AULA POLITÈCNICA NAUTICA

Materiales compuestos

PROCESOS DE FABRICACIÓN DE EMBARCACIONES

Alejandro Besednjak

AULA POLITÈCNICA
/ NÁUTICA

Alejandro Besednjak Dietrich

Materiales compuestos

Procesos de fabricación de embarcaciones

EDICIONS UPC

Primera edición: septiembre de 2005

Diseño de la cubierta: Jordi Calvet

© Alejandro Besednjak, 2005

© Edicions UPC, 2005
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
E-mail: edicions-upc@upc.edu

Producción: Quality Impres, S.L.
Comte Güell 24-28, 08028 Barcelona

Depósito legal: B- 40719-2005
ISBN: 84-8301-820-9

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

Prólogo

La utilización de materiales compuestos en la industria naval ha experimentado, desde sus comienzos en la década del cuarenta, un constante crecimiento. Su empleo ha permitido construir embarcaciones más duraderas, más ligeras y a un coste menor que las tradicionales de madera; ello, sumado a importantes logros sociales obtenidos en la segunda mitad del siglo XX, ha permitido a un público cada vez mayor acceder a la navegación de recreo.

Superados los problemas iniciales, los nuevos procesos o técnicas han conseguido hacer de los materiales compuestos unos materiales fiables y con un comportamiento predecible. Ofrecen al diseñador naval unas excelentes propiedades mecánicas, una reducción sustancial de peso, y una libertad en el diseño de formas que los convierte en los preferidos respecto de otros materiales tradicionales.

El presente libro tiene como objetivos fundamentales ofrecer de manera clara y ordenada los diferentes procesos de fabricación que se utilizan actualmente en la construcción de embarcaciones empleando materiales compuestos, estudiar la problemática específica de las grandes estructuras marinas, y difundir las tecnologías más respetuosas con el medio ambiente. El mismo analiza los procesos desde una perspectiva contextual, y se encuentra orientado tanto a diseñadores y constructores navales como a estudiantes de ingeniería naval.

La falta de bibliografía técnica referente al tema en lengua castellana nos ha servido como estímulo para ofrecer esta recopilación. Esperamos que el texto sea útil, que su lectura sea entretenida, y que nos hagan llegar sus sugerencias, críticas y comentarios para enriquecer futuras ediciones.

Alejandro Besednjak Dietrich

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Agradecimientos

La idea de preparar el presente libro surge de la recopilación de una serie de apuntes monotemáticos referidos a los nuevos procesos de fabricación de embarcaciones en materiales compuestos, escritos para los alumnos de Enginyeria Tècnica Naval de la Facultat de Nàutica de Barcelona. No son pocos los que estos años han colaborado, de una manera u otra, para que este libro vea la luz. Por ello, quería agradecerles a todos ellos su esfuerzo.

A mis padres, que sin su apoyo y devoción jamás hubiera podido dedicarme a esta profesión.

A mi esposa Elvira, por su derroche de paciencia y comprensión.

A la Facultat de Nàutica de Barcelona y, especialmente, a Germán de Melo Rodríguez, director del proyecto de I+D OPEN 6,5.

A mis colegas de la Facultat de Nàutica de Barcelona Joan Antoni Moreno Martínez y Mohammed Reda Chakkor.

A Alejandro Bosque i Laguna, del Consorci El Far de Barcelona, y a Luis Fernández Delgado, delegado para Catalunya del Colegio Oficial de Peritos e Ingenieros Técnicos Navales.

A la biblioteca de la Facultat de Nàutica de Barcelona, especialmente a Carme Urgell y a Charo Piera.

A la biblioteca P. Fidel Fita de Arenys de Mar.

A Gabriela Carabelli, Mariana Arias, Horacio Chakass, Javier Soto Acebal y Héctor Longarella, de la Universidad Nacional de Quilmes, en Argentina.

A los diferentes talleres y astilleros por los cuales he pasado todos estos años, especialmente Sams-C3, y a sus directores, Albert Bargués y Bernat Calpe.

A todos ellos mi más sincero agradecimiento.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Índice

Presentación

Prólogo 7
Agradecimientos 8

1 Conceptos generales

1.1 Definición de material compuesto 15
1.2 Tipos de materiales compuestos 16
1.3 El concepto matriz-refuerzo 16

2 Matrices para materiales compuestos

2.1 Los polímeros 19
2.2 Origen 19
2.3 Procedimientos de síntesis de polímeros 19
2.4 Clasificación de los polímeros 20
2.4.1 Termoplásticos 21
2.4.2 Elastómeros 21
2.4.3 Termoestables 22
2.5 Particularidades de la industria naval 23
2.6 Funciones de la matriz polimérica en el material compuesto 24
2.7 Matrices termoestables 24
2.7.1 Proceso de curado de resinas 24
2.7.2 Clasificación de resinas 27
2.7.2.1 Resinas de poliéster 27
2.7.2.2 Resinas de viniléster 30
2.7.2.3 Resinas de baja emisión de estireno 31
2.7.2.4 Resinas *epoxi* 31
2.7.2.5 Resinas fenólicas 32
2.7.2.6 Otras resinas 33
2.8 Cargas y aditivos 33
2.8.1 Cargas 34
2.8.2 Aditivos 34
2.9 Recubrimientos 35
2.9.1 El *gelcoat* 35
2.9.2 El *topcoat* 36

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3 Materiales de refuerzo

3.1 Introducción 39
3.2 Fibras inorgánicas 39
3.2.1 Fibra de vidrio 39
3.2.1.1 Introducción 39
3.2.1.2 Composición química 40
3.2.1.3 Procesos de obtención 40
3.2.1.4 Tipos de fibras de vidrio 41
3.2.1.5 Propiedades 41
3.2.2 Fibra de carbono 42
3.2.2.1 Introducción 42
3.2.2.2 Composición química 42
3.2.2.3 Proceso de obtención 42
3.2.2.4 Tipos de fibra de carbono 43
3.2.2.5 Propiedades 43
3.3 Fibras sintéticas 44
3.3.1 Fibras aramídicas 44
3.3.1.1 Introducción 44
3.3.1.2 Composición química 45
3.3.1.3 Proceso de obtención 45
3.3.1.4 Tipos de fibras aramídicas 45
3.3.1.5 Propiedades 45
3.4 Estructuras textiles 46
3.4.1 Introducción 46
3.4.2 Fieltros 47
3.4.3 Sistemas no mallados 47
3.4.3.1 Tejidos 47
3.4.3.2 Ensamblados 49
3.4.3.3 Trenzados 50
3.4.4 Mallados y encadenados 51

4 Materiales de núcleo

4.1 Introducción 53
4.2 Concepto de estructura *sandwich* 53
4.3 Tipos de núcleos 54
4.3.1 Maderas naturales 54
4.3.1.1 Madera balsa 54
4.3.1.2 Cedro rojo 56
4.3.1.3 Contrachapado marino 56
4.3.2 Espumas sintéticas 57
4.3.2.1 Espumas de cloruro de polivinilo (PVC) 57
4.3.2.2 Espumas de poliuretano (PU) 58
4.3.2.3 Espumas de poliestireno (PS) 59
4.3.2.4 Espumas de estireno-acrilonitrilo (SAN) 59
4.3.2.5 Espumas de polimetacrilimida (PMI) 59
4.3.2.6 Espumas sintácticas 60
4.3.3 Nido de abeja 60
4.3.4 Fire Coremat ® 61

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

5 Introducción a los procesos de fabricación

5.1 Introducción 63
5.2 Clasificación de los procesos 63
5.3 Contenido de refuerzo 64
5.4 Coste de utillajes y equipos 65
5.5 Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) 65
5.6 Número de unidades que deben producirse 68

6 Técnicas de moldeo por contacto

6.1 Introducción a las técnicas 69
6.2 Laminado manual 69
6.2.1 Concepto fundamental 69
6.2.2 Herramientas 70
6.2.3 Materiales 71
6.2.4 Ambiente de trabajo 73
6.2.5 Ventajas 74
6.2.6 Desventajas 74
6.2.7 Conclusiones 75
6.3 Proyección simultánea 75
6.3.1 Concepto fundamental 75
6.3.2 Herramientas 76
6.3.3 Materiales 78
6.3.4 Ambiente de trabajo 79
6.3.5 Ventajas 79
6.3.6 Desventajas 80
6.3.7 Conclusiones 80
6.4 Moldeo con impregnadores 81
6.4.1 Concepto fundamental 81
6.4.2 Herramientas 82
6.4.3 Materiales 83
6.4.4 Ambiente de trabajo 84
6.4.5 Ventajas 84
6.4.6 Desventajas 84
6.4.7 Conclusiones 85

7 Técnicas de moldeo asistidas por vacío

7.1 Introducción a las técnicas 87
7.2 El vacío 87
7.2.1 Formas de obtención del vacío 88
7.3 Moldeo por vacío-laminado manual 90
7.3.1 Concepto fundamental 90
7.3.2 Desarrollo del método 91
7.3.2.1 Tejidos pelables 92
7.3.2.2 *Films* separadores y sangradores 92
7.3.2.3 Manta de absorción/aireación 93
7.3.2.4 *Films* de nylon para bolsa de vacío 93
7.3.2.5 Masillas de cierre 94
7.3.3 Materiales 94

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

7.3.4 Ambiente de trabajo 94
7.3.5 Ventajas 95
7.3.6 Desventajas 95
7.3.7 Conclusiones 96
7.4 Laminado de preimpregnados 96
7.4.1 Concepto fundamental 96
7.4.2 Materiales 97
7.4.3 Ambiente de trabajo 100
7.4.4 Ventajas 100
7.4.5 Desventajas 100
7.4.6 Conclusiones 101
7.5 Preimpregnados parciales 101
7.5.1 Concepto fundamental 102
7.5.2 Ventajas 102
7.5.3 Desventajas 103
7.5.4 Conclusiones 103

8 Técnicas de moldeo por vía líquida

8.1 Introducción a las técnicas 105
8.2 RTM 105
8.2.1 Concepto fundamental 105
8.2.2 Herramientas 106
8.2.3 Materiales 107
8.2.4 El proceso 108
8.2.5 VARTM 111
8.2.6 Ambiente de trabajo 112
8.2.7 Ventajas 112
8.2.8 Desventajas 112
8.2.9 Conclusiones 113
8.3 Técnicas de moldeo por infusión 113
8.3.1 Concepto fundamental 113
8.3.2 Herramientas 114
8.3.2.1 Moldes 114
8.3.2.2 Sistema de vacío y distribución de resina 115
8.3.3 Materiales 115
8.3.3.1 Resinas 115
8.3.3.2 Materiales de refuerzo 116
8.3.3.3 Materiales de núcleo 116
8.3.3.4 Materiales fungibles 116
8.3.4 Principios de distribución de la resina 117
8.3.5 Ventajas 119
8.3.6 Desventajas 120
8.3.7 Conclusiones 120

9 Autoclave

9.1 Introducción 121
9.2 Concepto fundamental 121
9.3 Herramientas 122

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

9.4 Materiales 123
9.5 El proceso 123
9.6 Ambiente de trabajo 124
9.7 Ventajas 125
9.8 Desventajas 125
9.9 Conclusiones 125

Bibliografía 127

Índice alfabético 131

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

1 Conceptos generales

Si analizamos la evolución de la humanidad basándonos en diferentes aspectos, ya sean éstos sociales, culturales ó técnicos, podremos observar que dicha evolución siempre ha estado condicionada por el descubrimiento de nuevos materiales.

Las edades de piedra, del cobre, del bronce, del hierro, constituyeron etapas en la historia de la humanidad en las cuales el hombre, a través del conocimiento y manejo de nuevos materiales y técnicas, supo desarrollar nuevas estructuras políticas y sociales.

Al contrario de lo que se pudiera pensar, el concepto de *material compuesto* es tan antiguo como la naturaleza misma. Un buen ejemplo de ello lo podemos observar en la madera, la cual combina fibras de celulosa de estructura tubular con una matriz de lignina.

Otro ejemplo de material compuesto confeccionado por el hombre en los inicios de la civilización lo constituyen las chozas de adobe y paja, moradas que sentaron las bases de las construcciones actuales.

El secreto de los materiales compuestos reside en la elección de un sistema de matriz adecuado y su asociación con fibras de refuerzo, obteniéndose como resultado un nuevo material con cualidades diferentes, que no son alcanzables por cada uno de los materiales predecesores de manera aislada.

El reto actual de los materiales compuestos, en cualquiera de sus variantes, consiste en dar con las mejores asociaciones de fibra-matriz, para proporcionar cada vez materiales con mejores prestaciones para el fin que son concebidos.

1.1 Definición de material compuesto

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de una unión (no química, insolubles entre sí) de dos o más componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores.

Podemos identificar dos fases: una continua, constituida por la *matriz*, y otra fase discontinua, denominada *refuerzo*. Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros. La identificación de los materiales y la de su interfase debe ser posible de distinguir por medios físicos.

Las propiedades del nuevo material dependen, entonces, del tipo de interfase y de las características de los componentes.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

1.2 Tipos de materiales compuestos

De las diferentes clasificaciones que podemos hacer de los materiales compuestos, quizás la más importante sea la que se refiere a su matriz, y en la cual podemos identificar tres grupos principales:

a) Materiales compuestos de matriz metálica
b) Materiales compuestos de matriz cerámica
c) Materiales compuestos de matriz polimérica

Los materiales compuestos de matriz metálica han sido desarrollados principalmente para componentes aeroespaciales y de motores de automoción. Poseen alta resistencia y muy bajo peso. Se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: reforzados con fibra continua, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas.

Así, encontramos como ejemplos de los materiales compuestos de matriz metálica las aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro, aleaciones de aluminio reforzados con partículas de alúmina y carburo de silicio, etc.

Los materiales compuestos de matriz cerámica son más recientes, y mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales, especialmente en rangos de bajas temperaturas.

También se clasifican de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: reforzados con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas.

Las principales 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 fibras discontinuas y partículas se utilizan como refuerzo agujas cerámicas de carburo de silicio.

En cuanto a los materiales compuestos de matriz polimérica, podemos definirlos como materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y que dadas sus particulares características, pueden ser moldeados con absoluta libertada 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 sintética o inorgánica.

Podemos destacar entre éstos los materiales compuestos termoestables, con sus principales grupos de matrices, las resinas poliéster, viniléster, *epoxi*, y fenólicas; y, como materiales de refuerzo, las fibras de vidrio, las aramídicas (*kevlar*) y las de carbono, tomando la forma de numerosos tipos de estructuras textiles simples o combinadas.

Por ser los materiales compuestos de matriz polimérica, y fundamentalmente los termoestables, los más utilizados en la construcción de embarcaciones, les dedicaremos este estudio.

1.3 El concepto de matriz-refuerzo

A diferencia de los materiales isotrópicos convencionales, los materiales compuestos presentan una serie de diferencias destacables.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

De la combinación de matriz-refuerzo, es este último el que le otorga las principales propiedades mecánicas al nuevo material. De hecho, las fibras de refuerzo ya constituyen por sí solas el elemento resistente del material. Sin embargo, aisladamente, su eficiencia no es la óptima. Es necesario entonces combinarlas con una matriz que las proteja de factores externos y con algún tipo de esfuerzo en particular.

La orientación de las fibras de refuerzo es sumamente importante. Si analizamos primero una probeta constituida por refuerzos unidireccionales y sometida a tracción en el sentido de las fibras de refuerzo (Fig. 1.1), podemos observar que la resistencia de la matriz a la tracción adquiere en el material compuesto valores más elevados que aisladamente. Sin embargo, la resistencia de las fibras de refuerzo se ve ligeramente disminuida.

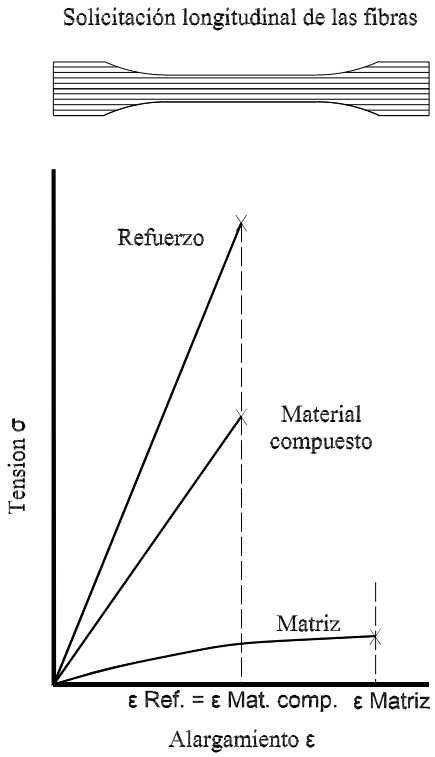


Fig. 1.1

En el caso que analizáramos otra probeta, constituida por la misma matriz y los mismos materiales de refuerzo, pero en la cual se hubiese cambiado el sentido de orientación de las fibras de refuerzos (Fig. 1.2), ahora trabajando transversalmente al esfuerzo original de tracción, veríamos claramente que los valores de resistencia del nuevo material son inferiores al de cada uno de sus componentes predecesores analizados aisladamente.

De esta diferencia de comportamiento mecánico tan destacable respecto de los materiales isotrópicos, podemos concluir que los materiales compuestos pueden mejorar las propiedades predecesoras de sus materiales constituyentes, siempre que se empleen de forma adecuada, es decir, conociendo de antemano los esfuerzos a los cuales estarán sometidos.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

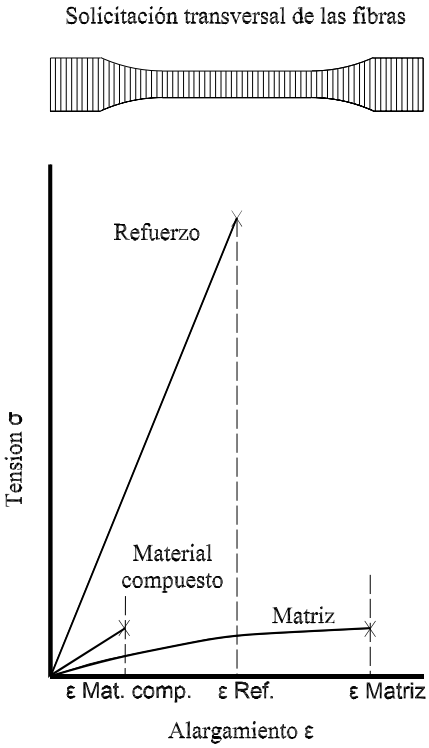


Fig. 1.2

En antagonismo a los materiales isotrópicos convencionales, como el acero o el aluminio, con los materiales compuestos se pueden diseñar las características que tendrá el nuevo material anisotrópico, dando lugar así a una auténtica "selección a la carta" de las características finales del mismo.

Esto se traduce en un cambio en la forma de plantear estructuras, una forma totalmente nueva que permite una mayor libertad de diseño de las mismas.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2 Matrices para materiales compuestos

Según hemos visto en el capítulo anterior, existen materiales compuestos de matrices metálicas, de matrices cerámicas y de matrices poliméricas.

De acuerdo con esta clasificación basada en las matrices, podemos encontrar en cada grupo numerosos materiales que puedan ser utilizados como elemento aglutinante.

Sin embargo, este estudio se dirigirá fundamentalmente al grupo de materiales compuestos de matriz polimérica, por ser el más ampliamente utilizado en la industria en general, y en la construcción naval en particular.

2.1 Los polímeros

La palabra *polímero* proviene etimológicamente del griego y significa “muchos miembros o partes”. Químicamente se define como un material constituido por grandes moléculas, las cuales se forman por la secuencia repetitiva de moléculas pequeñas o agrupaciones de átomos simples, enlazadas unas a otras por enlaces primarios (usualmente del tipo covalentes simples). Estas unidades estructurales sencillas (moléculas pequeñas) que dan origen a los polímeros reciben el nombre de *monómeros* (*mono*=uno; *meros*=parte).

2.2 Origen

Los precedentes de los monómeros se encuentran en el carbono, presente en diferentes materiales naturales, pero debido a su elevado coste de obtención y producción, sólo es rentable su extracción desde el petróleo, carbón y gas natural.

Es posible obtener diferentes polímeros partiendo del mismo monómero mediante procesos de síntesis, modificando los procesos de producción, o a través de mezclas entre las sustancias origen.

2.3 Procedimientos de síntesis de polímeros

El concepto *síntesis* proviene del griego y significa reunir. Químicamente se define como la formación de compuestos químicos a partir de sus elementos o de otras sustancias químicas sencillas. Esta reacción química de síntesis, por la cual se obtienen los polímeros, se denomina *polimerización*.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

El requerimiento básico para polimerizar una molécula es que cada molécula de monómero debe ser capaz de enlazarse a otras dos o más moléculas de monómero por reacciones químicas. Comienzan con moléculas pequeñas, que luego se van uniendo entre sí para formar moléculas gigantes. Existe una gran diversidad de sustancias de naturaleza orgánica que cumplen con este requisito, dando lugar a diferentes sistemas de clasificación de estas reacciones de polimerización:

a) Sistema adición-condensación (Carothers)

- *Polimerización por adición*: si la molécula entera de monómero pasa a formar parte del polímero; este tipo de polimerización no genera subproductos.

- *Polimerización por condensación*: si parte de la molécula de monómero se pierde cuando el monómero pasa a formar parte del polímero; este tipo de polimerización genera subproductos.

b) Sistema crecimiento de cadena-crecimiento en etapas

- *Polimerización por crecimiento de cadenas*: los monómeros pasan a formar parte del polímero de a uno por vez.

- *Polimerización por crecimiento en etapas*: en una reacción por crecimiento en etapas, las cadenas en crecimiento pueden reaccionar entre sí para formar cadenas aún más largas. Esto es aplicable a cadenas de todos los tamaños. Existen dos tipos de polimerización por etapas: policondensación y poliadiciones.

2.4 Clasificación de los polímeros

Así como la palabra *metal* designa diferentes tipos de materiales, la palabra *polímero* debe considerarse como un concepto amplio, en el que caben un buen número de materiales. Dentro de este numeroso grupo de materiales, podemos hacer diferentes clasificaciones, atendiendo siempre a diversos criterios.

Una primera clasificación podría establecerse según el origen del polímero, de la siguiente manera:

a) polímeros naturales
b) polímeros sintéticos

Como polímeros naturales podemos mencionar la lana, la seda, la celulosa, el caucho natural, etc.; como polímeros sintéticos, los plásticos, el caucho sintético, las pinturas y recubrimientos, los adhesivos, los pegamentos, los materiales textiles sintéticos, las resinas endurecibles, etc.

Sin embargo, la clasificación más aceptada se basa en el comportamiento térmico del polímero, es decir, en la termodependencia de sus propiedades (comportamiento y procesabilidad); así, tenemos:

a) termoplásticos
b) elastómeros
c) termoestables

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2.4.1 Termoplásticos

Los 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. Constituyen el grupo más importante y de mayor uso comercial de polímeros sintéticos.

Su arquitectura molecular o estructura puede ser lineal o ramificada, lo que le facilita fluir con aportación de calor.

Como ejemplos podríamos citar polietilenos, polipropilenos, policloruro de vinilo, poliamidas, policarbonatos, poliuretanos, etc.

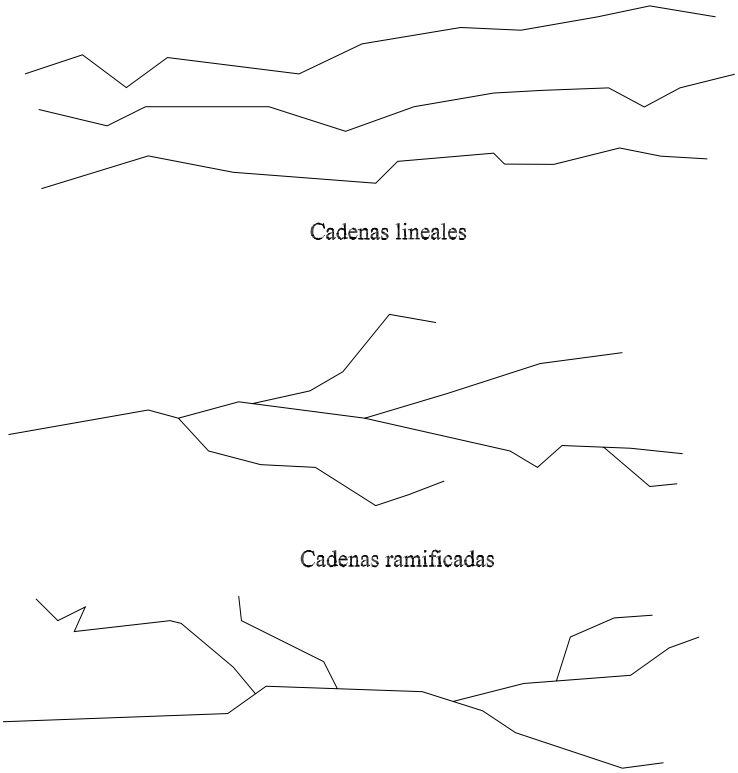


Fig. 2.1 Estructura molecular de termoplásticos

2.4.2 Elastómeros

Los elastómeros son polímeros que poseen cadenas con mucha libertad de movimiento molecular (flexibilidad). Presentan dobles enlaces a lo largo de la cadena, pero reticulados en menor extensión. Debido a ello presentan un estado gomoelástico a temperatura ambiente. Son infusibles e insolubles, pero hinchables.

Como ejemplos podemos citar el caucho natural y el sintético, el caucho nitrilo, el caucho estireno-butadieno, el polibutadieno, etc.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

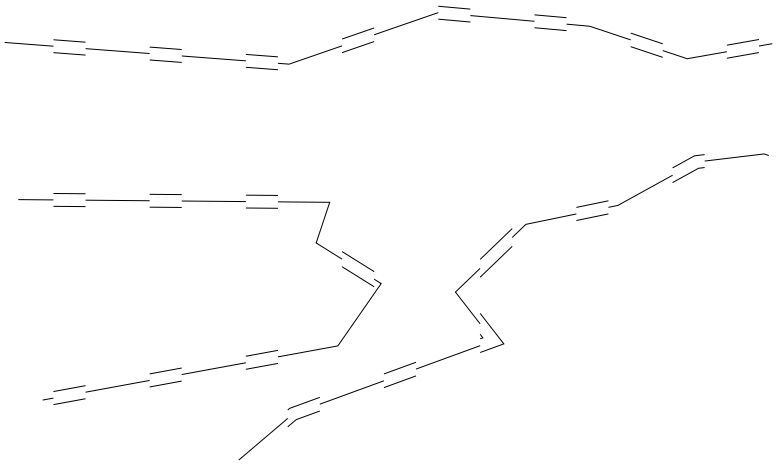


Fig. 2.2 Estructura molecular de elastómeros. Presentan dobles enlaces a lo largo de la cadena

2.4.3 Termoestables

Los termoestables son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remoldeados. Molecularmente hablando son polímeros entrecruzados. Tienden a ser resinas de mucha rigidez, y someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero (carbonización). A temperatura ambiente son duros y frágiles.

Como ejemplos de polímeros termoestables podemos citar las resinas poliéster, las resinas viniléster, las *epoxi*, las fenólicas, las resinas urea-formaldehído, etc.

Para mejorar las características mecánicas de las resinas termoestables, se las suele asociar con diferentes tipos de materiales de refuerzo, como por ejemplo la fibra de vidrio, dando lugar entones a un material compuesto. Este nuevo material poseerá unas características diferentes de las de sus materiales de origen.

