentes tipos de tejidos, (1) Tela o tafetán, (2) Sarga, (3) Satén

- **Ensamblados:** Los hilos de trama y urdimbre no se entrecruzan formando ligamentos. Las fibras paralelas se hallan superpuestas unas a otras con diferentes orientaciones. Para mantenerlas ligadas sin que se deformen se cosen mediante una fibra auxiliar ligera.

En función de las orientaciones de las fibras pueden existir ensamblados:

- Unidireccionales
- Biaxiales
- Triaxiales
- Cuatriaxiales
- Multiaxiales

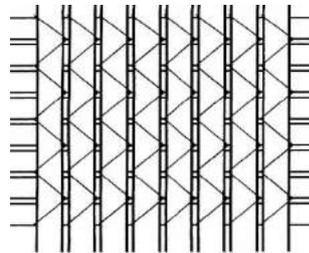


Figura 5. Ensamblado biaxial - Materiales compuestos (Alejandro Basednjak)

1.7 Cargas y aditivos

En la industria de los materiales compuestos se utilizan diferentes productos que puedan ser incorporados a las resinas con la finalidad de aportarles unas características determinadas.

Las propiedades que aportan estos productos al material compuesto son las siguientes:

- **Mejorar el producto final:** Esto se consigue con:

- Cargas reforzantes que permitan aligerar la pieza
- Cargas de bajo coste para poder abaratar el producto final
- Cargas ignífugas
- Cargas conductoras y antiestáticas
- Colorantes, pigmentos
- Agentes anti-ultravioleta, que protegen al producto de la acción de los rayos UV.
- Agentes anti-retracción, con los que se obtiene una mejor calidad del acabado superficial.

- **Mejoran el proceso de moldeo del material compuesto:**

- Sistema catalítico, que son productos necesarios para el curado de la resina y se comprende por el endurecedor, el inhibidor, los estabilizantes térmicos y los antioxidantes.
- Lubrificantes internos, que lo que hacen es modificar la viscosidad de la resina sin alterar sus propiedades.
- Agentes de desmoldeo (lubrificantes externos), para reducir la tendencia de la resina a pegarse a la superficie de los moldes
- Agentes de flujo
- Agentes tixotrópicos, para evitar el descuelgue de resina en paredes verticales

1.8 Materiales para núcleos de Sándwich

Una estructura sándwich está compuesta de tres elementos:

- **Las alas:** Están compuestas por unas laminas delgadas y resistentes. Suelen tener mejores propiedades mecánicas que el resto de componentes.
- **El núcleo:** Generalmente es un material ligero cuya función es mantener separadas las alas del sándwich y transmitir los esfuerzos cortantes de un ala al otro.
- **La interfase de unión entre las alas y el núcleo:** Es un adhesivo que tiene como función mantener unidos el núcleo y las alas.

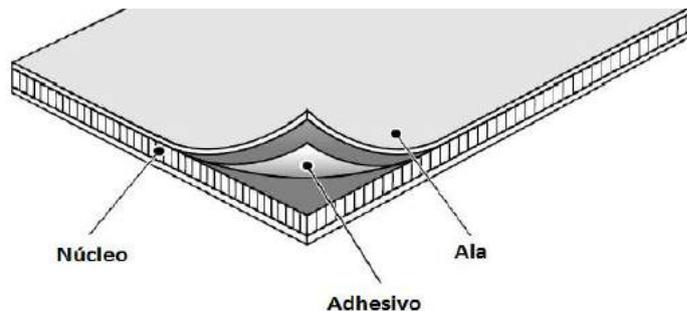


Figura 6. Elementos estructura Sándwich - NAFEMS Benchmark Composite Test R0031/3

La estructura Sándwich presenta grandes prestaciones en el ámbito de los materiales compuestos ya que permite aumentar la rigidez y la resistencia de un elemento sometido a flexión o a compresión sin apenas aumentar el peso.

En la siguiente imagen se podrá ver un ejemplo de cómo el incremento del espesor de la estructura sándwich no afecta al peso de la estructura.

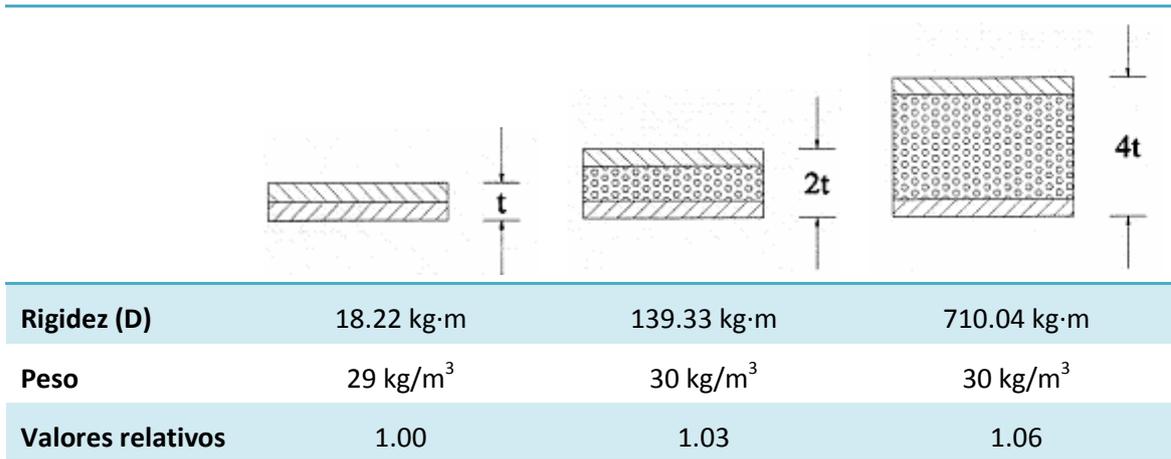


Figura 7. Comportamiento de la estructura Sándwich

Los principales tipos de núcleo que se utilizan para la elaboración de materiales compuestos son:

- Nido de abeja
- Madera de balsa
- Espumas
- Fire Coremat

1.8.1 Nido de abeja

Este tipo de núcleo se realiza a partir de láminas delgadas de diversos materiales metálicos y no metálicos cuyas propiedades, unidas al espesor de la lámina y la forma y tamaño de la celda formada, pueden variarse considerablemente y generar productos con un amplio margen de densidades, resistencias, etc.

Las láminas se unen entre sí mediante adhesivos de distintos tipos o por soldadura, formando estructuras por lo general regulares y repetitivas generando de esta manera la forma de "nido de abeja" con prismas regulares, siendo la más común la forma hexagonal.

Los materiales que se emplean más frecuentemente son el aluminio, la fibra de vidrio o papel de aramida impregnados con resina fenólica, el papel y el polipropileno.

Con este tipo de núcleo conseguimos estructuras sándwich extremadamente ligeras. En la industria naval se utilizan en embarcaciones de alto rendimiento, especialmente en cubiertas y mamparos.

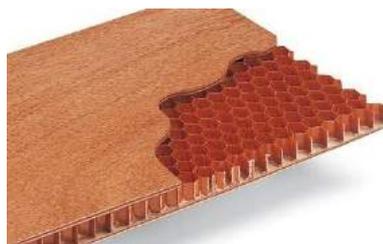


Figura 8. Ejemplo de núcleo "Nido de abeja".

1.8.2 Madera de balsa

La madera es uno de los elementos más antiguos usados como núcleo en estructuras sándwich. Dada la alta rigidez que presenta este tipo de material es difícil adaptarlo a formas curvas, por lo que se suele emplear en forma de bloques pequeños unidos entre sí por un material de soporte, generalmente un tejido de poco gramaje.

La madera balsa para estructuras sándwich debe ser tratada antes de procesarse, eliminando la materia orgánica presente y reduciendo la humedad hasta el 10%. Humedades superiores provocan hinchazón y podredumbre de la madera, y pueden ocasionar delaminaciones de las pieles exteriores. Posee una capacidad de absorción de resina muy elevada, producto de su elevada porosidad, por lo que se recomienda sellar las superficies antes de proceder a su laminado.

1.8.3 Espumas sintéticas

Todos aquellos plásticos en los cuales existe un gas incluido en forma de burbujas se denominan espumas plásticas. El volumen que ocupan estas burbujas puede alcanzar hasta el 95% dentro del total de la espuma. Cuando las burbujas interiores de gas presentes en la espuma se comunican entre sí, se denominan espumas de celda abierta; cuando cada burbuja interior se encuentra aislada, tenemos espumas de celda cerrada. Entre unas y otras, existen espumas plásticas en estados mixtos.

Existe una gran variedad de espumas que se utilicen como núcleo en estructuras sándwich, pero las más utilizadas en la construcción naval son:

- Espumas de cloruro de polivinilo (PVC)
- Espumas de poliuretano (PU)
- Espumas de poliestireno (PS)
- Espumas de estireno-acrilonitrilo (SAN)
- Espumas de polimetacrilímda (PMI)

Las propiedades de las espumas dependen fundamentalmente de:

- Composición del polímero
- Estado del polímero
- Densidad de la espuma
- Estructura de las celdas
- Composición del gas espumante

1.8.4 Fire Coremat

Es un material formado por fibras sintéticas no tejidas de poliéster, de orientación completamente aleatoria, que incorpora como cargas micro esferas cerradas de plástico a base de cloruro de polivinilideno (PVDC).

Se utiliza como material de núcleo para producir estructuras que requieran rigidez aunque con un coste inferior al de estructuras sándwich realizado con espumas sintéticas.

1.9 Ventajas e inconvenientes de los materiales compuestos

Ventajas de usar materiales compuestos

Los principales aspectos que podemos destacar de los materiales compuestos son:

- Presentan una excelente relación resistencia-peso y rigidez-peso
- Dan como resultado estructuras más livianas
- Tienen un cierto grado de flexibilidad
- Presentan estabilidad dimensional
- Tienen una alta resistencia dieléctrica
- Presentan una buena resistencia a la corrosión
- Tienen buena resistencia a la fatiga
- Gracias a su fácil manipulación, se produce un menor desperdicio de material
- Tienen la facilidad de adaptarse a formas complejas
- Coeficiente de expansión térmica muy bajo (tailoring)

Inconvenientes de los materiales compuestos

Podemos destacar como inconvenientes o limitaciones los siguientes aspectos:

- Es un material relativamente nuevo que ha empezado a expandirse tarde, por lo que la falta de estudios al respecto puede generar complicaciones a la hora de elegir los materiales del compuesto. Eso no paso con los metales.
- Falta mucha información sobre el comportamiento de los materiales compuestos.
- El coste de la materia prima inicial es más elevado que el coste de la materia prima de los materiales convencionales.
- Tienen un nivel de inflamabilidad superior al de otros materiales convencionales.
- Se tiene que realizar el mantenimiento de la materia prima en unas condiciones ambientales específicas, y como consecuencia hay un encarecimiento del producto final.
- El laminado final presenta poca resistencia al impacto.
- El proceso de fabricación esta poco automatizado, cosa que provoca una mayor implicación durante el proceso por parte de los trabajadores.
- La manipulación de los materiales compuestos debe ser cuidadosa, ya que el polvo que expiden, cuando son cortados, en caso de ser inhalados puede ser peligroso para el trabajador, por lo que es importante trabajar con el equipo de seguridad requerido para la actividad.
- Su reciclado debe hacerse según la normativa que lo indica, con el fin de evitar posibles contaminaciones ambientales.

Capítulo 2. Procesos de fabricación

A continuación se presentarán los principales procesos de producción de materiales compuestos en la construcción naval.

2.1 Moldeo por contacto

Las técnicas de moldeo por contacto implican la colocación de las fibras de refuerzo y resina líquida sobre la superficie de un molde abierto, que puede o no ser previamente revestido con una capa de gelcoat. En estas técnicas la mano del operario juega un papel muy importante, ya que de él depende que el laminado quede bien o no. Las técnicas de moldeo por contacto utilizan sistemas de resinas que curan a temperatura ambiente. Son las técnicas más sencillas y económicas.

Dentro de este grupo podemos destacar:

- Laminado manual
- Proyección simultánea
- Moldeo con impregnadores

2.1.1 Laminado manual

La técnica de laminado manual fue la primera que se empleó en el laminado de materiales compuestos. En el moldeo de laminado manual las presiones que se ejercen sobre el laminado son muy bajas, ya que es el operario que mediante un rodillo aplica presión para ayudar a la impregnación del refuerzo e intentar que no queden burbujas de aire entre las capas del laminado. Esta baja presión provoca que las características mecánicas y físicas que se alcanzan sean inferiores a las que se obtienen mediante otros métodos, y esto es debido al bajo porcentaje de fibra del laminado final.

Este método es el más económico debido a su relativa sencillez y que no requiere de mano de obra excesivamente especializada ni inversiones elevadas en cuanto a material de trabajo. Por el contrario, presenta los inconvenientes de un ambiente de trabajo molesto, producción lenta, mayor necesidad de mano de obra, acabado fino solo por una de las caras y la calidad final como ya se ha mencionado anteriormente depende única y exclusivamente de la especialización y sensibilidad del operario.

El proceso operativo de este método consta de las siguientes fases:

1. Preparación del molde

Primeramente lo que se tiene que hacer es limpiar el molde por si hay algún resto de laminados anteriores. Una vez tenemos la superficie del molde limpia pasaremos a encerarlo. Este encerado proporcionará un acabado superficial del laminado de mayor calidad y actúa como agente desmoldeante.

2. Preparación del refuerzo

Antes de iniciar la fase de laminación es necesario disponer de todo el refuerzo que se va a utilizar cortado según formas y dimensiones aproximadas al desarrollo de la pieza final.

Si el laminado consta de varias capas de refuerzo, todas ellas estarán listas para su aplicación correlativa, ya que la operación de estratificado puede y debe hacerse sin necesidad de esperar a la gelificación de las capas anteriores.

3. Aplicación del gelcoat

Cuando se requiere de un acabado superficial óptimo (por necesidades de rugosidad superficial, protección química, color, etc.), será necesario aplicar una primera capa de gelcoat antes de la estratificación de la pieza.

La aplicación de gelcoat se realizará de la manera más uniforme posible, con un espesor comprendido entre 0.2 y 0.5 mm. El gelcoat se puede aplicar mediante brocha, rodillo o pistola en función de las dimensiones de la pieza y de la calidad que se quieran obtener.

4. Preparación de la resina

La resina a utilizar para la estratificación, se preparará con los aditivos oportunos, acelerada y catalizada inmediatamente antes de iniciar el moldeo.

5. Realización del estratificado

Para la correcta realización del estratificado es necesario comenzar con una capa de resina sobre el molde, colocando a continuación la primera capa de refuerzo, previamente cortada según la forma y dimensiones aproximadas de la pieza, sin dar lugar a la gelificación de la resina. Es habitual empezar con un MAT de bajo gramaje para que se adapte fácilmente a las formas de la superficie del molde, con lo que se reducirá la posibilidad de que aparezcan huecos entre esta primera capa y la del gelcoat.

Una vez tenemos el laminado finalizado se pasará un rodillo metálico de consolidación, cuya función principal es la de extraer el aire atrapado entre las capas de material.

6. Endurecimiento

Una vez que la pieza ha sido moldeada, es necesario esperar un tiempo variable, entre 45 min y varias horas en función del tipo de resina, condiciones de curado, tamaño de la pieza, rigidez de la misma, etc. antes de proceder al desmoldeo.

7. Desmoldeo

Cuando la pieza ha polimerizado lo suficiente de modo que no se produzcan deformaciones en la misma puede procederse a su desmoldeo.

El desmoldeo debe de hacerse usando la técnica adecuada que dependerá fundamentalmente del tamaño de la pieza y su rigidez.

Para desmoldear piezas difíciles con contornos relativamente planos se recomienda el uso de cuñas rígidas, mientras que para piezas con contorno curvado son más adecuadas las cuñas semi-rígidas o flexibles ya que se adaptan mejor a la geometría de la pieza sin producirle ningún daño.

8. Desbarbado y acabado final

El desbarbado consiste en eliminar los excesos de material que aparecen en los bordes del laminado. El laminado manual normalmente va acompañado de un gran exceso de material.

Una vez se ha desbarbado la pieza se efectuará el mecanizado definitivo, el cual se lleva a cabo con la pieza totalmente polimerizada, mediante herramientas adecuadas.

9. Control de calidad

Se realizan ensayos no destructivos a la pieza para ver si cumple con los parámetros establecidos. Las variables de estudio más importantes a tener en cuenta dentro de este control de calidad son las siguientes:

- Aspecto final: calidad superficial, rugosidad, burbujas e imperfecciones.
- Aspectos geométricos: formas, dimensiones y tolerancias.
- Distribución de la fibra y de la resina.
- Ausencia de vacío, aire o inclusiones de impurezas en el laminado.
- Ausencia de zonas despegadas.
- Dureza final adecuada.
- Paredes verticales.

Para acabar con este método, se tiene que hacer mención a las condiciones del ambiente de trabajo, ya que afectan a los tiempos de curado de la pieza. El grado de temperatura más adecuado para el área de trabajo está comprendido entre 15° C y 30° C, siendo el óptimo entre 17° C y 22° C. Otro factor que se tiene que tener en cuenta es la humedad relativa ambiente, ya que la humedad afecta la unión entre los refuerzos secos y la resina, disminuyendo la adhesión en la interfase y por lo tanto esto causa una disminución de la calidad del laminado. Por último una buena limpieza del sector de trabajo evitara que entren partículas de polvo en el laminado que puedan disminuir la calidad de este.

2.1.2 Proyección simultánea

El moldeo por proyección simultánea supone una primera evolución del laminado manual, ya que se automatizan algunas de las operaciones con objeto de ganar productividad y reducir costes de fabricación.