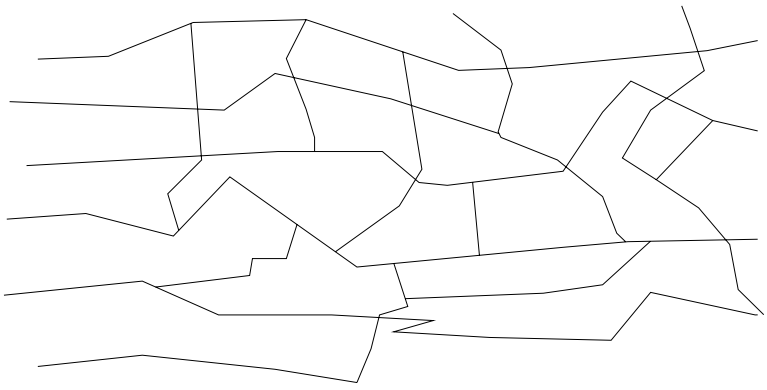


Fig. 2.3 Estructura molecular de termoestables. Cada intersecto representa un punto de entrecruzamiento entre cadenas poliméricas

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2.5 Particularidades de la industria naval

Arribados a este punto, creemos necesario definir el alcance de los materiales compuestos en la industria naval, para su mejor compresión. Por ello, luego de las diferentes clasificaciones llevadas a cabo respecto de los tipos de materiales compuestos, y de los diferentes materiales que pueden intervenir en su composición como matrices, podemos afirmar que los materiales compuestos de matriz polimérica, y en especial los de matrices termoestables, son los más utilizados con tales propósitos, argumentando a continuación algunas de las razones más importantes que derivan de este hecho.

El voluminoso tamaño que por lo general poseen las embarcaciones, hace impensable económicamente, al menos de momento, la utilización de otros materiales compuestos diferentes de aquellos en que intervengan las matrices termoestables.

Los materiales compuestos de matriz metálica se basan en la incorporación de refuerzos con fibras continuas, fibras discontinuas, y en la adición de partículas. La fabricación de estos compuestos se hace bien por la acción de presión y temperatura sobre las capas del refuerzo entre láminas del metal, de forma que las láminas se deforman en torno a las fibras y se enlazan unas y otras, o bien mediante complicados procesos metalúrgicos de polvos y procesos de infiltración por fusión. Los costes de tales procesos hacen difícil su aplicación en la construcción de embarcaciones, siendo su finalidad, casi exclusivamente, aeroespacial.

Los materiales compuestos de matriz cerámica tienen como objeto principal la de mejorar las características de los materiales cerámicos. Conocidas las propiedades de resistencia a las altas temperaturas de los materiales cerámicos, los compuestos cerámicos buscan solución a la fragilidad que tienen muchos de estos materiales a bajas temperaturas, evitando la fractura sin sacrificar la resistencia. Los tipos de refuerzo pueden ser a través de fibras continuas, fibras discontinuas y refuerzos con partículas. Los procesos de fabricación se basan en deposiciones químicas de vapor para la impregnación de los refuerzos, encapsulamiento de las fibras mediante un material vítreo-cerámico, o la compresión isostática en caliente. En todo caso, la complejidad de los procesos, así como la finalidad última de los materiales obtenidos, se alejan de la problemática presente en diseño y construcción de embarcaciones.

Por último, de los materiales compuestos de matriz polimérica, sólo tienen utilidad en el campo naval las matrices termoplásticas y las termoestables.

Los termoplásticos se utilizan únicamente en la construcción de piezas de tamaño reducido, debido a que su estructura molecular es lineal o ramificada; necesitan de calor y alta presión para moldearse, lo que eleva el coste de los moldes; la impregnación de las fibras de refuerzo se torna dificultosa dada la alta viscosidad de la matriz durante su elaboración, y éstas tienen tendencia a fluir a temperaturas medias.

En cambio, los materiales compuestos de matriz termoestable no necesitan de grandes inversiones en moldes ni controles de temperatura, ya que la mayoría de resinas se procesan a temperatura ambiente. Los procesos de fabricación requieren moldes sencillos, construidos por lo general con los mismos compuestos u otros más sencillos, como la madera, y las propiedades físicas y mecánicas finales son más que aceptables. El coste de la materia prima es razonable y la mano de obra, a pesar de ser numerosa y artesanal, no requiere de un alto grado de capacitación.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Por lo expuesto anteriormente, podemos concluir que los materiales compuestos utilizados en construcción naval quedan circunscriptos casi pura y exclusivamente a los poliméricos, y específicamente a aquellos que emplean matrices termoestables.

2.6 Funciones de la matriz polimérica en el material compuesto

Las matrices constituyen, junto con los elementos de refuerzo, los dos elementos básicos e indispensables del material compuesto. Entre las funciones principales que cumplen las matrices, podemos destacar las siguientes:

a) Transmiten los esfuerzos a las fibras de refuerzo a través de la interfaz (frontera entre fibra y matriz).
b) Protegen a las fibras de los esfuerzos de compresión.
c) Unen las diferentes fibras de refuerzo por medio de fuerzas adhesivas.
d) Aseguran a las fibras de refuerzo de acuerdo con el orden preestablecido.
e) Resguardan a las fibras de los ataques externos como humedad, ataque químico, etc.

2.7 Matrices termoestables

El estado inicial de los termoestables es un líquido viscoso, que por efecto de una reacción de 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, más resistencia térmica, mayor fragilidad y, en contrapartida, menor capacidad de absorción de energía, menor alargamiento a la rotura, y menor resistencia química. Es necesario entonces, alcanzar soluciones de compromiso entre ductilidad y resistencia térmica.

A temperatura ambiente estas moléculas altamente reticuladas son duras y rígidas, pero al mismo tiempo frágiles, y tienden a reblandecerse mucho menos que los termoplásticos por la acción del calor.

Entre las principales ventajas comunes a todos los termoestables podemos mencionar:

a) alta rigidez
b) bajo peso
c) alta estabilidad dimensional
d) alta estabilidad térmica
e) resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga
f) buenas propiedades como aislante térmico y eléctrico

2.7.1 Proceso de curado de las resinas

Se denomina *curado* al proceso por el cual la resina se transforma de un estado líquido a un estado sólido.

Para que este cambio de estados se produzca, es necesario adicionarle a la resina diferentes sustancias, como el catalizador y el acelerador (conocido también como activador). Desde el instante en el cual se

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

produce la mezcla de los mismos, podemos decir que el proceso de endurecimiento ha comenzado. En la primera parte de la figura 2.4 podemos observar que no existe un incremento notable de la temperatura de la mezcla, aunque la misma comienza a aumentar su viscosidad, hasta el punto en que se transforma en un gel que imposibilita seguir impregnando los refuerzos: este punto se conoce como *punto de gel*, y determina los límites del tiempo de trabajo de la resina. En general, es el punto que indican los fabricantes en sus especificaciones, para unas condiciones determinadas, dependiendo de algunas variables como el porcentaje de catalizador, la temperatura ambiente y el espesor del laminado.

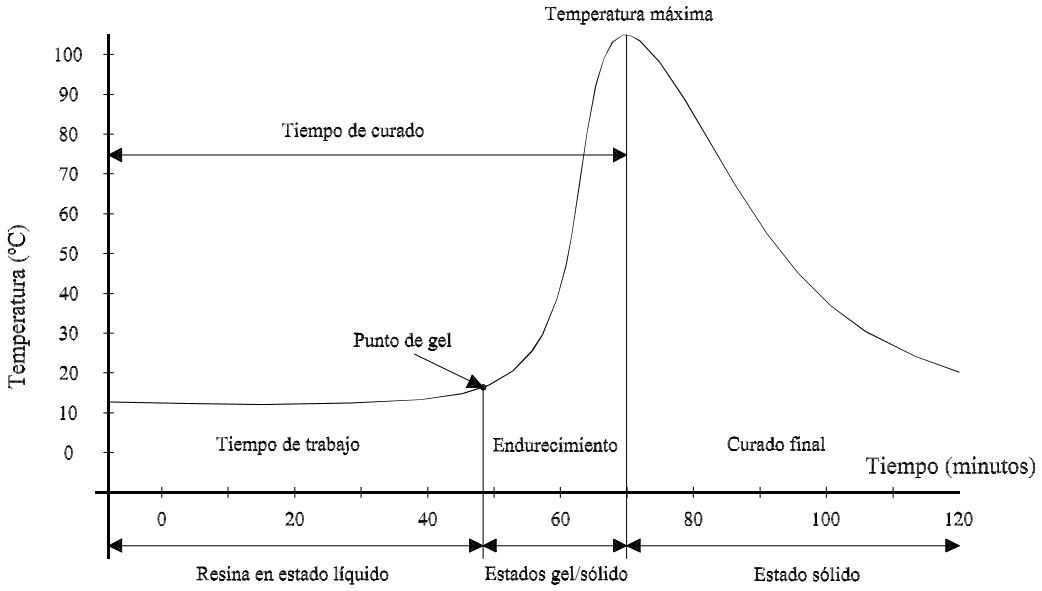


Fig. 2.4 Curva exotérmica característica de una resina

A partir del punto de gel, comienza la fase de endurecimiento de la resina; la reacción que se produce durante el entrecruzamiento de moléculas genera calor de forma exotérmica, razón por la cual se produce un acusado aumento de temperatura de la mezcla. El tiempo que dura esta etapa y la temperatura máxima que alcanza la mezcla están en función también del porcentaje de catalizador-activador, de la temperatura ambiente y, de una manera muy importante, del espesor del laminado. Como referencia, en las resinas de poliéster y viniléster, esta temperatura puede sobrepasar los 150º C.

Una vez alcanzada la temperatura máxima, ésta comienza a descender lentamente, hasta alcanzar nuevamente el laminado la temperatura ambiente. La reacción química aminora. Se conoce esta etapa como de *curado final*, y la resina presenta ya un estado completamente sólido. Este curado final puede acelerarse mediante la adición de temperatura al laminado una vez que haya superado el pico exotérmico, conociéndose el proceso como de *postcurado*. La duración e intensidad dependerá de las características técnicas de la resina.

No obstante, el curado también puede realizarse a temperatura ambiente, proceso que se conoce como *maduración del laminado*. El mismo tendrá mayor o menor brevedad dependiendo de las propiedades de la resina utilizada en el mismo, pero como valor de aproximación, una resina poliéster necesita de

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

al menos entre 24 y 48 horas a 20º C para alcanzar un grado de curado del 90%, hecho que permitiría extraer la pieza del molde. Es cuando la resina adquiere una buena parte de sus características mecánicas y químicas. Sin embargo, el curado total (100%) se producirá a lo largo de varias semanas o meses.

Siempre es conveniente laminar espesores reducidos para evitar elevados picos exotérmicos. La mala conductividad térmica de las resinas no ayuda a disipar este calor generado por la reacción química, y estos excesos de temperatura pueden perjudicar la pieza y los moldes. Si observamos la figura 2.5, podemos ver el diferente efecto que produce sobre una muestra de resina este cambio de espesores.

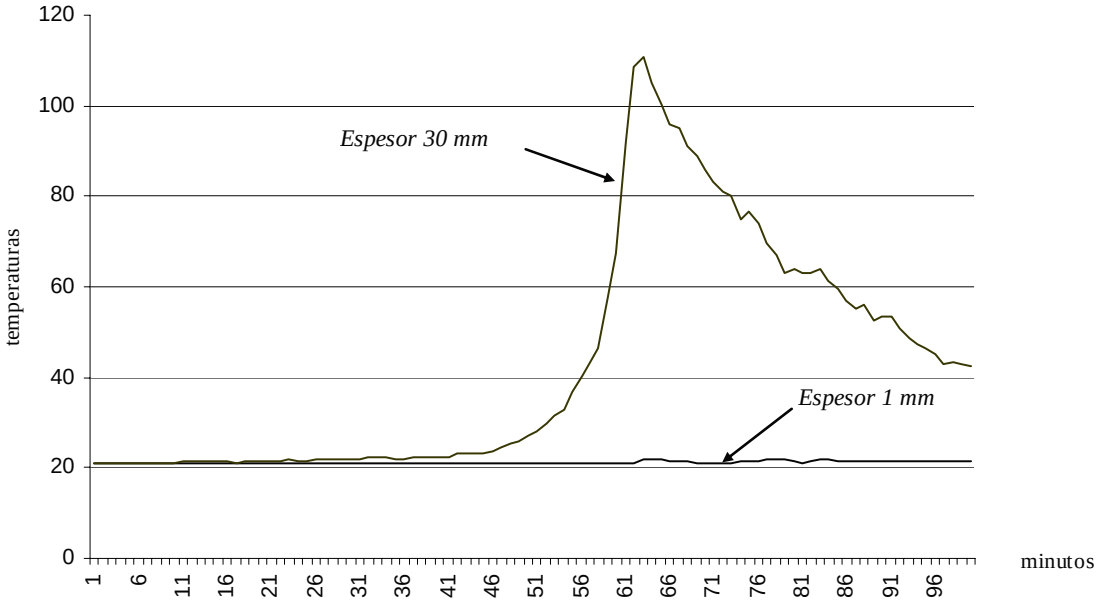


Fig. 2.5 Comparativa de curvas exotérmicas en función del espesor del laminado. Probeta de resina de poliéster catalizada al 2%

Esta es la razón fundamental por la cual los laminados son realizados en varias etapas; de esta manera, la superficie expuesta permite disipar el calor producido por la reacción exotérmica, evitando marcas, grietas y decoloraciones en la pieza.

Los factores que intervienen durante el curado son:

a) tipo de resina
b) temperatura del ambiente de trabajo (ideal 17-22º C)
c) naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador
d) espesor del laminado
e) procesos de curado o postcurado
f) humedad relativa ambiente
g) presencia o ausencia de cargas
h) luz solar

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2.7.2 Clasificación de resinas

a) Resinas de poliéster
b) Resinas de viniléster
c) Resinas *epoxi*
d) Resinas fenólicas
e) Resinas bismaleimida
f) Resinas poliimida
g) Esteres de cianato
h) Polieteramida

2.7.2.1 Resinas de poliéster

Son las resinas más utilizadas a escala mundial, ocupan un sitio destacado con más del 90% del volumen de consumo entre las matrices termoestables y, dadas sus características, son las más utilizadas en la construcción de embarcaciones en serie. Su coste es el más reducido entre todas las matrices termoestables.

1. Formulación

Las resinas de poliéster se producen a partir de reacciones de policondensación (Sec. 2.3) entre dos monómeros: ácido dicarboxílico (el más utilizado es el anhídrido maleico) y diol; de estos dos monómeros, uno al menos debe contener una insaturación. El polímero resultante se disuelve en un medio reactivo, para disminuir la viscosidad de la resina y facilitar la procesabilidad (impregnación). Este medio reactivo suele ser en general el estireno que, al contener un grupo insaturado susceptible de reaccionar con la insaturación de la resina poliéster, será el medio promotor de la estructura reticulada rígida una vez iniciada la reacción de endurecimiento. El porcentaje de estireno presente en el producto final oscila entre 40-45%.

Las resinas de poliéster son cuerpos inestables que tienen tendencia a polimerizar y gelificarse, por ello, para el suministro se estabilizan con inhibidores (hidroquinona).

2. Propiedades

Es casi imposible definir las propiedades genéricas de las resinas de poliéster, debido a la gran variedad existente y a que cada una es formulada para unos requerimientos específicos y con unos constituyentes particulares. En líneas generales 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.

3. Tipos de resinas de poliéster

Dependiendo del tipo de alcoholes y ácidos de los que se parta, se obtienen diferentes tipos de resinas de poliéster; según la naturaleza de sus monómeros constituyentes, se dividen en ortoftálicas, isoftálicas, bisfenólicas y otros tipos. Las más utilizadas son:

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Ortoftálicas: constituyen las más frecuentes y las de menor coste entre las resinas de poliéster. Son combinación de anhídrido maleico y anhídrido ftálico con glicoles. 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). Se sustituye el anhídrido ftálico por ácidos isoftálicos, aumentando de esta manera la resistencia al agua. La mayoría de *gelcoat*s de uso naval se formulan en base isoftálica.

Isoftálica NPG: se sustituye el propilen glicol por neopentil glicol, mejorando la resistencia química de la resina isoftálica.

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

4. Proceso de curado

El proceso en el cual la resina pasa de un estado líquido a un estado sólido se denomina curado. Este cambio de estado no se produce por si solo, o si se produce, se realiza con mucha dificultad (en procesos complejos de aplicación de calor o de exposición a la radiación).

Para facilitar la reacción de polimerización y el consecuente cambio de estado de la resina a temperatura ambiente, es necesario añadir a la misma en el momento de su utilización unas sustancias denominadas *iniciador* (o también catalizador) y *activador* (o acelerador), en los porcentajes indicados por el fabricante de la resina.

El catalizador produce radicales libres que provocan el inicio de la reacción, y está basado, por lo general, en peróxidos orgánicos, que se añaden a las resinas en formas de líquidos en porcentajes del peso de la misma, y que varían entre el 1 y el 3%.

Los peróxidos se seleccionan en función de la temperatura de curado de la resina y de la exotermia de la reacción y, asociados al acelerador, determinan los tiempos de trabajo (tiempo de gel) y endurecimiento del sistema.

El acelerador se selecciona en función del catalizador. En los procesos de curado a temperatura ambiente, el acelerador suele ser una pequeña cantidad de sales de cobalto orgánicas, que se adicionan a la resina en estado líquido previamente a la incorporación del catalizador.

Dado que los porcentajes de acelerador requeridos son mínimos (entre el 0,1 y el 0,3%), por lo general los adiciona el fabricante de la resina, y ésta pasa a denominarse resina *preacelerada*. La otra razón de este proceder es evitar accidentes ocasionados por la mezcla directa del catalizador y el acelerador. Si esto ocurre, tiene lugar una fuerte reacción exotérmica que se manifiesta normalmente en forma de explosión.

La tabla 2.1 expresa los sistemas catalíticos más frecuentes para resinas de poliéster curadas a temperatura ambiente.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Tabla 2.1 Sistemas catalíticos para resinas de poliéster

Catalizador	*Acelerador*	*Tiempo de gel*	*Tiempo de endurecimiento*
Peróxido de benzoilo	*Dimetil-Anilina*	*Largo*	*De medio a rápido*
Peróxido de benzoilo	*Dietil-Anilina*	*Largo*	*Largo*
Peróxido de benzoilo	*Dimetil-p.toluidina*	*Largo*	*Muy largo*
Peróxido de metiletilcetona	*Naftalato de cobalto*	*Corto*	*Lento*
Peróxido de acetilacetona	*Naftalato de cobalto*	*Medio*	*Rápido*
Peróxido de ciclohexanona	*Naftalato de cobalto*	*Medio*	*Progresivo*

De todos estos sistemas catalíticos, la combinación peróxido de metiletilcetona-cobalto es la más utilizada en construcción naval por permitir un buen curado en condiciones ambientales normales (sin necesidad de procesos de postcurado) y una fácil dosificación; como principal inconveniente presenta reducidos tiempos de gel.

Los porcentajes de catalizador son variables dentro de unos límites mínimo y máximo. Un índice por debajo del aconsejado (generalmente 1%) provoca una reacción incompleta, y aunque a simple vista la resina endurezca, no existen suficientes radicales libres para completar el curado, derivando en una resina que no alcanzará sus propiedades teóricas.

En el sentido contrario, si excedemos los porcentajes de catalizador en demasía, se producirá una masa de resina que tenderá a aumentar su propia temperatura y pico exotérmico, hecho que provoca la evaporación del monómero reactivo.

Los tiempos de curado de las resinas a temperatura ambiente se pueden controlar desde las siguientes variables, pero respetando siempre las especificaciones del fabricante:

a) cantidad de acelerador
b) cantidad de catalizador
c) temperatura del local de trabajo

La temperatura de trabajo ideal se sitúa entre 17º y 22º C, buenos resultados se obtienen también entre 15º y 25 º C, y nunca debe laminarse por debajo de 10º C o por encima de 30º C.

La presencia de inhibidores en las resinas obedece a las siguientes causas:

a) Conservan la resina; las resinas en estado líquido son inestables, y tienen tendencia a polimerizar o gelificarse si no cuentan con la presencia de algún tipo de inhibidor.
b) Controlan la reacción exotérmica limitando el aumento de temperatura.
c) Retardan la polimerización de la resina catalizada, brindando más tiempo de trabajo.
d) Regularizan la fabricación de la resina evitando que se complique la reacción de policondensación.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las resinas deben conservarse en su recipiente original, cerradas para evitar la evaporación, y en sitios oscuros, para evitar la acción de la luz y la temperatura.

Son resinas muy utilizadas en procesos de laminado de moldeo por contacto, con molde abierto, ya sea manual o de proyección simultánea, y en procesos de molde cerrado, como infusión, RTM, prensado, etc.

En la industria naval se emplea en la construcción de cascos, cubiertas, superestructuras, estructuras internas, mobiliario interior, pequeños componentes, etc.

2.7.2.2 Resinas de viniléster

Las resinas de viniléster fueron desarrolladas originariamente para la fabricación de materiales compuestos resistentes a los ataques de agente químicos. Esta buena resistencia es debida a los pocos grupos de éster que contiene su cadena comparado con otras resinas, siendo estos grupos los más susceptibles de ser atacados por dichos agentes. Podríamos definir las resinas viniléster como resinas intermedias entre las resinas *epoxi*es y las resinas poliéster. Heredan de las primeras sus buenas propiedades físico-químicas con ciclos de curado similares a las de poliéster, es decir, relativamente cortos.

Las resinas de viniléster son el resultado de una reacción de poliadición (Sec. 2.3) 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. Esta disolución ronda entre el 30-40% de monómero reactivo. Los monómeros de molécula simple presentes permiten un endurecimiento a través de una polimerización de radicales. Esto se lleva a cabo con los mismos peróxidos que se emplean con las resinas de poliéster.

Las resinas de viniléster poseen mejores propiedades mecánicas, químicas y térmicas que las de poliéster; poseen un alto grado de resiliencia, buena resistencia a la fatiga y la contracción durante el curado es bastante menor que la de las resinas de poliéster (1%). El hecho de que contengan menor porcentaje de disolvente las hace propicias para aquellos procesos que requieran una reducción sustancial de las concentraciones de estireno en el ambiente.

Las viscosidades son similares a las de 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 autoextinguibles (esta propiedad puede obtenerse por modificaciones).

Su precio es aproximadamente de 1,5 a 2 veces el precio de las resinas de poliéster, siendo esta su principal desventaja.

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

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2.7.2.3 Resinas de baja emisión de estireno

Uno de los problemas derivados de la utilización de resinas que contienen monómero de estireno como diluyente son las altas emisiones que se producen en el ambiente de trabajo, especialmente si los locales son de reducidas dimensiones.

Para reducir tales emanaciones, la industria y los fabricantes de resinas han desarrollado diferentes soluciones alternativas: a) disminuir o suplantar el monómero de estireno por otro menos volátil (solución por lo general bastante costosa); b) modificar los procesos de conformado del material compuesto (por ejemplo mediante métodos de molde cerrado como la infusión); c) adaptar las instalaciones a la normativa mediante costosos equipos de filtrado y purificación; o bien, d) utilizar resinas con aditivos que reduzcan las emisiones.

Las resinas de baja emisión de estireno LSE (*low styrene emission*) contienen un aditivo en pequeñas cantidades, que es generalmente cera o parafina. La parafina es poco soluble en la resina. Una vez realizado el laminado y cuando se ha evaporado cierta cantidad del monómero, la parafina se separa y crea una delgada película sobre el laminado, impidiendo que el estireno restante emane al ambiente.

Es importante destacar que la reducción de las emisiones ocurre sólo durante la fase estática del ciclo de curado, es decir, una vez que la resina se encuentra en estado sólido.

Como principal inconveniente, las resinas LSE presentan una baja adhesión interlaminar fruto de esa delgada película de parafina presente en la superficie. Para mejorar los laminado secundarios, es necesario mecanizar (lijar) la superficie antes de realizar el laminado siguiente. Esto deriva en que este tipo de resinas sean ideales de utilizar en piezas en las cuales se pueda realizar todo el laminado de una sola vez, evitando así tener que lijar las superficies entre laminados.

2.7.2.4 Resinas *epoxi*

Las resinas *epoxi* son las resinas más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad, fundamentalmente porque poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster y de viniléster. Si sumamos a esto a su buena capacidad de adhesión sobre una gran cantidad de materiales de refuerzo, se obtienen como resultado laminados con un elevado contenido de fibra.

Su formulación se basa en los epóxidos (generalmente bisfenol A) que curan por las reacciones de poliadición (Sec. 2.3) al reaccionar con agentes de curado (iniciadores) polifuncionales como fenoles, aminas o poliácidos. La reacción se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores. Las resinas *epoxi* son una compleja mezcla de resinas, agentes de curado, aceleradores, catalizadores, modificadores termoplásticos y otros aditivos.

Las características finales de la resina dependerán del tipo de epóxido y del agente de reticulación (resistencia térmica, modo de endurecimiento y ductilidad).

El proceso de curado es similar al de las resinas de poliéster y viniléster. La adición del endurecedor debe hacerse según las recomendaciones del fabricante, y los porcentajes del mismo, por lo general, suelen ser fijos (a diferencia de las resinas de poliéster y viniléster, en las cuales había un margen de acción). Una falta de endurecedor provocará una reacción incompleta, y una adición en exceso

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

provocará una reacción diferente, con la modificación del peso molecular de la resina, y por lo tanto, unas propiedades finales inferiores.

Para que la mayoría de las resinas *epoxi* curen completamente es necesario la aportación de calor externo, a través de un proceso de curado o postcurado. Si se desea obtener buenas propiedades a temperatura ambiente, deben utilizarse agentes catalíticos específicos a tal fin.

Poseen las mejores propiedades mecánicas, una mayor resistencia térmica y una buena resistencia a la abrasión; baja contracción durante el curado (0-1%), buenas propiedades eléctricas y térmicas, y buena resistencia al ataque de agentes químicos. Las propiedades mecánicas pueden modificarse por adición de sustancias inertes. Y la contracción puede anularse mediante aditivos o con una adecuada combinación con la fibra de refuerzo. También se pueden conseguir elongaciones superiores a las del poliéster mediante la utilización de aditivos. Poseen una baja absorción de agua, que las hace idóneas para estructuras marinas. Su principal inconveniente es su elevado coste.

La viscosidad de las resinas *epoxi* es muy elevada, hecho que dificulta su aplicación y procesado. Se pueden utilizar diluyentes, pero siempre siguiendo la recomendación del fabricante.

La variedad de resinas *epoxi* presentes en el mercado es muy amplia, y su elección se fundamenta en el tipo de propiedades finales deseadas, la técnica de procesado y el tipo de aplicación. Estas variedades se obtienen por diferentes combinaciones de los endurecedores (determinado por el fabricante y para cada resina en particular), derivando así en tiempos de gel y propiedades finales particulares.

Su utilización es frecuente en estructuras que requieran máxima resistencia con el mínimo de peso, como por ejemplo embarcaciones de regata, de alta velocidad, aplicaciones de defensa, etc. También se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, eléctricas, electrónicas, en herramientas, equipos químicos, depósitos y tanques de almacenamiento, adhesivos, tuberías, etc.

2.7.2.5 Resinas fenólicas

Las resinas fenólicas encuentran su principal campo de aplicación en los sectores que requieran un buen comportamiento frente al fuego y las altas temperaturas. De ahí que su uso sea preferente en interiores de medios de transporte colectivos como aviones o trenes. Fueron las primeras resinas utilizadas para la conformación de materiales compuestos.

Las resinas fenólicas son el resultado de una reacción de *condensación* (Sec. 2.3) entre un grupo fenólico (generalmente cresoles, p-fenilfenol y octilfenol) con formaldehído. La polimerización por condensación genera como producto residual agua, que debe ser suprimida para evitar fallos posteriores, durante la etapa de moldeo. Para curar las resinas fenólicas se requiere de calor y presión. Una vez curadas, se presentan como un producto duro, insoluble e infusible.

Mediante la adición de cargas y refuerzos, se obtienen resinas con propiedades específicas.

Existen fundamentalmente dos tipos de resinas fenólicas: las novalacas y las resoles; y se clasifican según la presentación como materia prima (polvos de moldeo, resinas líquidas, resinas en solución) o según la técnica de moldeo (moldeo a baja, media y alta presión).

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Entre sus principales propiedades podemos destacar la elevada resistencia a la temperatura, buena resistencia al fuego, resistencia a la abrasión, excelentes características eléctricas, buena resistencia a agentes químicos, estabilidad dimensional, buena adhesión a otras matrices termoestables y resistencia al choque.

La utilización de las resinas fenólicas se centra en aquellos apartados que, como mencionamos anteriormente, requieren un comportamiento facultativo frente al fuego y las altas temperaturas.

2.7.2.6 Otras resinas

Dentro de este último grupo hemos querido introducir todas aquellas resinas que se utilizan para la confección de materiales compuestos, pero no tienen casi utilidad en la industria naval:

Resinas bismaleimidas: excelente resistencia a altas temperaturas (entre 275º y 300º C). Dificultad de proceso. Aplicaciones en el campo de la defensa.

Resinas poliimidas: excelente resistencia a altas temperaturas (hasta 250º C). Elevada absorción de agua. Dificultad para procesar (moldeo a 300º C y postcurado a 400º C). Aplicaciones en el campo de la defensa.

Resinas esteres cianato: elevada resistencia, dureza y propiedades eléctricas; baja absorción de humedad, buena estabilidad dimensional. Principales aplicaciones en el campo de la defensa y eléctrico.

Resinas polieteramidas: competidoras de las resinas *epoxi*, bismaleimidas y poliimidas. Excelente resistencia a altas temperaturas. Principales aplicaciones en el campo de la defensa, eléctrico y de la automoción.

2.8 Cargas y aditivos

Las cargas y los aditivos son una serie de productos que pueden ser añadidos a las resinas con la finalidad de aportarles características particulares. Estas sustancias pueden proporcionar mejoras al proceso de moldeo o mejoras a la pieza acabada. Entre sus principales aportaciones podemos mencionar las siguientes:

a) Reducir los costes de la materia prima
b) Disminuir el peso de la pieza
c) Controlar la viscosidad de la resina durante el proceso de moldeo
d) Reducir la contracción de la matriz
e) Modificar las propiedades reológicas
f) Aumentar la rigidez
g) Mejorar el acabado superficial, dejando superficies más lisas

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

2.8.1 Cargas

Existen fundamentalmente dos tipos de cargas: a) reforzantes y b) no reforzantes.

Las cargas reforzantes, debido a su particular geometría, reparten regularmente los esfuerzos en la pieza moldeada, evitando que se produzcan concentraciones de tensiones, y pueden ayudar a la reducción del peso final de la pieza. Las más utilizadas son las microesferas de vidrio. Éstas, al no tener una influencia significativa sobre la viscosidad de la resina, se suelen utilizar en porcentajes elevados. Dentro de este grupo podemos distinguir las microesferas huecas y las microesferas macizas. Los diámetros oscilan, por lo general, entre 10 y 150 micras. La integración en el compuesto se puede mejorar si a las microesferas se les realiza un ensimaje previo.

Las cargas no reforzantes se añaden para conseguir una disminución del coste del material compuesto, sin sacrificar las propiedades finales de la pieza. Por lo general son de origen mineral, entre las cuales destacamos los carbonatos, los silicatos y los sílices. (Carbonato de calcio, silicato de magnesio hidratado y cristalina son los más utilizados de cada clase).

También existen otras cargas no reforzantes que persiguen características particulares, como las cargas ignífugas y las cargas conductoras de calor o electricidad.

La incorporación de cargas debe hacerse de manera razonada y siguiendo las recomendaciones del fabricante de la resina, porque en general disminuyen sus propiedades físicas y mecánicas.

Con su incorporación en la matriz se aprecia una reducción de la resistencia a la tracción y a la flexión. En contrapartida, se produce un aumento de la densidad y viscosidad de la resina, y un aumento en la dureza, el módulo de elasticidad y en la estabilidad dimensional del laminado.

2.8.2 Aditivos

Los aditivos son una serie de productos que se añaden a las resinas para aumentar o mejorar sus cualidades, pero en porcentajes más bajos que las cargas. Son aditivos:

Los sistemas catalíticos: productos necesarios para curar las resinas. Comprenden el inhibidor, el endurecedor, los estabilizantes térmicos y los antioxidantes.

Los lubrificantes: pueden ser internos o externos. Los lubrificantes internos modifican las fuerzas de cohesión intermolecular de la resina, provocando una disminución de la viscosidad y ayudando a la procesabilidad de la misma. Los lubrificantes externos afloran a la superficie de la resina durante el proceso de moldeo y disminuyen la tendencia natural de éstas a adherirse al molde. A estos últimos se los conoce también con el nombre de *agentes de desmoldeo*.

Los agentes tixotrópicos: se utilizan para evitar que las resinas se escurran en zonas verticales o con cierto grado de inclinación. El más utilizado es el polvo de sílice.

Los colorantes: son sustancias solubles en disolventes orgánicos o agua. Poseen una baja resistencia química y térmica, por lo que se utilizan esporádicamente.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las pastas colorantes: son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso que se incorporan a las resinas a efectos de coloración. Se emplean porcentajes del 2% para colorear masas y entre 10 y 20% para colorear *gelcoat*s.

Los pigmentos: son sustancias sólidas de origen mineral u orgánico que se utilizan como colorante.

Los agentes antiultravioleta: son aditivos que se utilizan para proteger al material compuesto de los efectos de la radiación ultravioleta.

Los agentes antirretracción: se emplean en procesos de moldeo en caliente, y persiguen mejorar el aspecto de la superficie del material compuesto.

Las parafinas: se añaden a las resinas o *gelcoat*s que se utilizan en la última etapa del laminado, para favorecer su curado. Dosificación entre 2 y 3%.

2.9 Recubrimientos

2.9.1 El *gelcoat*

El *gelcoat* o gel de recubrimiento es la primera capa de resina que protege al laminado del ataque químico y medioambiental. Es la primera capa que se aplica sobre el molde y, una vez la pieza es extraída, constituye la superficie que estará en contacto con el exterior, actuando como barrera de desgaste de la misma.

La duración de la pieza estará íntimamente ligada a la calidad de esta barrera que es el *gelcoat*. El *gelcoat* oculta y protege las fibras de refuerzo del ataque de la humedad y del medio exterior, proporcionando una superficie más atractiva. También proporciona las propiedades estéticas de la pieza como color y brillo (puede ser de color o transparente), proporciona resistencia al calor, y brinda resistencia a la abrasión. Todo ello, con una total ausencia de porosidad superficial.

Los *gelcoat*s son formulados a partir de resinas a las cuales se les añaden pigmentos y aditivos en suspensión. Se diferencian por colores, por sistema de curado y por viscosidad.

Clasificación de *gelcoat*s de acuerdo con su finalidad:

1. *Gelcoats para moldes*: poseen baja contracción y elevada flexibilidad. Son resistentes a la abrasión y al rayado superficial en proporción mayor que los *gelcoat*s utilizados para piezas.

2. *Gelcoats industriales*: son los más utilizados, poseen buenas propiedades mecánicas pero no son adecuados en aplicaciones que requieran protección química o medioambiental. Amplia variedad de colores.

3. *Gelcoats para usos alimenticios*: son aquellos *gelcoat*s aptos para permanecer en contacto con alimentos líquidos sin perjuicio alguno. No todos los pigmentos que se utilizan en los *gelcoat*s estándares cumplen con estos requisitos.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

4. *Gelcoats resistentes a la abrasión*: para la fabricación de superficies expuestas a un elevado tránsito. Incorporan cargas inorgánicas de elevada dureza.

5. *Gelcoats isoftálicos*: se formulan a partir de resinas isoftálicas, resultando *gelcoat*s muy resistentes al medio ambiente, humedad y agua marina; excelente flexibilidad y buen brillo. Son los adecuados para aplicaciones navales.

6. *Gelcoats metalizados*: son *gelcoat*s incoloros a los cuales se les adicionan pigmentos metalizados de grano fino.

7. *Gelcoats sanitarios*: son *gelcoat*s con elevada resistencia al agua caliente.

8. *Gelcoats resistentes al fuego*: son *gelcoat*s a los cuales se les adicionan cargas ignífugas a base de compuestos orgánicos que liberan agua de su molécula al arder.

9. *Gelcoats específicos*: son todos los *gelcoat*s que cumplen propiedades específicas, como resistencia química, *gelcoat*s ignífugos, *gelcoat*s de . serigrafía, *gelcoat*s de prensa, etc.

Clasificación de los *gelcoat*s de acuerdo a su método de aplicación:

a) Gelcoats de brocha y rodillo: poseen viscosidades entre 7.500 y 12.000 cPs; índice tixotrópico entre 3,5 y 4,5; buen poder cubriente.

b) Gelcoats de proyección: poseen baja viscosidad, entre 3.000 y 3.500 cPs., obtenida por medio de un diluyente como monómero de estireno o acetona, lo que permite su aplicación con pistola de proyección o equipo de presión. Índice tixotrópico entre 3,5 y 4,5.

Los espesores de aplicación recomendados para los *gelcoat*s oscilan entre 0,25 y 0,4 mm para piezas, y entre 0,4 y 0,6 mm para moldes. Espesores menores no aseguran la protección y ocultamiento de las fibras, y espesores mayores pueden agrietarse cuando el laminado sea sometido a esfuerzos, fruto de la fragilidad de la película de *gelcoat*.

2.9.2 El *topcoat*

Cuando concluimos un laminado, la capa última de resina no tendrá un curado completo por encontrarse su superficie de interfase en contacto con la humedad presente en el aire. Dicha humedad actúa como un inhibidor. Para evitar este hecho, se debe aplicar sobre esta última capa algún recubrimiento que la preserve de la influencia de la humedad y le asegure un curado al completo.

El *topcoat* o último revestimiento es un producto similar al *gelcoat*, pero a diferencia de éste, 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.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los *topcoat*s actúan también como compensadores del laminado, equilibrando en la cara rugosa la presencia del *gelcoat* en la cara buena. Sirven para presentar una superficie más decorativa, y protegen a las fibras del laminado del ataque de agentes externos.

En cuanto a su composición química, son resinas de base poliéster o viniléster a las cuales se les añaden pigmentos y aditivos en suspensión. Se presentan comercialmente en una amplia variedad de colores.

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

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3 Materiales de refuerzo

3.1 Introducción

La combinación de una matriz polimérica con fibras de refuerzo da lugar a un nuevo material estructural denominado *material compuesto*. De los componentes presentes en el mismo, las fibras son las que aportan la resistencia y el buen comportamiento mecánico, traducidas en resistencia y rigidez.

Las fibras de refuerzo más utilizadas en la construcción naval son las fibras de vidrio, las fibras aramídicas (de *kevlar*) y las de carbono, ofrecidas en forma de diferentes ordenamientos planos como fieltros, sistemas mallados y sistemas no mallados.

Por ser una componente tan importante en la constitución del nuevo material, haremos un estudio detallado de los diversos tipos de materiales de refuerzo, así como de sus principales formas de presentación.

La división principal entre las fibras se establece de acuerdo con el origen de las mismas, pudiendo ser inorgánicas ó sintéticas.

3.2. Fibras inorgánicas

3.2.1 Fibra de vidrio

3.2.1.1 Introducción

La fibra de vidrio era ya conocida por los egipcios, que la utilizaban para reforzar vasos y ánforas construidas de cerámica. Sin embargo, es recién a mediados de los años treinta, en los Estados Unidos, cuando se comienza a utilizar de forma experimental como material de refuerzo de matrices poliméricas. La utilización masiva en la construcción naval se produce a finales de los años cincuenta, cuando se produce una reducción de los costes de la materia prima y se desarrollan nuevos procesos de fabricación. De todas las fibras de refuerzo, son las fibras de vidrio las de mayor utilización en la construcción de embarcaciones.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3.2.1.2 Composición química

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

La elevada resistencia que poseen las fibras de vidrio es producida por los enlaces covalentes entre el silicio y los radicales de oxígeno. Los átomos integran una retícula tridimensional con estructura amorfa; es debido a esta razón que posean características isotrópicas.

3.2.1.3 Procesos de obtención

Las fibras de vidrio se obtienen por dos procesos diferentes: a) a partir de bolas; o b) por fusión directa.

En el primer caso se introduce la materia prima (se utiliza arena, caolín o dolomita) en un horno, y luego de someterla a varios procesos se obtienen como resultado unas bolas con un diámetro aproximado de 20 mm. Estas bolas resultantes son nuevamente introducidas en otro horno para posteriormente hilarlas. De cómo se realiza este hilado podemos diferenciar dos tipos de fibras:

a) *Silionne*: se obtienen por estirado mecánico, y da lugar a fibras continuas.
b) *Verranne*: se obtienen por estirado por fluido, y da lugar a fibras discontinuas.

Las fibras continuas (*silionne*) poseen mejores propiedades mecánicas que las discontinuas (*verranne*).

En el segundo caso, cuando se obtiene por el procedimiento de fusión directa o hilado bajo fusión, el vidrio fundido pasa por unos agujeros perfectamente dimensionados, distribuidos sobre una superficie de platino. Las fibras se obtienen estirando monofilamentos de vidrio muy delgados.

El comportamiento del vidrio en monofilamentos delgados es muy diferente que el comportamiento del vidrio en masa: se torna flexible a medida que disminuimos su diámetro.

Para mejorar la formación de los hilos, su estirado, su enrollado y su posterior tejido, se procede a aplicar sobre las fibras una película química que facilita estas operaciones. Este proceso se conoce como *ensimaje*, y se realiza una vez los hilos se han enfriado.

Este agente de acoplamiento, generalmente del tipo silano, debe ser compatible con la matriz que se utilizará, ya que permite la adherencia de la resina al hilo, protege los filamentos durante la confección de estructuras textiles diversas (en la manipulación) y aglutina los monofilamentos constituyendo un hilo de base. Por lo general se disuelve el producto químico en agua y se aplica por pulverización.

Para que la fibra pueda ser utilizada, debe dársele una serie de formas que faciliten dicha tarea. Así, los cordones pueden dar lugar a hilos de fibra de vidrio (para estructuras textiles complejas) o a mechas (conjunto de haces de filamentos continuos, para fieltros continuos o discontinuos). Las características mecánicas de cada una de estas configuraciones vendrán gobernadas por la geometría final de la estructura textil. Una vez confeccionados los cordones, se deben secar para extraer el exceso de agua utilizada como disolvente durante el ensimaje.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3.2.1.4 Tipos de fibra de vidrio

A (alcalino): posee buena resistencia al ataque de soluciones químicas y ácidas, producto de los elevados porcentajes de alcálisis que contiene. Sin embargo, esos elevados porcentajes repercuten negativamente en su resistencia al agua. Ha sido suplantado por el vidrio E.

B (boro): excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad.

C (chemical): es un tipo de fibra con una elevada resistencia química. Se utiliza en estructuras que se ven sometidas a atmósferas muy agresivas. Propiedades mecánicas entre vidrio A y E. Aplicaciones en sectores químicos, alimenticios, etc.

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

E (eléctrico): desarrollado principalmente para aplicaciones eléctricas, es el tipo de fibra de vidrio de coste más reducido. También se emplea en otras aplicaciones como en la construcción de barcos, y es la más utilizada en la fabricación de fibras continuas. Es básicamente un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con un contenido muy bajo o nulo de potasio y sodio. Posee una buena resistencia a la humedad.

R o S (resistance-francés- y strength-inglés-): es el tipo de fibra de mayor resistencia. Su principal terreno de aplicación se encuentra en los campos militar y aeroespacial. Relación resistencia/peso superior al vidrio E. Ofrece mayor resistencia a la tracción y a la fatiga.

3.2.1.5 Propiedades

Entre las principales características de las fibras de vidrio podemos destacar:

a) Excelente resistencia mecánica específica (resistencia a la tracción/densidad)
b) Resistencia a la humedad (debe sin embargo evitarse la humedad antes de la laminación porque perjudica la unión con la resina)
c) Resistencia al ataque de agentes químicos
d) Buenas propiedades como aislante eléctrico
e) Débil conductividad térmica
f) Buena estabilidad dimensional
g) Bajo alargamiento
h) Propiedades isótropas (al contrario que las fibras de carbono y *kevlar*)
i) Excelente adherencia a la matriz (utilizando recubrimientos apropiados para cada tipo de resina)
j) Incombustibilidad
k) Imputrescibilidad

La tabla 3.1 exhibe valores teóricos de propiedades mecánicas de las fibras más usuales. Dichos valores corresponden a fibras recién confeccionadas. Sin embargo, tales propiedades pueden verse sustancialmente disminuidas producto de los procesos de transformación a los cuales son sometidas durante la fabricación de las diferentes estructuras textiles.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Tabla 3.1 Principales propiedades de la fibra de vidrio

Tipo	*Vidrio E*	*Vidrio R/S*	*Vidrio C*
Resistencia a la tracción (GPa)	*3,4 – 3,5*	*3,4 – 4,6*	*3,1*
Módulo elástico (GPa)	*72 -73*	*85 - 87*	*71*
Densidad (Kg/m^3)	*2600*	*2500 - 2530*	*2450*
Alargamiento a la rotura (%)	*3,3 – 4,8*	*4,2 – 5,4*	*3,5*
*Resistencia específica (GPa * cm^3/g)*	*1,3 – 1,35*	*1,7 – 1,85*	*1,3*
*Módulo E específico (GPa * cm^3/g)*	*27,7 – 28,2*	*34 – 34,9*	*29*
Chef. Transmisión térmica (10^{-6}/ºK)	*5*	*4 – 5,1*	*7,2*
Diámetro del filamento (µm)	*8 -20*	*10*	*20*

3.2.2 Fibra de carbono

3.2.2.1 Introducción

Aunque filamentos de carbono habían sido obtenidos ya en el siglo XIX, las fibras de carbono se desarrollaron de forma definitiva en Gran Bretaña en la década del sesenta, principalmente para las industrias aeronáutica y aeroespacial. Combinadas con matrices *epoxi*es, resultan materiales compuestos que se caracterizan por poseer una elevada resistencia y un elevado módulo de elasticidad, siendo, sin embargo, un material sumamente ligero.

3.2.2.2 Composición química

Existe diversidad de materiales que pueden ser utilizados como precursores de las fibras de carbono, como el poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y la celulosa. El más utilizado en la actualidad es el poliacrilonitrilo. Este material no es poliacrilonitrilo al 100%, sino un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico o cloruro de vinilo.

3.2.2.3 Proceso de obtención

Como hemos mencionado anteriormente, el material más utilizado como materia prima para la obtención de fibras de carbono es la fibra de poliacrilonitrilo (PAN). La fibra de carbono derivada de los hidrocarburos o de la hulla tiene un coste más moderado que las obtenidas del PAN.

En todos los procesos de obtención de la fibra de carbono se produce una oxidación controlada y carbonización (proceso de pirólisis controlada en varias fases) de las fibras precursoras a elevadas temperaturas. En función de la temperatura final alcanzada durante el proceso (desde 1.200º C hasta 3.000º C), se obtienen fibras de mayor resistencia y módulo elástico más elevado.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las fases del proceso para la obtención de una fibra de carbono procedente de fibras de poliacrilonitrilo son las siguientes:

Estabilización y oxidación: las fibras son estiradas para alinear sus redes internamente; luego se produce un calentamiento en atmósfera oxidante desde temperaturas de 200º hasta 250º C, manteniendo la tensión sobre las fibras.

Carbonización: calentamiento en atmósfera inerte a temperaturas de hasta 1.500º C. Se eliminan fundamentalmente el H y N de la fibra original, transformándose en fibras de carbono.

Grafitación: calentamiento en una atmósfera no oxidante hasta 2.500º - 3.000º C, para obtener un módulo de elasticidad mayor, a expensas de una alta resistencia a la tracción.

Los productos primarios resultantes del proceso anterior son fibras de filamentos continuos con un contenido de carbono de entre el 92 y el 100%, según sean las propiedades que se persigan. Todos los demás productos, por ejemplo fibras de filamentos discontinuos, se obtienen de operaciones secundarias.

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

3.2.2.4 Tipos de fibra de carbono

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

Fibras de alta tenacidad (HT): su resistencia y tenacidad es superior a las de las fibras de vidrio, pero inferior del resto de las fibras de carbono. Su coste es moderado, y son adecuadas en un campo de aplicación muy amplio.

Fibras de alto módulo (HM): derivadas de las demandas de alta rigidez de piezas aeroespaciales y aeronáuticas, estas fibras presentan un módulo de elasticidad muy alto. Coste elevado, bajo alargamiento a la rotura y, debido a las diferencias de potencial en contacto con los metales, pueden provocar corrosión del tipo galvánico.

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

3.2.2.5 Propiedades mecánicas

Las mejores propiedades mecánicas de las fibras de carbono se obtienen de asociarlas con matrices del tipo *epoxi*. Una característica interesante de las mismas es su coeficiente de expansión térmica negativo en la dirección de las fibras y positivo en el sentido transversal. Mediante una adecuada combinación de matrices y refuerzos, es posible obtener un material resultante que no sufra deformaciones térmicas en un amplio rango de temperaturas (material con elevada estabilidad dimensional).

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Además de ésta particular característica, podemos destacar otras importantes propiedades:

a) Elevada resistencia y rigidez
b) Alta resistencia a la vibración
c) Buen comportamiento a la fatiga
d) Buena conductividad térmica
e) Buena conductividad eléctrica
f) Bajo coeficiente de dilatación térmica
g) Resistencia a altas temperaturas
h) Elevada resistencia química a ácidos, disolventes y alcálisis
i) No se ven afectadas por el contacto con agua de mar

Como desventaja principal podemos mencionar su elevado coste, por lo que se suelen combinar con otros materiales de refuerzo más económicos.

Tabla 3.2 Principales propiedades de las fibras de carbono

Tipo	*Carbono HT*	*Carbono HM*	*Carbono IM*
Resistencia a la tracción (GPa)	*2,6 – 5*	*2,0 – 3,2*	*3,4 – 5,9*
Módulo elástico (GPa)	*228 - 238*	*350 - 490*	*280 - 400*
Densidad (Kg/m^3)	*1740 - 1830*	*1790 - 1910*	*1730 - 1800*
Alargamiento a la rotura (%)	*1,2 – 2*	*0,4 – 0,8*	*1,1 – 1,9*
*Resistencia específica (GPa * cm^3/g)*	*1,5 - 2*	*1,1 – 1,7*	*2,0 – 3,1*
*Módulo E específico (GPa * cm^3/g)*	*127 - 134*	*190 - 260*	*160 - 200*
Chef. Transmisión térmica (10^{-6}/ºK)	*-0,1 a -0,7*	*-0,5 a -1,3*	*--*
Diámetro del filamento (µm)	*7 - 8*	*6,5 - 8*	*5 - 7*

3.3. Fibras sintéticas

3.3.1 Fibras aramídicas

3.3.1.1 Introducción

Se considera el k*evlar*, nombre comercial otorgado a las fibras aramídicas descubiertas por Du Pont en el año 1965 y comercializadas desde principios de los años setenta, como la fibra sintética más importante luego del nylon. Su uso se concentra en los campos en los que se requiere alta resistencia a la tracción con bajo peso y elevada resistencia al impacto del material. Se encuentra ampliamente difundido en la industria aeronáutica, espacial, balística, y en menor medida en la industria naval para la fabricación de cascos de embarcaciones.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3.3.1.2 Composición química

Las fibras de aramida se clasifican químicamente como una poliamida aromática. Están constituidas por grupos amida y anillos aromáticos, que le confieren una elevada estabilidad térmica. La unidad que se repite es la poliamida aromática. Los enlaces por puentes de hidrógeno mantienen unidas a las cadenas en dirección transversal. Actuando en conjunto, las fibras de aramida tienen alta resistencia en la dirección longitudinal y baja en la dirección transversal. La existencia de los anillos aromáticos en su estructura molecular le confiere una alta rigidez a las cadenas poliméricas.

3.3.1.3 Proceso de obtención

Las fibras de aramida se obtienen a partir de una solución de amida aromática disuelta en ácido sulfúrico, que se estira y luego se hila. Las cadenas moleculares se orientan en la dirección de las fibras durante el estirado.

3.3.1.4 Tipos de fibras aramídicas

Existen dos tipos comerciales de *kevlar*:

Kevlar 29: alta resistencia y baja densidad. 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.

3.3.1.5 Propiedades

Entre las principales características de las fibras aramídicas podemos destacar:

a) Alta resistencia específica a la tracción, comparada con el resto de materiales conocidos
b) Excelente resistencia al impacto. Alta capacidad de absorción de energía
c) Densidad menor que todas las fibras sintéticas utilizadas en laminados
d) Excelente comportamiento ante la corrosión en cualquier ambiente (sólo atacada por ácidos muy fuertes)
e) Buena resistencia a la fatiga
f) Buenas características de amortiguamiento de las vibraciones
g) Buenas características dieléctricas
h) Resistencia a las llamas y autoextinguible
i) Elevada resistencia térmica. Temperatura de descomposición superior a 420º C
j) Coeficiente de dilatación negativo
k) Su rotura se produce progresivamente

Como aspectos negativos podemos señalar fundamentalmente su reducida resistencia a la compresión y su sensibilidad a la humedad. Su coste es considerable, hecho éste que restringe su utilización.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los rayos UV afectan las capas exteriores de fibras de *kevlar*, aunque la degradación no suele tener carácter progresivo. Su impregnación de resina puede presentar dificultades debido a que no se produce la decoloración típica de las fibras de vidrio al ser impregnadas.

Dado su elevado coste, se suele combinar con refuerzos de carbono o vidrio, en función de las características perseguidas. Por ejemplo, un laminado carbono-*kevlar* combina las buenas propiedades resistentes del primero con las buenas propiedades de resistencia al impacto del segundo.

Cuando se laminan con resinas de viniléster, se produce un aumento en la elongación del laminado, conjuntamente con un aumento de resistencia a la tracción en comparación con los laminados vidrio-poliésteres tradicionales.

*Tabla 3.3 Principales propiedades de las fibras aramídicas**

Tipo	*Normal (kevlar®29)*	*HM (kevlar®49)*
Resistencia a la tracción (GPa)	*2,8 – 3,0*	*2,8 – 3,4*
Módulo elástico (GPa)	*58 - 80*	*120 - 186*
Densidad (Kg/m^3)	*1390 - 1440*	*1450 - 1470*
Alargamiento a la rotura (%)	*3,3 – 4,4*	*1,9 – 2,4*
*Resistencia específica (GPa * cm^3/g)*	*1,9 – 2,2*	*1,9 – 2,3*
*Módulo E específico (GPa * cm^3/g)*	*40 - 56*	*83 - 127*
Chef. Transmisión térmica (10^{-6}/ºK)	*-2,0 a -6,0*	*-2,0 a -6,0*
Diámetro del filamento (µm)	*12*	*12*

**Valores aproximados*

3.4. Las estructura textiles

3.4.1 Introducción

Las características finales del material compuesto dependerán, en gran medida, de la cantidad de material de refuerzo que contenga el mismo en su composición global y de su posicionamiento de acuerdo con criterios preestablecidos de carga.