El proceso de laminación es idéntico al de laminado manual con la diferencia de que en este método se proyecta fibra cortada entre chorros de resina catalizada (viscosidad del orden de 300 - 500 cP a 25°) mediante un equipo especial de proyección, de manera que la matriz y el refuerzo se depositan simultáneamente sobre el molde. Una vez depositados, se procede a realizar un compactado mediante rodillos o espátulas para mejorar la impregnación de los refuerzos y eliminar el aire que queda atrapado entre las diferentes capas del laminado.

El proceso operativo de este método consta de las siguientes fases:

1. Preparación del molde
2. Preparación del refuerzo
3. Reglaje de la máquina
4. Proyección simultánea
5. Impregnación y desburbujeo
6. Polimerización
7. Desmoldeo
8. Desbarbado y mecanizado
9. Control de calidad

Se puede ver que las únicas fases que se diferencian entre el proceso operativo de laminado manual y el de proyección simultánea son, la fase de reglaje de la máquina de proyección y la fase de proyección simultánea.

- **Reglajes de la máquina:** Los reglajes que permitirán un buen control y estabilidad del proceso productivo son los siguientes:

- **Caudal de la fibra:** El reglaje del cortador se ajusta situando de forma aproximada el valor de la presión del manómetro de la cortadora y verificando el caudal de fibra recogiendo y pesando la cantidad de hilo cortado durante un minuto.
- **Caudal de resina:** En función de la cantidad de fibra de vidrio cortada se regulará el caudal de la resina, de modo que la relación en peso entre la fibra y la resina alcance un valor que puede oscilar entre el 25 y el 35%.
- **Caudal del sistema catalítico:** Este reglaje es directo, ya que en la mayoría de máquinas, la bomba del catalizador es solidaria con la de la resina, por lo que al ser idéntico el número de bombeos de ambas, también lo será la relación de volúmenes bombeados.

Además hay una serie de ajustes de la máquina de proyección que es necesario conocer, que son:

- Longitud de los hilos cortados: Longitudes de entre 25 y 50 mm.
- Estado de las cuchillas
- Estado del rodillo de caucho
- Ajuste del sistema de rodillos (distancias)
- Orientación del abanico de resina: Elegir el tipo de boquilla adecuada, para ello consultar las especificaciones de cada fabricante.
- Orientación del haz de hilos cortados: Elegir el tipo de boquilla adecuada, en función del ángulo de salida y el diámetro del orificio.

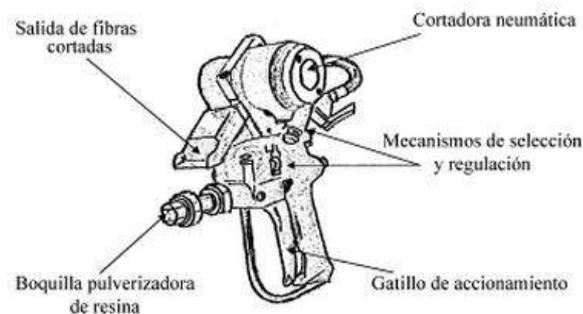


Figura 9. Cabezal de proyección simultánea. - *Materiales compuestos, procesos de fabricación.* Alejandro Basednjak

- **Proyección simultánea:** Esta fase del proceso consiste en depositar sobre el molde de forma simultánea fibra y resina en las proporciones adecuadas y de manera que las cantidades depositadas originen sobre el molde un tapiz lo más homogéneo posible en cuanto a espesor y distribución.

2.1.3 Moldeo con impregnadores

El moldeo con impregnadores es una técnica que se ha desarrollado para la construcción de grandes embarcaciones en materiales compuestos. Este técnica se encuentra a medio camino entre el laminado manual y los prepeg, ya que el proceso de estratificado es bastante similar al laminado manual, pero con la diferencia de que las fibras ya vienen impregnadas gracias a un equipo de impregnación manual. Con esta técnica obtenemos laminados de mejor calidad, uniformidad y contenido de matriz.

El equipo de impregnación consiste básicamente en sumergir la estructura textil en un baño de resina catalizada y seguidamente eliminar el exceso de resina mediante la compresión del material a través de diversos rodillos de compresión. Gracias a este sistema de compresión, podemos controlar el porcentaje de resina presente en el laminado regulando la separación entre los rodillos.

Una vez realizado el proceso de impregnación se procederá a colocar las fibras impregnadas sobre el molde, para luego realizar el compactado y el desburbujeo, mediante la acción de rodillos o espátulas.

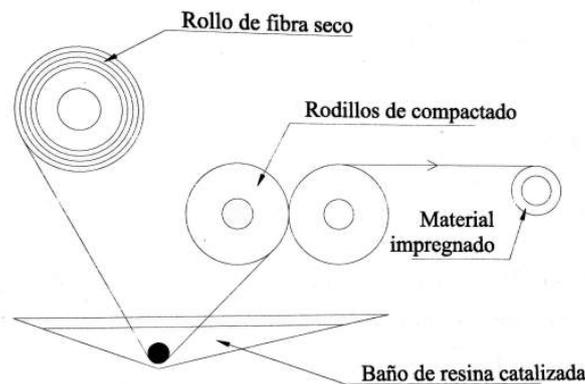


Figura 10. Esquema equipo de impregnación manual. - Materiales compuestos. Alejandro Basednjack

Algunas de las ventajas que obtenemos con este método con respecto a los otros dos mencionados anteriormente son:

- Reducción del tiempo de trabajo.
- Mayor rapidez y facilidad de fabricación de laminados.
- Laminados de mejor calidad, con un mayor control del porcentaje de refuerzo, entre 35 y 55%.

2.2. Técnicas de moldeo asistidas por vacío

La técnica de moldeo por vacío consiste en aplicar presión sobre el laminado durante su ciclo de curado. Esto permite conseguir materiales compuestos con mejores propiedades físicas y mecánicas.

Al realizarle el vacío al laminado, se consigue remover el aire atrapado entre capas, compactar las capas, evitar cambios de orientación del laminado durante el curado, reducir la humedad y optimizar el contenido de matriz en el material compuesto.

Podemos distinguir tres métodos de producción por vacío:

- Laminado manual asistido por vacío
- Laminado con pre-impregnados
- Laminado con pre-impregnados parciales

Concepto de "vacío":

Se denomina vacío a los estados de presión de aire que se encuentran por debajo de la presión atmosférica. Por lo tanto la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la bolsa determina la fuerza de cierre sobre el laminado.

Formas de obtención del vacío:

Existen diferentes formas de obtener el vacío. Cada sistema se distingue por la presión máxima que puede alcanzar. Limitados por sus características constructivas.

Entre los sistemas más comunes utilizados en construcción naval podemos distinguir:

- **Bombas de paletas flexibles:**
 - Nivel elevado de vacío
 - Flujo continuo
 - Elevados caudales de aspiración
 - Eléctricas
- **Bombas de anillo líquido:**
 - Nivel elevado de vacío
 - Flujo continuo
 - Elevados caudales
 - Mínimo desgaste
 - Eléctricas
- **Generadores de vacío :**
 - Alto caudal
 - Bajo niveles de vacío
 - Neumáticos
 - Mínimo mantenimiento
 - Ruidosos

Accesorios para el laminado por vacío:

La ventosa: Elemento que conecta la manguera con el interior del laminado. Consta de una placa base, una arandela de estanqueidad y una placa de cierre. La placa base presenta anillos concéntricos en relieve, que permiten una mayor estanqueidad con la junta. La ubicación de la ventosa en el molde se debe colocar en una zona donde los posibles fallos queden ocultos.

Las mangueras: Elemento que conecta las ventosas con el equipo de vacío, estas deben poseer un diámetro acorde al volumen de aire que deseamos extraer.

El vacuómetro: Elemento que se utiliza para controlar el nivel de vacío en el interior de la bolsa. Las escalas utilizadas son bares o milímetros de mercurio.

Las trampas de resina o filtros decantadores: son mecanismos que evitan que los excesos de resina que fluyen por las mangueras lleguen al sistema de vacío, previniendo su inutilización. Normalmente se suelen construir de acero.

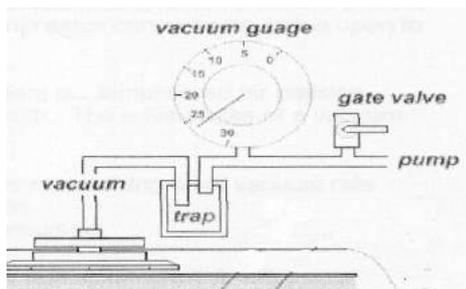


Figura 11. Esquema equipo de vacío

2.2.1 Laminado manual asistido por vacío

Este método es una evolución del laminado manual por contacto, con la diferencia que se aplica presión al laminado durante el proceso de curado mediante un equipo de vacío.

Una vez finalizado el laminado manual por contacto, y con suficiente tiempo antes de que comience el proceso de gelificación de la matriz polimérica, se dispone sobre el laminado los materiales fungibles. Estos materiales permitirán realizar el compactado, extraer los excesos de resina, evitar que dichos materiales se queden adheridos a la pieza, facilitarán también el desmoldeo y disminuirán las emisiones de elementos volátiles orgánicos al ambiente.

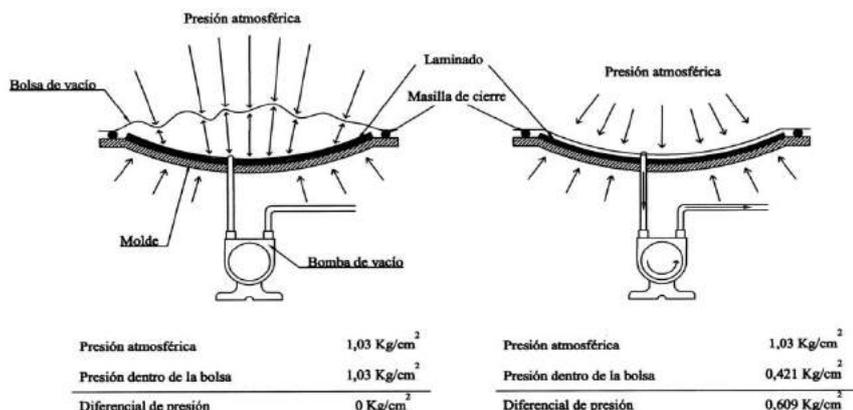


Figura 12. Generación de vacío en el laminado. - Materiales compuestos (Antonio Miravete)

Los materiales fungibles son:

- a) **Tejidos pelables (*peel-plies*):** Es el primer tejido que se coloca después de la última capa del laminado. Este elemento facilita la extracción de los materiales fungibles del laminado. Poseen un hilo de diferente color para poder identificarlo sobre la pieza una vez curada.
- b) **Films separadores y films sangradores desmoldeantes:** Los films separadores son utilizados para separar el laminado del resto de materiales del proceso de vacío. Los films sangradores son los mismos films separadores pero perforados siguiendo un patrón establecido, que permiten salir al exceso de resina existente en el laminado.
- c) **manta de absorción/aireación:** Son tejidos sintéticos no entramados, constituidos de fibras de poliésteres reciclados que permiten circular el aire atrapado por todo el interior de la bolsa hacia algún orificio de salida y actúa como absorbente del exceso de resinas que emana por acción de la presión de compactación.
- d) **Film de nylon para bolsa de vacío:** Los films de bolsa de vacío son los encargados de sellar todo el laminado, incluido el resto de fungibles anteriormente mencionados. Una vez sellados se realiza el vacío en el interior de la membrana creada sobre el laminado.
- e) **Masillas de cierre (*tacky-tape*):** Se utilizan para sellar el molde y la bolsa de vacío.

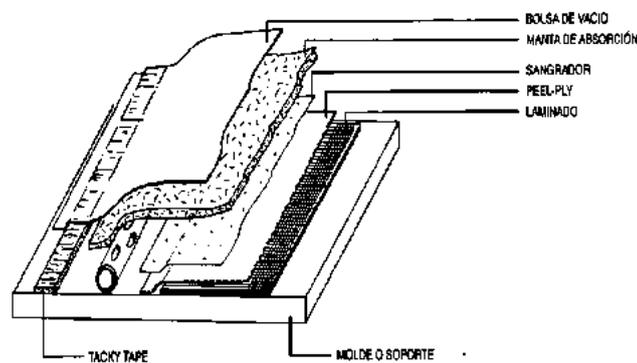


Figura 13. Materiales fungibles del método de laminado asistido por vacío.

2.2.2 Laminado con Pre-impregnados

Los materiales pre-impregnados son un tipo de material que se puede presentar de distintas formas, láminas de tejido, unidireccional, roving, etc., que ha sido impregnado previo a su uso y almacenado, generalmente a bajas temperaturas (unos -20°C).

La característica principal de este tipo de material es que la resina que los componen se mantiene en un estado de "semicurado", esto le confiere un tacto semi-pegajoso llamado "tacking".

Una de las principales ventajas de los pre-impregnados es el control sobre el porcentaje fibra/resina, ya que está muy determinado. Por lo general suelen tener altos porcentajes de fibra, factor que asegura que las propiedades mecánicas del compuesto serán buenas.

La impregnación se realiza mediante rodillos impregnadores que permiten obtener porcentajes de resina muy precisos y una buena uniformidad del impregnado.

El procesado de dichos materiales se realiza entonces, disponiendo las diferentes capas de estructura textil descongelada sobre el molde, y sometiénolas finalmente a presión y temperatura, obteniendo como resultado laminados de alta calidad.

Tipos de pre-impregnados:

Dependiendo de la temperatura de curado, podemos diferenciar tres clases de pre-impregnados:

- a) **Pre-impregnados de alta temperatura:** Son los que poseen las mejores propiedades físicas y mecánicas. Su temperatura de curado es alrededor de 180°C.
- b) **Pre-impregnados de media temperatura:** Poseen temperaturas de curado cercanas a 120°C.
- c) **Pre-impregnados de baja temperatura:** Poseen temperaturas de curado que oscilan entre 60 y 120 °C. Son los más usados en el sector naval.

Ciclo de curado

Para los pre-impregnados es muy importante el ciclo de curado ya que dependiendo de la temperatura a la que trabajemos y el tiempo que tardemos podremos tener un moldeado más óptimo.

En el caso de trabajar en unas condiciones superiores a las óptimas de curado, aproximadamente unos 3°C/min por encima de las condiciones óptimas, la resina solidificará antes y por lo tanto las burbujas que puedan aparecer no se podrán sacar.

En el caso de trabajar en unas condiciones inferiores a las óptimas de curado, la resina estará demasiado tiempo líquida y por lo tanto el pre-impregnado se escurrirá.

2.2.3 Pre-impregnados parciales

Los pre-impregnados parciales permiten acceder a niveles de calidad similares a los materiales pre-impregnados pero con unos costes más razonables.

Las resinas y las estructuras textiles que se utilizan en su confección solo tienen pequeñas modificaciones respecto de las utilizadas en los prepeg tradicionales.

La diferencia fundamental respecto a los otros prepeg se basa en que las fibras son impregnadas sólo parcialmente, mediante un impregnado selectivo o películas de resina pre-impregnada. Esta característica permite a las fibras secas actuar como una gran membrana porosa, facilitando la salida del aire que pudiese quedar atrapado entre capas del laminado antes del curado.

Cuando el material se somete al proceso de curado, la resina impregna las zonas secas del refuerzo. Con esto evitamos hacer los compactados intermedios de los prepeg tradicionales, y por lo tanto se obtiene una reducción de los tiempos de proceso.

2.3 Moldeo por vía líquida

Las técnicas de moldeo de materiales compuestos por vía líquida se caracterizan por el hecho de que la resina y las fibras de refuerzo entran en contacto por primera vez en el interior del molde cerrado. La presión de compactación se consigue mediante el uso de contramoldes o técnicas auxiliares de vacío.

Las dos técnicas de moldeo por vía líquida son:

- RTM
- Infusión

2.3.1 RTM

La tecnología RTM (resin transfer molding) es un proceso que consiste en colocar los refuerzos de fibra secos en el interior de un molde abierto, una vez colocado todas las fibras se cierra el laminado usando un contra-molde y se inyecta o se transfiere resina catalizada al interior del mismo. Una vez se empieza a inyectar resina en el interior del molde, de baja viscosidad, esta desplaza el aire que queda en el interior del molde hasta el punto de ventilación. Una vez se observa que la resina sale por el punto de ventilación se deja de inyectar resina al laminado y se deja curar.

El rango de presiones hidrostáticas de cierre se encuentra entre 2 y 10 bar, y las presiones de inyección de resina oscilan entre 1.5 y 10 bar.

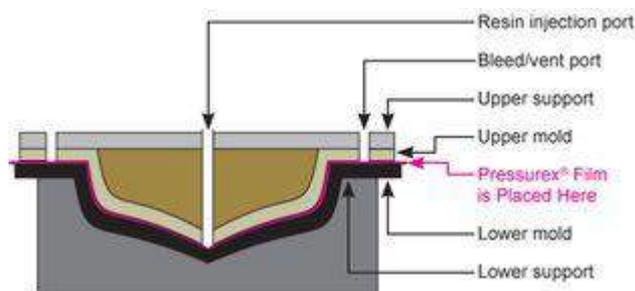


Figura 14. Estructura del molde para el método de moldeo por transferencia de resina (RTM).

De acuerdo con la forma en cual se transfiere la resina al interior del molde podemos distinguir tres métodos:

- RTM estándar:** Diseñados para elevadas producciones, generalmente suelen ser moldes metálicos capaces de resistir presiones hidráulicas de cierre muy elevadas. (desde 4 a 10 bar). La presión de inyección de la resina es elevada, entre 2 y 10 bar. Los moldes disponen de control de temperatura que ayudan a reducir los tiempos de curado de la pieza.
- RTM al vacío:** Proceso similar al RTM estándar pero con presiones de inyección más bajas (1.5 a 3 bar). La presión de cierre será la obtenida mediante vacío (0.5 Bar). Al ejercer presiones de inyección más reducidas los moldes se suelen fabricar con los mismos materiales compuestos.
- RTM light:** La presión de cierre será la obtenida mediante vacío. La transferencia de resina se puede realizar mediante una bomba de baja presión (hasta 3 bares) o por efecto del vacío (similar al método de infusión). Este método es el que tiene el coste más reducido.