Para facilitar el procesado de las fibras (impregnación, disposición geométrica y uniformidad de espesores), éstas se configuran en ordenamiento planos, que denominaremos estructuras textiles. Estas estructuras textiles se consideran como materiales intermedios y se presentan bajo diversas configuraciones:

a) Fieltros
b) Sistemas no mallados (tejidos, ensamblados, trenzados)
c) Sistemas mallados (mallas, encadenados)

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

3.4.2 Fieltros

Los fieltros son estructuras textiles de fibras de refuerzo que no poseen una orientación preferente, con una distribución intercalada y aleatoria. Para mantenerlas unidas antes de impregnarlas, se les aplica algún tipo de ligante, que por lo general, se determina en función del tipo de matriz que se utilizará posteriormente (*epoxi*, poliéster-viniléster, etc.).

Los fieltros pueden ser de fibras continuas, hilvanados o de fibras cortadas, por lo general entre 40 y 50 mm (Fig. 3.1 y Fig. 3.2). Para la confección de fieltros de fibra de vidrio se utilizan, por lo general, hilos de silionne.

Se consideran estructuras textiles bidimensionalmente isotrópicas, con resistencias y rigideces no demasiado elevadas. Para laminados en diferentes fases, se utilizan para mejorar la adherencia interlaminar entre capas de laminado sucesivas.

A la mayoría de fieltros se los denomina comercialmente *mats*.

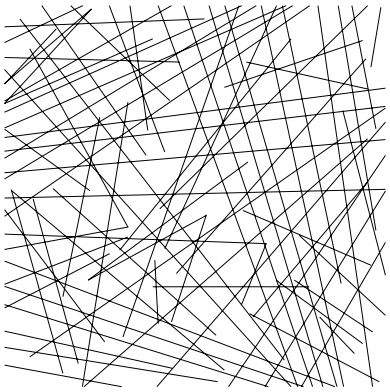


Fig. 3.1 Fieltro de fibras cortadas

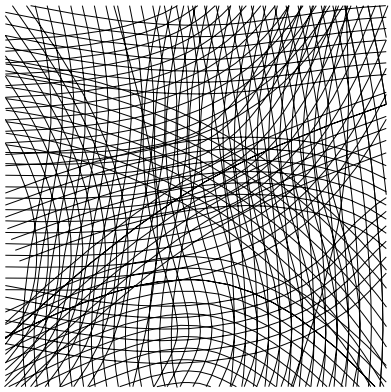


Fig. 3.2 Fieltro de fibras continuas

El *velo de superficie* es un fieltro de vidrio C de bajo gramaje (generalmente entre 30 y 80 gr/m^2) que se coloca en contacto con el *gelcoat* exterior durante el proceso de laminación. Tiene dos funciones fundamentales: a) la de brindar resistencia a la débil película de *gelcoat*, sobre todo cuando se producen solicitaciones (recordemos que el *gelcoat* por sí solo es una película frágil); b) la de brindar una barrera química frente al ambiente exterior; ello se consigue gracias a la elevada absorción de resina que posee. Como funciones no menos importantes también podemos destacar su aumento de la resistencia al impacto y a la abrasión de la superficie, y que evita que se marquen exteriormente los tejidos utilizados en laminado.

3.4.3 Sistemas no mallados

3.4.3.1 Tejidos

Son estructuras textiles en las cuales durante su fabricación (tejido) se cruzan diferentes fibras perpendicularmente, denominadas trama y urdimbre.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los hilos de urdimbre son aquellos que corren en el sentido longitudinal del rollo, y los de trama, los que atraviesan de forma perpendicular, dando lugar a puntos de entrecruzamiento denominados ligamentos (Fig. 3.3).

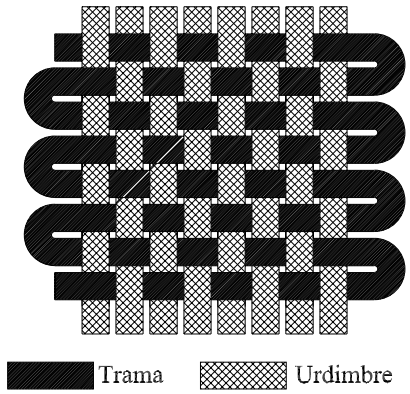


Fig. 3.3 Esquema de un tejido

Las direcciones resistentes se encuentran generalmente orientadas en las direcciones de trama y urdimbre (0º y 90ª); son tejidos que se emplean mayoritariamente en laminados manuales, y son muy utilizados en la construcción naval.

Diferentes tipos de tejidos:

a) Tela o tafetán (Fig. 3.4): es el ligamento más simple y más utilizado; cada hilo de urdimbre se enlaza con una pasada de trama que alternativamente pasa una vez por encima y otra por debajo de cada hilo de urdimbre.

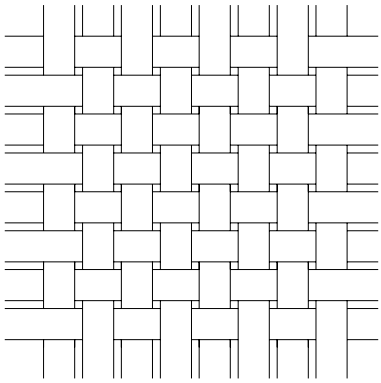


Fig. 3.4 Tejido convencional

b) Sarga (Fig. 3.5): es un tipo de ligamento que se identifica rápidamente porque presenta unas líneas en diagonal. Cada hilo de urdimbre o de trama hace una basta* de dos o más hilos de urdimbre o

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

trama, con una progresión de entrecruzamiento de uno a la derecha o a la izquierda para formar una línea diagonal identificable. Así entonces, los puntos de ligadura se trasladan un espacio al costado a cada pasada de trama. La sarga tiene derecho y revés. En las sargas, el número de lizos (hilos de urdimbre en el telar) puede variar.

c) Satén (Fig. 3.6): en esta tipo de ligadura cada hilo de urdimbre hace una basta* sobre cuatro pasadas de trama y se entrelaza con la quinta pasada de trama con una progresión de dos a la derecha o a la izquierda.

d) Raso: en el satén, las bastas (hilos sin ligar) van en sentido vertical, mientras que en el raso las bastas van en sentido horizontal. En el ligamento de raso cada pasada de trama hace una basta sobre cuatro hilos de urdimbre y se entrelaza con el quinto hilo de urdimbre con una progresión de dos a la derecha o a la izquierda.

El satén y el raso presentan el mismo principio, con la diferencia de que el satén es por urdimbre y el raso es por trama. Ambos presentan derecho y revés.

Las sargas, los satenes y rasos, por poseer menor número de ligamentos, son materiales más deformables que los tafetanes o telas.

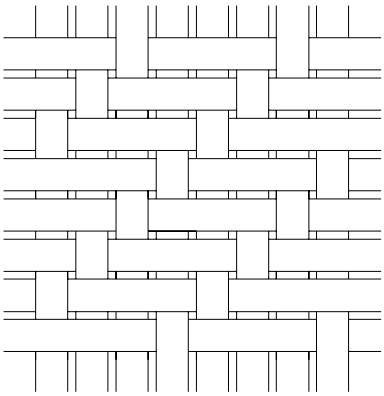


Fig. 3.5 Sarga

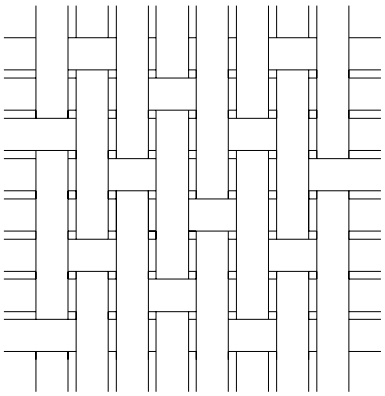


Fig. 3.6 Satén

3.4.3.2 Ensamblados

En este tipo de estructura textil, los hilos de trama y de 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, por lo general se encuentran cosidas mediante una fibra auxiliar ligera (Fig. 3.7).

Desde el punto de vista mecánico, presentan mejores propiedades que los fieltros y que los tejidos, por encontrarse el hilo trabajando completamente alineado con el sentido del esfuerzo (Fig. 3.8). Son los ensamblados el tipo de estructura textil más utilizado en piezas de altos requerimientos estructurales.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

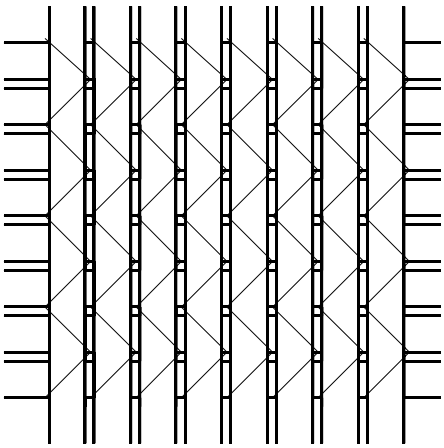


Fig. 3.7 Ensamblado biaxial

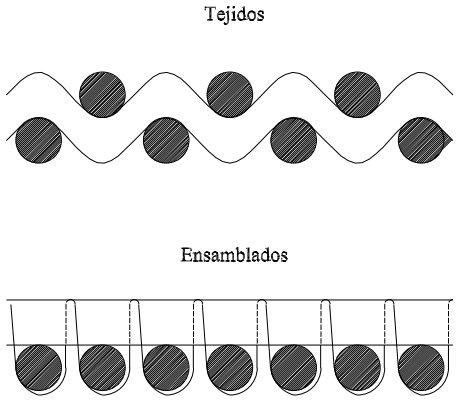


Fig. 3.8 Diferencias entre tejidos y ensamblados

En función de las orientaciones de las fibras pueden existir ensamblados *unidireccionales*, *biaxiales*, *triaxiales*, *cuatriaxiales* y *multiaxiales*. Son un tipo de estructura textil de amplia utilización en la construcción naval.

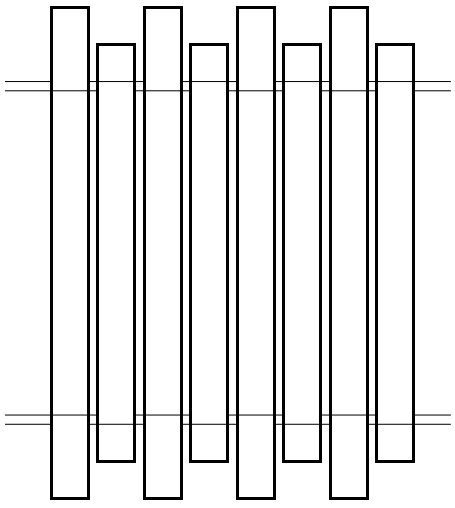


Fig. 3.9 Unidireccional

3.4.3.3 Trenzados

A diferencia de los tejidos y los ensamblados, en los cuales existen fibras alineadas y perpendiculares respecto del esfuerzo, los trenzados presentan un cierto ángulo respecto del mismo (Fig. 3.10). Se confeccionan en forma de calcetín o en forma de cintas, y el ángulo que forman puede ajustarse con las solicitaciones. Casi no se utilizan en la construcción naval, salvo en pequeñas piezas.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

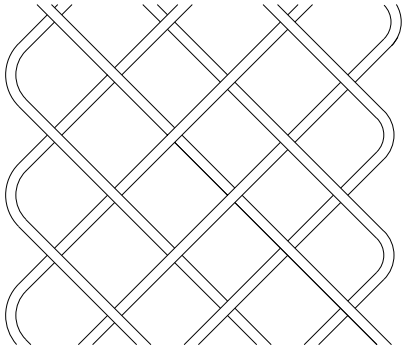


Fig. 3.10 Trenzado

3.4.4 Mallados y encadenados

Ordenamientos textiles planos que se confeccionan mediante mallado o encadenado de una fibra o de un sistema con fibras a otra fibra o sistema de fibras. Para su confección son necesarias máquinas especiales, de las denominadas de *género de punto*.

*Mallados (*Fig 3.11): son los denominados *tejidos multiaxiales*. Son estructuras textiles confeccionadas a base de fibras de refuerzo con diferentes orientaciones; gracias a la acción de la máquina de tejer, dichas orientaciones se mantienen inalterables (la estructura textil no se deforma).

Pueden presentar problemas de impregnación dado el gran volumen de fibras por lo general presente.

En función del número y orientación de capas que los constituyen, las estructuras multiaxiales pueden ser realmente rígidas.

Encadenados (Fig. 3.12): debido a su proceso de confección, las fibras poseen orientaciones que por lo general no son ventajosas en la confección de laminados, por ser direcciones muy poco usuales. Además, las fibras de vidrio y carbono poseen baja resistencia al entrelazamiento y baja resistencia a las flexiones a las cuales son sometidas durante la confección.

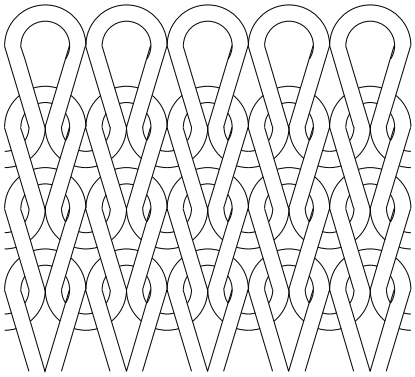


Fig. 3.11 Mallado

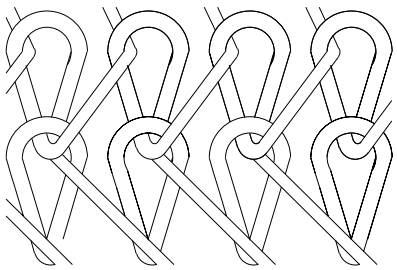


Fig. 3.12 Encadenado

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

4 Materiales de núcleo

4.1 Introducción

Una *estructura sandwich* es una estructura constituida por dos pieles de material resistente entre las que se interpone un material ligero y, por lo general, de baja densidad. Este núcleo, si bien aumentará el espesor y en mínima medida el peso de la nueva estructura comparada con una estructura simple, reportará grandes beneficios desde el punto de vista de la rigidez del conjunto.

4.2 Concepto de estructura *sandwich*

Una estructura *sandwich* (Fig. 4.1) está compuesta por tres elementos fundamentales: a) las pieles exteriores; b) el núcleo del *sandwich*; y c) la interfase de unión entre el núcleo y las pieles (generalmente un adhesivo).

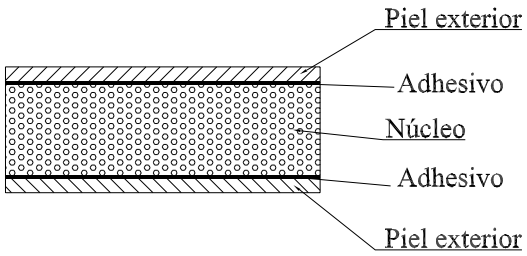


Fig. 4.1 Elementos de estructura sandwich

Cada uno de los elementos implicados cumple una función determinada. Las pieles exteriores son los elementos resistentes, generalmente realizadas con materiales de mejores propiedades que el resto; el núcleo, de material ligero, cuyas funciones principales son mantener separadas las pieles exteriores, brindar aislamiento térmico (si cabe) y transmitir los esfuerzos cortantes de una cara a la opuesta; y por último la interfase, que tiene como función principal mantener unido todo el conjunto.

Si un panel *sandwich* es sometido a flexión como en la figura 4.2, las pieles exteriores experimentarán esfuerzos diferentes. Por ejemplo, la piel superior está sometida a tracción, y la piel inferior estará sometida a compresión:

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

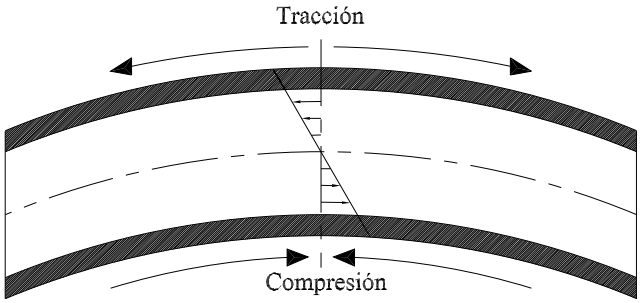


Fig. 4.2

El núcleo debe mantener la distancia relativa entre las pieles y la distancia entre las pieles y la línea neutra. Debe el núcleo, por lo tanto, ser suficientemente resistente para poder soportar los esfuerzos de corte que se producen y evitar que se produzca un desplazamiento de las pieles en el sentido longitudinal. Debe también soportar los esfuerzos de compresión perpendicular a las pieles.

Las pieles deberán ser capaces de resistir el esfuerzo de flexión al cual están sometidas a través de los correspondientes esfuerzos de tracción y compresión.

De modo que la nueva estructura *sándwich*, comparada con la estructura simple, será mucho más resistente con sólo un mínimo aumento de peso.

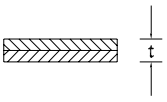
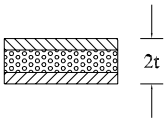
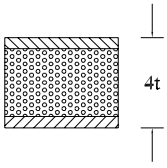
	Construcción monolítica	*Construcción sandwich*	*Construcción sandwich*
			
Rigidez relativa	100	700	3700
Resistencia relativa	100	350	925
Peso relativo	100	103	106

Fig. 4.3

4.3 Tipos de núcleos

4.3.1 Maderas naturales

4.3.1.1 Madera balsa

La madera balsa es originaria del centro y sur de América. Considerada como madera dura, es entre todas ellas la más blanda y ligera (densidad entre 100 y 250 kg. /m^3). Dada su alta rigidez, es difícil adaptarla a formas curvas, por lo que se suele emplear en forma de bloques pequeños unidos entre sí

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

por un material de soporte, generalmente un tejido de poco gramaje. También existen paneles planos rígidos en los cuales los bloques de madera son encolados con adhesivos de madera estructurales.

La disposición de las fibras de madera es siempre perpendicular al laminado, que es donde se obtienen las máximas propiedades mecánicas (esta configuración otorga excelente resistencia a la compresión). En las direcciones perpendiculares al grano, las propiedades mecánicas decrecen. La madera balsa posee módulo y resistencia a la compresión más elevados comparada con el resto de materiales utilizados como núcleo.

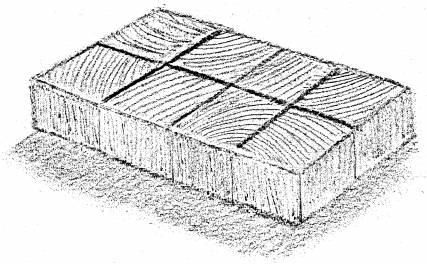


Fig. 4.4 Madera balsa en pequeños bloques. Vista superior

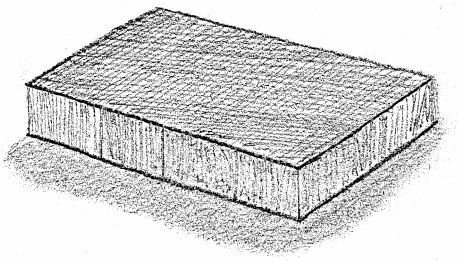


Fig. 4.5 Madera balsa en pequeños bloques. Vista del tejido de soporte

La madera balsa para estructuras *sandwich* debe ser tratada antes de procesarse, eliminando la materia orgánica presente y reduciendo la humedad hasta una cifra del 10%. Humedades superiores provocan hinchazón y podredumbre de la madera, y pueden ocasionar deslaminaciones de las pieles exteriores.

Es compatible con la mayoría de resinas empleadas en la construcción naval. Posee, sin embargo, 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.

Por lo general, no se suele utilizar para superficies que estén en contacto permanente con el agua y la humedad, quedando relegado su uso a cubiertas, mamparos y divisiones interiores.

Tabla 4.1 Principales propiedades de la madera balsa

Densidad	*(Kg./m^3)*	*90*	*155*	*220*
Resistencia al corte	*(MPa)*	*1,6*	*3*	*4,5*
Módulo cortante	*(MPa)*	*96*	*166*	*237*
Resistencia a la tracción	*(MPa)*	*7*	*13,5*	*20,6*
Resistencia a la compresión	*(MPa)*	*5,4*	*12,7*	*21,9*
Módulo de compresión	*(MPa)*	*1850*	*4100*	*6840*

Nota: Los valores expresados en la tabla son sólo orientativos. Los valores corresponden a planchas de madera balsa constituidas por pequeños bloques unidos por un tejido de soporte

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

4.3.1.2 Cedro rojo

Originaria de América del norte, Reino Unido y Nueva Zelanda, es una madera blanda y aromática. De color pardo rojizo, se torna gris plateado tras una larga exposición a la intemperie. Tiene una densidad aproximada de 370 Kg. /m^3. Se utiliza como material *sandwich* en la construcción de embarcaciones unitarias sin molde (construcción *one-off*). Por lo general se presenta en forma de listones fresados (Fig. 4.6) que permiten ser montados de una manera rápida y sencilla (técnica conocida como *Strip-plank*®).

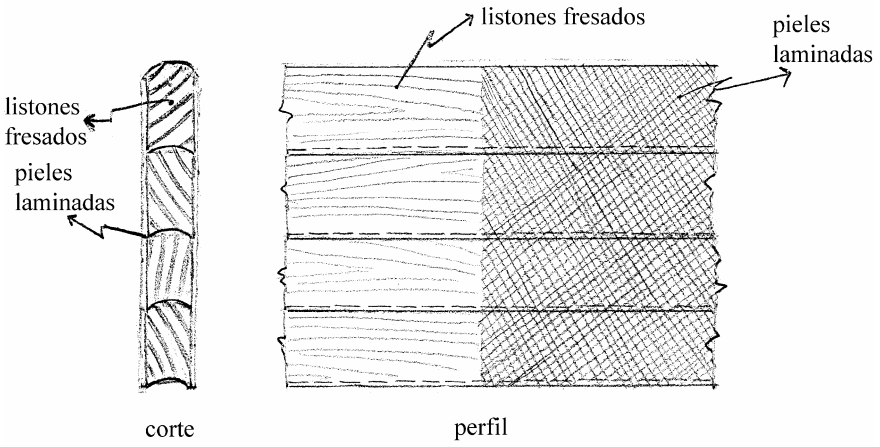


Fig. 4.6 Estructura sandwich de madera

Tabla 4.2 Principales propiedades del cedro rojo

Densidad	*(Kg./m^3)*	*320*
Resistencia al corte	*(MPa)*	*6,83*
Carga de rotura a la flexión	*(MPa)*	*53,8*
Módulo de elasticidad	*(MPa)*	*8270*
Resistencia a la compresión	*(MPa)*	*19,11*

4.3.1.3 Contrachapado marino

Es un tablero realizado a partir de delgadas láminas de madera, denominadas *placas* o *chapas estructurales*, unidas para formar un tablero estable y resistente. El número de hojas siempre es impar y la dirección de cada chapa es perpendicular a aquellas con las cuales está en contacto (Fig. 4.7 y Fig. 4.8).

En función de la cola utilizada existen diferentes grados, siendo el grado marino el que se confecciona con colas fenólicas que permiten soportar el ataque de los hongos y de la humedad en ambientes marinos.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Por lo general se utiliza en las estructuras *sandwich* como complemento de las espumas sintéticas, reemplazándolas en todas aquellas zonas donde ocurren esfuerzos de compresión o tracción excesivos, como por ejemplo la zona donde se instalan herrajes.

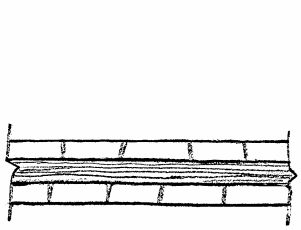


Fig. 4.7 Contrachapado marino Vista en corte

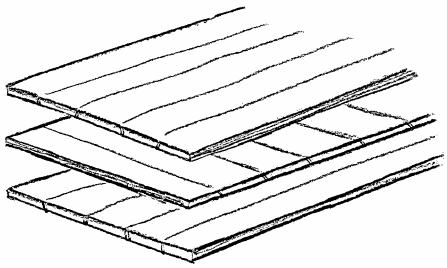


Fig. 4.8 Orientación de las chapas

Existe una amplia variedad de contrachapados marinos derivados del uso, en su fabricación, de diferentes maderas. Las maderas más utilizadas son el okume, el iroko, la teka, la caoba, el sapelli, el cedro, la acacia, los pinos spruce y douglas, y en menor medida el moabi, el sipo y la balsa. Los tableros contrachapados pueden ser construidos con una única madera o pueden combinar diferentes.

4.3.2 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.

La gran mayoría de plásticos se pueden espumar, pero por cuestiones técnicas, económicas y prácticas, sólo se espuman un grupo reducido.

A continuación proponemos una breve recopilación de las más utilizadas en la construcción naval.

4.3.2.1 Espumas de cloruro de polivinilo (PVC)

Se fabrican combinando un copolímero de polivinilo con plastificadores, estabilizantes, compuestos de cruzamiento y agentes de soplado. Son un espumado químico con activación térmica. La mezcla de sustancias es calentada en un molde bajo presión para que se produzca la reacción de entrecruzamiento. Una vez realizada esta fase del proceso, se sumergen en agua caliente para continuar su expansión hasta obtener la densidad perseguida. Los diámetros de celda pueden variar de 0,254 mm hasta 2,5 mm. Se clasifican en función de la densidad (alta, media y baja densidad, densidades entre 40 y 210 kg. /m^3) y por su estabilidad térmica.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las espumas de PVC presentan buena resistencia mecánica, buena resistencia térmica, poseen buenas características como aislante acústico y tienen una alta resistencia a la penetración de agua. Comparadas con el resto de espumas sintéticas, poseen las mejores propiedades, lo que, sumado a su adaptabilidad a superficies con doble curvatura, las convierten en las más utilizadas.

La gran mayoría de espumas de PVC de celda cerrada que se utilizan en la construcción naval mantienen sus propiedades mecánicas inalterables hasta 60º C. Si la temperatura de servicio o de proceso es mayor, deberán seleccionarse espumas estabilizadas a una temperatura mayor.

PVC lineales: los enlaces entre las diferentes moléculas son lineales, por lo que sus propiedades mecánicas son más bajas. Su característica más sobresaliente es su capacidad de absorción de impactos sin que se produzca una rotura catastrófica, siendo esta característica mayor que en espumas de PVC de celda cerrada.

Tabla 4.3 Principales propiedades de las espumas de PVC

Estructura / densidad (Kg./m^3)		*Lineal 80*	*Entrelazado 75*	*Entrelazado 80*	*Entrelazado 96*
Resistencia al corte	*(MPa)*	*1,17*	*--*	*1,00*	*1,5*
Módulo de corte	*(MPa)*	*20*	*11*	*30*	*45*
Resistencia a la tracción	*(MPa)*	*1,38*	*1,21*	*1,79*	*2,48*
Resistencia a la compresión	*(MPa)*	*0,86*	*1,1*	*1,17*	*1,79*

4.3.2.2 Espumas de poliuretano (PU)

Nos referiremos al poliuretano con carácter termoestable. Los productos de partida para obtener espumas de poliuretano son un isocianato y un poliol de tipo poliéter o poliéster. Como los componentes son líquidos, se suele realizar la reacción de polimerización en el mismo instante que se moldea.

Las espumas resultantes pueden ser de celda abierta o celda cerrada. Las de celda abierta tienden a ser estructuras flexibles y las de celda cerrada, estructuras rígidas. Las densidades resultantes pueden ser muy amplias (desde 10 hasta 900 Kg/m3), y vendrán gobernadas por la proporción y composición química.

Si bien tienen características menores que las espumas de PVC, presentan una buena resistencia mecánica y tenacidad, resisten la abrasión, poseen buena resistencia química, baja conductividad térmica y elevada resistencia eléctrica. A temperatura ambiente trabajan mejor que las espumas de PVC y son más resistentes a las altas temperaturas.

En la construcción naval se suelen utilizar como material aislante, como reserva de flotabilidad, como material de soporte en la confección de estructuras internas, así como núcleo de estructuras *sandwich* en embarcaciones de esloras muy reducidas.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

4.3.2.3 Espumas de poliestireno (PS)

Como resultado de espumar el poliestireno se obtiene una espuma muy ligera, resistente a la absorción de agua y a los microorganismos. Sin embargo, debido a que dichas espumas son solubles al estireno, no se suelen utilizar con resinas de poliéster y viniléster. Poseen una reducida resistencia mecánica (no se utilizan como material estructural) y una baja conductividad térmica. Las densidades varían entre 10 y 45 Kg. /m^3. Sólo se utilizan en náutica como material aislante o de flotación.

Tabla 4.4 Principales propiedades de las espumas de poliestireno (PS)

Densidad (Kg./m^3)		*28*	*30*	*45*
Módulo a compresión	*(kN/m^2)*	*10000 - 18000*	*12000 - 20000*	*25000 - 33000*
Resistencia al corte	*(kN/m^2)*	*200*	*250*	*500*
Módulo de corte	*(kN/m^2)*	*4000*	*4500*	*6000*
Resistencia a la tracción	*(kN/m^2)*	*450*	*500*	*1000*
Módulo a tensión	*(kN/m^2)*	*10000 - 18000*	*12000 - 20000*	*25000 - 33000*

4.3.2.4 Espumas de estireno-acrilonitrilo (SAN)

Este copolímero tiene mejor resistencia química y térmica, así como mayor rigidez que el poliestireno. Su comportamiento es similar al PVC; en capacidad de absorción de impactos se comporta de manera similar a la espuma de PVC lineal, y en capacidad estática como la espuma de PVC cruzada.

Tabla 4.5 Principales propiedades de las espumas SAN

Densidad (Kg./m^3)		*55*	*80*	*210*
Resistencia al corte	*(MPa)*	*0,56*	*0,98*	*1,75*
Módulo de corte	*(MPa)*	*12*	*20*	*35*
Resistencia a la tracción	*(MPa)*	*0,81*	*1,39*	*2,27*
Resistencia a la compresión	*(MPa)*	*0,40*	*0,79*	*1,45*

4.3.2.5 Espuma de polimetacrilímida (PMI)

Las espumas PMI se producen por expansión térmica de un ácido metacrílico y metacrilonitrilo. Durante el proceso de espumado, la hoja de copolímero es convertida en polmetacrilimida. Como resultado se obtiene un plástico celular rígido con estructura celular homogénea y cerrada.

Estas espumas poseen mejores propiedades mecánicas que el resto de las espumas sintéticas, entre las cuales destacan la alta resistencia térmica, excelente resistencia a la fluencia y un reducido peso. La

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

elevada estabilidad térmica las convierte en las preferidas para utilizar en estructuras *sandwich* realizadas a partir de materiales preimpregnados. Existen diferentes grados en función de su densidad.

Tabla 4.6 Principales propiedades de las espumas PMI

Densidad (Kg./m^3)		*75*	*11*
Resistencia al corte	*(MPa)*	*1,28*	*2,35*
Módulo de corte	*(MPa)*	*30*	*49*
Resistencia a la tracción	*(MPa)*	*2,74*	*3,40*
Resistencia a la compresión	*(MPa)*	*1,47*	*2,94*

4.3.2.6 Espumas sintácticas

Menos conocidas que las espumas sintéticas, se diferencian de éstas porque las cavidades no se forman por generación de gas dentro del material, sino que se producen por la incorporación a su masa de microesferas huecas de diferentes materiales. Las espumas más comunes son las de microesferas de vidrio con resina fenólica o poliéster, pero existen también las metálicas y de carbono. Fruto de esta combinación, se obtiene una espuma con una elevadísima resistencia a la compresión, razón por la cual se utiliza ampliamente en la construcción de elementos destinados a la inmersión profunda como submarinos, boyas y aparatos de rescate submarino.

4.3.3 Nido de abeja

El concepto *nido* o *panal de abeja* se refiere a una forma de estructurar diferentes materiales que se emplean como núcleo en estructuras *sandwich* (Fig. 4.9). Se reproduce la forma natural de los nidos de abejas con láminas delgadas de diferentes materiales.

La morfología del núcleo queda definida por parámetros como el tamaño de la celda, la densidad del material empleado, la zona de adhesión entre celdas, la altura del núcleo, el espesor de la hoja que se utiliza para confeccionarlo, y la dirección de las placas.

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.

Los panales de abeja se pueden fabricar por procesos de expansión y por procesos de corrugado u ondulación. Las láminas obtenidas se unen mediante adhesivos o soldadura, dando lugar a estructuras regulares y repetitivas.

Con su empleo se consiguen estructuras *sandwich* extremadamente ligeras. En la industria naval se utilizan en embarcaciones de alto rendimiento, especialmente en cubiertas y mamparos, dado que en zonas sumergidas existe un riesgo potencial de absorción de agua. Su elevado coste y una compleja técnica de encolado son las razones fundamentales de su limitada utilización.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

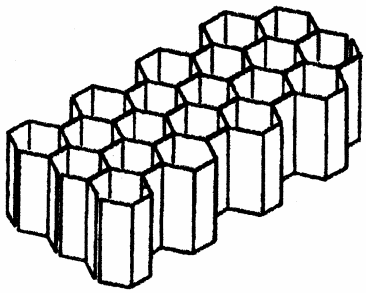


Fig. 4.9 Nido de abeja hexagonal

4.3.4 Fire Coremat®

El Fire Coremat® es un material conformado de fibras sintéticas no tejidas de poliéster, de orientación completamente aleatoria, que incorpora como cargas microesferas cerradas de plástico a base de cloruro de polivinilideno (PVDC) junto con un ligante soluble en estireno. Se utiliza como material de núcleo para producir estructuras que requieran rigidez aunque con un coste inferior al de estructuras *sandwich* realizadas con espumas sintéticas (por ejemplo, en la construcción de moldes).

Su aplicación se realiza por estratificación, a diferencia del resto de materiales de núcleo, que son encolados. Por ello presenta una excelente conformabilidad con unos espesores reducidos (de 1 a 5 mm). Para mejorar su adhesión, debe ser laminado entre ordenamientos planos tipo fieltros.

Existen dos tipos fundamentales:

Coremat® XM: con un contenido de 55% de microesferas. Para resinas poliésteres y vinilésteres. Para procesos de laminado manual por contacto y proyección simultánea (Fig. 4.10).

Coremat® XX: con un contenido de 45% de microesferas. Para resinas poliésteres y vinilésteres. Para procesos de laminado manual por contacto y proyección simultánea. Existe una variante con *mat* añadido para reducir el tiempo de aplicación (Fig. 4.11).

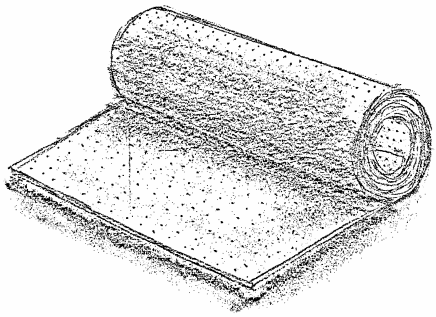


Fig. 4.10 Coremat® XM

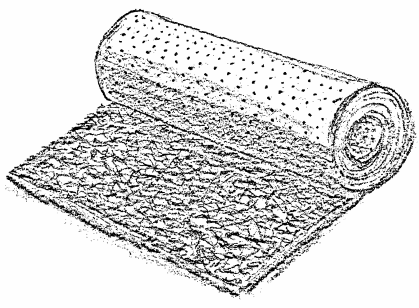


Fig. 4.11 Coremat® XX

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Su inconveniente principal es que su densidad final dependerá de la habilidad del operario, puesto que al ser un material poroso generalmente absorbe gran cantidad de resina.

Se utiliza para cascos, cubiertas, componentes interiores y moldes de embarcaciones de producción en serie.

Tabla 4.7 Principales propiedades del Coremat®

Material		*Coremat® XM (2-4 mm)*	*Coremat® XX (1-5 mm)*
Resistencia a la compresión	*(N/mm^2)*	*16,55*	*22,06*
Módulo de compresión	*(N/mm^2)*	*1724*	*200*
Resistencia a la tracción	*(N/mm^2)*	*3,31*	*2,31*
Módulo de tracción	*(N/mm^2)*	*352*	*352*
Resistencia al corte	*(N/mm^2)*	*4,31*	*4,00*
Módulo de corte	*(N/mm^2)*	*50*	*68*
Resistencia a la flexión	*(N/mm^2)*	*7,52*	*8,48*
Módulo de flexión	*(N/mm^2)*	*1103*	*900*

Nota: Los valores expresados en la tabla corresponden a Coremat® XM y XX impregnados con resina de poliéster

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

5 Introducción a los procesos de fabricación

5.1 Introducción

En la construcción con materiales tradicionales, las piezas se confeccionan a partir de un material ya constituido al que se le da otra forma. Su calidad puede ser controlada en una etapa previa a la fabricación, y es posible determinar posibles fallos así como estimar la conveniencia de su uso. En la construcción con materiales compuestos, las piezas y el material surgen simultáneamente del propio proceso de fabricación. Por esta razón, el proceso de manufactura adquiere una importancia mayor que en el resto de procesos de manufactura para materiales comunes.

Existen, a nivel industrial, un buen puñado de técnicas de fabricación con materiales compuestos, pero en el caso de la construcción de embarcaciones, dicho número se ve sensiblemente reducido dado el gran tamaño de las piezas a construir.

Los procesos aptos deben, por tanto, ser flexibles y permitir ciertos márgenes, para poder compensar la fabricación en condiciones que, en la mayoría de las veces, distan mucho de las ideales.

Se deduce entonces la importancia que tiene la elección del método de fabricación y su posterior desarrollo, como condicionantes de las características físicas y mecánicas finales de la pieza.

5.2 Clasificación de los procesos

Dirigiremos nuestro estudio fundamentalmente a los procesos más utilizados en la construcción naval, ya sean éstos procesos para embarcaciones completas o bien para componentes de las mismas.

Entre los procesos más idóneos en la construcción de embarcaciones podemos señalar:

Moldeo por contacto	*Moldeo asistido por vacío*	*Moldeo por vía líquida*	*Moldeo con autoclave*
a) Laminación por contacto	*a) Laminación por contacto asistido por vacío*	*a) RTM*	
b) Proyección simultánea	*b) Preimpregnados*	*b) VARTM*	
c) Impregnadores	*c) Preimpregnados parciales*	*c) Infusión*	

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Cada proceso de fabricación fue desarrollado con una finalidad específica, para luego derivar hacia otras áreas industriales en las cuales se le encontró una nueva utilidad. Todos los métodos presentan ventajes e inconvenientes, y realizar un estudio comparativo entre ellos resulta tarea casi imposible, dada la gran cantidad de variables que entran en juego.

Hemos creído, sin embargo, que una aproximación comparativa resultaría beneficiosa para una mejor compresión del tema. Para poder realizarla hemos hecho múltiples simplificaciones, puesto que algunos procesos no son perfectamente comparables entre sí; dicha comparación se ha orientado exclusivamente a la construcción de embarcaciones de recreo o alguno de sus componentes. En muchos casos se han omitido en las gráficas valores simplemente para evitar que tales datos sean utilizados erróneamente. Los resultados ofrecidos pueden ser considerados como valores normales en la construcción de embarcaciones, aunque puede que no lo sean en otra disciplina industrial. Reiteramos que la problemática de la construcción naval es muy específica, y que la actividad de un astillero casi nunca se orienta exclusivamente a los procesos de fabricación con materiales compuestos, sino que dichas técnicas son un eslabón más en una larga cadena que tiene como finalidad conseguir un producto equilibrado.

5.3 Contenido de refuerzo

Una de las propiedades más significativas de un material compuesto desde el punto de vista ingenieril es la proporción de material de refuerzo en el global del laminado (Fig. 5.1). Con ella se establecen las principales propiedades mecánicas del laminado resultante, obteniendo mayores propiedades cuanto mayor sea el porcentaje de refuerzo en su constitución. Es evidente que existen límites superiores e inferiores al contenido de refuerzo, dado que fibras resecas dejarían de comportarse como un material compuesto, y que fibras excesivamente impregnadas sólo aportarían más peso a la estructura sin proporcionarle más resistencia a cambio.

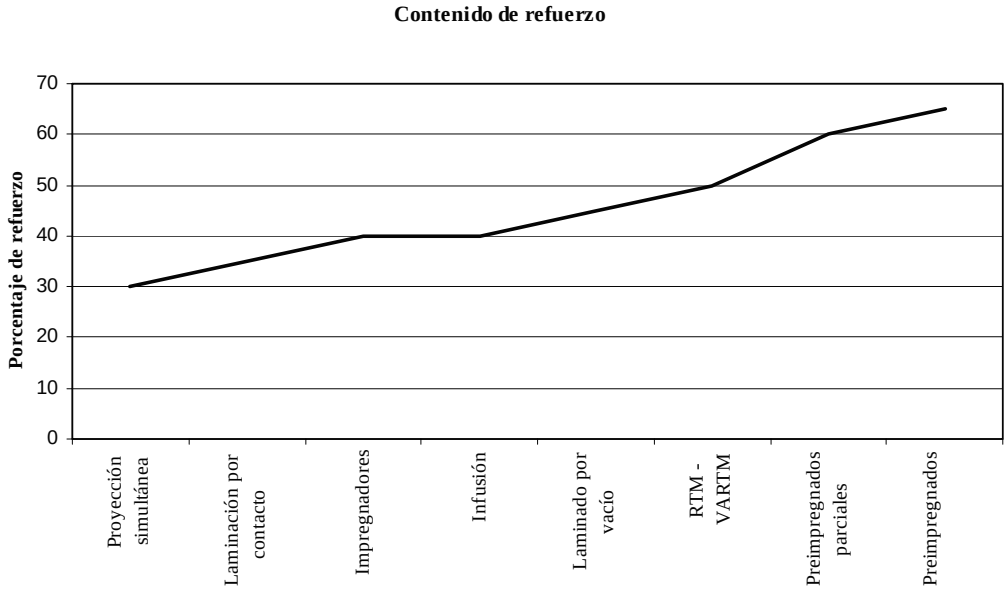


Fig. 5.1

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

El contenido de refuerzo se determina mediante un ensayo de calcinación, en el cual se introduce una probeta del laminado previamente pesada en una mufla de laboratorio; se eleva entonces la temperatura hasta que se calcina la resina (por encima de 600º C), y luego se tornan a pesar los residuos restantes. Así queda entonces establecido el porcentaje de refuerzo presente en el laminado.

Se deduce aquí que los laminados con menor cantidad de resina, o si se prefiere, con mayor porcentaje de fibra, serán aquellos que son obtenidos por procesos que se sirven de una presión externa para compactar el laminado antes de que se arribe al punto de gel de la resina.

5.4 Coste de utillajes y equipos

Cada método requiere de útiles de trabajo y equipos específicos. El mayor coste de estos materiales de trabajo, asociados a cada uno de los métodos, suele estar ligado a una mayor calidad del laminado (Fig. 5.2). Así por ejemplo, serán muy diferentes los requerimientos de un molde para realizar piezas mediante laminado por contacto manual que uno que se utilice para fabricar piezas de preimpregnados, en el cual los criterios de estabilidad térmica y resistencia a la presión de trabajo son determinantes del alto coste final.

Además de los moldes, se analizan aquí todas las herramientas manuales necesarias para realizar el trabajo de laminado, las instalaciones con sus equipos auxiliares, los sistemas de adquisición y control de datos, así como los equipos y elementos de protección sanitaria y medioambiental.

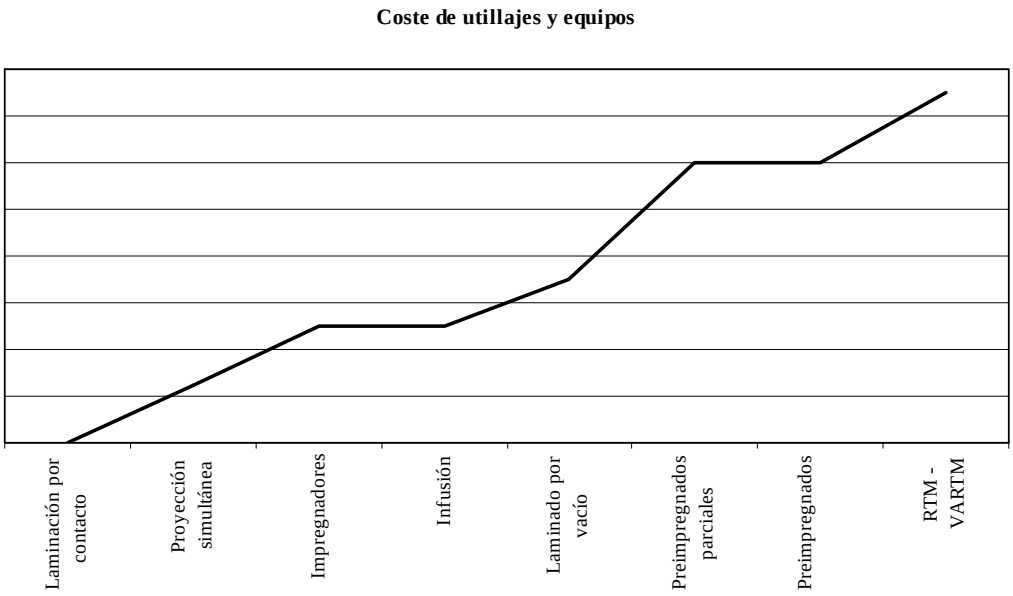


Fig. 5.2

5.5 Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)

La mayoría de resinas poseen en su composición compuestos orgánicos volátiles, como por ejemplo el monómero de estireno en las resinas de poliéster y viniléster. Estos compuestos orgánicos, una vez

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

realizado el laminado, tienden en gran medida a evaporarse, contaminando el ambiente de trabajo y ocasionando problemas de salud a los trabajadores.

Esta contaminación del ambiente de trabajo se produce en dos fases: la primera, denominada *fase dinámica*, se produce desde que la resina se encuentra en estado líquido hasta que alcanza el punto de gel; la segunda, denominada *fase estática*, es consecutiva de la primera, y se produce cuando la resina se encuentra en forma de sólido (Fig. 5.3).

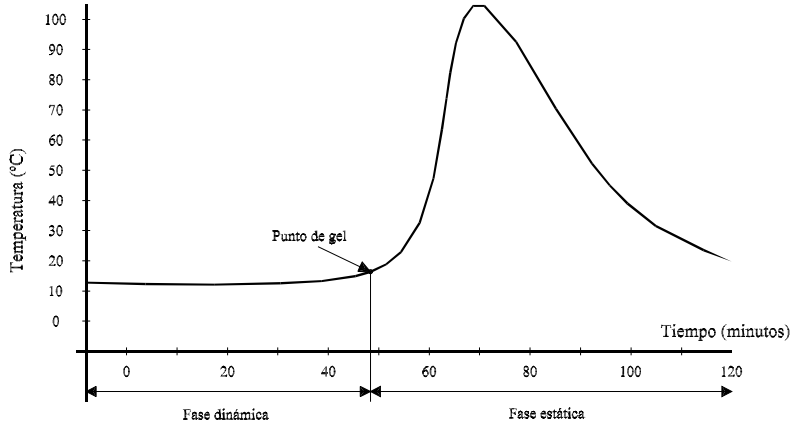


Fig. 5.3

La primera fase de contaminación es la más agresiva, ya que el estado líquido de la resina facilita la evaporación de los compuestos orgánicos; la superficie de la resina está continuamente perturbada y las emisiones son difíciles de controlar.

La fase estática se produce una vez se ha concluido el laminado y la resina se encuentra en estado gel/sólido; la elevación de la temperatura fruto de la reacción exotérmica acelera la evaporación del disolvente, y a medida que avanza el grado de curado de la pieza disminuyen las emisiones (Fig. 5.4).

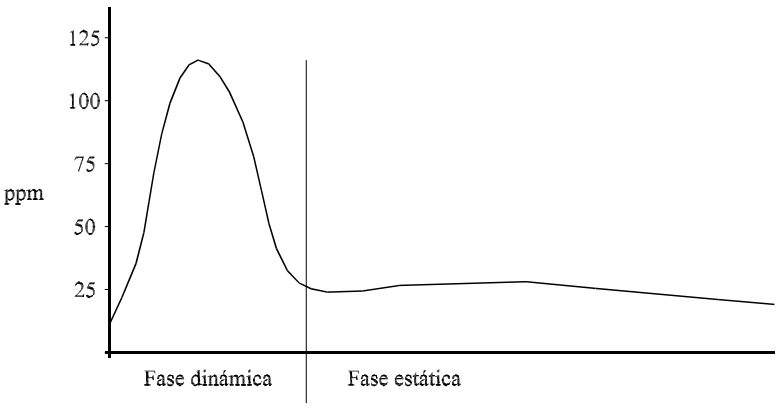


Fig. 5.4

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

El nivel permisible de emanaciones se encuentra regulado para cada país (Tabla 5.1), y dicho número se encuentra relacionado con el volumen del local, la superficie del laminado, el proceso de fabricación empleado, el tipo de resina y el tratamiento al que se somete el aire del local de trabajo.

Tabla 5.1 Límite de exposición al estireno para países europeos

País	*TLV-TWA, ppm*	*TLV-STEL, ppm*
Alemania	*20*	*40 (30min)*
Austria	*50*	*100 (15min)*
Bélgica	*50*	*100 (15min)*
Dinamarca	*25*	*25*[1]
España	*50 (20)*[2]	*100 (40*[2]*)(15min)*
Finlandia	*20*	*100 (15min)*
Francia	*50*	--
Holanda	*25*	*50 (15min)*
Italia	*50*	*100 (15min)*
Luxemburgo	*20*	*40 (30min)*
Noruega	*25*	*37.5 (15min)*
Reino Unido	*100*[4]	*250 (10min)*
Suecia	*20*[3]	*50 (15min)*
Suiza	*50*	*100 (4x10min)*

[1] *Límite máximo*
[2] *R.D. 374/01*
[3] *10 ppm para nuevas instalaciones*
[4] *Obligación de reducir lo máximo posible*

TLV-TWA (*Threhold limit values - time weighted average)*
Representa la concentración media de un contaminante en el aire ponderada en el tiempo, por 8 horas diarias o 40 semanales, por debajo de la cual se puede estar expuesto repetidamente.

TLV-STEL (*Threshold limit values - short term exposure limit*)
Representa la concentración a la que los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un corto período de tiempo (15 minutos).

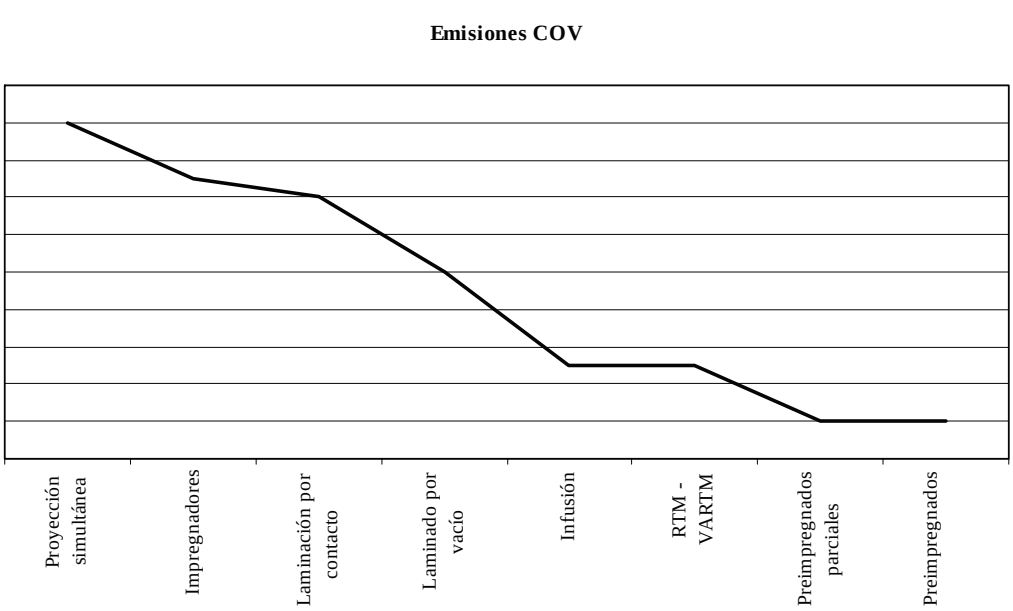


Fig. 5.5

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Con el fin de reducir o eliminar las emanaciones de compuestos orgánicos volátiles en el ambiente se han desarrollado nuevas tendencias en materiales y procesos de fabricación.

Las tendencias relacionadas con los materiales se basan en modificar la composición de las resinas, disminuyendo o sustituyendo tales componentes por otros menos contaminantes.

Las tendencias relacionadas con los métodos de producción se fundamentan en utilizar técnicas de moldeo conocidas como *de molde cerrado*, en las cuales, mediante la utilización de membranas o contra-moldes, se evita la evaporación del compuesto contaminante. Es el caso, por ejemplo, de los métodos de infusión, de laminado por vacío, el RTM y los preimpregnados.

5.6 Número de unidades que deben producirse

El número de unidades que deben producirse determina en gran medida la elección del proceso de fabricación (Fig. 5.6). Si bien en la industria en general suele considerarse una alta producción la construcción de más de 10.000 unidades anuales de una pieza, en la construcción naval se considera como elevada producción la fabricación de más de 20 unidades durante el mismo período. De este hecho deriva que muchos procesos desarrollados para fabricar piezas en materiales compuestos no tengan aplicación en el campo naval, dado que su puesta en marcha y posterior amortización resultaría irrealizable con niveles tan escasos de productividad.

Así, quedan entonces al abasto del constructor, por un lado, métodos cuasiartesanales como el laminado por contacto manual, laminados por vacío y preimpregnados; procesos utilizados por la gran mayoría de astilleros y pequeños talleres en la fabricación de un reducido número de unidades. Por otro, métodos derivados de conceptos automotrices de producción, como el RTM y el VARTM, utilizados por las grandes empresas multinacionales del sector y que producen un elevado número de embarcaciones.

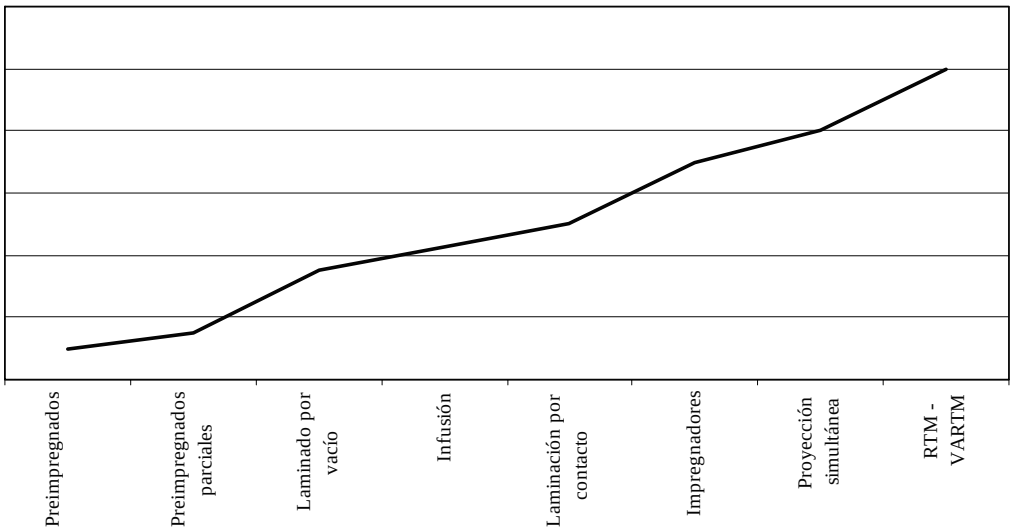


Fig. 5.6

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

6 Técnicas de moldeo por contacto

6.1 Introducción a las técnicas

Las técnicas de moldeo por contacto son aquellas en las cuales la mano del hombre juega un papel muy importante en la constitución del material compuesto. Las características físicas y mecánicas del laminado dependerán en mayor medida de lo cuidadoso que sea el operario durante su elaboración. Las técnicas de moldeo por contacto utilizan, por lo general, sistemas de resinas que curan a temperatura ambiente. Son las técnicas más sencillas, más económicas y las más artesanales.