Los moldes de producción para RTM requieren de una serie de características que se deben tener en consideración durante su etapa de diseño. Para series importantes de producción, los moldes suelen ser metálicos, pero para bajas producciones se pueden construir en materiales compuestos.

El cierre de los moldes debe prevenir el derrame de resinas mas allá de los límites de la pieza; para ellos, los moldes deben ser equipados con algún sistema de sellado. Entre los más utilizados podemos destacar:

- a) Sellado con elastómeros
- b) Sellado con anillo de apriete
- c) Sellado con silicona
- d) Sellado con resina

La inyección de resina se realiza mediante un sistema de bombeo, el equipo está compuesto por un sistema de dosificación, mezcladores, depósitos y controladores que aseguran en todo momento un control preciso de la resina que se inyecta.

Las características que deben de poseer las resinas en este método de producción son:

- Deben poseer viscosidades bajas (entre 80 y 250cPs a20°C).
- Deben de poseer una exotermia baja para evitar problemas durante el proceso de moldeo como contracciones, deformaciones y marcados en la superficie de la pieza.
- Deben tener unos tiempos de gel suficientemente largos para garantizar el llenado completo del molde, sin renunciar a una buena polimerización.

Para poner en marcha la producción de piezas mediante el proceso RTM son necesarios una serie de equipos y accesorios como son:

- Máquina de inyección de resina
- Depósitos de resina
- Moldes adecuados al proceso
- Regulación de temperatura
- Sistema de vacío
- Cabina proyección gelcoat
- Equipos de preparación y corte refuerzos secos o preformas
- Cabina polimerización
- Equipo de apertura y cierre de moldes
- Equipos y zonas de mecanizado

Un punto muy importante durante el proceso de diseño del molde es el de determinar los puntos de entrada de resina y los puntos de evacuación del aire. Este aire interior debe ser evacuado para evitar problemas como porosidad superficial o bien la reducción de las propiedades mecánicas del laminado.

Existen tres modelos fundamentales de introducción de la resina en el molde:

- a) **Inyección puntual:** El punto de inyección de la resina se encuentra en el centro del molde y el aire es evacuado por los bordes del mismo. Es el método más lento de llenado, pero es el que requiere menos cantidad de resina.

- b) **Inyección por canal de flujo lateral:** La inyección de la resina se realiza por el lateral y avanza como un frente hacia el otro lado del molde, por donde se realiza la evacuación del aire.
- c) **Inyección periférica:** La resina es inyectada por el perímetro del molde, propagándose hacia el interior, y el drenaje del aire se realiza por el centro del mismo. Es el método más rápido de llenado pero también el que requiere la mayor cantidad de resina.



Figura 15. Moldeo por transferencia de resina (RTM). Inyección puntual.

2.3.2 Infusión

Este método de producción de materiales compuestos consiste en la impregnación de una o varias capas de refuerzo colocadas sobre el molde al igual que en el método RTM, y mediante los materiales fungibles se cierra el laminado con la intención de ejercer presión sobre él mediante un mecanismo de generación de vacío, con todos sus accesorios (vacuómetros, ventosas, trampas de vacío, etc.), como si fuera un contra-molde.

Una vez compactado el laminado seco, se permite el paso de resina catalizada a través de mangueras estratégicamente distribuidas sobre todo el molde. La resina se distribuye sobre el laminado por medio de las estructuras textiles que actúan como una gran membrana porosa.

Una vez la resina cubre toda la extensión del laminado, se corta la alimentación de esta, pero no se deja de ejercer presión sobre el laminado durante el proceso de curado. La polimerización de la resina se realiza a temperatura ambiente, aunque pueden reducirse los tiempos de curado mediante la aportación de calor externo.

Con esta técnica obtenemos porcentajes de fibra-matriz del 60-40%.

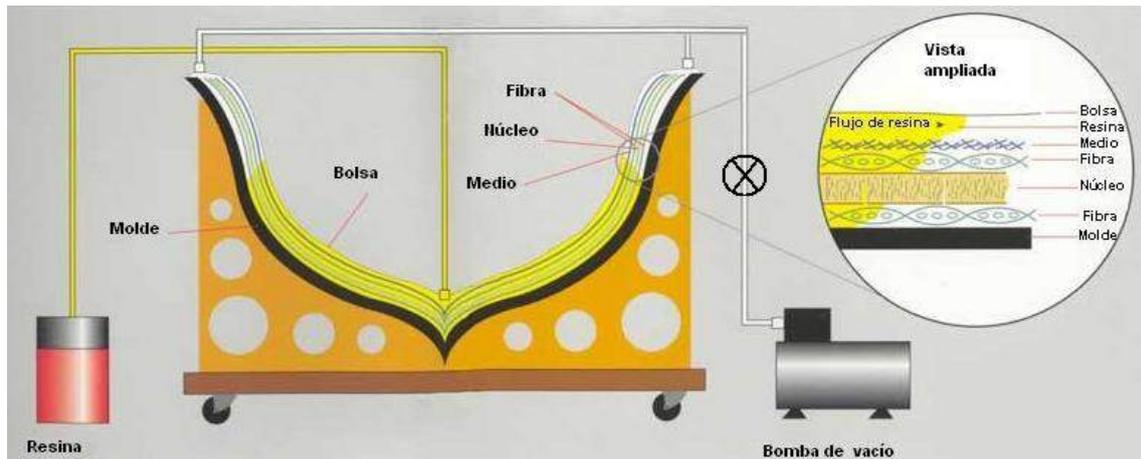


Figura 16. Estructura del molde para el método de moldeo por infusión.

Los aspectos que tenemos que tener en cuenta con respecto a la **matriz** son:

- **Viscosidad:** La resina fluirá cuanto más baja sea su viscosidad, aunque viscosidades muy bajas pueden provocar la entrada de aire al laminado, y si es muy elevada la viscosidad, los tiempos de llenado son mayores y pueden generar zonas secas de resina por insuficiencia de impregnación.
- **Tiempo de gel:** En función de la extensión de la pieza a laminar se deberá de poseer de un tiempo de gel mayor o menor, con la intención de que todas las fibras queden adecuadamente impregnadas.
- **Reactividad:** La buena polimerización de la resina proporciona laminados con mejor calidad, en caso contrario aparecerán defectos en el laminado. Otro aspecto a tener en cuenta es que la resina tiene que tener una baja exotermia.

Los materiales fungibles que se emplean en este método son:

- Peel-plies o mallas de distribución:** tiene la función de distribuir la resina por la superficie del laminado a la vez que hace de medio de drenaje-evacuación del aire que está en el interior del laminado. Una vez acabado el curado de la pieza, es el material que se extrae para eliminar el exceso de resina que pueda haber quedado sobre el laminado.
- Película o film de nylon transparente para bolsa de vacío:** debe de poseer buenas propiedades de elongación para que se adapte bien a la geometría de la pieza que se pretende realizar.
- Masillas de cierre (Tacky-tape):** cumple la función de junta estanca entre la bolsa y el molde.

En lo que respecta a la alimentación externa de la resina, son los mismos que en el método RTM:

- Infusión puntual**
- Infusión por canal de flujo lateral**
- Infusión periférica**

2.4 Moldeo con autoclave

El proceso de autoclave consiste en someter a piezas laminadas, normalmente pre-impregnadas, para someterlas a una mayor presión de compactación y a una temperatura de curado más elevada.

Los elementos principales de un autoclave son:

- **Una cámara presurizada:** Suelen tener una superficie cilíndrica, y sus dimensiones depende exclusivamente del tipo de piezas a las que se le va a someter el proceso de presurización.
- **Dispositivos de calentamiento:** El sistema más utilizado es la combustión de gas, ya que es más económico que el calentamiento eléctrico y permite temperaturas de hasta 540°C.
- **Sistema de presurización del gas:** Los tres tipos de gases que se utilizan para la presurización son: aire, nitrógeno y dióxido de carbono.
- **Sistema de aplicación del vacío:** El proceso de moldeo con autoclave se complementa con el de vacío, permitiendo a éste una presión adicional sobre la pieza, evacuando los componentes volátiles y actuando fundamentalmente como protección del laminado frente a los gases internos del autoclave.
- **Sistema de control de los parámetros de curado:** Son dispositivos que van dentro de la cámara de presurización que sirven para llevar el control del proceso
- **Soporte de los moldes para su introducción en la cámara**

Se tienen que diferenciar dos etapas del ciclo de curado en autoclave:

- En una **primera etapa** se aplica vacío y presión sin temperatura durante un período de tiempo muy corto. Cuando se alcanza la presión se comienza a aumentar la temperatura gradualmente de acuerdo a la rampa térmica del material.
En esta etapa, el calor reduce la viscosidad de la resina y permite que fluya, ayudando a escapar el aire y los elementos volátiles del laminado, así como ayuda a la impregnación de las fibras.
- En la **segunda etapa** del ciclo la temperatura aumenta nuevamente hasta alcanzar la temperatura de curado final y mantenerse hasta que se haya completado la reacción de curado.

Para obtener un buen acabado final se tiene que ser consciente que tanto la uniformidad de presión como la uniformidad de temperatura en el interior del autoclave son primordiales.

Esta distribución de temperatura debe ser lo más homogénea posible tanto en la temperatura de curado máxima como durante la rampa de curado.

Los resultados que obtenemos con este procedimiento son los mejores en comparación con los demás métodos y también son los que tienen mayores propiedades físicas y mecánicas. El problema de este método es que es demasiado costoso, cosa que dificulta su expansión en el mercado.



Figura 17. Autoclave para astilleros navales. ITALMATIC.

2.5 Enrollamiento Filamentario (mástiles)

El enrollamiento filamentario (filament winding) es un proceso automatizado en el que un haz de fibras continuas, ya sean pre-impregnadas o húmedas impregnadas con resina, se enrollan en un mandril con un patrón determinado. El proceso de devanado se compone de un bobinado de monofilamentos impregnados o bandas de fibra, que son enrollados a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota entorno a su eje de giro. La orientación angular del refuerzo de fibra se determina en función de la velocidad de la cabeza del bobinado que se mueve a lo largo del mandril en relación con la rotación del mandril.

El ángulo de enrollado puede variar desde bajos ángulos "longitudinales" (0°) hasta altos ángulos "circunferenciales" (90°) con respecto al eje del mandril. Por lo que puede ser realizado cualquier tipo de ángulo helicoidal.

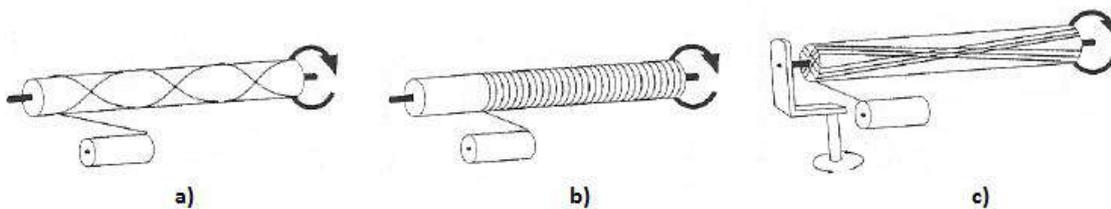


Figura 18. Diferentes técnicas de bobinado. a) Helicoidal, b) Circular y c) Polar.

Las estructuras que pueden ser fabricadas mediante enrollamiento filamentario son necesariamente de revolución, con simetría cilíndrica, esférica, cónica, o cualquier otra forma que no tenga zonas cóncavas.

Estas estructuras se diseñan para condiciones de carga específicas, como presión interna o externa para el caso de depósitos y tuberías, flexión y compresión para el caso de mástiles de embarcaciones a vela, etc.

Las variables de diseño a tener en cuenta en el proceso de fabricación son:

- **Selección del material:** Este proceso permite el uso de un amplio abanico de fibras y matrices.
- **La viscosidad de la matriz:** No debe ser muy baja para evitar problemas de uniformidad de contenido de resina en la pieza terminada. La viscosidad tampoco debe ser muy elevada porque se puede producir deshilachado de la fibra y retención de burbujas.
- **Ángulo de enrollado entrono al eje del mandril.**
- **Tensión de enrollado del refuerzo.**
- **Contenido de volumen de fibra del material fabricado.**
- **Número de capas para alcanzar el espesor de diseño.**

Los pasos a seguir en el proceso de enrollamiento filamentario son:

1. Programar el bobinado para determinar el patrón de enrollamiento adecuado.
2. Determinar la cantidad de fibras que deben pasar por el ancho de banda instalado en la máquina bobinadora.
3. Cuando el devanado es por vía húmeda, el haz de fibras pasará previamente por un baño de resina.
4. El haz de fibras se tira a través del dispensador de fibra, que se adjunta al mandril, y se determina la tensión de bobinado y el programa de bobinado se inicia.
5. Una vez el proceso se ha completado, se procederá al curado de la pieza aplicando temperatura sobre él.
6. Después de la curación el mandril se retira del compuesto.

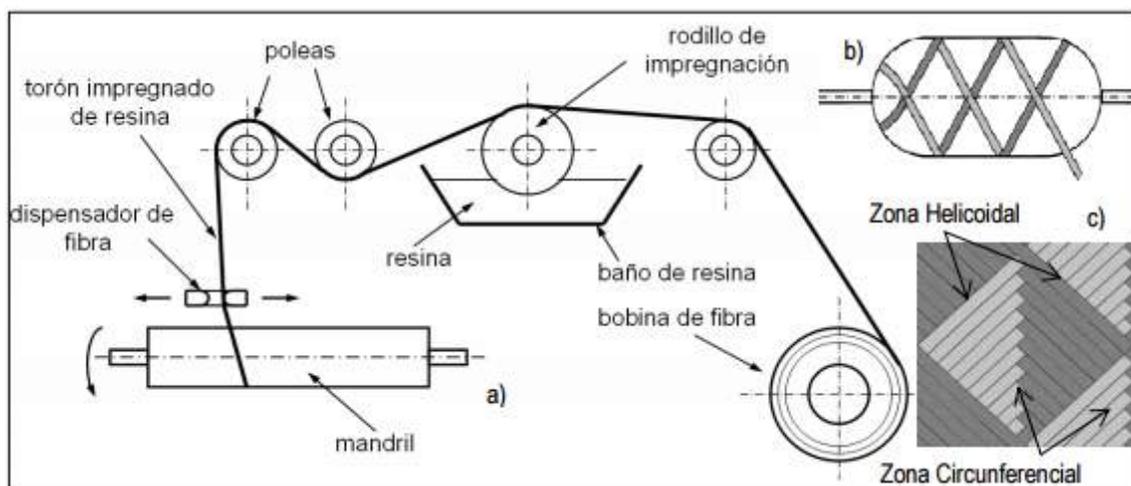


Figura 19. Moldeo por enrollamiento filamentario.

2.6 Moldeo por estampación de termoplásticos reforzados

El estampado es un método muy utilizado en la fabricación de piezas de material termoplástico reforzado con fibra de vidrio. El proceso se alimenta de placas de termoplástico reforzado rígidas que pueden ser previamente calentadas para ser más maleables. Las piezas son transportadas hasta un molde donde son estampadas con una prensa.

El método de estampación ofrece la posibilidad de fabricar piezas de gran tamaño y complejidad con espesores variables y grandes volúmenes de producción. Tienen buenas propiedades mecánicas gracias a su gran volumen de fibra.

Proceso de estampación:

Este proceso consiste en estampar en un molde la placa termoplástica reforzada, previamente calentada a una temperatura cercana a la del punto de fusión de la matriz.

Una de las cosas que hay que definir en primer lugar es el tamaño y el peso de la placa a estampar. La placa se transporta hasta un horno donde se calienta de forma homogénea por las dos caras. Una vez calentada la placa se introduce de forma rápida en el molde para evitar la pérdida de calor.

Una vez la placa esta en el molde es estampada. La presión de moldeo depende del molde, del tamaño de la pieza y de la velocidad de aplicación de la presión pudiendo oscilar entre 10 y 41 MPa. La velocidad de prensado en caso de estampación en caliente tiene dos fases, una rápida inicial y una lenta con mayor presión al cerrar el molde para que el tiempo de ciclo sea más corto.

Capítulo 3. Análisis

3.1 Caracterización mecánica de los laminados

Los procedimientos numéricos más comúnmente utilizados para obtener el rendimiento mecánico de estructuras compuestas son, la teoría de laminación y el método de los elementos finitos, ambos requieren del tensor de rigidez de los materiales compuestos. Este tensor se obtiene generalmente a partir de la combinación de las propiedades elásticas del material compuesto.

Los parámetros elásticos necesarios para obtener el tensor de rigidez de un material compuesto son, en un caso de dos dimensiones, el módulo de elasticidad o módulo longitudinal E_1 , el módulo transversal E_2 , la relación de Poisson ν y el módulo de cizallamiento G_{12} . Con estos parámetros obtenemos el tensor de rigidez mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbb{C}_{2D} = \frac{1}{1 - 2\nu} \begin{bmatrix} E_1 & \nu E_1 & 0 \\ \nu E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - 2\nu)G_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{ec. 1.1})$$

Probablemente una de las formulas más utilizadas para obtener los parámetros elásticos del material compuesto, debido a su simplicidad, es la regla de las mezclas (RoM) y la regla inversa de mezclas (inverse RoM). Estas formulas consideran que la rigidez de los componentes del material compuesto son proporcional a la cantidad volumétrica del material compuesto. La regla de las mezclas considera una condición de iso-deformación y se aplica a las propiedades en la dirección de la fibra:

$$\begin{aligned} E_1 &= f_k^f E_1 + m_k^m E_1 \\ \nu &= f_k^f \nu + m_k^m \nu \end{aligned} \quad (\text{ec. 1.2})$$

Siendo f_k y m_k la cantidad volumétrica de la fibra y de la matriz en el material compuesto. El resto de parámetros elásticos se calculan usando la "inverse RoM", donde se considera una condición de tensión uniforme para obtener las propiedades del compuesto.

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_2} &= \frac{f_k}{f E_2} + \frac{m_k}{m E_2} \\ \frac{1}{G_{12}} &= \frac{f_k}{f G_{12}} + \frac{m_k}{m G_{12}} \end{aligned} \quad (\text{ec. 1.3})$$

A partir de esta primera aproximación, que se define por las ecuaciones 1.2 y 1.3 diferentes autores han tratado de mejorar la fórmula para predecir los parámetros elásticos de material compuesto. Paul (1960) limitó los valores de los parámetros elásticos. El límite inferior se obtuvo con el principio de energía mínima complementaria, mientras que el límite superior se obtuvo con el principio de la mínima energía potencial.

Otro enfoque para mejorar la predicción de los parámetros elásticos del material compuesto se encuentra con la introducción de los parámetros semi-empíricos en la fórmula. Tsai (1964) propuso una fórmula en la que una nueva variable "C" se incluye en las ecuaciones 1.2 y 1.3. "C" representa el grado de contigüidad en la fibra, siendo $C = 0$ el caso de fibras aisladas y $C = 1$ el caso de tener todas las fibras en contacto.

3.2 Rotura de laminados

Mediante ensayos realizados en el laboratorio sobre un laminado, se pueden determinar las siguientes resistencias de una lámina unidireccional o tejido:

X - Resistencia a tracción longitudinal

X' - Resistencia a compresión longitudinal

Y - Resistencia a tracción transversal

Y' - Resistencia a compresión transversal

S- Resistencia a cortadura

Utilizando estos datos se pueden establecer criterios de rotura bidimensional y predecir la resistencia de una lámina ortótropa solicitada por tensión o deformaciones combinadas.

La resistencia a compresión longitudinal implica más de un modo. La fibra puede ceder bajo compresión axial o puede hacerlo bajo micro-pandeo. Las contribuciones de la rigidez de la matriz y de la unión de la interfase están relacionadas con la base elástica que a su vez está relacionada con el micro-pandeo.

En la rotura a tracción longitudinal puede definirse un modo, función principal de las fibras, no tiene sentido utilizar este modo para caracterizar la rotura a compresión longitudinal.

La resistencia a tracción transversal es una combinación de la resistencia de la matriz ante tensiones complejas, resistencias de interfase entre fibra y matriz, y las tensiones de curado a nivel micro-mecánico.

La resistencia a compresión transversal al igual que la resistencia a cortadura interlaminar puede implicar modos múltiples.

3.2.1 Relación resistencia/tensión

La relación resistencia/tensión **R** o relación de resistencia, es la relación entre la resistencia máxima o última y las tensiones aplicadas.

Haciendo referencia a las siguientes expresiones:

- Tensión aplicada: $\{\sigma\} \text{ máx} = R\{\sigma\} \text{ aplicada}$,
- Deformación generada: $\{\epsilon\} \text{ máx} = R\{\epsilon\} \text{ aplicada}$,

Numéricamente R puede tener cualquier valor, pero solo tiene sentido físico con un valor mayor o igual que la unidad. Las relaciones anteriores son aplicables a todos los criterios de rotura comúnmente utilizados. La interpretación de estas relaciones sería la siguiente:

- Cuando $R = 1$, aparece la rotura.
- Cuando $R > 1$, por ejemplo $R=2$, el margen de seguridad es dos, es decir, las tensiones aplicadas pueden multiplicarse por dos sin aparecer rotura.
- Cuando $R < 1$, por ejemplo $R=0.5$, las tensiones aplicadas han excedido la resistencia por un factor de dos. Aunque físicamente no es comprensible, este valor proporciona una información útil para el diseño, ya que indican que se debe modificar el laminado o se deben reducir las cargas.

Los criterios de rotura más comunes son:

- Tensión máxima
- Deformación máxima
- Criterio cuadrático en el espacio de tensiones y deformaciones

3.2.1.1 Criterio de la máxima tensión

Este criterio calcula las relaciones resistencia/tensión para cada componente. El signo de cada tensión determina si se trata de una resistencia de tracción o de compresión. Números negativos es compresión y positivos tracción. La relación de resistencia más baja entre las tres siguientes ecuaciones es la que define la tensión de rotura de la lámina:

$$R_X = \frac{X}{\sigma_X} \text{ si } \sigma_X > 0, \text{ ó } R_X = \frac{X'}{|\sigma_X|} \text{ si } \sigma_X < 0$$

$$R_Y = \frac{Y}{\sigma_Y} \text{ si } \sigma_Y > 0, \text{ ó } R_Y = \frac{Y'}{|\sigma_Y|} \text{ si } \sigma_Y < 0$$

$$R_S = \frac{S}{|\sigma_S|}$$

3.2.1.2 Criterio de la máxima deformación

Este criterio es muy similar al de la máxima tensión. La máxima deformación para cada ensayo simple se determina mediante el cálculo de la resistencia dividida por el módulo tangente:

$$\epsilon_X = \frac{X}{E_X}, \text{ ó } \epsilon_{X'} = \frac{X'}{E_X}$$

$$\epsilon_Y = \frac{Y'}{E_Y}, \text{ ó } \epsilon_{Y'} = \frac{Y'}{E_Y}$$

$$\epsilon_S = \frac{S}{E_S}$$

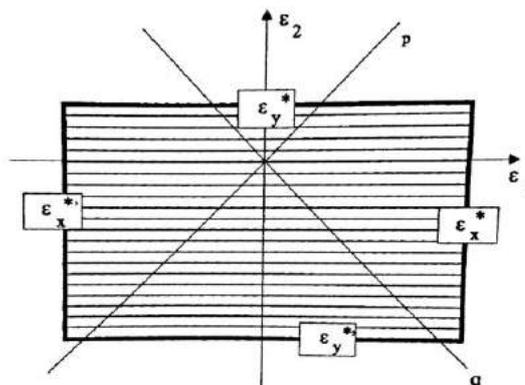


Figura 20. Criterio de la máxima deformación de una lámina ortótropa.

La **relación de resistencia (R)** en este criterio se calcula mediante el valor más bajo de las tres relaciones de la deformación máxima dividida por la deformación aplicada, de forma similar al criterio de máxima tensión.

3.2.1.3 Criterio cuadrático en el espacio de tensiones

Este criterio puede explicarse como una generalización de la energía de distorsión de la deformación. Los criterios de rotura se utilizan como herramientas útiles de diseño basados en datos adecuados y disponibles. El criterio en el espacio de tensiones consiste en la suma de productos escalares lineales y cuadráticos como se determina a continuación:

$$(1) F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i = 1, \quad ij = 1,2,3,4,5,$$

Para una lámina delgada ortótropa bajo un estado de tensión plana relativa a los ejes de simetría x e y , los parámetros de resistencia F pueden calcularse a través de la siguiente fórmula:

$$(2) F_{XX} = \frac{1}{XX'}, \quad F_{YY} = \frac{1}{YY'}, \quad F_{SS} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_X = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}, \quad F_Y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}, \quad F_S = 0$$

$$(3) F_{XY} = F_{XY}^* [F_{XX}F_{YY}]^{1/2}, \quad -\frac{1}{2} < F_{XY}^* < 0$$

Este criterio se denomina criterio modificado de Hill. Para materiales compuestos altamente anisótropos, el lugar geométrico de rotura en el espacio de tensiones es un elipsoide muy distorsionado. Los componentes de la ecuación (1) alcanzan su valor máximo cuando el término de la derecha alcanza la unidad. Sustituyendo la ecuación $\{\sigma\}_{\text{máx}} = R\{\sigma\}_{\text{aplicada}}$, en la ecuación (1) obtenemos:

$$(4) [F_{ij}\sigma_i\sigma_j]R^2 + [F_i\sigma_i]R - 1 = 0$$

Los valores de las componentes de tensión de la ecuación anterior son los correspondientes a las tensiones existentes. Para un material dado están especificados los valores de F . Para un estado de tensiones dado, los valores de σ son conocidos. Únicamente se necesita resolver en la ecuación cuadrática anterior la relación **R (resistencia/tensión)**. La solución final de la fórmula cuadrática es:

$$\mathbf{aR^2 + bR - 1 = 0}$$

$$\mathbf{a = F_{ij}\sigma_i\sigma_j, \quad b = F_i\sigma_i}$$

Substituyendo obtenemos:

$$(5) R = -\left(\frac{b}{2a}\right) + \left[\left(\frac{b}{2a}\right)^2 + \frac{1}{a}\right]^{1/2}$$

Se puede mencionar el criterio de Tsai-Wu como caso particular de este criterio. El criterio Tsai-Wu utiliza una expresión cuadrática completa y tiene en cuenta los diferentes valores de resistencia obtenidos en el material compuesto para tensiones y estados de compresión. De acuerdo con este criterio, el fallo en el material compuesto se producirá cuando:

$$f_1(\sigma_1) + f_2(\sigma_2) + f_{11}(\sigma_1)^2 + f_{22}(\sigma_2)^2 + 2f_{12}(\sigma_1\sigma_2) + f_3(\tau_{12})^2 = 1$$

Donde,

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} & f_2 &= \frac{2}{F_{2t}} - \frac{2}{F_{2c}} \\ f_{11} &= \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} & f_{22} &= \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \\ f_{12} &= -\frac{1}{2F_{1t}^2} & f_3 &= \frac{1}{F_{12}^2} \end{aligned}$$

3.2.1.4 Criterio cuadrático en el espacio de deformaciones

El criterio de rotura resultante está basado en deformación plana porque se desprecia la deformación distinta de cero a lo largo del espesor. El criterio de rotura resultante en el espacio de deformaciones es:

$$(1) \varepsilon_j + G_i \varepsilon_i = 1$$

Suponiendo que la relación de resistencia basada en las tensiones combinadas es igual a la de deformaciones combinadas, se puede determinar la **relación resistencia (R)** usando el criterio de deformación en el espacio de deformaciones:

$$(2) [G_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j]R^2 + [G_i\varepsilon_i]R - 1 = 0$$

Aplicando el mismo criterio que en la ecuación cuadrática en el espacio de tensiones obtenemos la relación de resistencia (R):

$$aR^2 + bR - 1 = 0$$

$$a = G_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j, \quad b = G_i\varepsilon_i$$

Substituyendo obtenemos:

$$(3) R = -\left(\frac{b}{2a}\right) + \left[\left(\frac{b}{2a}\right)^2 + \frac{1}{a}\right]^{1/2}$$

3.2.2 Roturas sucesivas de lámina

Sea cual sea el criterio de rotura utilizado, éste se aplica a cada lámina dentro de un laminado. La lámina con la relación de resistencia más baja fallará primero generando así la rotura-primera-lamina. Una vez que la tensión y la deformación aplicadas exceden el lugar geométrico **PRL** (lugar geométrico interior de las laminas intactas), las láminas se degradarán con fisuras de matriz/interfase.

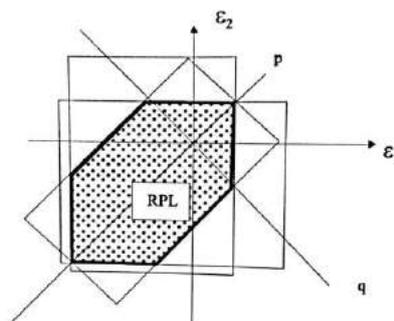


Figura 21. Lugar geométrico de rotura-primera-lamina usando el criterio de máxima deformación.

Los criterios cuadráticos son más sencillos de usar porque cada lámina está gobernada por una única relación de resistencia para cada carga aplicada. Habrá tantas relaciones de resistencia como láminas haya en el plano de carga. Se sucederán diferentes roturas de lámina comenzando con la lámina de menor relación de resistencia hasta que se alcance la resistencia última del laminado, lo que se denomina rotura de la última lámina.

Resulta más laborioso tratar con los criterios de máxima tensión o máxima deformación porque debemos tomar tres de las cinco relaciones de resistencia para cada lámina, la menor de las cuales es la relación que define la rotura. Conforme aumente el número de láminas aumentará tres veces el número de relaciones de resistencia respecto al criterio cuadrático.

3.2.3 Coeficientes de seguridad

Los coeficientes de seguridad R son de extrema importancia en el dimensionamiento de piezas de materiales compuestos. Estos coeficientes dependen del proceso de fabricación así como del tipo de trabajo.

Existen dos formas de expresar el coeficiente de seguridad:

- Mediante la relación R resistencia/tensión
- Mediante el límite máximo de deformación

Actualmente estos coeficientes de seguridad están tipificados para cada aplicación en concreto. De todas formas, la relación de resistencia (R) viene determinada por la siguiente ecuación:

$$R = 3 * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5$$

Donde K depende de factores externos, estos son:

- K_1 : Factor que depende del proceso de fabricación.
- K_2 : Factor que depende del comportamiento químico.
- K_3 : Factor que depende de la temperatura de diseño y del HDT (Heat Distortion Temperature).
- K_4 : Factor que depende del número de ciclos de carga.
- K_5 : Factor que depende del proceso de curado.

3.3 Defectología típica de los materiales compuestos

Los materiales compuestos una vez ya curados, pueden tener defectos de laminado causados por diferentes factores como pueden ser exceso o escasez de resina, temperatura inadecuada en la etapa de curado, mal proceso de laminación, etc.

Existen diferentes tipos de defectos que se pueden encontrar en los materiales compuestos con matriz polimérica, los más comunes son los siguientes:

- **Delaminación:**

Este defecto se produce cuando dos láminas contiguas se separan. Se puede dar una separación simple, múltiple y a distintas profundidades. En la siguiente imagen se puede ver un ejemplo de falta de unión entre las capas sucesivas. Esto produce un hueco que ocasionara una variación de las propiedades de la pieza. Este tipo de defectos suelen darse debidos a un mal proceso de elaboración o a impactos durante el manejo o apilado de los laminados.

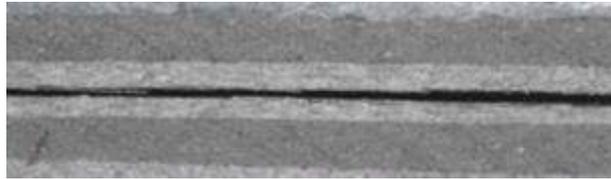


Figura 22. Defecto por delaminación.

Las situaciones en las que un mal proceso de laminación puede provocar una delaminación son:

- Utilizar resinas o catalizadores diferentes en dos capas consecutivas.
- Impregnación insuficiente del refuerzo.
- Uso de capas consecutivas de elevada proporción de fibra.
- Deterioro del ensimaje.
- Uso de un ensimaje inadecuado.
- Laminar sobre una superficie ya curada.

- **Inclusiones:**

Este defecto viene dado por la presencia interlaminar de un material que se queda en la pieza durante su fabricación. En la siguiente imagen se puede ver como hay un objeto extraño, en un tono más oscuro, entre dos láminas de tejido del laminado.

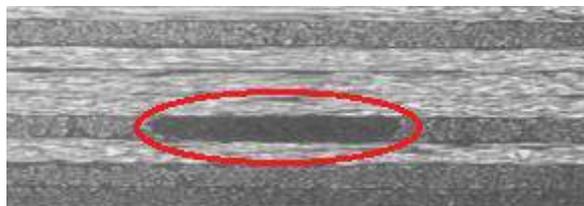


Figura 23. Inclusiones en el laminado.

- **Porosidad:**

La porosidad en un laminado tiene lugar cuando el material tiene aire en su interior que no ha podido ser extraído. Una posible causa de que aparezca este defecto es por falta de presión sobre él durante el proceso de laminado. Se pueden distinguir cuatro tipos de porosidad:

- **Porosidad uniformemente distribuida:** Los poros aparecen en distintas capas del laminado y se produce por una mala compactación entre capas.

- **Porosidad en una única capa:** Se produce una acumulación de pequeñas discontinuidades, muy próximas entre sí, entre dos capas consecutivas cuando ya se ha empezado el proceso de curado y no queda suficiente resina como para rellenar ese espacio.
- **Porosidad interlaminar:** Este defecto se aparece en forma de poros alineados en la misma capa debido a problemas de contaminación.
- **Porosidad en toda la pieza:** Este defecto es causado por una falta de presión durante el proceso de laminado. En este caso, la pieza se desecha ya que no pasaría el control de calidad.

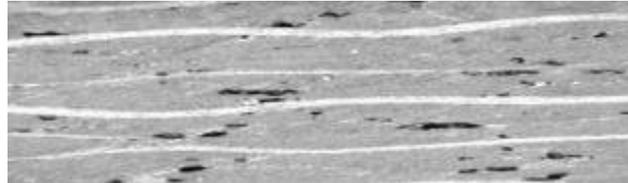


Figura 24. Ejemplo de porosidad uniformemente distribuida.

- **Falta de impregnación de las fibras:**

Este defecto se ocasiona por una escasez de resina durante el proceso de impregnación del laminado, esto ocasiona una falta de impregnación de todo el conjunto de las fibras y como consecuencia tenemos puntos del laminado con falta de impregnación (fibras secas).

Este defecto también se puede presentar cuando la resina es demasiado viscosa o se ha empleado un tiempo de gelificación demasiado corto. Otra causa por la que se puede originar este defecto es al intentar laminar con varias capas a la vez, al laminar en zonas de difícil acceso o en zonas con demasiada verticalidad.