Dentro de este grupo identificamos las técnicas de laminado manual, proyección simultánea y moldeo con impregnadores.

6.2 Laminado manual

La técnica del laminado manual, encuadrada en el grupo de técnicas de moldeo por contacto, es una de las más antiguas entre todas las técnicas conocidas en la fabricación de piezas con materiales compuestos.

Las técnicas de laminado por contacto aprovechan las ventajas de los sistemas de matrices poliéster y viniléster en su procedimiento de curado; que no necesitan la aportación de calor externo para su completa polimerización ni de alta presión de moldeo para su estratificación.

A pesar de ser una técnica sencilla y artesanal, con mucha dependencia de la habilidad del operario, continúa siendo a lo largo de los años la más difundida, tanto por su bajo coste como por su adecuación a piezas de diferentes geometrías y tamaños, y porque además no presenta excesivos problemas.

6.2.1 Concepto fundamental

El proceso de laminado manual consiste en la aplicación de sucesivas capas de material de refuerzo sobre un molde, para impregnarlas gradualmente con resina mediante la acción de un rodillo o brocha (Fig. 6.1).

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

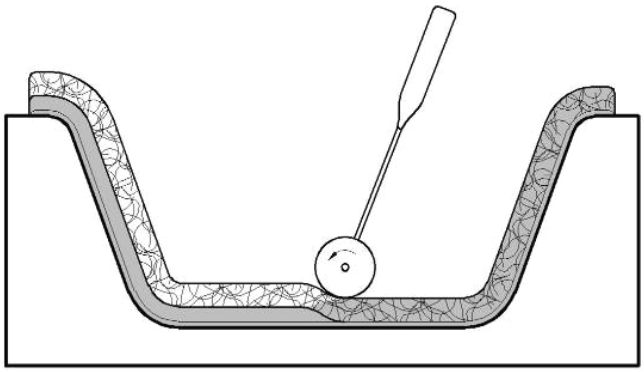


Fig. 6.1 Laminado manual

La acción de pasar el rodillo sobre la superficie obedece a dos razones fundamentales: a) ayudar a la impregnación del refuerzo; b) intentar evitar que queden burbujas de aire atrapadas entre las sucesivas capas del estratificado.

La presión de compactación del laminado tiene valores que varían entre 0 y 0,1 Kg. /m^2. Dicha presión ocurre exclusivamente cuando se aplica la acción del rodillo, y presenta variaciones en diversos aspectos como geometría de la pieza, posición de laminado, viscosidad de la resina, así como también en aspectos humanos relacionados con el operario, como su motivación, cansancio, etc.

6.2.2 Herramientas

Las herramientas necesarias para desarrollar correctamente esta técnica se dividen en dos grupos:

a) Herramientas de laminado
b) Herramientas de corte

Las herramientas que consideramos para el laminado son aquellas que permiten impregnar el material de refuerzo con la matriz, compactar las napas de material así como eliminar las burbujas de aire que quedan atrapadas dentro del laminado. Dentro de este grupo podemos distinguir los rodillos, las espátulas y las brochas.

Los rodillos de laminación son las herramientas ideales para extender la matriz polimérica en grandes superficies con mayor agilidad, permitiendo una distribución más uniforme de la misma. Para dicha tarea el rodillo más acorde es del denominado de lana (Fig. 6.3), ya que no se ve afectado por el ataque químico de la resina y evita la degradación del mismo (lo que daría lugar a laminados de baja calidad). Existen también rodillos de cerdas y rodillos de nylon, aunque son menos utilizados ya que al ser considerados “blandos” no ejercen una buena presión de consolidación sobre el estratificado.

Dentro de este grupo tenemos también los rodillos metálicos de consolidación (Fig. 6.4), cuya función principal es ayudar a la extracción del aire atrapado entre capas de material. Consisten en un buen número de ruedas dentadas de diferentes diámetros que, al actuar sobre el laminado, lo “pinchan” para que el aire atrapado salga hacia el exterior.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

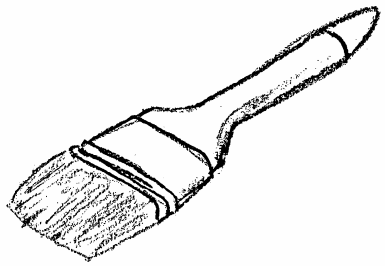


Fig. 6.2 Brocha

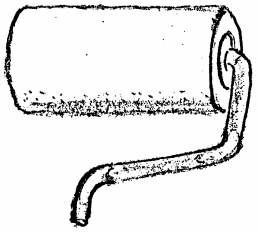


Fig. 6.3 Rodillo de lana

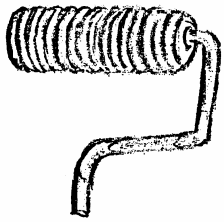


Fig. 6.4 Rodillo metálico

Existe en el mercado una variedad bastante amplia de rodillos, tanto sean de laminado como de compactado, lo que permiten la selección del más idóneo en función del tipo de trabajo y de las dimensiones de la pieza que se quiera laminar.

La limpieza de los rodillos, tanto de laminación como de consolidación, suele realizarse con disolventes como la acetona o el estireno.

Las brochas (Fig. 6.2) para laminados deben cumplir dos premisas básicas: coste reducido e integridad. La primera se debe a que la duración de las brochas suele ser breve, fruto del desgaste que sufren y de la incorrecta higiene a la cual se someten. La segunda premisa se refiere a que las brochas no deben desprender cerdas, puesto que esto repercute en la calidad del laminado. Para ello, deben poseer un adhesivo aglutinante de las cerdas compatible con los sistemas de matrices que se utilicen para laminar.

Existen diferentes tipos de brochas, pero las dos más utilizados son las redondas, para trabajar lugares estrechos y reducidos, y las brochas planas o paletinas, que se utiliza para laminados de superficies planas.

El uso de las espátulas es ideal cuando la viscosidad del material dificulte la impregnación del refuerzo (por ejemplo con resinas *epoxi*), siendo las más utilizadas las de plástico dada su mayor flexibilidad. Las rasquetas se utilizan para realizar mezclas de productos que posean una viscosidad elevada (masillas, pinturas, etc.).

Las herramientas de corte son necesarias para fraccionar el material de refuerzo. Dentro de este grupo destacan las tijeras y los cúteres.

Las tijeras son ideales para el corte de tejidos de mayor gramaje; no deshilachan pero suelen tener el problema de su constante desafilado, debido a la abrasión de los materiales como la fibra de vidrio. Existen tijeras que incorporan mecanismos especiales para disminuir el esfuerzo de corte, y otras que son confeccionadas para el corte de materiales específicos, como las tijeras para corte de *kevlar*.

Los cúteres son idóneos para el corte de materiales de refuerzo tipo fieltro. Su utilización en el corte de tejidos y ensamblados puede provocar deshilachado. La hoja intercambiable les proporciona más versatilidad que la tijera.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

6.2.3 Materiales

Matrices

Con el método de laminado manual se pueden emplear la mayoría de matrices poliéster, viniléster y *epoxi*. Su viscosidad debe estar comprendida entre 300 y 600 cPs para que facilite la tarea de impregnación. Se utilizan en mayor medida resinas que no requieran procesos de curado o postcurado, aunque es posible utilizar matrices más complejas. Se pueden incorporar cargas y aditivos en las resinas para buscar modificar alguna propiedad.

Refuerzos

La totalidad de los tejidos, ensamblados y fieltros pueden ser aplicados mediante la técnica del laminado manual. No obstante, existen una serie de recomendaciones acerca de las secuencias de laminado para mejorar la calidad de la pieza (Fig. 6.5):

Siempre que sea posible, la primera capa o piel de contacto con el *gelcoat* o el molde deberá ser un velo de superficie o, en su defecto, un fieltro de bajo gramaje; su presencia permitirá mejorar el aspecto superficial de la pieza, evitará problemas de marcado de la misma y minimizará el riesgo de aparición de ósmosis en piezas que se encuentren en contacto con el agua.

Cuando los espesores de la pieza sean grandes, es recomendable realizar el estratificado por partes, para evitar calentamientos en la misma, producto de la reacción exotérmica de la matriz. Cuando el laminado se realice de esta manera, la buena adhesión interlaminar entre las sucesivas secuencias de laminado debe ser garantizada por medio de una superficie lo más lisa posible, conseguida mediante la utilización de fieltros. Conviene, antes de iniciar la siguiente secuencia de laminación, comprobar que la superficie esté exenta de polvo e imperfecciones.

Por último, la piel de acabado deberá presentar un aspecto uniforme y agradable, objetivo que se consigue disponiendo de fieltros o tejidos de bajo gramaje sobre las capas finales de laminado.

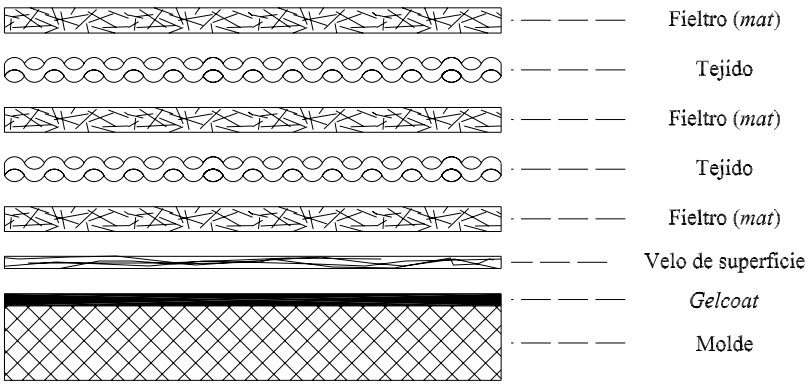


Fig. 6.5 Secuencia de laminado recomendada

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Si debido al tamaño de la pieza los tejidos no pueden ser colocados enteros, se procederá a realizar juntas debidamente solapadas. El ancho de solape mínimo (Fig. 6.6) dependerá del material de refuerzo y de la matriz utilizada. Deberán guardarse ciertas normas de distancia entre las costuras de una misma capa (Fig. 6.7) y se deberá distribuir los solapes entre capas sucesivas a efectos de realizar un laminado lo más uniforme posible.

Fig. 6.6

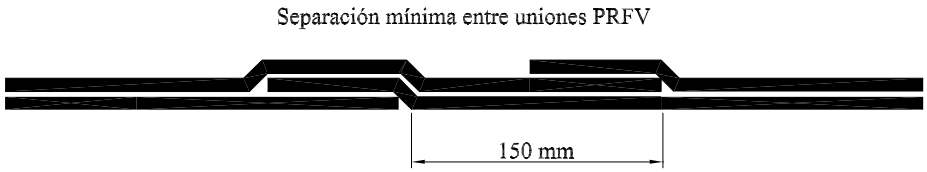


Fig. 6.7

6.2.4 Ambiente de trabajo

El lugar de realización de la labor de laminado debe cumplir un mínimo de condiciones ambientales para obtener unos resultados satisfactorios.

La primera condición será la temperatura del local. La temperatura ambiente incide directamente en el grado de curado de la pieza y en la procesabilidad de la matriz. A bajas temperaturas, aumenta la viscosidad de la resina, lo que dificulta la impregnación de los refuerzos; esto produce que los laminados realizados en estas condiciones suelan poseer un porcentaje mayor de resina en su composición.

Por otra parte, a bajas temperaturas el grado de reticulación de las resinas no se produce completamente, lo que da lugar a materiales compuestos con propiedades mecánicas más bajas que las estimadas.

En caso que la temperatura sea muy elevada, se puede producir la evaporación de una parte del disolvente que contienen las resinas, hecho que afecta también a sus propiedades finales. La laminación también se torna dificultosa por los cortos tiempos de gel de que se disponen, y las reacciones exotérmicas en las piezas generan temperaturas más elevadas, hecho que puede provocar marcas y distorsiones sobre la misma.

Por todo ello, el rango de temperaturas más acorde es el comprendido entre 15º C y 30º C, siendo el óptimo entre 17º C y 22º C. En ninguna circunstancia es recomendable laminar con temperaturas

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

inferiores a 10º C. Cuando las condiciones no lo permitan, deberá postergarse el proceso hasta que se garanticen las condiciones mínimas de trabajo.

La segunda premisa será el control de la humedad relativa ambiente: si bien la mayoría de materiales de refuerzo no se ven afectados por la humedad, ya que son resistentes a la misma e incluso al agua (excepción de las fibras aramídicas), la humedad presente en el ambiente de trabajo, especialmente sobre los refuerzos secos, afecta la unión de éstos con resina, disminuyendo la adhesión en la interfase, y, por ende, disminuyendo la calidad del estratificado.

Deberá respetarse, como valor límite de humedad, un máximo del 75%. Si las condiciones no lo permiten, será mejor postergar el proceso hasta que dichas condiciones se cumplan. Debe también prestarse especial atención al lugar de almacenaje de los refuerzos, que deben mantenerse en lugares secos y en envoltorios cerrados.

La limpieza del sector de trabajo es fundamental ya que cualquier partícula de polvo que esté presente en el ambiente propiciará un laminado de baja calidad, con impurezas en su constitución. Debe mantenerse siempre el ambiente lo más limpio y ordenado posible, con una buena ventilación y una buena iluminación.

6.2.5 Ventajas

Las principales ventajas que hacen del método de laminado manual el más difundido podrían resumirse en:

a) Los equipos necesarios son de extrema sencillez y su coste es relativamente bajo.
b) El coste de la materia prima es reducido.
c) Dada su simplicidad no requiere mano de obra excesivamente cualificada.
d) No existen límites respecto del tamaño de pieza a producir.
e) El coste de los moldes es el más bajo entre todos los procesos de producción.
f) Es un método ideal para producciones cortas y para piezas de gran tamaño.
g) Se pueden emplear todo tipo de refuerzos y resinas.
h) Se pueden construir tanto estructuras *sandwich* como monolíticas.
i) En general no requiere de procesos térmicos posteriores.

6.2.6 Desventajas

a) Los laminados son de calidades irregulares (uniformidad, homogeneidad y tasa de porosidad).
b) El contenido de refuerzo es bajo, entre 25 y 35%.
c) Existe una fuerte dependencia de la habilidad y motivación del operario.
d) Requiere, en general, de numerosa mano de obra.
e) La productividad es baja debido a lo artesanal del proceso.
f) Los factores ambientales como temperatura y humedad pueden condicionar el proceso.
g) Provoca elevadas emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).
h) Se producen gran cantidad de desperdicios.
i) El acabado superficial sólo es bueno en la superficie que está en contacto con el molde.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

6.2.7 Conclusiones

El proceso de laminado manual es el más difundido en la industria naval por varias razones: bajo coste de equipos y de materiales; sencillez de proceso; se pueden utilizar todo tipo de resinas y estructuras textiles; no existen límites de tamaño de pieza a fabricar; y no requiere de costosos procesos térmicos posteriores para alcanzar sus máximas propiedades. Si añadimos a esto que el proceso es ideal para producciones bajas o unitarias, obtendremos un método que se adapta perfectamente a los requerimientos de la mayoría de constructores navales.

En contrapartida, los laminados resultantes no suelen ser muy homogéneos, y el contenido de refuerzo suele ser bajo. La calidad final dependerá en gran medida de la acción del hombre y de factores ambientales. Sin embargo, realizando estrictos controles durante la elaboración, la calidad se puede mejorar considerablemente.

En resumen, se deben extremar los cuidados durante las diferentes etapas del proceso y sobre las diferentes variables involucradas, a efectos de obtener laminados con propiedades físicas y mecánicas satisfactorias.

6.3 Proyección simultánea

El método de proyección simultánea fue desarrollado en Estados Unidos en la década de los cincuenta como consecuencia del auge vivido por la industria del plástico reforzado con fibras de vidrio.

Si bien todavía posee una fuerte componente artesanal, se puede decir que es una evolución del método de laminado manual en pos de una mayor productividad. Se encuentra fuertemente arraigado en los astilleros que realizan piezas de grandes dimensiones, como pesqueros y embarcaciones de pasaje de cabotaje.

6.3.1 Concepto fundamental

El proceso de proyección simultánea consiste en proyectar fibra cortada (generalmente hilos de *roving*) entre chorros de resina catalizada mediante un equipo especial de proyección, de manera que la matriz y el refuerzo se depositen 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 estratificado (Fig. 6.8).

A diferencia del laminado manual, aquí la impregnación la hace un equipo de proyección de resina; sin embargo, la etapa de consolidación todavía se realiza manualmente mediante rodillos. Esta etapa adquiere mayor relevancia que en el laminado manual, dado que el laminado obtenido inicialmente fruto de la proyección contiene en su interior una considerable cantidad de aire, que debe evacuarse mediante la presión de un rodillo o espátula.

La presión de compactación del laminado será entonces similar al laminado manual, con valores comprendidos entre 0 y 0,1 Kg. /m^2. Dicha presión se verá afectada por variables como viscosidad de

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

la resina, geometría de la pieza, posición del laminado, y por aspectos humanos relacionados con el operario, como su motivación, cansancio, etc.

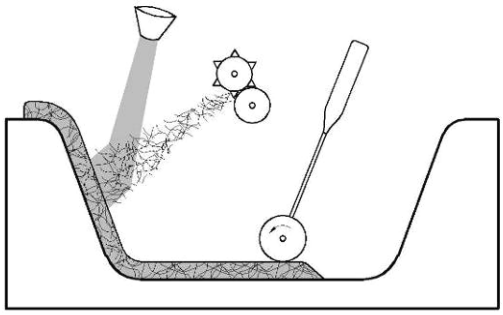


Fig. 6.8 Proyección simultánea

6.3.2 Herramientas

El equipo consiste en una pistola de proyección que es alimentada mediante una bomba con resina previamente catalizada, y un cabezal de rodillos cortadores que efectúa el corte del hilo de *roving* y lo proyecta en forma de pequeños filamentos.

Dependiendo de cómo se realiza la mezcla de resinas con sus pares catalíticos, definimos dos tipos equipos de proyección: de mezcla interna y de mezcla externa.

Los equipos de mezcla interna (Fig. 6.9) poseen dos conductos aislados por los cuales es transportada la resina: en uno, la resina se encuentra preacelerada; en el otro, la resina se encuentra precatalizada. En ningún caso la mezcla se produce al completo en el interior de los mismos, hecho que provocaría más de una obstrucción.

Una vez los materiales pasan por la boquilla de la pistola y la abandonan, las dos corrientes de material se funden junto con el aire formando un abanico, para pocos segundos después depositarse sobre la superficie del molde.

En los equipos de mezcla externa (Fig. 6.10), existen también dos conductos independientes, pero uno de ellos conduce sólo el acelerador y el otro resina preacelerada. Una vez pasan por la boquilla de la pistola y la abandonan, se mezclan formando un abanico que también se deposita sobre la superficie del molde.

La regulación del caudal de catalizador debe realizarse antes de comenzar la operación de proyección. La mayoría de equipos están dotados de bombas esclavas, es decir, de bombas de dosificación de catalizador que realizan el mismo número de bombeos que las bombas de resina de forma sincronizada. También pueden dotarse de calentadores en línea para evitar problemas ocasionados por el cambio de la viscosidad de la resina debido a las variaciones de la temperatura ambiente.

Tanto los equipos de mezcla interna como los de mezcla externa necesitan de frecuentes interrupciones para la limpieza de los conductos internos con disolvente.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

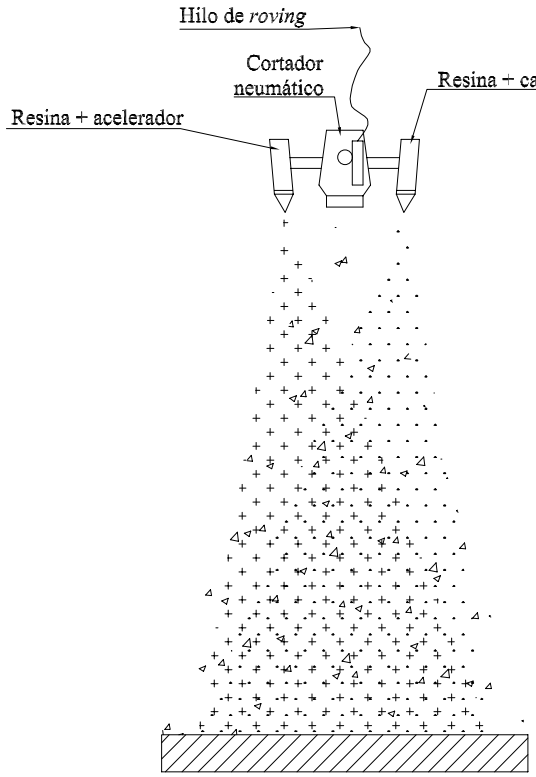


Fig. 6.9 Equipo de mezcla interna

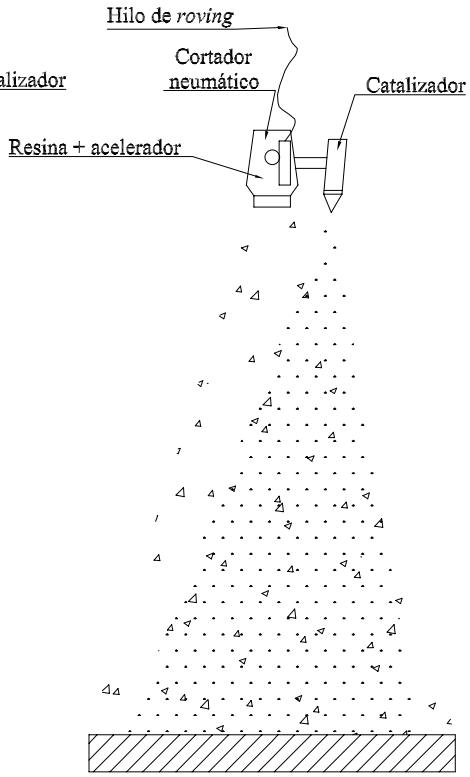


Fig. 6.10 Equipo de mezcla externa

El cabezal cortador de los hilos de *roving* posee funcionamiento neumático, y permite cortar dichos refuerzos en largos variables, comprendidos entre 20 y 50 mm. Se encuentra montado en la parte superior de la pistola de proyección de resina (Fig. 6.11) para permitir la caída de los filamentos por gravedad sobre el abanico de resina. Como el conjunto adquiere un peso elevado, generalmente se monta sobre un brazo de suspensión para facilitar la labor del operario.

Los equipos de proyección simultánea permiten proyectar tanto la resina y el refuerzo conjuntamente como la resina de manera aislada, convirtiéndose el equipo en una *saturadora*. La elección de una u otra función se realiza mediante un dispositivo situado en el lateral del cabezal (Fig. 6.11).

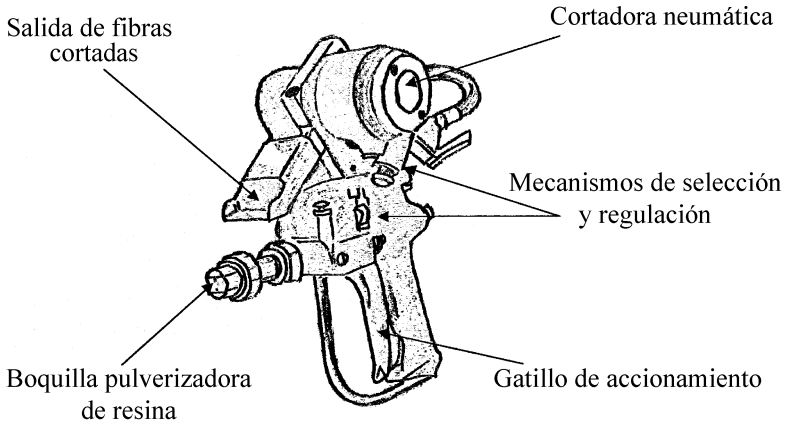


Fig. 6.11 Cabezal de proyección

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Mediante la regulación de la presión del aire se obtienen diferentes proporciones de fibra-resina. Las presiones de trabajo típicas oscilan entre 2 y 3 bar para la resina y entre 6 y 8 bar para el motor cortador. Los caudales de los equipos actuales oscilan entre 2,5 y 12 kg por minuto. Por ello, es necesario dotar al taller de una instalación neumática que produzca una presión de trabajo estable de 8 bar y un caudal entre 500 y 800 lts/minuto.

Debido a las nuevas reglamentaciones medioambientales, los fabricantes de equipos de proyección simultánea han desarrollado diferentes variantes de los equipos, como los equipos de proyección *airless*, que funcionan por presión hidráulica, los saturadores por riego y los equipos de impregnación con rodillo, con el objetivo de eliminar el aire como medio de transporte del material y así disminuir las emisiones de compuestos volátiles al ambiente.

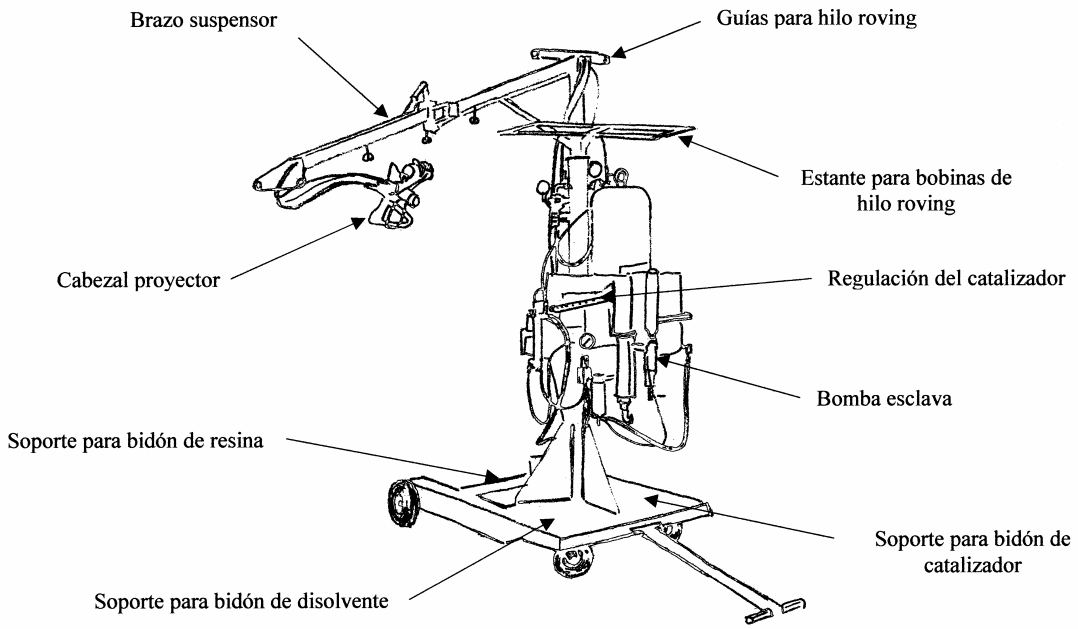


Fig. 6.12 Equipo de proyección simultánea

6.3.3 Materiales

Los equipos de proyección simultánea y de saturación permiten trabajar con todo tipo de resinas, pero son diferentes los de resinas poliéster y viniléster de los equipos fabricados para resinas especiales como las *epoxi*. Esta diferencia es una consecuencia de las distintas viscosidades y de los diferentes porcentajes de catalización.