- **Desprendimiento de la resina:**

Este efecto ocurre a medida que pasa el tiempo y el laminado está expuesto a un ambiente hostil dejando al descubierto el refuerzo. Este defecto puede ser debido a factores como:

- Baja temperatura de laminado.
- Pérdida excesiva de estireno.
- Uso de resina inadecuada para los factores externos a los que va a ser expuesto.

Capítulo 4. Comportamiento

4.1 Efectos ambientales

Los efectos ambientales generan en los materiales compuestos unas repercusiones, que en general son menores que en los materiales metálicos. Las situaciones en las que los materiales compuestos son susceptibles de registrar alteraciones en su comportamiento son:

- Exposición a un ambiente húmedo o a un líquido
- Degradación debida a las radiaciones ultravioleta del sol
- Ataques químicos
- Envejecimiento

4.1.1 Exposición a un ambiente húmedo o un líquido

Cuando una matriz orgánica de un material compuesto es expuesta al aire húmedo o a un líquido, tanto el contenido de humedad como la temperatura del material pueden cambiar con el tiempo. Estos cambios a su vez afectan a las propiedades térmicas y mecánicas, implicando una disminución en las prestaciones de dicho material.

Un parámetro muy importante en los procesos de transferencia de humedad es la **temperatura de transición vítrea T_g** , que es la temperatura crítica de degradación. La humedad absorbida por el laminado puede cambiar la temperatura de transición vítrea, afectando de este modo las características de difusión del material.

Por lo tanto se tiene que tener en cuenta que la exposición de la resina a elevadas temperaturas, por encima de T_g , podría provocar una degradación significativa de esta y la rigidez del material compuesto se podría ver afectada.

Se tiene que tener en cuenta que la humedad no solo afecta a la matriz, si no que en el caso de fibras de vidrio y aramidas también se ven afectadas. Las fibras de carbono no se ven afectadas.

4.1.2 Degradación debida a las radiaciones ultravioletas del sol

Los materiales compuestos que están expuestos a prolongadas radiaciones solares se degradan con mayor rapidez, en concreto los materiales con matriz polimérica son los que más se degradan. Esta degradación se manifiesta por una decoloración del polímero y un deterioro en la superficie del material compuesto. Para reducir el efecto de la radiación UV sobre el material se incorporan estabilizadores de radiación UV en la formulación de la resina poliéster.

Por otra parte, las fibras de carbono y vidrio son resistentes a los UV, pero las aramidas como el Kevlar se degradan rápidamente.

4.1.3 Ataques químicos

Los materiales compuestos que están en contacto con el agua del mar absorben muy lentamente agua, incluso teniendo un buen mantenimiento del casco y aplicando los productos adecuados para hacerlo más impermeables. El hecho de absorber agua produce que el laminado tenga una reducción de la resistencia.

Si existe una afinidad química fuerte entre la matriz y los agentes químicos, las moléculas pequeñas (solventes) pueden esparcirse por la totalidad del polímero y afectar las propiedades mecánicas. Generalmente la absorción física causa:

- Pérdida de resistencia y rigidez
- Incremento en dureza y grado de deformación del polímero

4.1.4 Envejecimiento

Los materiales compuestos a causa de los efectos ambientales como pueden ser el tipo de atmosfera en el que trabaja, el tipo de agentes químicos que les rodea, etc., padecen un envejecimiento lento. A medida que se va envejeciendo, estos cada vez se van convirtiendo en materiales más rígidos y frágiles.

El efecto del envejecimiento es menor en los materiales compuestos termoestables, como las resinas epoxi, que en materiales termoplásticos. Aun así, en la mayoría de casos estos efectos no son críticos porque la mayor transferencia de carga la reciben las fibras, donde el envejecimiento de estas es mínimo.

4.2 Comportamiento frente al fuego

Los efectos del fuego en los materiales compuestos se pueden dividir en cuatro aspectos principales:

- Crecimiento del fuego
- Toxicidad de los gases generados en la combustión
- Resistencia residual e integridad estructural
- Extinción de la llama

Los materiales compuestos de matriz orgánica cuando son calentados de forma que se encuentran rodeados de gases combustibles, se produce la ignición, liberan calor y propagan el frente de llama.

Los materiales compuestos comparados con la mayor parte de los polímeros presentan ventajas en las peores condiciones de fuego debido principalmente a su propia constitución, ya que contienen fibra inerte en su interior. Cuanta más fibra contenga, menos cantidad de matriz orgánica tendrá, que es la parte combustible. Cuando las capas exteriores de un material compuesto pierden la resina debido a la gasificación inducida por el calor, la fibra que ha quedado inerte actúa como una capa aislante, impidiendo la penetración del calor en el interior del composite. Se puede decir que la fibra actúa como una capa intumescente que protege las capas interiores del material compuesto.

Existen resinas especialmente diseñadas para soportar altas temperaturas como son las de bismaleimida y poliimida. Los laminados construidos con estas matrices presentan un comportamiento excelente hasta 250°C, especialmente los laminados cuasi-isotrópicos. El único problema de este tipo de resinas es su elevado coste en comparación con las epoxi o poliéster. En cambio las resinas fenólicas aunque su

comportamiento mecánico es de peor calidad ofrecen un buen comportamiento frente al fuego y con un coste más asequible.

Hay diversos recubrimientos para materiales compuestos que se comportan de manera excelente como pueden ser:

- Tejidos cerámicos
- Recubrimientos cerámicos
- Recubrimientos intumescentes a base de agua o solventes
- Híbridos de recubrimientos intumescentes y cerámicos
- Espumas de silicona
- Pieles fenólicas
- Mantas endotérmicas
- etc.

Los recubrimientos más efectivos de entre todas las barreras contra el fuego son: las mantas de vidrio, mantas intumescentes y los recubrimientos intumescentes con base de agua o cerámicos. Estos tipos de barreras contra el fuego tienen la ventaja de que puede ser fabricada "in situ" durante el procesado del material compuesto, reduciendo costes de instalación e incrementando su durabilidad.

4.3 Comportamiento frente a fatiga

La fatiga es la condición por la cual un material se agrieta o falla como resultado de esfuerzos repetidos (cíclicos). Por lo tanto, la fatiga se define como el cambio estructural permanente, localizado y progresivo que tiene lugar en un material sujeto a deformaciones repetidas y fluentes.

La fatiga puede afectar prácticamente a todos los materiales sujetos a esfuerzos cíclicos. Los esfuerzos incluyen los que producen las cargas externas repetitivas y los esfuerzos térmicos que resultan del calentamiento y enfriamiento alternados.

La *vida de fatiga* de un material se define como el número total de ciclos de esfuerzos necesarios para causar la falla. El método más común para estudiar la vida a fatiga es utilizar cargas cíclicas de amplitud constante y registrar el número de ciclos hasta la rotura.

4.3.1 Mecanismos de degradación por fatiga

El efecto fatiga es la reducción de la resistencia o la rigidez residual, y la posible rotura, tras aplicar un número finito de ciclos de carga. Estos ciclos de carga son menores en magnitud que la carga necesaria para producir la rotura en un solo ciclo. Por lo tanto, tiene que ocurrir algún tipo de proceso de "degradación por fatiga" que reduzca la resistencia del material bajo carga.

4.3.1.1 El proceso de fatiga

Para materiales compuestos laminados que presentan fibras en la dirección perpendicular al eje de aplicación de la carga, el primer signo de degradación por fatiga y el más prolífico es el de la formación de grietas en la matriz. Aunque la rigidez y ductilidad del material pueden acelerar o retardar el inicio de esas grietas, llegando incluso a evitar totalmente su aparición en algunos casos de carga cuasi-estática, se ha comprobado que la aplicación de una carga cíclica da lugar a la formación de grietas en

prácticamente todos los sistemas de materiales compuestos laminados con fibras continuas, no sólo en sistemas de matriz polimérica, sino también de matriz cerámica o metálica. En la mayoría de los casos estas grietas se forman a través de las capas en la dirección paralela a las fibras y perpendicular al eje principal de aplicación de la carga. Estas se denominan **grietas de matriz primarias**.

La consecuencia más inmediata de la formación de este tipo de grietas es la aparición de roturas en las fibras. Estas roturas comienzan en las capas adyacentes cercanas a los extremos de las grietas, incluso durante el primer tercio de la vida total de la pieza.

Por lo tanto, la secuencia de desarrollo de la degradación microscópica en materiales compuestos laminados bajo cargas cíclicas pueden concebirse como un proceso que se compone de iniciación de grietas primarias en la matriz, fractura de las fibras, pérdida de la adherencia a escala local, formación de grietas secundarias y posible delaminación local.

4.3.1.2 Mecanismo de degradación por fatiga

Existen dos propiedades de los materiales compuestos laminados que influyen de modo decisivo en la forma de representar el mecanismo de degradación por fatiga: la no homogeneidad y la anisotropía.

Heterogeneidad:

La heterogeneidad es el factor principal en la respuesta de estos materiales ante cargas cíclicas. Desde el punto de vista del comportamiento, la heterogeneidad presenta una dualidad.

Por una parte es el factor que contribuye en mayor medida a que los materiales compuestos laminados presenten una buena resistencia a la fatiga. Por otro lado, es el factor más condicionante en el inicio de la degradación a nivel microscópico.

La heterogeneidad también contribuye a la complejidad de los estados de tensión asociados con el desarrollo del daño por fatiga, incluso antes de iniciarse el proceso de degradación. Esto es debido a que la no homogeneidad del material da lugar a la aparición de cargas internas entre los distintos componentes del material.

Anisotropía:

La anisotropía influye en gran medida en el desarrollo del daño por fatiga. Las fases de refuerzo del material compuesto están alineadas o distribuidas de forma geométrica, lo que origina una dependencia direccional de las propiedades mecánicas del material. Esta dependencia está asociada con estados de tensión compleja que pueden dar lugar a solapamientos, como por ejemplo combinaciones de tracción axial y esfuerzo cortante.

4.4 Reciclaje de materiales compuestos

En función del tipo de refuerzo del material compuesto y el tipo de resina se llevara a cabo un proceso de reciclado distinto, y eso es debido a las propiedades de ambos elementos. En este caso se determinaran el proceso de reciclado de:

- Materiales compuestos de fibra de vidrio y matriz termoestable
- Materiales compuestos de carbono/epoxi

4.4.1 Reciclado de materiales compuestos de fibra de vidrio y matriz termoestable

Los productos SMC (Sheet Molding Compound) están formados aproximadamente por un 70% de contenido en peso de material inorgánico (principalmente carbonato de calcio y fibras de vidrio) y entorno a un 10-20% de contenido en peso de una resina termoestable. Además existe un 5-10% de contenido en peso de un aditivo termoplástico cuya función es la de proporcionar superficies más suaves.

Los productos SMC han tenido una gran aplicación en la industria actual como por ejemplo en la industria de la automoción, naval, etc. Debido a su gran aplicación se han generado una gran cantidad de desechos que deberán ser reciclados.

Existen cuatro aproximaciones principales para el reciclado de materiales compuestos de matriz termoestable:

- Amolado
- Degradación química selectiva
- Pirólisis
- Incineración en recuperación de energía

4.4.1.1 Amolado simple del SMC

El reciclado del SMC mediante el proceso del amolado, consiste en la reutilización de las fibras, el carbonato cálcico y las resinas poliméricas, sin la separación entre sí de estos componentes. El material compuesto es triturado y tamizado a trozos pequeños y posteriormente utilizado como relleno en un nuevo producto. Los nuevos productos de SMC que contienen en SMC reciclado como material de relleno, poseen la misma resistencia al impacto y propiedades físicas que anteriormente.

Una de las ventajas de usar SMC reciclado como relleno frente a los materiales convencionales de relleno, es que su gravedad específica es más baja, de esta manera se obtienen piezas más ligeras y resistentes.

4.4.1.2 Degradación química selectiva de fragmentos de SMC

Otra opción de reciclado es la degradación química selectiva de la red del polímero poliéster/estireno por reacción de los enlaces de éster con un apropiado nucleófilo. Se ha comprobado que cuando la resina de poliéster insaturada y en masa, reacciona con nucleófilos (como por ejemplo alcohol, hidróxido/benzil de potasio, hidrazina o benzilamina) se pueden producir productos solubles.

Este método padece algunas limitaciones en comparación con otras alternativas de reciclaje. Algunas de estas limitaciones son:

- El uso de hidróxido de potasio como nucleófilo tiene un efecto degenerador sobre las fibras de vidrio que se recuperan del reciclado.
- Un punto importante a tener en cuenta es que en el paso de neutralización del ácido, se puede descomponer el carbonato cálcico que está presente, evitando que pueda ser usado como material de relleno.

Como solución a las limitaciones expuestas anteriormente, se evaluaron agentes químicos menos agresivos con las fibras de vidrio, como las etanolaminas. El proceso de etanolamina permite la

recuperación de una buena cantidad de fibras de vidrio y una ventaja adicional es que este agente puede recuperarse por medio de la destilación.

4.4.1.3 Pirólisis de fragmentos de SMC

La pirólisis es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

La pirólisis, si se realiza de forma cuidadosa, posee la capacidad de separar los componentes inorgánicos del SMC sin reducir sus características. Un beneficio añadido de la pirólisis es que no sólo separa los componentes de forma individual para su reutilización, sino que además utiliza el contenido energético de la fracción de resina del SMC como combustible del proceso.

4.4.1.4 Incineración en recuperación de energía

La recuperación de energía por combustión de fragmentos de SMC está especialmente bien situada para uso final de los fragmentos de SMC que están contaminados y contienen una mezcla de diferente polímeros. El reciclado de SMC no sólo consiste en el reciclado de la matriz polimérica puesto que el total del material que compone el SMC está formado por fibra de vidrio y materiales de relleno. Después de la combustión, una gran cantidad de refuerzo inerte y material de relleno resulta sobrante. Este residuo inorgánico puede tener el mismo volumen que el material compuesto original.

Los materiales SMC producen baja carbonización porque la matriz de poliéster tiende a quemarse rápidamente con la mayor parte del calor liberado en la fase de combustión gaseosa, lejos de la fase sólida. Esta es la misma situación que en el caso de materiales compuestos basados en resinas epoxi y viniléster que también producen baja carbonización.

4.4.2 Reciclado de materiales compuestos carbono/epoxi

La recuperación de las fibras de carbono a partir de los desperdicios que se generan en el procesado de plástico reforzado con fibra de carbono es una nueva tecnología que está surgiendo en el campo del reciclado. En la fabricación de compuestos con fibra de carbono, los filamentos continuos en forma de tejidos o no tejidos son los más usados. Estos materiales son normalmente impregnados con resinas epoxi, y los preimpregnados resultantes son procesados.

Los desperdicios generados por el procesado de materiales compuestos con fibras de carbono consisten en fibras, tejidos, preimpregnados y laminados curados. La mayoría de estos son preimpregnados, los cuales pueden ser reprocesados por dos operaciones básicas: extrayendo la resina y cortando las fibras.

El material de la matriz para compuestos con fibra de carbono es resina epoxi. Una forma de extracción de la resina es a través de degradación térmica. Este proceso proporciona cambios en la superficie de la fibra, provocando bajas propiedades de adhesión fibra-matriz. La resina también puede ser extraída por medio del uso de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

El reciclado de desperdicios de fibra de carbono impregnada es económicamente interesante, debido al alto coste de la fibra de carbono.

Capítulo 5. Ensayos y calidad

Los materiales compuestos deben ser sometidos a un control de calidad, este control se ha centrado en técnicas de validación de las propiedades físico-químicas del material ya curado. Este método consiste en analizar el material en su estado sólido y cumpla con los requisitos estipulados en la normativa Europea (EN) y la Norteamericana (ASTM).

El proceso de control de calidad de los composites debe realizarse siguiendo las siguientes etapas:

- Validación de la fibra
- Validación de la matriz
- Control de la reacción
- Control de los moldes y utillajes
- Control del proceso de fabricación y manipulación
- Control del proceso de curado
- Control de la pieza terminada

El control de calidad se realizará a través de unos ensayos normalizados, y en algunos casos no normalizados si la empresa lo exige.

Los ensayos que se realizan se diferencian en función de los que se realizan a las materias primas y los realizados sobre el material compuesto ya sea a través de probetas o directamente sobre el propio material.

Una vez realizados los ensayos, se puede definir un material compuesto de buena calidad si cumple con los siguientes aspectos:

- **Contenido en porosidad o burbujas:** Para materiales pre-impregnados tiene que estar por debajo del 1-2%, y en procesos realizados en vía húmeda mediante métodos manuales, puede llegar al 10%.
- **Consolidación del laminado:** La proporción fibra-matriz en los pre-impregnados puede llegar al 70% de fracción de volumen de fibra, y en los procesos por vía húmeda puede estar en torno 25%.
- **Grado de curado**
- **Orientación de la fibra:** Las fibras deben adaptarse a los requerimientos de diseño.

5.1 Ensayos sobre las materias primas

Estos ensayos se realizan para garantizar la calidad del producto antes de ser utilizado y ser desechado todo aquel que no cumpla con los requisitos predeterminados. De este modo se asegura el fabricante que el defecto en el laminado solo puede aparecer en el proceso de fabricación del material compuesto.

Los ensayos que se realizan son:

- Ensayos y control sobre las fibras
- Control de matrices
- Control de la interfase

5.1.1 Ensayos y control sobre las fibras

Los ensayos que se realizan a las fibras de refuerzo son para determinar la resistencia a tracción y módulo de elasticidad a tracción.

Los métodos de ensayo que se aplican normalmente para determinar las propiedades a tracción de las fibras son ensayos de filamentos y/o hilos impregnados con resina. Estos ensayos están detallados en la normativa ASTM D 3379-75 para ensayos de filamentos y en ASTM D 4018-81 para ensayos de hilos. En algunos casos, la resistencia de la fibra se calcula a partir de la resistencia de laminados unidireccionales si se conoce el porcentaje en volumen de fibra.

Para los tejidos, mats o rovings en seco, los principales controles son:

- Control visual: regularidad en el tejido, ausencia de manchas o cuerpos extraños u otro defecto apreciable a simple vista.
- Control del gramaje
- Espesor medio de mats y tejidos
- Determinación de la masa lineal para hilos (rovings)
- Ensayos mecánicos: como por ejemplo ensayos a tracción o la determinación de la rigidez a flexión.
- Porcentaje de humedad en el refuerzo
- Porcentaje de ensimaje en las fibras
- Porcentaje de impurezas
- Determinación de la solubilidad en estireno

5.1.2 Control de matrices

Es importante realizar el control de las matrices que se emplean en el proceso de fabricación del composite, ya que una variación despreciable en las características de la resina puede causar una disminución de las propiedades del material compuesto de hasta un 30%. Estas propiedades de la resina pueden variar en función del tiempo de almacenamiento, temperatura, humedad, etc.

Los principales controles que se llevan a cabo son:

- **Control químico de la resina:**

En función del tipo de resina que se vaya a analizar se controlan diferentes aspectos.

En las resinas poliéster se realiza el índice de ácido, índice de hidróxilo, contenido en estireno y contenido en agua.

En las resinas epoxi se realizan los controles de equivalente en epoxi, índice de hidróxilo y contenido de cloro.

Para las resinas fenólicas se realizan los controles de fenol y fenol libre, y el contenido en agua.

- **Control de viscosidad de la resina:**

Los dos métodos más usados son: el viscosímetro de Brookfield y la copa de FORD.

Una resina poco viscosa tendrá cadenas moleculares más cortas y dará material compuesto con menores propiedades mecánicas.

El **viscosímetro de Brookfield** mide la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en la muestra de fluido a estudiar.

La **copa de FORD** mide el tiempo que tarda un volumen determinado de resina en pasar a través de un orificio calibrado.

- **Control mecánico de la resina:**

La resistencia y módulo de tracción así como la deformación de rotura pueden determinarse usando paneles planos o probetas. Los detalles de este método de ensayo se reflejan en la norma ASTM D638M-84.

5.1.3 Control de la interfase

Existen varios métodos de ensayo para obtener la resistencia de la unión fibra-matriz de un material compuesto. El método más utilizado es el de arranque de la fibra. Esta técnica se utiliza usualmente para fibra de vidrio pero presenta dificultades de uso para la fibra de carbono debido a su naturaleza frágil, es decir, rompe la fibra antes de ser arrancada por la matriz.

Al aplicar una fuerza de tracción a la probeta, esta fuerza se transmite por cortadura a la fibra en la interfase fibra-matriz.

La resistencia a cortadura de interfase media (t) puede calcularse según la siguiente expresión:

$$t = \frac{\sigma_f d}{2 l_c}$$

Donde:

σ_f : Tensión de fractura de la fibra

d : Diámetro de la fibra

l_c : Longitud crítica

5.2 Control del material compuesto

Se pueden distinguir tres formas de control de calidad del material compuesto, y estas son:

- Sobre probetas que sean realizadas en moldes apropiados.
- Ensayos destructivos sobre las piezas
- Ensayos no destructivos sobre las piezas

5.2.1 Control de probetas

Las probetas de las que realizamos dicho control de calidad se tienen que obtener de las piezas fabricadas en concreto. En el caso de que resulte difícil la obtención de dichas muestras se deberá realizar una probeta de la forma más aproximada al proceso de fabricación real de la pieza.

En cuanto a la realización de los ensayos sobre las probetas se tendrá que tener en cuenta las condiciones ambientales a las que va a ser expuesta dicha pieza, por lo que las probetas tendrán que ser acondicionadas a dichas condiciones.

Otro de los aspectos que se tienen que tener en cuenta en el análisis de la probeta es la determinación de densidad, volumen de fibra y control de resina.

La densidad de un material compuesto puede determinarse obteniendo el peso de la probeta en seco y sumergida en agua. La probeta puede ser cualquier pieza de tamaño y forma, siempre que su volumen no sea inferior a 1 cm^3 .

El contenido de fibra de los materiales compuestos de matriz orgánica se suele determinar disolviendo la resina del composite en un medio que no ataque excesivamente la fibra. Una vez que la resina está completamente disuelta, el residuo (la fibra) es filtrada, limpiada, secada y pesada.

5.2.2 Ensayos destructivos sobre las piezas

Los ensayos destructivos son pruebas a las que se someten los materiales con el fin de determinar sus propiedades mecánicas como por ejemplo la dureza, tenacidad, resistencia mecánica, ductilidad, etc. y así poder verificar la calidad de dicho material. De este modo, si sabemos su comportamiento, se podrá hacer una correcta aplicación de este.

Estos ensayos son muy importantes ya que nos muestran de manera proporcional como se desempeñan los materiales en distintas situaciones.

Los principales ensayos destructivos que se realizan sobre las piezas de materiales compuestos son los siguientes:

- Ensayos de tracción
- Ensayos de flexión
- Ensayos compresión
- Ensayos de cortadura plana
- Ensayos de cortadura interlaminar
- Ensayos de fatiga
- Ensayos de fractura interlaminar
- Ensayos de impacto
- Ensayos de compresión después de impacto
- Ensayos de panales Sándwich

5.2.3 Ensayos no destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos son usados para detectar las imperfecciones superficiales e internas en los materiales, soldaduras, elementos o piezas fabricadas y componentes, con el fin de asegurar un nivel de calidad aceptable del estado estructural y funcional de los equipos, sistemas y componentes, tanto durante la fase de fabricación o construcción como durante la vida en servicio de los mismos.

Los ensayos no destructivos de materiales compuestos obligan a contemplar de forma bastante distinta el aspecto de los defectos a comparación de como se hace con los metales. Los defectos e imperfecciones son producidos fortuitamente durante dos momentos diferentes, que son la fabricación y la vida en servicio del compuesto.

Los tipos de ensayos que se realizan sobre los materiales compuestos son los siguientes:

- Técnica de inspección visual
- Ultrasonidos
- Radiografía
- Termografía
- Holografía óptica
- Holografía acústica
- Sistemas de fibras ópticas
- Emisión acústicas

Capítulo 6. Los materiales compuestos en la industria naval

6.1. Introducción

La primera vez que se usaron los materiales compuestos en la industria naval para la construcción de barcos fue poco después de la Segunda Guerra Mundial. El casco fue fabricado en PRFV (polímero reforzado con fibra de vidrio).

Los armadores empezaron a sustituir la madera por PRFV para la construcción de pequeñas embarcaciones, debido a que la construcción con madera cada vez resultaba más cara. Otra de las razones por la cual se empezaba a reducir el uso de madera, es que esta se degrada con el agua del mar mucho más que los composites y por lo tanto necesitan de un mayor mantenimiento y las reparaciones son más caras.

El primer intento de fabricar cascos con materiales compuestos reforzados con fibra (PRFV) fue en 1947 cuando se fabricaron doce pequeñas embarcaciones para la Marina de los Estados Unidos. En ese momento, poco se sabía sobre el diseño y construcción de embarcaciones en composite, las tecnologías aplicadas en los procesos de fabricación estaban en proceso de desarrollo, y los materiales tenían baja resistencia y poca durabilidad. Este cúmulo de factores hizo que el uso de materiales compuestos en la construcción de buques no fuera factible, ya que estos aun no estaban en condiciones de navegar.

Las técnicas de diseño y las tecnologías aplicadas en el proceso de construcción mejoraron rápidamente, y eso llevó a poder utilizar los materiales compuestos para la fabricación de pequeñas y medianas embarcaciones durante la década de 1950. Gracias a esta mejora en el conocimiento de la materia, la elección del tipo de fibra y resinas empleadas durante la construcción eran las adecuadas.

El conocimiento y la confianza en los materiales compuestos fue creciendo y esto hizo que se incrementara el número y tipos de embarcaciones marítimas. Por ejemplo, a mediados de la década de 1960, más de 3.000 barcos habían sido construidos de materiales compuestos para la Marina de los Estados Unidos, incluyendo más de 800 botes balleneros a motor, 330 barcos de servicios públicos, 250 lanchas de desembarco, 220 barcos de personal, y 120 barcos de patrulla.

La mayoría de las embarcaciones se construían utilizando poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), aunque los materiales compuestos con estructura sándwich y los materiales que contienen fibras de carbono o aramida laminadas con resinas epoxi o viniléster se empezaron a utilizar para aplicaciones estructurales de alto rendimiento.

Los composites actualmente se utilizan en una amplia variedad de embarcaciones, que varían en tamaño y forma, como puede ser desde una canoa o un bote pequeño a un yate o embarcaciones

rápidas. Además los materiales compuestos también se emplean para la fabricación de estructuras ligeras para buques grandes, mástiles, superestructuras como plataformas marinas, etc.

6.2. Aplicaciones Navales de los composites

La aplicación de los materiales compuestos de PRFV en embarcaciones fue impulsado inicialmente por una necesidad de obtener embarcaciones más ligeras, fuertes, resistentes a la corrosión y duraderas.

La Marina de los Estados Unidos apoyo los principios de diseño, investigación y trabajo de desarrollo para la producción de buques en composite. Inicialmente, la marina financió la producción de pequeñas embarcaciones de uso personal, seguidamente durante la década de 1950 se llevo a cabo la construcción de una mayor variedad de embarcaciones, incluyendo patrulleras, lanchas de desembarco y buques dedicados a la limpieza de minas. Además la Marina de los Estados Unidos fue la primera en utilizar superestructuras de materiales compuestos para grandes buques, como por ejemplo: casetas, tuberías y tanques de combustible y agua.

A partir de la década de 1950 la armada británicas, francesa y sueca empezaron a utilizar materiales compuestos en sus buques, y eso hizo expandir las aplicaciones de estos en la construcción naval.

La expansión de los composites se hizo eminente y durante los años 1950 y 1960 se produjeron una gran cantidad de buques y submarinos de guerra además de otros complementos navales. Un ejemplo de esta gran variedad de embarcaciones y complementos se muestra en la *Tabla 6*.

Embarcaciones:
Buscaminas
Lanchas de desembarco
Barco Personal o de recreo
Revestimientos para cascos de madera
Domo del sonar de un submarino
Aletas del submarino
Mástiles y obenques del mástil
Timones
Tanques (combustible, aceite lubricante, agua)
Tubos de torpedos
Las tapas de escotilla
Patrulleras de río
Embarcaciones de práctico (Pilot boat)
Cabinas para barcos pequeños
Tubería
Antenas para buques

Tabla 6. Lista de las embarcaciones que se fabricaron con PRFV - ASM Handbook

Hasta la década de 1960 los únicos buques construidos íntegramente de materiales compuestos tenían esloras inferiores a 20m (66 pies). Esto es así debido a que no era seguro construir buques de guerra más grandes de esa eslora ya que no tenían la suficiente rigidez viga-casco debido al bajo modulo de Young que presentaban estos materiales.

El poco espesor de la viga casco puede causar excesivo arrufo y quebranto con mala mar. Tales grandes flexiones producen fallos inducidos por fatiga en el casco, mamparos y las articulaciones, además estas

causan problemas de mantenimiento como puede ser la desalineación del eje y la pérdida de estanqueidad de las escotillas.

El problema de la baja rigidez de la viga casco para pequeños buques de guerra se superó a principios de 1970 con la construcción del HMS Wilton por la Royal Navy. Este es un buque dedicado a operaciones de limpieza de minas que tenía una eslora de 46,6m, con un desplazamiento a plena carga de 450 toneladas, lo que fue el mayor buque construido en materiales compuestos hasta el momento. La alta rigidez de la viga casco se logró mediante la construcción con un compuesto innovador conocido como "**single skin design**". El casco básicamente consistía en una fina capa de laminado de PRFV endurecido con refuerzos longitudinales y transversales, la mayoría de las secciones transversales estaban construidas en sándwich. No sólo el casco tenía la rigidez adecuada, sino que también tenía una excelente resistencia al impacto y resistencia a la corrosión.

Desde mediados de la década de 1970, cientos de barcos de patrulla y buques dedicados a operaciones de limpieza de minas (minehunter), fueron construidos usando materiales compuestos. Estos tenían un rango de 50m a 60m de eslora. Mientras la técnica de "*single skin design*" se utilizaba para la construcción de embarcaciones, otras dos técnicas de producción se fueron desarrollando para conseguir embarcaciones de composite más grandes. Estas técnicas fueron la construcción **monocasco**, que consiste en darle un espesor determinado al laminado del casco, y la construcción **sándwich**, que consiste en colocar un núcleo entre las dos caras exteriores del laminado. En la *figura 25* se muestran ejemplos de buques construidos con las diferentes técnicas nombradas anteriormente.



(a)



(b)



(c)

Figura 25. Barcos de composite. **(a)** El buque "Sandown class minehunter" construido con una sola capa (single-skin). **(b)** El buque "Huon class minehunter" con construcción en monocasco. **(c)** El buque "Bay class minehunter" con casco compuesto en sándwich.

Cada vez más, las lanchas patrulleras se construían con un diseño totalmente compuesto o un casco de composite equipado con una superestructura de aluminio. La creciente popularidad de las lanchas patrulleras de PRFV se debe principalmente a su excelente resistencia a la corrosión, lo que se traduce en una reducción de los costes de mantenimiento y una estructura más liviana, que pueden alcanzar velocidades más altas, y con un menor consumo de combustible. Se estima que las patrulleras de composite son aproximadamente un 10% más ligera que un bote de aluminio y más de un 35% que un barco de acero del mismo tamaño. Sin embargo, el coste de fabricación de un barco de patrulla en materiales compuestos era alrededor de un 30% más alto que para un barco de acero, y eso fue un gran impedimento para su uso a gran escala.

Un ejemplo de barco de patrulla en composite es el "**Skjold class**" gobernado por la Real Marina Noruega, como se muestra en la *figura 26*. Este buque tiene 47,5m de eslora con un desplazamiento a plena carga de 270 toneladas y está hecho de material compuesto con estructura tipo sándwich. El núcleo del sándwich es una espuma de polivinilo de cloruro, y las pieles exteriores consisten en láminas de fibra de vidrio y de carbono. Los materiales compuestos de fibra de carbono rara vez se utilizan en la construcción de buques a causa de su alto coste, sin embargo, se utiliza en el *Skjold* para las estructuras que requieren de una alta rigidez, como puede ser por ejemplo el mástil.



Figura 26. El "Skjold class" barco de patrulla

Otro tipo de buque que comúnmente se construía en composite son los "*minehunting ships*" (buques de detección o destrucción de minas submarinas). Una gran cantidad de este tipo de buques se han construido desde mediados de la década de 1970 usando los diferentes métodos, "single-skin" o sándwich. La razón principal por la que se construían estos buques con materiales compuestos es que no poseen propiedades magnéticas y son muy resistentes a la corrosión.

Por regla general de diseño, el comportamiento estructural de los buques con eslora inferior a 50m, como es el caso de lanchas patrulleras y "*minehunters*", está centrado en la respuesta de estructuras locales, tales como mamparos y cubiertas. Por otra parte, el rendimiento de los barcos más grandes, de aproximadamente 60m, está determinado por la rigidez de la viga casco. Debido a la baja rigidez de los materiales de PRFV, casi todos los buques tienen una eslora inferior a 60m. El único buque construido en composite hasta la fecha por encima de este tamaño es el "**Visby class corvette**" (botado el 8 de

junio de 2000) con 72 m de eslora, y entro en servicio para la Real Armada Sueca. Se muestra en la *figura 27*.

El Visby está construido en estructura sándwich donde incorpora un núcleo de espuma de cloruro de polivinilo, y el laminado está formado por fibra de carbono y resina viniléster, el proceso de fabricación es por el método de infusión.

El uso de materiales compuestos de fibra de carbono refleja el aumento de la demanda de rigidez viga-casco. El diseño en composite con fibra de carbono proporciona un alto nivel de resistencia y durabilidad, buena resistencia a los golpes, bajas propiedades magnéticas, y una estructura ligera.



Figura 27. Visby class corvette

La marina de los Estados Unidos considero la posibilidad de construir sus corvettes con materiales compuestos, pero buques de la Armada de más de 100 m, como fragatas, destructores y portaaviones, no era factible que se construyeran íntegramente con materiales compuestos, ya que es mucho más barato construir buques de gran tamaño de acero.

Durante esta etapa de desarrollo de la construcción de grandes buques en composite, las estructuras de fibra de vidrio reforzado son las que más se han utilizado. Sin embargo, el uso de fibra de carbono cada vez se iría usando más en la construcción de buques ya que su precio fue cayendo y eso posibilitó el hecho de realizar grandes estructuras.

Pero la realidad es que no es factible construir grandes barcos utilizando materiales compuestos, estos materiales se utilizan ahora en una amplia variedad de elementos estructurales y para el equipo interno en fragatas, destructores y portaaviones.

6.3. Componentes estructurales en buques

Los composites se utilizan en las superestructuras de algunos buques de guerra para eliminar la corrosión, agrietamiento por fatiga, y para obtener una reducción del peso. El primer buque de guerra grande construido con una superestructura compuesta fue la fragata "**La Fayette**", que se muestra en la *Figura 28*. La construcción en sándwich se uso en la sección de popa de la superestructura, que incluye un hangar para helicóptero y chimeneas. La sección de popa de esta superestructura tiene 38 m de eslora, 15 m de manga y pesa 85 toneladas, lo que la convierte en una de las estructuras de composite más grande y pesada en el sector naval. La sección delantera de la superestructura, que incluye el puente, centros de combate y de telecomunicaciones, está construido de acero, ya que se consideró que una estructura compuesta no proporcionaría una protección adecuada. Como se ha mencionado anteriormente, las superestructuras de composite son entorno de un 30 a un 40% más ligeras que una estructura de acero, y esto se traduce en una mejor estabilidad del buque y ahorro de combustible. Sin embargo, se estiman en un 35 a un 50% más caro de construir, y por esta razón, la mayoría de los buques de guerra seguirán siendo construidos con superestructuras de acero o de aluminio por lo menos durante los próximos años.