Las viscosidades de las resinas deben encontrase en un rango entre 300 y 500 cPs, para permitir una rápida y fácil impregnación del refuerzo. También se pueden incorporar cargas y aditivos en la matriz, siempre que no modifiquen en exceso la viscosidad de la misma.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Respecto de los refuerzos, las máquinas de proyección simultánea sólo proyectan pequeños filamentos de hilos de *roving*, que una vez dispuestos sobre la pieza cumplen las funciones de fieltros. El largo de los filamentos que se proyectarán puede graduarse, pero los filamentos largos producen laminados con mejores propiedades mecánicas.

Los equipos de proyección permiten regular el contenido de refuerzo entre 20 y 50%, pero es importante resaltar que dicho porcentaje sólo afecta al material proyectado, y no al total del laminado.

El método no permite trabajar de forma directa estructuras textiles como tejidos, mallados y ensamblados, por lo que éstas deben ser colocadas sobre la superficie de la pieza manualmente, para impregnarlas con la ayuda de la pistola, que funcionará como saturadora. Dicha labor debe ser asistida por operarios que mediante rodillos produzcan el desaireado del conjunto. Son válidas las recomendaciones hechas en el apartado de laminado manual acerca de los solapes y su distribución en el laminado.

6.3.4 Ambiente de trabajo

Las condiciones ambientales deberán ser similares al proceso de laminado manual para obtener unos resultados satisfactorios.

La temperatura del local de trabajo debe estar comprendida entre 15º C y 30º C, siendo entre 17º C y 22º C la óptima. No es recomendable realizar el proceso de proyección a temperaturas inferiores de 10º C. A temperaturas elevadas, se debe prestar especial atención a los cortos tiempos de trabajo disponibles para desburbujeo, dado los elevados volúmenes de proyección, así como a los grandes espesores, que pueden provocar marcas y distorsiones por picos exotérmicos elevados.

La humedad relativa ambiente no deberá ser mayor de un 75%. Valores superiores afectan principalmente la unión fibra-resina.

El almacenaje de los materiales de refuerzo debe realizarse siguiendo las recomendaciones de sus fabricantes, y por lo general, en lugares secos, aislados del resto del taller y en envoltorios cerrados.

El ambiente debe encontrase libre de polvo e impurezas, puesto que cualquier flujo de aire procedente del proceso las pondría en suspensión, afectando a la calidad del laminado.

Debido a la naturaleza del proceso, es fundamental tener un sistema de recirculación de aire que permita una renovación constante del aire en el local de trabajo, ya que la proyección simultánea produce altas tasas de emisiones de estireno en el ambiente (en la fase dinámica cuadriplica al laminado manual).

Cuando las condiciones no lo permitan, deberá postergarse el proceso hasta que se garanticen las condiciones mínimas de trabajo.

6.3.5 Ventajas

Entre las principales ventajas del proceso de proyección simultánea podemos mencionar:

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

a) Proceso más productivo que el laminado manual (hasta un 30%).
b) El coste del refuerzo es menor (constituido generalmente por hilos *roving*).
c) Proceso ideal para producción de pocas piezas de gran tamaño o muchas de tamaño medio.
d) Se pueden aprovechar los mismos moldes que en el laminado manual.
e) Se pueden construir tanto estructuras monolíticas como *sandwich*.
f) Se realiza una optimización del material y una minimización de los desperdicios.
g) Los equipos pueden transportarse a diferentes localizaciones.
h) En general no requiere de procesos térmicos posteriores.

6.3.6 Desventajas

a) El coste del equipo de proyección simultánea es elevado.
b) La calidad del laminado es muy irregular (propiedades mecánicas, homogeneidad, uniformidad de espesores, tasa de porosidad, etc.).
c) El contenido de refuerzo es bajo (entre 20 y 30%).
d) Sólo es posible aplicar de forma directa fieltros. El resto de estructuras textiles deben colocarse de forma manual.
e) El cambio de viscosidad por variación de la temperatura genera obstrucciones en los conductos del equipo de proyección.
f) Existe una fuerte dependencia de la habilidad y motivación del operario.
g) Es necesaria numerosa mano de obra en la fase de compactación del laminado.
h) Existe dependencia de factores ambientales como la temperatura y la humedad.
i) El acabado superficial sólo es bueno por una de las caras.
j) Es necesario disponer de instalaciones especialmente adecuadas para la utilización del equipo de proyección (sistemas auxiliares y zonas aisladas).
k) Las condiciones laborales son poco satisfactorias debido a la alta tasa de compuestos orgánicos volátiles (VOC). Es el método más contaminante.
l) El mantenimiento del equipo requiere un riguroso y estricto programa.
m) El método no es idóneo para realizar piezas de pequeñas dimensiones.

6.3.7 Conclusiones

El proceso de proyección simultánea es utilizado fundamentalmente en la construcción de grandes estructuras marinas, como barcos de pasaje y pesqueros, o en embarcaciones de menor tamaño pero elevada producción, como botes y lanchas. Ello es debido a la elevada tasa de aportación de material que poseen las máquinas, así como a la automatización de una parte importante del proceso de laminado.

El método de proyección simultánea requiere de rigurosos controles para la obtención de buenos resultados. Los porcentajes de refuerzo obtenidos son similares a los del laminado manual, aunque es frecuente encontrar porcentajes menores por falta de dichos controles.

Su utilización requiere de operadores muy cualificados y de un mantenimiento constante del equipo para conseguir piezas de calidad. La frecuente falta de homogeneidad de los laminados resultantes, producida por la ausencia de alguno de estos requisitos, provoca que muchas veces dichos equipos sean infrautilizados, usados únicamente como saturadores.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las condiciones laborales derivadas de su utilización son poco satisfactorias debido a la alta tasa de compuestos orgánicos volátiles (VOC). El proceso de proyección simultánea es el proceso más contaminante de los estudiados aquí.

Podríamos concluir afirmando que el método de proyección simultánea es un método que mejora la productividad de los astilleros, sin aumentar necesariamente la calidad de los laminados, y provocando una importante emisión de compuestos orgánicos volátiles al ambiente de trabajo.

6.4 Moldeo con impregnadores

El proceso de moldeo con impregnadores es una técnica que ha sido desarrollada originariamente para satisfacer las necesidades de los constructores de grandes embarcaciones en materiales compuestos, pues requerían transformar elevados volúmenes de material con una alta velocidad de proceso.

La técnica se encuentra a mitad de camino entre los laminados manuales y los preimpregnados: los laminados son de mejor calidad, uniformidad y contenido de matriz, sin las limitaciones de utilización de estructuras textiles que presenta el método de proyección simultánea.

6.4.1 Concepto fundamental

El proceso es considerado como una evolución del laminado manual y consiste básicamente en sumergir la estructura textil en un baño de resina catalizada, para luego extraer el exceso de la misma mediante la compresión del material a través de diversos rodillos de compactación (Fig. 6.13).

El control del porcentaje de resina presente en el laminado se realiza regulando la separación de los rodillos, y puede arrojar laminados con porcentajes de fibra comprendidos entre un 35% y hasta un 55%.

Una vez realizado el proceso de impregnación, se transporta el material y se deposita sobre el molde, para luego realizarle el compactado y desburbujeo mediante la acción de rodillos o espátulas.

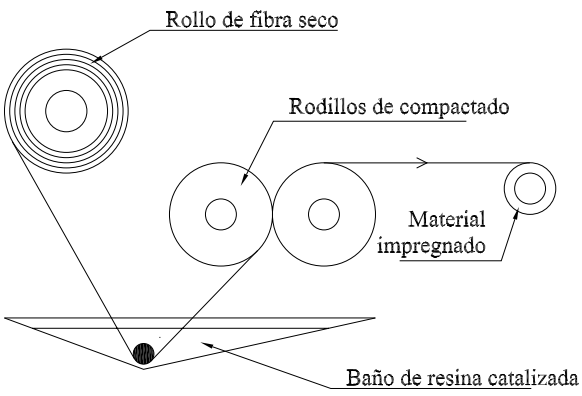


Fig. 6.13 Impregnadores

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Con este proceso se consigue mecanizar una parte importante del proceso de laminado manual, con las consabidas ventajas del caso.

6.4.2 Herramientas

Los equipos impregnadores más sofisticados están constituidos por complejos dispositivos neumáticos, eléctricos y mecánicos, razón de su elevado coste, aunque también existen equipos manuales muy simples (Fig. 6.14).

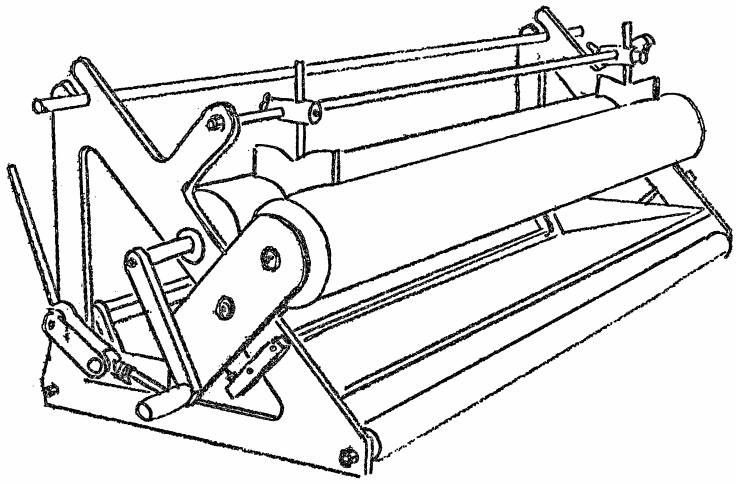


Fig. 6.14 Equipo de impregnación manual

Dependiendo fundamentalmente del tipo de estructura textil que se quiera aplicar, los equipos se encarecen, ya que a mayor espesor de material, más complejo de torna el método de impregnación.

Así, encontramos desde los más simples equipos impregnadores con dos rodillos, hasta los sistemas con múltiples rodillos que permiten al material pasar por sucesivas etapas de impregnación y compactado.

Las velocidades de suministro de material estarán condicionadas por la velocidad de impregnación del equipo, y ésta por la viscosidad de la resina y por el espesor de la estructura textil. Por ejemplo, cuando se utiliza una resina *epoxi*, el proceso de impregnado se torna más lento.

El suministro de resina puede hacerse manualmente o mediante bombas esclavas similares a las de proyección simultánea. La utilización de bombas permite modificar más fácilmente los porcentajes de catalización con menores márgenes de error.

Normalmente los equipos impregnadores permiten trabajar con anchos de tejidos estándares, es decir, desde simples cintas tejidas o unidireccionales, hasta estructuras textiles de 1.5 m de ancho.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los sistemas impregnadores se ofrecen en diferentes opciones:

a) Estacionarios: se destinan a una zona de trabajo determinada y son ideales para producciones elevadas de piezas pequeñas, pues se distribuyen los diferentes moldes alrededor del equipo impregnador.

b) Portátiles: permiten libertad de desplazamiento y flexibilidad de la producción, y se utilizan en empresas que requieren elevadas cantidades de material pero para diferentes configuraciones de geometría y tamaño de piezas.

c) Montados sobre rieles de desplazamiento (Fig. 6.15): esta configuración facilita el traslado de equipo sobre el molde que requiere ser laminado, con reducción de tiempos de transporte del material y mayor limpieza de la zona de trabajo. Constituyen equipos muy versátiles, ideales para el trabajo de grandes cascos de barcos. Poseen desplazamientos longitudinales, transversales, verticales y giros del equipo impregnador sobre su eje vertical.

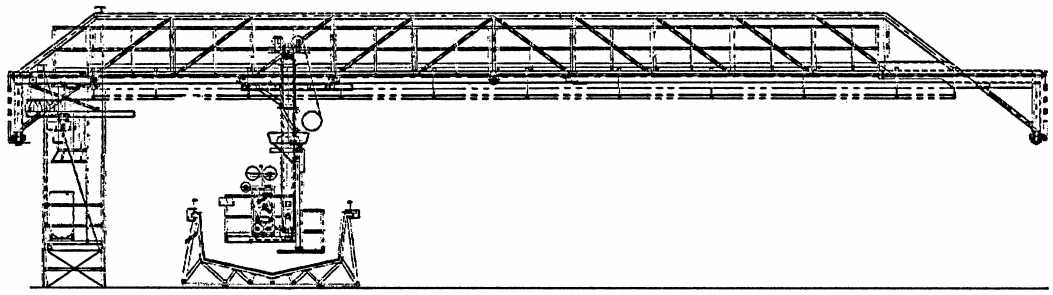


Fig. 6.15 Equipo impregnador montado sobre puente grúa

6.4.3 Materiales

A diferencia del método de proyección simultánea, el laminado con impregnadores permite trabajar con estructuras textiles de toda clase, incluyendo tejidos y ensamblados. Sin embargo, en el caso de utilizar fieltros, éstos deben ir acompañados de algún otro material que posea una estructura textil más firme, que haga las veces de soporte del fieltro, para evitar así su deformación.

Los impregnadores permiten trabajar con todos los sistemas de matrices actuales, es decir resinas poliéster, resinas viniléster, resinas *epoxi* y resinas fenólicas. Dependiendo de la viscosidad del sistema de matriz, el tiempo de vida de la resina y el espesor de la estructura textil, se pueden diseñar laminados con las más variadas características, modificando los contenidos de resina a requerimientos del fabricante.

Debido a que se pueden utilizar sistemas de resinas comunes, no es necesario el aporte de calor externo ni de presión adicional para obtener laminados de buena calidad. No obstante, y para piezas

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

que así lo requieran, se puede combinar dicho método de laminación con compactaciones mediante vacío.

6.4.4 Ambiente de trabajo

Las condiciones de trabajo deben ser similares a las de los métodos de laminado manual y proyección simultánea.

La temperatura del local debe estar comprendida entre 15º y 30º C; la temperatura óptima será entre 17º y 22º C, no siendo recomendable realizar laminados a temperaturas inferiores de 10º C; la humedad relativa ambiente no deberá exceder el 75%.

Debe siempre conservarse el ambiente de trabajo limpio de polvo y partículas, con una buena ventilación y una adecuada iluminación.

Si estas condiciones no se cumplen, lo mejor será postergar el proceso hasta que se garanticen las condiciones mínimas de trabajo.

6.4.5 Ventajas

Entre las principales ventajas que ofrece este método podemos mencionar:

a) Importantes reducciones del tiempo de trabajo (laminado realizado *in situ*).
b) Alta velocidad de fabricación de laminados (hasta 6 m lineales/minuto).
c) El método es ideal para la construcción de grandes piezas.
d) Los laminados son de mejor calidad. Contenido de refuerzo variable entre 35 y 55%.
e) Los laminados son más homogéneos (alto grado de control de las relaciones refuerzo-matriz y de porcentajes de catalización).
f) El proceso no requiere de moldes especiales, adaptándose a los existentes para otras técnicas.
g) El proceso minimiza los desperdicios.
h) Las emisiones COV dinámicas se producen en una zona delimitada, lo que facilita su control.
i) Se pueden procesar todo tipo de estructuras textiles; las matrices, sólo con la viscosidad adecuada.
j) Se pueden construir tanto estructuras monolíticas como tipo *sandwich*.
k) En general no requiere de procesos térmicos posteriores.

6.4.6 Desventajas

El método presenta también una serie de desventajas y limitaciones:

a) El coste del equipo impregnador es elevado.
b) El manejo del equipo requiere una elevada capacitación.
c) Si bien la impregnación la realiza una máquina, la distribución, compactado y desburbujeo todavía depende del operario.
d) Es necesaria numerosa mano de obra durante el proceso de compactado y desburbujeo.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

e) Existen limitaciones en cuanto al espesor máximo de la estructura textil que se quiera procesar.
f) Existen limitaciones respecto de la viscosidad de la resina que se pretenda utilizar.
g) El proceso pude verse afectado por factores ambientales.
h) El equipo requiere una limpieza minuciosa al final de cada jornada laboral y un riguroso programa de mantenimiento.
i) La implantación del método requiere generalmente modificaciones de la distribución en planta.

6.4.7 Conclusiones

Los equipos impregnadores pueden presumir de ser los únicos diseñados originariamente para la industria naval. Es fácil constatar que su finalidad es la construcción de grandes piezas de materiales compuestos. Son equipos costosos, que requieren una alta capacitación para su operación y deben seguir un riguroso programa de mantenimiento.

A pesar de ello, presentan una serie de ventajas respecto de su más directo competidor, la proyección simultánea: los laminados resultantes poseen mayor contenido de refuerzo, mayor homogeneidad de contenido y de espesores que aquéllos; es posible procesar todo tipo de estructuras textiles directamente; y las emisiones COV son menores dado que no se utiliza aire como medio de transporte de la matriz sino el propio refuerzo.

En resumen, podemos afirmar que nos encontramos ante un método que es una buena alternativa a la proyección simultánea en la fabricación de grandes estructuras marinas.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

7 Técnicas de moldeo asistidas por vacío

7.1 Introducción a las técnicas

Las técnicas de moldeo asistidas por vacío permiten conseguir materiales compuestos con mejores propiedades físicas y mecánicas que los obtenidos por las técnicas de moldeo por contacto, aunque sus costes operativos suelen ser ligeramente superiores.

Estas técnicas aprovechan una presión externa para prensar el laminado y optimizar el contenido de matriz en el material compuesto, mejorando la adhesión interlaminar entre capas y obteniendo un laminado con una densidad mayor.

Los procesos de laminado asistidos por vacío suelen ser procesos más extensos y las resinas requieren, por lo general, de curados o postcurados a altas temperaturas.

Dentro de este grupo de procesos podemos distinguir el laminado manual asistido por vacío, el laminado con preimpregnados y el laminado con preimpregandos parciales.

7.2 El vacío

El estado en el cual existe una ausencia total de presión se denomina *vacío*. Sin embargo, a efectos prácticos, se denomina vacío a los estados de presión que poseen valores inferiores a la presión atmosférica normal (1,013 bar), que es la que se utiliza como referencia (Fig. 7.11).

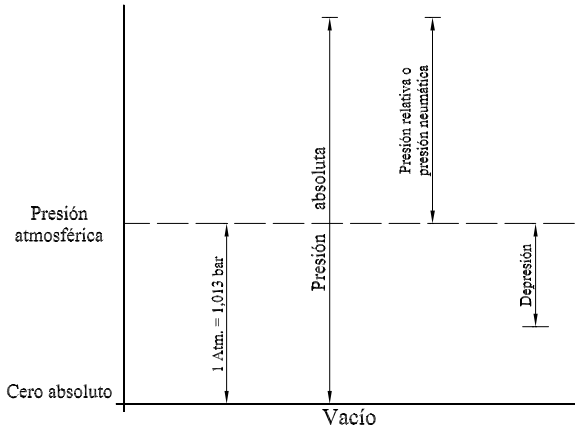


Fig. 7.1 Presiones absolutas y relativas

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

En las técnicas de moldeo asistidas por vacío se emplean depresiones que pueden alcanzar hasta -0,98 bar, medidas siempre desde la presión de referencia o atmosférica. Esto quiere decir que en dichos casos se trabaja con depresiones muy cercanas al vacío total o cero absoluto.

7.2.1 Formas de obtención del vacío

Los medios empleados para producir vacío son diversos: extractores para depresiones muy pequeñas, bombas de vacío accionadas por motores eléctricos y generadores de vacío de aire comprimido. Sin embargo, dadas las particularidades de la industria naval, nos centraremos fundamentalmente en tres tipos de artefactos: a) las bombas de paletas flexibles (supresores); b) las bombas de anillo líquido; y c) los generadores de vacío (eyectores).

Las bombas son los medios más conocidos de obtención de vacío. El trabajo de la bomba consiste en bombear gases o vapores, aspirándolos de un recipiente cerrado y expulsándolos al exterior. Cada tipo de bomba se distingue de las demás por la presión mínima que puede alcanzar (cerca del cero absoluto), presión que queda limitada por las características constructivas de la misma.

Las bombas de vacío de paletas flexibles (Fig 7.2) generan vacío mediante la utilización de un motor eléctrico convencional. Se emplean cuando son necesarios elevados caudales de aspiración.

La bomba está constituida por un rotor de 6 u 8 paletas dispuestas de forma radial, que realiza un movimiento excéntrico en el interior de un estator. Por efecto de la fuerza centrífuga, las paletas son proyectadas hacia el exterior, y se adaptan a la superficie interior del estator.

Las lumbreras de aspiración y expulsión van dispuestas en los laterales del estator; cada vez que una paleta pasa por delante del orificio de aspiración recoge una cantidad de gas, lo comprime y lo expulsa por la lumbrera de expulsión. Como existen varias paletas, casi no hay oscilaciones del flujo, siendo el caudal de aspiración continuo.

La lubricación se realiza por goteo, aprovechando la misma aspiración para que el aceite caiga.

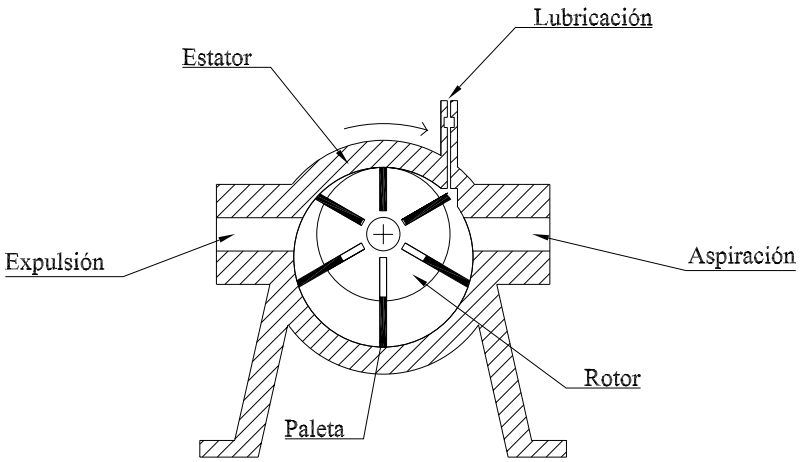


Fig. 7.2 Bomba de paletas flexibles

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Las bombas de vacío de anillo líquido (Fig. 7.3) consisten en un rodete, compuesto de varias palas, que gira excéntrico en el interior del estator; este rotor queda limitado lateralmente por dos discos denominados *de distribución* (Fig. 7.4), que son los encargados de regular la aspiración y expulsión a través de unas ranuras practicadas en los mismos.

Debido a que en el interior de la bomba hay una cierta cantidad de agua, al girar el rodete y por efecto de la fuerza centrífuga, el líquido adopta la forma de un anillo concéntrico con el estator. Entre este anillo, las palas y el núcleo del rodete o rotor, se forma una cámara, en la que tiene lugar la aspiración y posterior expulsión de gas. El proceso es continuo, ya que hay siempre palas que aspiran mientras que otras expulsan.

La principal ventaja de esta bomba estriba en que, al no existir roce entre el rotor y el estator, debido a que es el anillo de agua el que roza con ambos, no hay prácticamente desgaste entre las piezas. El mismo anillo hace de lubrificante y refrigerante. Como inconveniente principal presenta el calentamiento y evaporación del líquido, hecho que, si ocurre, disminuye la eficiencia de la bomba.

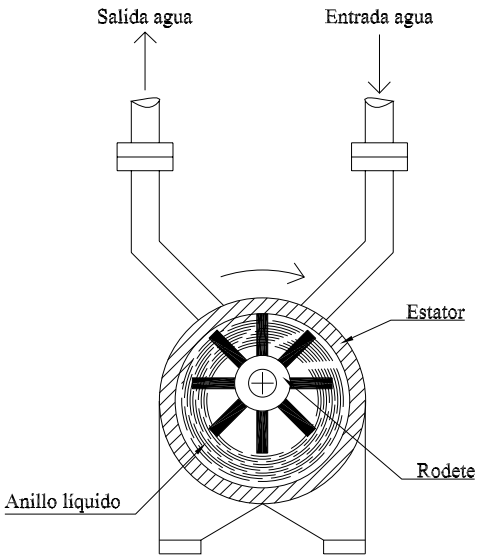


Fig. 7.3 Bomba de anillo líquido

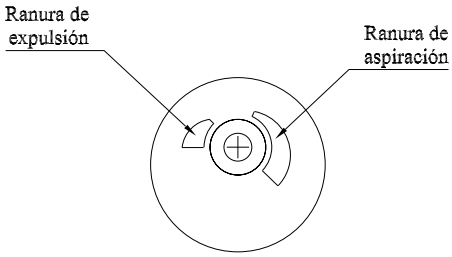


Fig. 7.4 Detalle de los discos de distribución

Tanto las bombas de paletas como las de anillo líquido utilizan motores eléctricos, por lo que resultan más costosas que otros sistemas generadores de vacío. Los rangos de capacidades de succión para estas bombas pueden oscilar entre 6 m^3/hora hasta 1600 m^3/hora.

Si los volúmenes de aire para evacuar no son excesivamente grandes ni los niveles de vacío que se busca alcanzar son demasiado elevados, se puede recurrir al uso de los generadores de vacío (c).

Los generadores de vacío (Fig. 7.5), también conocidos como *eyectores*, son elementos que producen vacío o depresión de aire y, a diferencia de las bombas, no utilizan motores eléctricos. Para su funcionamiento aprovechan el efecto físico conocido como *efecto Venturi*.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

El aire comprimido entra en el eyector procedente de la red neumática (A) (dependiendo del grado de vacío, dicha presión puede oscilar entre 1,5 bar y hasta 8 bar). Al llegar al punto (B), el aire se estrangula y aumenta considerablemente la velocidad. Ese aumento de velocidad crea una depresión en la cámara central (C) y en el conducto de vacío (D), que se aprovecha para realizar la extracción. Por último, el aire extraído sale por (E) junto con el aire a presión generador del vacío.

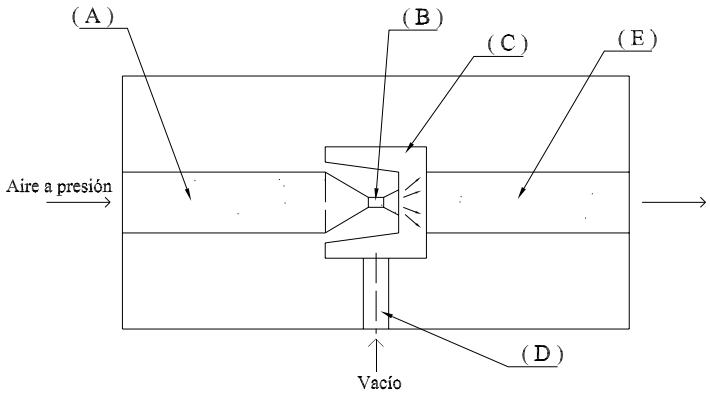


Fig. 7.5 Generador de vacío

Los generadores de vacío son elementos de pequeñas dimensiones y su instalación es sumamente sencilla. Al no disponer de partes móviles, su mantenimiento se ve drásticamente reducido. El único requisito necesario es conectarlo a una línea de aire comprimido. En contrapartida, suelen ser ruidosos, por lo que es aconsejable instalarlos en unidades aisladas de la zona de trabajo.

7.3 Moldeo por vacío - laminado manual

La técnica de laminado manual asistido por vacío consiste en crear una presión adicional sobre el laminado durante su ciclo de curado. La función principal de la técnica consiste en optimizar las relaciones refuerzo-matriz del material.