Figura 28. La Fayette, fragata con la superestructura en composite en la sección que se muestra en el círculo.

Otra estructura en composite que se empezó a desarrollar para su uso en grandes buques fue el mástil. La viabilidad de la fabricación de mástiles de comunicaciones y vigilancia en materiales compuestos se empezó a estudiar debido a los numerosos problemas con los mástiles de acero.

Los principales problemas con los mástiles de acero son que se corroen y se producen interferencias con los sistemas de radar y de comunicaciones de otros buques. En 1997, el avanzado sistema de mástil/sensor (AEM / S) se instaló en el buque "**Spruance class destroyer USS Arthur W. Radford**" como

una demostración de nuevas tecnología. Todo el mástil estaba hecho de material compuesto tipo sándwich y tiene 28 m de altura y hasta 10,7 m de ancho, como se muestra en la *Figura 29*.

Una razón importante para la construcción del sistema de AEM / S con materiales compuestos es que estos materiales permiten el paso de señales de radar y de comunicaciones con muy poca interferencia o atenuación, a diferencia de los metales. Esto permite que todas las antenas, sensores y otros equipos electrónicos sensibles puedan instalarse dentro de la estructura del mástil, y de esta manera estar protegidos de la intemperie. Otros beneficios del sistema AEM/ S es que son más ligero y más resistente a la corrosión que los mástiles de acero; sin embargo, los mástiles compuestos presentan el hándicap que son mucho más caros de construir.



Figura 29. Mastil AEM/S de composite en el buque USS *Arthur W. Radford*

La viabilidad del uso de materiales compuestos en una amplia variedad de estructuras secundarias en equipos del buque y submarinos está en constante proceso de desarrollo e investigación. Por ejemplo, se está estudiando el desarrollo de hélices, propulsores, y ejes de propulsión de composite. La intención es que los compuestos ofrezcan una serie de ventajas importantes sobre los metales cuando se utilicen en sistemas de propulsión, incluyendo menores costes, reducción de peso, bajo magnetismo, propiedades de amortiguación del ruido y resistencia a la corrosión. Se prevé que los ejes de propulsión hechos de materiales compuestos serán de un 25 a 80% más ligero que un eje de acero del mismo tamaño y se reducirán los costes del ciclo de vida al menos en un 25%, debido a un menor número de problemas asociados con la corrosión y la fatiga. A pesar de los beneficios mencionados anteriormente, el uso de materiales compuestos en los sistemas de propulsión es limitado. Hélices compuestas sólo se han utilizado en buques torpederos y en alguna nave minehunter (detectoras de minas), los ejes propulsores de composite sólo se han instalado en algunos barcos de patrulla, incluyendo el *Skjold* antes mencionado, mientras que aún no se han utilizado propulsores compuestos. Sin embargo, se espera que el uso de materiales compuestos en estas aplicaciones vaya aumentando, aunque a un ritmo lento.

Los composites también fueron evaluados para su uso en timones de los barcos u otras aplicaciones como chimeneas, mamparos, cubiertas, puertas estancas, tuberías, conductos de ventilación, componentes para motores diesel, bombas e intercambiadores de calor en grandes buques.

6.4. Ocio, competición y comercio de buques de materiales Compuestos

La diversidad de aplicaciones de los materiales compuestos en la construcción naval es lo que ha llevado a su amplio alcance en la náutica de ocio, deportiva, buques comerciales y pequeñas lanchas. Los composites se utilizaron por primera vez en las embarcaciones de recreo y yates en la década de 1950, y en las embarcaciones comerciales, como los arrastreros de pesca y embarcaciones de práctico de puertos, así como pequeñas lanchas, en la década de 1960.

Es interesante destacar que la experiencia y los conocimientos adquiridos en el uso de los materiales compuestos en la náutica de ocio y comercial facilitó el uso más amplio de estos materiales en otros tipos de buques.

A partir de la década de 1970, el uso de materiales compuestos para la fabricación de cascos de embarcaciones se incrementó de forma espectacular, y en la actualidad la mayoría de los buques de menos de 15 o 20 metros de eslora están contruidos con PRFV. Los tipos de embarcaciones fabricadas en composite son: kayaks, canoas, botes, motos acuáticas, botes salvavidas, yates y lanchas. Buques de más de 20 metros se hacen generalmente de acero o aleaciones de aluminio, aunque el uso de materiales compuestos para esloras mayores cada vez ira siendo mayor ya que el coste de fabricación en materiales compuestos cada vez es más económico. Entre los buques comerciales más grandes que se construyeron utilizando materiales compuestos son los cruceros de lujo, los ferries de pasajeros, aerodeslizadores y barcos de pesca.

Hace varios años, entre el 50 y el 60% de todos los barcos de pesca de menos de 60 m se hicieron de PRFV, y se espera que la construcción con materiales compuestos continúe aumentando. Los composites se utilizan a menudo para que la embarcación sea más ligera y eso permita poder transportar una mayor cantidad de producto, además la suciedad producida por los pescados es más fácil de limpiar que en las de madera, y los cascos son más fáciles de mantener y reparar. Los materiales compuestos también se han utilizado en las hélices de barcos de pesca, así como motoras, para evitar los problemas de corrosión y de ruido que pueden producir las hélices de metal, también se están utilizando cada vez más en los Ferries de alta velocidad capaces de transportar entre 350 y 400 pasajeros. Los Ferries se construyen generalmente con un casco compuesto y una superestructura de aluminio, estos rara vez se construyen con una superestructura en composite por la mala resistencia al fuego. Algunas cubiertas de elevación y puertas en los Ferries de transporte de coches también se han hecho de un material compuesto tipo sándwich.

El material compuesto más utilizado en buques de ocio y comercial es el PRFV, en forma de un laminado grueso o un compuesto tipo sándwich. Más del 95% de todas las embarcaciones de composite se construyen con PRFV debido a su bajo coste, que es similar al coste del acero y aleaciones de aluminio. Hay, sin embargo, una serie de razones por las cuales los materiales compuestos tienen una gran popularidad en la construcción de embarcaciones, estas son:

- Capacidad para moldear fácilmente y económico.

- Excelente resistencia a la corrosión.
- Peso ligero, lo que resulta en menor consumo de combustible.
- Fácil de reparar.
- Buena capacidad para absorber el ruido y amortiguar las vibraciones, lo que lo convierte en un viaje más cómodo en los barcos motorizados.

Yates de alto rendimiento que compiten en las carreras más prestigiosas del mundo, como la Copa América, se construyen con materiales compuestos de calidad aeroespacial en lugar de GRP (Glass Reinforced Plastic). Los compuestos avanzados también se utilizan en la construcción de lanchas de carreras y los cascos de veleros.

El secreto del *International America Cup Class* (IACC) en la construcción de yates y lanchas de carreras es que se han construido con materiales compuestos avanzados como se muestran en la *Figura 30*. Los yates y barcos de carreras como estos se construyen con materiales compuestos ultraligeros tipo sándwich, donde las capas del laminado son delgadas y contienen fibras de carbono, vidrio y / o aramida (Kevlar, DuPont) y un núcleo de espuma de polivinilo de cloruro o nido de abeja de Kevlar. Los procesos de fabricación que se realizan para la obtención de estructuras compuestas de alto rendimiento son el moldeo por transferencia de resina (RTM), infusión, o tratamiento en autoclave. Estos métodos se utilizan en la construcción de cascos y cubiertas para conseguir laminados sin defectos, con excelente tolerancia dimensional, y un alto contenido de fibra para una máxima rigidez y resistencia a la fatiga.



(a)



(b)

Figura 30. Barcos construidos casi en su totalidad con materiales compuestos avanzados. (a) 2000 Team New Zealand IACC yate. (b) barco de regatas serie F- 2 .

Las principales ventajas del uso de materiales compuestos avanzados son la distribución óptima del peso, buena resistencia a la fatiga, la amortiguación a las vibraciones, y lo más importante, los ratios de alta rigidez-peso y resistencia-peso que ofrecen. El uso de materiales compuestos avanzados con altas relaciones de rigidez-peso y resistencia-peso, permite obtener cascos más ligeros con la rigidez y la resistencia equivalente a cascos de PRFV con espesores mucho más gruesos.

Los apéndices como orzas y timones en los cascos de vela de alto rendimiento, flaps en lanchas, y timones en yates también se construyen comúnmente utilizando compuestos tipo sándwich. Esto es beneficioso para el rendimiento hidrodinámico porque el peso total se reduce al mínimo, se obtiene mayor rigidez en los apéndices, y una reducción en el peso del timón contribuye a reducir momentos de cabeceo del casco.

Los composites también se utilizan para fabricar el mástil, botavara y tangones, además de los accesorios y refuerzos de montaje en veleros y yates. Los mástiles en barcos de vela están hechos de material compuesto reforzados de vidrio o carbono para obtener la flexibilidad deseada para una respuesta óptima. La fibra de carbono también se utiliza en mástiles para la IACC y otros yates de alto rendimiento. Los mástiles compuestos son entre un 40% a un 50% más ligero que los mástiles similares hechos de aleación de aluminio, lo que resulta una reducción del momento escorante y, por lo tanto, la mejora del rendimiento de la embarcación.

Por último, y por ello no el menos importante, la fabricación de velas laminadas con materiales compuestos. Las velas han estado constantemente en proceso de estudio y análisis con la intención de conseguir velas más ligeras, más resistentes y que la distribución de esfuerzos sea la más adecuada para el tipo de vela que se esté fabricando.

Hasta finales de los años setenta, todos los materiales de vela utilizados eran materiales tejidos en telares. Se utilizaba ya desde los años cincuenta y sobre todo sesenta hilos basados en fibras de polyester (Dacron) para las velas en general y de polyamida (Nylon) para los spis y velas para vientos portantes. Estas fibras desbancaron rápidamente el algodón por ser muy superiores a éste en cuanto a la deformación y peso.

A finales de los años setenta, aparecieron los primeros materiales en que la estabilidad de forma se buscaba ya no a base de resinados, sino que se adhería a un lado del tejido una lámina de polyester con muy buena resistencia a la deformación en todas direcciones. Se fueron realizando diferentes tipos de laminados combinando diferentes tipos de fibras como pueden ser Nylon, Dacrón, Vectran, Kevlar y Carbono entre otras, para conseguir las características deseadas de la vela.

A principios de los años 1990, concretamente en 1992 aparecieron las velas 3DL, una tecnología revolucionaria que termo-moldea las velas en una membrana unitaria sobre un molde tridimensional a escala real. Comparada con una vela tradicional fabricada mediante la unión de paños, una vela 3DL tiene un menor coeficiente de estiramiento para su peso, mantiene su forma en un mayor rango de vientos y durante más tiempo.

6.5. Aplicaciones offshore de los composites

Los materiales compuestos de PRFV se han utilizado en las plataformas de perforación en el mar durante muchos años, aunque en la industria del petróleo sólo se ha utilizado estos materiales en aplicaciones secundarias y no en los principales elementos estructurales. El acero es el material estructural primario que se utiliza en las plataformas de perforación ya que tiene muchos beneficios que otros materiales no pueden igualar, incluyendo los materiales compuestos. Los beneficios incluyen materiales de bajo coste, la capacidad para fabricar grandes estructuras a bajo coste, buena resistencia al fuego, reglas de diseño bien establecidas, entre otras. Sin embargo, el acero tiene una serie de inconvenientes que ha permitido a los materiales compuestos usarse para determinadas aplicaciones.

El mayor problema con el uso del acero para una estructura en alta mar es la baja resistencia a la corrosión, y en estas plataformas no solo está como agente corrosivo el agua del mar sino que hay otras, como sulfuro de hidrógeno y cloruro de hidrógeno, que se producen durante la perforación. Se estima que la industria petrolera gasta miles de millones de dólares cada año en el mantenimiento, reparación y sustitución de estructuras de acero corroídas. Con los composites se reducen estos costes de mantenimiento debido a su excelente resistencia a la corrosión contra la mayoría de productos químicos.

Los composites también ofrecen la posibilidad de reducir el peso de la parte superior de la plataforma cuando se utilizan en aplicaciones tales como módulos de alojamiento, plataformas de aterrizaje de helicópteros y las cubiertas. Se estima que los compuestos proporcionan un ahorro de un 30 a un 50% en comparación con el acero. El aumento del uso de materiales compuestos en las estructuras superiores hace que el transporte y la instalación de las plataformas sean más fáciles.

Los composites se utilizan para una gran variedad de estructuras y componentes en la plataforma offshore, debida a su buena resistencia a la corrosión y al ser más liviana en comparación con el acero. Los tipos de materiales compuestos más utilizados son los compuestos PRFV y fenólicos, este último es utilizado debido a su buena resistencia al fuego. Los compuestos que contienen fibras de carbono, fibras de Kevlar, o resinas epoxi se usan con moderación debido a su alto coste.

Algunas de las aplicaciones actuales de los materiales PRFV son:

- Tuberías de baja presión
- Tanques de almacenamiento, tanques de lubricación, y tanques de servicio diario
- Rejillas, escalones y pasamanos
- Los paneles de protección contra incendios y las secciones de los módulos de alojamiento
- Las boyas y flotadores
- Fortalecimiento de las estructuras de acero
- Cubiertas de aterrizaje de helicópteros

No todas las plataformas en alta mar utilizan materiales compuestos, y en la mayoría de las aplicaciones, los materiales compuestos se han usado para reemplazar secciones de acero corroídas. Las nuevas plataformas rara vez se construyen con cantidades significativas de material compuesto, aunque esto puede cambiar a medida que la industria del petróleo evalúa la viabilidad del uso del PRFV para nuevas aplicaciones. Las aplicaciones potenciales incluyen:

- Tuberías de alta presión
- Tubos de perforación, tubos y canalizaciones verticales

- Plataformas semi-sumergibles
- Las paredes y pisos para proporcionar protección contra la explosión y el fuego

Se espera que el uso de materiales compuestos crezca con algunas de estas nuevas aplicaciones, sin embargo, sigue habiendo muchos problemas económicos y técnicos que deben resolverse antes de usar los PRFV en plataformas offshore. El mayor coste de fabricación de estructuras offshore con materiales compuestos en comparación con el acero es una preocupación para la industria petrolera. Sin embargo, existe un creciente reconocimiento de que se puede obtener un importante ahorro de costes con los materiales compuestos, debido a la reducción de mantenimiento y sustitución de estructuras corroídas. También hay preocupación por la falta de códigos de diseño y estándares en campos petroleros bien establecidas con el uso de materiales compuestos. Un problema de seguridad importante es que la mayoría de los PRFV tienen poca resistencia al fuego, tales como tiempos cortos de encendido, altas tasas de liberación de calor, producción de humo y propagación de las llamas.

Aunque los materiales compuestos tengan una conductividad térmica mucho más baja que los materiales metálicos, hay bastantes factores que condicionan a los materiales compuestos poder cumplir con los requisitos de seguridad contra incendios aplicados en las plataformas petrolíferas y de gas en alta mar.

6.6 Aplicaciones actuales

Actualmente los materiales compuestos son una gran potencia en la industria naval, y no solo en la náutica de recreo en la que se podría decir que el 90% de las embarcaciones con esloras inferiores a 20 - 25 metros están fabricadas con estos materiales, sino que también los podemos ver en otros tipos de embarcaciones como pueden ser de pesca, pasaje, etc.

Los materiales compuestos están expuestos a un continuo estudio con la intención de proporcionar mejores propiedades para el sector naval, y poder conseguir una difusión de estos en sectores que debido a las cargas o esfuerzos que puedan soportar en su ciclo de vida no cumplan las propiedades que ofrecen otros, como es el caso del acero. Además de los análisis que se efectúan sobre las propiedades de estos materiales, también se estudian los tipos de laminados y como mejorar los procesos de fabricación que se llevan a cabo.

Actualmente, dentro del mercado de los materiales compuestos, podríamos decir que los PRFV son los laminados que ocupan casi en su totalidad el mercado de la industria naval, debido a sus reducidos costes, pero con estos obtenemos unas propiedades inferiores que al usar materiales compuestos avanzados, como son las fibras de carbono y Aramida (Kevlar, DuPont). Estos materiales se usan para embarcaciones de competición o que tengan que soportar mayores esfuerzos, ya que con estos materiales podemos conseguir iguales propiedades mecánicas con un espesor mucho más reducido que laminados con PRFV.

Por lo tanto, podemos ver que hay una gran variedad de embarcaciones con infinidad de laminados que se han realizado con diferentes procesos de laminación. Aunque se tiene que tener en cuenta que actualmente los procesos que más se llevan a cabo son el moldeo asistido por vacío, infusión y RTM.

Como se ha mencionado en otros apartados, los materiales compuestos no solo se utilizan para la fabricación de embarcaciones, sino que se están utilizando para la construcción de plataformas o superestructuras de buques grandes, con la intención de reducir el volumen de desplazamiento del buque, y por lo tanto conseguir un ahorro económico a la vez que una reducción del mantenimiento debido a las buenas propiedades de estos ante la corrosión.

Los materiales compuestos también se usan para la fabricación de complementos navales, como es el caso de mástiles de fibra, botavaras, obenques, timones, etc. El hecho de usar estos materiales en los complementos proporciona embarcaciones aún más livianas, que para la náutica de recreo proporcionan una reducción en costes de mantenimiento y combustible, pero a lo que a la competición se refiere, pueden llegar a proporcionar un incremento en la velocidad de navegación, que se pueden traducir en victorias.

Después de ver la gran amplitud de los materiales compuestos, y poder ver el margen de mejora que ha tenido desde sus inicios y el que tendrá en un futuro, surgió la idea de crear una plataforma web en la que ofrecer todos los conocimientos relacionados con la materia. Finalmente se decidió crear **NAVAL COMPOSITES**, una web dedicada a los materiales compuestos en la industria naval, se podrá consultar más información en el siguiente link:

<http://www.navalcomposites.com/>

Naval Composites

Naval Composites es una plataforma virtual de conocimiento que pretende compartir información y dar a conocer a las empresas que producen con materiales compuestos. Para la realización de esta web se ha hecho un estudio previo de todas aquellas empresas, de ámbito nacional, que están relacionadas con el tema.

Se realizó una búsqueda bibliográfica gracias a la cual recopilé la información necesaria para la realización de esta web. Con ello se estructuró la plataforma virtual abordando los siguientes campos:

- **Sobre nosotros**
- **Materiales compuestos**
- **Astilleros**
- **Complementos navales**
- **Cursos**
- **Noticias**
- **Empleo**

Con ello se pretende tener la posibilidad de abordar los diferentes aspectos relacionados con los materiales compuestos, sin tener la necesidad de navegar por múltiples páginas webs. Es decir, gracias a esta plataforma, el usuario podrá informarse y estar al día del tema tratado sólo visitando la siguiente página: <http://www.navalcomposites.com>

Sobre nosotros

En este apartado se hace una breve presentación y una descripción del propósito de la página web:

"Ingeniero graduado en sistemas y tecnología naval ha desarrollado esta plataforma web con la intención de facilitar a los profesionales del sector y futuros aspirantes información sobre la producción con materiales compuestos en la náutica, así como astilleros y empresas dedicadas a la producción de complementos navales.

En la industria naval un elevado volumen de flota nacional está fabricada con materiales compuestos, por eso surgió la idea de crear esta plataforma de conocimiento que pretende facilitar al usuario información relacionada con el tema. Además de publicar noticias de actualidad, se proporcionará información sobre cursos formativos, relacionados con los materiales compuestos en la industria naval, que puedan ser de interés para poder desarrollarse profesionalmente. Se compartirán ofertas de empleo para facilitar el acceso al mundo laboral. "

Materiales compuestos

Considero que esta sección es una de las más importantes y en la que se refleja parte de la información que aparece en la primera parte del trabajo teórico.

Se divide en los apartados siguientes:

- **Conceptos**
 - Definición de material compuesto
 - Tipos de materiales compuestos
 - Características
 - Matrices
 - Recubrimientos
 - Refuerzos
 - Estructuras Textiles
 - Estructuras Sándwich
- **Procesos de laminación**
 - Moldeo por contacto
 - Moldeo asistido por vacío
 - Moldeo por vía líquida
 - Moldeo con autoclave
 - Enrollamiento filamentario
 - Estampación de termoplástico reforzado
- **Reciclaje**
 - Fibra de vidrio / Matriz termoestable
 - Fibra de carbono / Epoxi

Los siguientes apartados han sido seleccionados con el fin de destacar los conceptos que se han considerado más importantes de los materiales compuestos.

Astilleros

Un astillero es aquella instalación destinada a la construcción y reparación de embarcaciones.

En este apartado he querido crear una base de datos de todos los astilleros de España que producen con materiales compuestos, proporcionando de cada uno de ellos la siguiente información: nombre de astillero, localización, dirección, tipología de buques que fabrica, e-mail, teléfono de contacto, vínculo con su página web particular y material que se utiliza en el proceso de laminación.

Además, desde la página web, proporcionaré la posibilidad a todos los astilleros de poder publicar la información que consideren oportuna para poder definirse al público.

El hecho de ordenar toda esta información en tablas individuales, hace que resulte claro y sencillo para el internauta conocer cuáles son los astilleros que existen en este ámbito y poder acceder a cualquiera de ellos gracias a su enlace directo.

A continuación se muestra un ejemplo de la información que aparece:

GRUP ARESA INTERNACIONAL			
	Astillero:	ARESA	E-mail: info@gruparesaint.com
	Localización:	Arenys de Mar, Cataluña	Teléfono: 93 792 13 00
	Dirección:	Moll del portinyol s/n, Zona portuària	Web: www.aresaboats.com/es
	Tipología:	Buques de defensa y vigilancia Buques de servicio y offshore Buques de pasaje Buques de pesca profesional Buques de recreo a Motor (L >20m)	
		Material:	PRFV

Figura 31. Ejemplo de información sobre Astilleros - Naval Composites

Complementos navales

Los complementos navales son elementos que se añaden en la estructura del buque con la intención de mejorarlo.

En este apartado, tal y como se ha hecho en el apartado anterior, se ha creado una base de datos de todos las empresas de España dedicadas a la producción de complementos navales con materiales compuestos, proporcionando de cada uno de ellos la siguiente información: nombre de la empresa, localización, dirección, tipología (donde se muestra el tipo de complemento naval que producen), e-mail, teléfono de contacto y vínculo con su página web particular.

Además, des de la página web, se proporcionara la posibilidad a todos las respectivas empresas de poder publicar la información que consideren oportuna para poder definirse al público.

Las diferentes tipologías que pueden aparecer en la página web son las siguientes:

- **Velas**
- **Mástil y botavara**
- **Timón**
- **Rueda de timón**
- **Pasarela**
- **Hélices**
- **Remos**
- **Otros complementos navales:** como pueden ser cornamusas, tangones, etc.

A continuación se muestra un ejemplo de la base de datos que se ha usado para mostrar la información de las siguientes empresas:

SELDÉN MAST S.A.				
	Astillero:	SELDÉN Mast S.A.	E-mail:	jmb@seldenmast.se
	Localización:	Alicante, Valencia	Teléfono:	96 579 37 52 689 023 134
	Dirección:	Av del Rey Juan Carlos I, 58,03730 Xàbia,Alicante	Web:	www.seldenmast.com
	Tipología:	Mástiles y Botavaras Otros accesorios navales		

Figura 32. Ejemplo de información sobre empresas producción complementos navales - Naval Composites

Cursos

Con la intención de abarcar todos los campos de información respecto a los materiales compuestos, no podía faltar la recopilación de cursos. Si se está interesado en la materia y se quiere aprender o perfeccionar los conocimientos, se tienen que realizar **cursos**, y es por eso que se tiene la intención de hacer una recopilación de todos los que vayan saliendo para mantener al día al usuario.

Para proporcionar dicha información se ha creado una plantilla donde se informa sobre los siguientes aspectos: nombre del curso, entidad, lugar, fecha, tipo, horario, duración, precio, un enlace web donde se podrá acceder a la página de matriculación y una breve descripción de lo que se realizara en el dicho curso.

A continuación se muestra un ejemplo de la información que se muestra en la página web:

 CENTRO ESPAÑOL DE PLÁSTICOS	Curso	Diseño de materiales compuestos con CATIA V5
Entidad	Centro Español de Plásticos	
Lugar	-	
Fecha	27/04/2016 - 30/04/2016	
Tipo	Online	
Horario	Videoconferencia (09:00 - 14:00 h)	
Duración	20 h. (1 semana)	
Precio	500 €	
Enlace web	www.eu2.emgcdn.net	
Descripción	El postgrado está planteado con carácter de familiarización en sus contenidos sobre materiales (composites), tecnologías de fabricación, diseño y simulación, consolidando todos los aspectos teóricos con prácticas dirigidas por los profesionales del sector que actualmente desarrollan su trabajo en los diferentes sectores de aplicación de la tecnología contando para ello con empresas de diferentes sectores con diferentes procesos de fabricación.	

Figura 33. Ejemplo de información sobre Cursos - Naval Composites

Noticias

En este apartado se proporcionarán noticias de actualidad para mantener al usuario al día sobre nuevas tecnologías que se estén aplicando, nuevos productos en los que se estén trabajando, se le proporcionara a las empresas la posibilidad de publicar artículos promocionando nuevos procesos de trabajo, nuevos productos, etc.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se ven reflejadas las noticias en la página web:



Figura 34. Ejemplo de Noticias - Naval composites

Como se puede ver aparecerá en la imagen anterior, aparece un **"READ MORE"** donde con un simple *"click"* se podrá ver el artículo entero.

Además en la página inicial habrá una sección donde se irán actualizando las últimas noticias que se vayan publicando.

Empleo

Navalcomposites es una plataforma que pretende ser de utilidad, y por ello se intentará mantenernos al día y conseguir ofertas de trabajo que estén relacionados con los materiales compuestos. Para ello se intentará estar en contacto con las empresas que se han ilustrado en secciones anteriores.

Como se puede ver en la página web, además de proporcionar nosotros una bolsa de trabajo, se ofrecerá la posibilidad de que cada uno publique su propia oferta de trabajo y llevar la gestión de esta. Para ello el ofertante deberá rellenar un formulario a la vez que registrarse en la web. En este formulario se pedirá información sobre la **"oferta laboral"** y sobre **"datos de la empresa"** que proporciona la oferta de trabajo.

Finalmente, tanto las ofertas que proporcione **Naval Composites** como las que se publiquen mediante el formulario de oferta laboral, se verán reflejados en la página de la bolsa de trabajo de la siguiente manera:

Palabras claves Ubicación

Indefinido Jornada Completa Pácticas Temporal Tiempo parcial

Mostrando todo Indefinido, Jornada Completa, Pácticas & Temporal Empleos RSS Cancelar

	INGENIERO NAVAL NAv-LABs Laboratorio de diseño y construcción naval	Costa Rica	Indefinido Publicado hace 3 semanas
--	------------------------------------------------------------------------	------------	--------------------------------------------------

Figura 35. Ejemplo de Empleos - Naval Composites

Como se puede ver en la imagen anterior, aparece un cuadro donde poder seleccionar el tipo de oferta laboral que queremos buscar, y aparecerán dos cuadros de texto donde escribir alguna palabra clave con relación a la oferta de trabajo, o la ubicación que le interese al usuario.

Conclusiones

Después de analizar los tipos de compuestos, fabricación, propiedades, etc. estos son unos materiales ya muy implantados en la industria naval pero que tienen todavía mucho recorrido. Extendiendo su uso a mayores esloras, materiales más customizados, etc.

En este proyecto se ha tenido el propósito de facilitar el acceso a información sobre este tema a cualquier usuario que tenga interés por el mundo de los materiales compuestos en la industria naval. También se tiene la intención de ayudar a estudiantes universitarios graduados en ingeniería naval a acceder a este específico sector, publicando tanto ofertas de trabajo como noticias sobre actualidad. Esto conlleva publicitar a distintas empresas relacionadas con el tema y ayudar a potenciarlas, con esta plataforma, a nivel nacional. Este trabajo, por lo tanto, pretende ir dirigido al colectivo naval, a universitarios, graduados o a cualquiera que esté interesado sobre la situación de este sector en España.

A nivel personal, con este proyecto he sido capaz de recopilar, seleccionar y clasificar de manera razonable toda la información encontrada. Además he tenido el propósito de diseñar una página web eficaz y eficiente.

La idea de crear la página web surgió de este análisis previo, y de la carencia de una página web que reuniera todos los aspectos que se abarcan en "*Naval Composites*".

Los resultados que se ofrecen en esta web no son los definitivos, ya que estará en constante estudio de mejora para que al usuario le sea más fácil encontrar la información deseada, a la vez que se trabajará para proporcionar una mayor cantidad de noticias, mejores ofertas de trabajo y una amplia oferta de cursos.

La idea final es mostrar la situación actual en España sobre este tema, y potenciar a las empresas del sector con la intención de llegar a conseguir mejores resultados.

Este proyecto se inició en septiembre de 2015 y finaliza en abril de 2016. En este trayecto y en la fase de cerca bibliográfica, mis objetivos se han ido modificando hasta llegar a los actuales. Esto significa que constantemente he realizado un trabajo personal reflexivo por lo que he podido redirigir adecuadamente este trabajo.

Pienso que podría dividir este proceso en dos fases muy diferenciadas. En los primeros 3 meses me dediqué a realizar la parte teórica del trabajo: definí conceptos, ordené ideas y pude organizar la información que encontraba. Posteriormente, y con mis conocimientos bien estructurados, me dispuse a crear y diseñar la página web.

Bibliografía

Libros:

- [1] **Antonio Miravete.** *Materiales Compuestos, Tomos I - II. 1ª ed.* España: Reverte, S.A., 2007. ISBN 978-84-921349-7-7
- [2] **Alejandro Basednjak.** *Materiales compuestos, procesos de fabricación de embarcaciones. 1ª ed.* España: UPC, 2005. ISBN 978-84-8301-820-0.
- [3] **Ever J.Barbero.** *Introduction to composite materials design. 2ª ed.* Londres: Taylor & Francis Group, 1999.
- [4] **Daniel B. Miracle y Steven L. Donaldson.** *ASM Handbook Volume 21 Composites. 10ª ed.* ASM International, 2001. ISBN: 0-87170-703-9.
- [5] **DEPARTMENT OF DEFENCE, United States of America.** *Composites Materials Handbook, Volume 3: POLYMER MATRIX COMPOSITES MATERIALS USAGE, DESIGN, AND ANALYSIS.* 2002.
- [6] **José Luis Tallería Bartolomé.** *Materiales avanzados. 2ª ed.* España: CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 1994. ISBN 84-605-0633-9.

Artículos y documentos:

- [7] **R.A. Sheno, J.M. Dulieu-Barton, S. Quinn, J.I.R. Blake and S.W. Boyd.** *COMPOSITE MATERIALS FOR MARINE APPLICATIONS – KEY CHALLENGES FOR THE FUTURE.* School of Engineering Sciences, University of Southampton.
http://eprints.soton.ac.uk/68652/1/PCM_Paper_UoS_Final.pdf
- [8] **Andrew T. Grenier.** *Fire Characteristics of Cored Composite, Materials for Marine Use.* 1996. Disponible en:
<https://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0501102-231140/unrestricted/grenier.pdf>
- [9] **[9] Ivan Grabovac.** *Composite Reinforcement for Naval Ships: Concept Design, Analysis and Demonstration.* School of Applied Sciences, RMIT University, 2005. Disponible en:
<https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:9525/Grabovac.pdf>
- [10] **Jesús Casas Rodríguez.** *Industria naval y medio ambiente.* Grupo de trabajo: "Medio ambiente y Desarrollo sostenible". Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos. Disponible en:
<http://www.ingenierosnavales.com/sites/default/files/Libro%20Industria%20Naval%20y%20Medio%20Ambiente.pdf>
- [11] **Dr. S. Selvaraju, S. Ilaiyavel.** *APPLICATIONS OF COMPOSITES IN MARINE INDUSTRY.* Journal of Engineering Research and Studies, Vol.II, 2ª ed., pág. 89-91, 2011. Disponible en:
<http://www.technicaljournalonline.com/jers/VOL%20II/JERS%20VOL%20II%20ISSUE%20II%20APRIL%20JUNE%202011/ARTICLE%2019%20JERS%20VOL%20II%20ISSUE%20II%20APRIL-%20JUNE%202011.pdf>
- [12] **Miguel A. Jiménez, Luís Castejón, Antonio Miravete.** *Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles.* ICMA - Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza, 1997. Disponible en:
<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/497/545>

- [13] **M Mohan, Gurit.** *The advantages of composite material in marine renewable energy structures.* THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS, Paper presented at RINA Marine Renewable Energy Conference 2008. Disponible en:
http://www.gurit.com/files/documents/the_advantages_of_composite_material_in_marine_renewable_ergy_structures.pdf
- [14] **Danilo Ivan Rios Salas Valdivia.** *Análisis comparativo de piezas laminadas obtenidas por infusión.* Universidad Austral de Chile, 2010. Disponible en:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcir5861a/doc/bmfcir5861a.pdf>
- [15] **Angel Villamana Pazos.** *Propiedades mecánicas y desgaste de nanomateriales compuestos de matriz epoxy.* Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en:
http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16163/PFC_ANGEL_VILLAMANA_PAZOS.pdf?sequence=1
- [16] **Brenda L. Buitrago Pérez.** *Comportamiento de estructuras de material compuesto sometidas a cargas impulsivas.* Universidad Carlos III de Madrid. Tesis Doctoral, 2012. Disponible en:
<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/15004>
- [17] **Carlos Herrera Santos.** *Estudio del fallo en uniones adhesivas con materiales compuestos.* Universidad de Sevilla, 2013. Ingeniería aeronáutica. Disponible en:
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60156/fichero/VOLUMEN+1%252FPFC_CarlosHerrera.pdf
- [18] **Alexander Gil.** *Resinas de poliéster. Guía de manejo.* Universidad EAFIT, Colombia, 2012. Disponible en:
<http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaboratorios/infraestructura/laboratorios/Documents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>
- [19] **Xavier Martínez.** *Micro-Mechanical Simulation of Composite Materials using the serial/parallel Mixing Theory.* Tesis Doctoral. UPC, 2008. Disponible en:
<https://web.cimne.upc.edu/users/xmartinez/Public/Publications/PhD/PhD%20-%20Xavier%20Martinez.pdf>
- [20] **Luz Stella Arias Maya y Libardo Vanegas Useche.** *Falla de los materiales compuestos laminados.* Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004. UTP. Disponible en:
<http://www.redalyc.org/pdf/849/84911685021.pdf>
- [21] **Tsai, S.W. (1964).** Structural behavior of composites materials. Technical Report CR-71, NASA
- [22] **Paul, B. (1960).** Prediction of elastic constants of multiphase materials. In Transactions of the metallurgical society of AIME, pages 36-41.

Páginas Web:

Las páginas webs de las empresas que se promocionan en la plataforma web se pueden ver en:

<http://www.navalcomposites.com/>