La presurización del laminado cumple además otras importantes funciones: remueve el aire atrapado entre capas; compacta las capas de refuerzo por transmisión de fuerzas, proporcionando laminados más uniformes; evita que la orientación del laminado se modifique durante el curado; y reduce la humedad.

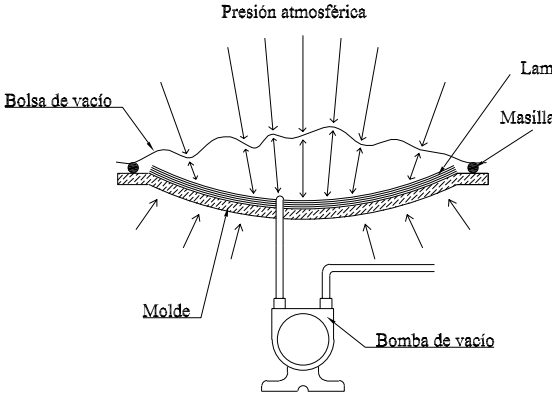
Todas estas ventajas han sido utilizadas durante años para maximizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos, tanto en campos aeronáuticos, aeroespaciales como en las industrias de componentes para competición.

7.3.1 Concepto fundamental

Este método es básicamente una extensión del método de moldeo por contacto-laminado manual, donde la presión es aplicada al laminado una vez éste se ha realizado al completo pero encontrándose la resina aún en un estado previo al de gel.

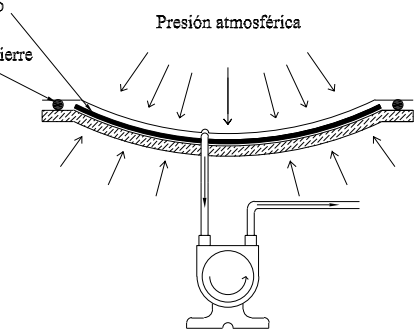
© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

La presión actuante se obtiene a través de un diferencial de presiones (Fig. 7.6 y Fig. 7.7). Se coloca sobre el laminado una membrana estanca y se procede a extraer el aire que existe en su interior, a través de un sistema de vacío. Al disminuir la presión en el interior de la bolsa, la presión atmosférica exterior actúa sobre el laminado presionándolo. En función de la capacidad del equipo de vacío y del grado de estanquidad alcanzado, obtendremos mayor presión de compactado.



Presión atmosférica	1,03 Kg/cm^2
Presión dentro de la bolsa	1,03 Kg/cm^2
Diferencial de presión	0 Kg/cm^2

Fig. 7.6 Laminado antes de aplicar vacío



Presión atmosférica	1,03 Kg/cm^2
Presión dentro de la bolsa	0,421 Kg/cm^2
Diferencial de presión	0,609 Kg/cm^2

Fig. 7.7 Laminado después de aplicar vacío

El moldeo por contacto asistido por vacío surgió como una evolución del método de laminado manual, buscando solucionar los problemas de bajos contenidos de refuerzo en su composición.

Esta antigua y sencilla técnica es hoy en día la preferida para los constructores navales que buscan estructuras sumamente livianas y con requerimientos estructurales elevados.

7.3.2 Desarrollo del método

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 disponen sobre el laminado los *materiales fungibles*, que constituyen el secreto de la técnica. 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.

Los materiales fungibles son:

a) Tejidos pelables (p*eel-plies*)
b) *Films* separadores y *films* sangradores desmoldeantes
c) Manta de absorción/aireación
d) *Film* de nylon para bolsa vacío
e) Masillas de cierre (*tacky-tape*)

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

En la figura 7.8 se puede observar la distribución correcta de los mismos sobre el laminado.

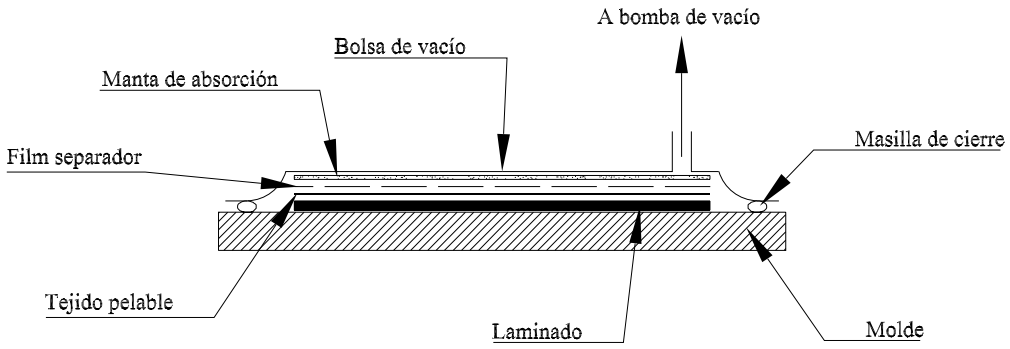


Fig. 7.8 Distribución de los materiales fungibles sobre el laminado

7.3.2.1 Tejidos pelables

Los tejidos pelables se aplican como último material en la secuencia del laminado. Están diseñados para ser extraídos de la superficie del laminado con suma facilidad, favoreciendo los procesos posteriores de adhesión secundaria, masillado o pintado, sin necesidad de abrasión mecánica previa.

Los tejidos pelables o *peel plies* son tejidos que, después de su proceso textil, son tratados para ser ofrecidos libres de impurezas, lo que permite utilizarlos en contacto directo con el laminado, sin problemas de contaminación posterior.

Constituidos normalmente de poliamidas (nylon) o fibras de poliéster, suelen dejar una superficie ligeramente rugosa, ideal para piezas que necesitan de un procesado posterior. La mayoría de los tejidos pelables de poliamidas (nylon) tienen problemas con sistemas de matrices fenólicas, debido a la emisión de agua que producen las mismas, por lo que se recomienda el uso de los tejidos de poliéster.

Dichos tejidos actúan también como protectores superficiales del laminado y se recomienda retirarlos solamente cuando sea necesario.

Suelen presentarse en diferentes formatos comerciales (en rollos o en cintas) y su peso varía entre 60 y 80 g/m^2. Poseen un hilo de color diferente que facilita su identificación sobre la pieza una vez curada. Su selección se realiza siguiendo criterios de resistencia a la temperatura.

7.3.2.2 *Films* separadores y sangradores

Los *films* separadores son utilizados para separar el laminado del resto de materiales del proceso de vacío (desmoldeante). 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.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los patrones de perforado se establecen de acuerdo con el proceso de fabricación seleccionado. El diámetro de perforado va en función del flujo de resina excedente y dependerá de: la temperatura de curado; el sistema de matriz; la viscosidad de la resina; el tiempo de trabajo; y la presión de compactación.

Todas estas consideraciones permiten seleccionar el *film* sangrador más adecuado, que permita salir al exceso de resina y de aire que haya quedado atrapado entre capas de laminado. Si su elección no se hace correctamente, se obtienen malos resultados, como laminados con alta tasa de porosidad (poca evacuación de aire, *film* sangrador con pocos agujeros) o bien laminados demasiado secos (*film* sangrador con demasiados agujeros o excesivamente grandes).

También existen *films* sangradores perforados que permiten salir solamente el flujo de gases pero restringen el paso de la resina, aunque ésta fuese de baja viscosidad.

Otras características importantes de estos *films* que podemos mencionar son: su resistencia a las altas temperaturas, su alta elongación (acorde a la elongación del *film* de la bolsa de vacío), la ausencia de contaminantes en su composición y su reducido coste.

7.3.2.3 Manta de absorción /aireación

Las mantas de absorción y aireación son tejidos sintéticos no entramados, normalmente constituidos de fibras de poliéster recicladas, razón por la cual presentan imperfecciones en su superficie.

Cumplen básicamente dos funciones: a) la de permitir circular el aire atrapado por todo el interior de la bolsa hacia algún orificio de salida; y b), la de actuar como absorbente del exceso de resina que emana por acción de la presión de consolidación.

Atendiendo a criterios de presión y temperatura de trabajo, existe una extensa gama que permite obtener tejidos resistentes a presiones de trabajo desde 1 a 14 bar, y a temperaturas de hasta 430º C.

De bajo peso (alrededor de 140 gr/m^2) y gran adaptabilidad, permiten amoldarse a formas complejas. No tienen propiedades desmoldeantes, por lo que deben ser separados del laminado mediante un tejido sangrador o película separadora perforada.

7.3.2.4 *Films* 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 de vacío anteriormente mencionados. Una vez sellado, se realiza el vacío en el interior de la membrana creada sobre el laminado para que actúe externamente la presión atmosférica.

Los criterios de selección se basan en su mayor o menor elongación, en su resistencia a temperaturas elevadas, su compatibilidad con las resinas, su resistencia al ataque de gases durante el curado y a su adaptabilidad a formas complejas.

Los *films* de vacío de nylon son higroscópicos y el contenido de humedad actúa sobre ellos como un plastificante, teniendo influencia sobre sus propiedades mecánicas. Cuando su contenido de humedad

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

es bajo, el *film* se vuelve rígido y quebradizo, y sus propiedades de alargamiento se deterioran. Por ello, es recomendable almacenarlos en salas en las cuales exista una humedad relativa mayor del 55%.

7.3.2.5 Masillas de cierre

Las masillas de cierre se utilizan para proveer una junta entre el molde y la bolsa de vacío, que asegure estanqueidad.

Constituidas de una mezcla de caucho sintético combinado con cargas inertes, plastificantes y aditivos que les proporcionan adhesividad, deben ser formuladas para que su extracción del molde sea fácil y no deje impurezas ni residuos en el mismo después del ciclo de curado.

La selección de dichas masillas se realiza en función de la temperatura de curado y la presión de trabajo.

7.3.3 Materiales

En la técnica de laminado manual asistido por vacío suelen emplearse resinas que poseen tiempos de gel longevos; esto se debe a que para poder realizar todo el proceso de laminado y compactado antes de que la resina alcance el punto de gel, es necesario bastante tiempo de trabajo.

Las resinas más utilizadas son las de *epoxi*, por dos razones básicas: a) si se buscan laminados de mejor calidad, el salto cualitativo es considerable respecto de las resinas poliéster y viniléster; b) las resinas *epoxi* suelen tener tiempos de gel bastante más extensos que las de poliéster y viniléster.

Sin embargo, si las dimensiones de la pieza lo permiten, se pueden realizar laminados por vacío con resinas de poliéster y viniléster, aunque con algunas consideraciones especiales respecto de los niveles de vacío buscados, dado que niveles elevados pueden provocar una migración masiva del monómero de estireno de las resinas, disminuyendo sus propiedades físicas y mecánicas.

Respecto de los materiales de refuerzo, se pueden utilizar todos los tipos de estructuras textiles, aunque, por lo general y dado que todo el laminado es de unión primaria, se evitan los fieltros.

Respecto de los materiales de núcleo, pueden emplearse de todo tipo, pero con consideraciones particulares para los de nido de abeja.

7.3.4 Ambiente de trabajo

Al igual que en los métodos precedentes, el local donde se realice un laminado por vacío debe cumplir con unas condiciones ambientales mínimas para garantizar el éxito del proceso.

La temperatura debe estar comprendida entre 15º y 30º C, siendo la ideal entre 17º y 22º C. No se deben realizar labores de laminado a temperaturas inferiores a 10º C.

La humedad relativa ambiente no debe sobrepasar el 75%, y se debe poner especial cuidado en el almacenaje de los materiales de refuerzo, a efecto de que no adquieran humedad (recordemos que la

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

humedad afecta básicamente a la unión con la resina).

Dado que la mayoría de resinas *epoxi* requieren procesos de curado o postcurado, será necesario dotar al local con algún sistema válido de calefacción. Cuando se produzca dicha situación se extremarán los cuidados para evitar accidentes, incendios y explosiones de productos expuestos a temperaturas elevadas.

La limpieza, el orden, una buena iluminación y una buena ventilación del sector de trabajo serán fundamentales para obtener laminados de buena calidad.

Respecto de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, la técnica de laminado manual asistida por vacío consigue reducir una parte de las emisiones; una pequeña cantidad durante la fase dinámica del proceso, justo cuando se consigue sellar el laminado mediante la bolsa de vacío, y una parte más importante durante la fase estática del proceso, al hallarse el laminado confinado en la bolsa de vacío.

7.3.5 Ventajas

Entre las ventajas más importantes que proporciona el proceso podemos citar:

a) Los laminados resultantes poseen altos porcentajes de refuerzo (40 – 55%).
b) La densidad del laminado es mayor y la tasa de porosidad, menor.
c) La impregnación de las fibras se realiza de manera mejor.
d) No existe límite de tamaño de pieza a realizar.
e) Se pueden emplear todo tipo de estructuras textiles.
f) Se pueden realizar tanto estructuras *sandwich* como monolíticas.
g) Se produce una importante reducción de emisiones COV durante el curado (fase estática).

7.3.6 Desventajas

Sin embargo, el proceso también tiene una serie de inconvenientes:

a) El coste del proceso se ve incrementado por la necesidad de equipos auxiliares.
b) Existe un coste adicional por la utilización de los materiales fungibles.
c) Los procesos de laminado son más extensos. La productividad es menor.
d) El proceso requiere una cualificación mayor por parte de los operarios. Durante el laminado es necesaria mano de obra extra.
e) Las resinas deben poseer tiempos de gel largos. Las mezclas son aún realizadas por el hombre.
f) Pueden aparecer zonas gelificadas antes de terminar de realizar el laminado o el compactado.
g) Los desperdicios pueden verse aumentados dadas las particularidades del proceso.
h) Los moldes deben ser especialmente concebidos, o modificados los existentes, para asegurar estanqueidad y resistencia térmica.
i) La humedad y la temperatura pueden condicionar el proceso.
j) Una excesiva evacuación del estireno (resinas poliéster y viniléster) puede provocar descenso de propiedades finales del laminado.
k) Las resinas utilizadas requieren, en general, procesos térmicos posteriores.
l) Las superficies sólo presentan una cara con buen acabado superficial, aunque el lado interior presenta un aspecto mucho mejor comparado con el de otros procesos.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

7.3.7 Conclusiones

El proceso de laminado manual asistido por vacío se utiliza en la construcción de embarcaciones que persiguen mejorar las propiedades mecánicas del laminado con una importante reducción de peso. Se emplea en la construcción de embarcaciones de competición, de defensa, en embarcaciones con fines específicos, así como técnica auxiliar en la adhesión de núcleos en estructuras *sandwich*.

La calidad de los laminados resultantes es mayor que la obtenida por cualquier método de moldeo por contacto. No tiene limitaciones respecto del tamaño de pieza a realizar, los materiales empleados son de uso frecuente, y las emisiones COV se ven reducidas especialmente durante la fase estática de curado.

En contrapartida, el proceso de elaboración del laminado es más extenso y su coste ligeramente superior (no se arriba, sin embargo, a los elevados costes de la construcción con preimpregnados), y la técnica requiere de profundo conocimiento de la misma para garantizar buenos resultados.

En virtud de que el proceso ofrece laminados de buena calidad a un coste moderado, podemos considerarlo como un proceso de fabricación sumamente equilibrado.

7.4 Laminado de preimpregnados

Los materiales compuestos preimpregnados (conocidos también como *prepegs*) fueron desarrollados originariamente para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales que requerían un material con un elevado contenido de refuerzo y una buena uniformidad del contenido de resina en su composición.

Aunque en el sector naval actualmente sólo se construyen embarcaciones de altas prestaciones, debido al elevado coste del material, se cree que en los próximos años su utilización será mas frecuente en embarcaciones de producción, a medida que se descubran otras aplicaciones industriales para dichos materiales que permitan reducir sus elevados costes de elaboración.

7.4.1 Concepto fundamental

La técnica del moldeo con preimpregnados permite separar los procesos de preparación de los de moldeado. De esta manera, con las piezas cortadas previamente, la colocación de las capas de material sobre el molde es más sencilla, lo que permite disponerlas en su correcta orientación y con la posibilidad de rectificar si procede.

El laminado de preimpregnados se realiza disponiendo sobre un molde las diferentes capas de estructuras textiles preimpregnadas, previamente descongeladas. Cuando la cantidad de capas o los espesores de las mismas sean importantes (más de 1000 gr./m^2), se debe proceder a realizar compactados intermedios mediante vacío, a efectos de eliminar el aire que puede quedar atrapado entre capas.

Una vez finalizado el laminado, la pieza alojada en su molde debe ser sometida a un aumento programado de presión y temperatura para que se produzca el curado final de la misma (Fig. 7.9).

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

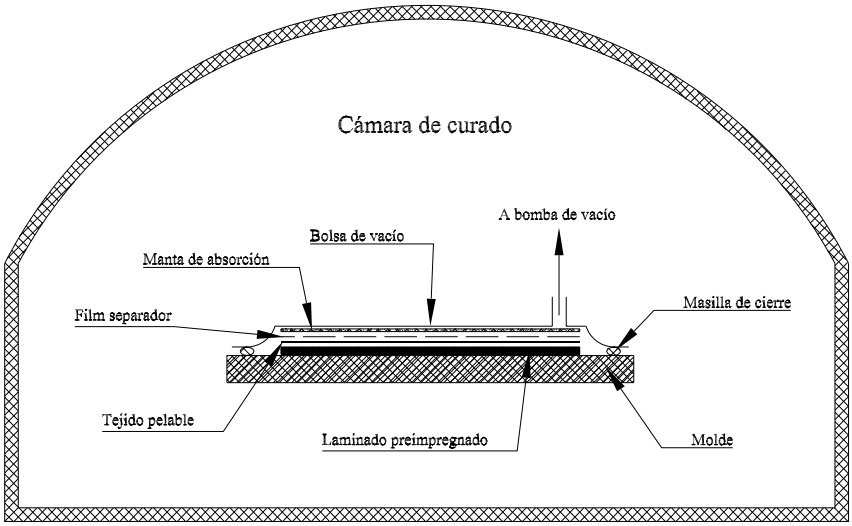


Fig. 7.9 Laminado de preimpregnados

La temperatura de curado final y la presión de compactado estarán en función del tipo de preimpregnado seleccionado. Si las presiones son bajas (hasta -0,98 bar), se recurre generalmente a la técnica de vacío; si las presiones necesarias son elevadas, se recurre al uso de prensas o autoclaves.

En piezas de geometría compleja, el uso de autoclaves garantiza elevadas presiones hidrostáticas de compactación sobre la totalidad de su superficie.

En el caso de la industria naval, dadas las grandes dimensiones y especial geometría de las piezas, se suelen procesar casi exclusivamente con la ayuda de sistemas de vacío.

Como resultado del proceso se obtienen materiales compuestos de una calidad muy superior a la técnica de laminado por contacto asistida por vacío y a las técnicas de moldeo por contacto.

7.4.2 Materiales

Elaboración del preimpregnado

Los materiales preimpregnados son estructuras textiles impregnadas con resinas reactivas, listas para ser utilizadas, a las cuales se les ralentiza el proceso de reticulación almacenándolas a bajas temperaturas.

La impregnación de las fibras se realiza mediante máquinas impregnadoras que aseguran unos porcentajes de fibra-resina muy elevados y precisos, mezclas muy homogéneas, y una excelente uniformidad del impregnado.

En función de la matriz utilizada existen diversos métodos de elaboración del preimpregnado. Las resinas más utilizadas son las resinas *epoxi* y las resinas fenólicas. El aspecto básico es el manejo de la viscosidad de la resina.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Este manejo se puede realizar por adición de disolventes o bien por calentamiento de las mismas. En cualquiera de los dos casos, se busca disminuir la viscosidad de la resina para facilitar el impregnado de la estructura textil, así como reducir la presencia de burbujas de aire debida a la elevada viscosidad de la matriz.

La reducción de la viscosidad por adición de disolventes es un proceso complejo, debido a que una vez concluido el impregnado de las estructuras textiles dichos disolventes son extraídos y recuperados. En la reducción de la viscosidad por calentamiento de la matriz no es necesaria la fase de extracción.

Una vez impregnados los refuerzos, y para evitar la destilación de la matriz, se deja avanzar la reticulación de la misma, de esta manera aumenta su viscosidad, y se obtiene un material intermedio.

Finalmente se reducen las temperaturas del conjunto, a efecto de retardar el ciclo de curado de la resina catalizada (temperaturas entre -10º y -20º C).

Los materiales preimpregnados poseen un tiempo de vida relativamente corto. Por esta razón, su almacenaje se realiza bajo refrigeración, para retrasar la reacción de reticulación que se ha iniciado en el momento de impregnarlos. Los tiempos de vida varían de acuerdo con la matriz utilizada, y pueden ser de entre 10 y 60 días sin congelación, y de hasta 6 meses a temperaturas bajo cero.

Tipos de preimpregnados

Dependiendo de la temperatura de curado, podemos diferenciar tres clases de preimpregnados:

a) Preimpregnados de alta temperatura
b) Preimpregnados de media temperatura
c) Preimpregnados de baja temperatura

Los preimpregnados que curan a altas temperaturas son los que poseen las mejores propiedades físicas y mecánicas. Su temperatura de curado es alrededor de 180º C y estos preimpregnados se utilizan fundamentalmente en construcciones aeroespaciales.

Los preimpregnados de media temperatura son la gama comercial más amplia, ya que poseen temperaturas de curado cercanas a 120º C y se utilizan en variedad de piezas industriales.

Los preimpregnados de baja temperatura poseen temperaturas de curado que oscilan entre 60º C y 120º C, y se encuentran entre los más utilizados en el sector naval debido a que el tamaño de las piezas a construir condiciona el tamaño del horno de curado.

Ciclo de curado

Un aspecto vital para conseguir buenos resultados en la utilización de materiales preimpregnados es su ciclo de curado (Fig. 7.10). Partiendo de que la viscosidad de la resina se modifica con la temperatura, debemos atender con precisión al ciclo de curado que nos especifica el fabricante del material. Dicho ciclo o rampa térmica establece las características óptimas de flujo de resina. Si dicha rampa térmica no se cumple, podemos encontrarnos ante graves problemas. Si la velocidad con que aumenta la temperatura es menor a la especificada, pueden presentarse problemas de refuerzos secos por excesivo

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

flujo de resina. Si dicha velocidad fuese mayor a la especificada, podrían presentarse zonas resecas o con contenido de aire, fruto de un curado anticipado que no permite el flujo de la resina.

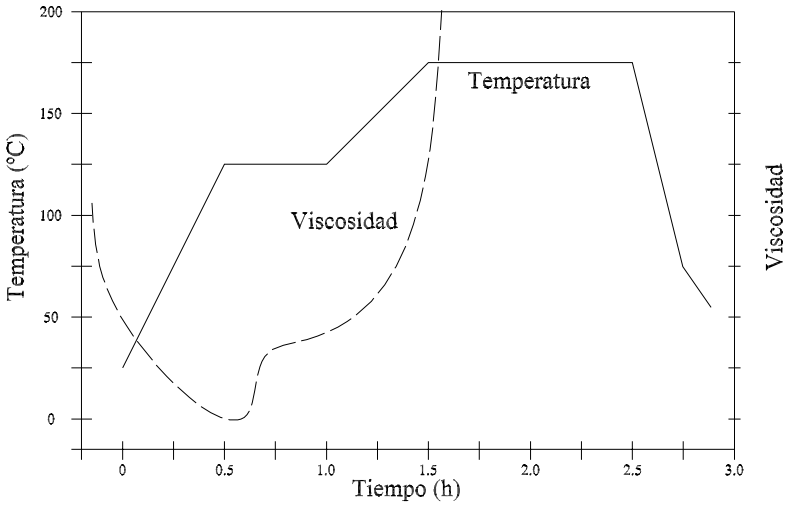


Fig. 7.10 Ciclo de curado de un preimpregnado

Almacenaje y manipulación de preimpregnados

El almacenaje de los preimpregnados se debe realizar en cámaras frigoríficas, donde la temperatura sea cercana a los –15º C. Debe evitarse su exposición a los rayos ultravioletas y se debe seguir un riguroso control de las salidas del material del congelador, a efectos de poder establecer la fecha de caducidad del mismo con exactitud.

Para su correcto procesado, los materiales preimpregnados deben descongelarse lentamente, hasta que alcancen la temperatura ideal de trabajo, entre 15º y 30º C. En este rango de temperaturas presentan poca rigidez y especial adhesividad.

En la fase de descongelación es sumamente importante evitar que el preimpregnado adquiera humedad (hecho que afectaría a la calidad de la pieza), razón por la que debe conservarse en su envoltorio original y en posición horizontal, para evitar el escurrimiento de la matriz.

El corte de los materiales preimpregnados puede ser: corte manual y corte mecánico. El corte manual se realiza mediante tijeras o simples cuchillas. El corte mecánico se realiza mediante cortadoras de cuchillas de control numérico; los sistemas de corte por láser y chorro de agua no son aptos para cortar los preimpregnados. El corte por láser acelera la reticulación de la resina por la línea de corte, y el chorro de agua aporta humedad al material, con las consabidas pérdidas de propiedades del mismo. Los métodos de corte mecánicos permiten una optimización del material, reduciendo los desperdicios.

Materiales fungibles

Para que el proceso de trabajo con preimpregnados resulte exitoso, es necesario utilizar los materiales fungibles, descritos en las técnicas de laminado manual asistido por vacío, de manera análoga, aunque

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

los criterios de selección de dichos materiales son ligeramente diferentes dado que las temperaturas de curado y las presiones de compactado resultan ser más elevadas.

Materiales de núcleo

Los materiales de núcleo que se utilizarán deberán ser seleccionados según criterios de resistencia y estabilidad térmica, así como de resistencia a la presión. Son aptos la mayoría de materiales de núcleo, a excepción del Coremat®.

7.4.3 Ambiente de trabajo

Las condiciones ambientales de trabajo con materiales preimpregnados son similares a las necesarias para otros procesos de fabricación, aunque debe prestarse especial atención al control de temperatura, debido a que para una correcta manipulación y procesado de los preimpregnados, el ambiente de trabajo debe encontrarse entre 15º y 30º C. A temperaturas inferiores de 15º C resulta casi imposible manipular dichos materiales por su excesiva rigidez, o lo que es lo mismo, por su elevada viscosidad. A temperaturas superiores a 30º C resulta sumamente laborioso trabajarlos por su exceso de adhesividad.

7.4.4 Ventajas

Las ventajas que ofrecen los materiales preimpregnados son muchas, entre las que podemos destacar:

a) Los laminados resultantes son de óptima calidad; los preimpregnados se presentan con elevados porcentajes de refuerzo en su composición (hasta un 65-70%).
b) Los porcentajes de refuerzo son muy precisos en todo el material y la composición de la matriz es completamente homogénea. La tasa de porosidad es reducida.
c) Los extensos tiempos de gel (mientras no se curan) permiten organizar mejor el trabajo de laminado y compactación.
d) La manipulación del material es sumamente sencilla y limpia. Las condiciones de trabajo mejoran notablemente y las emisiones COV se reducen al mínimo.
e) Dado que el material que no se utiliza se puede volver a almacenar, los desperdicios se reducen notablemente.
f) Existe la posibilidad de rectificar los laminados tantas veces como sea necesario antes de que se produzca el curado definitivo.
g) Debido a los rigurosos controles que exige el proceso es más fácil identificar posibles fallos.
h) Se pueden realizar tanto estructuras *sandwich* como monolíticas.

7.4.5 Desventajas

a) El coste de los materiales preimpregnados es notoriamente superior al de los materiales compuestos tradicionales. Debe sumarse también el coste de los materiales fungibles.
b) La infraestructura necesaria requiere de sistemas de vacío, hornos, autoclaves, congeladores, etc.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

c) Para que los preimpregnados alcancen las máximas propiedades físicas y mecánicas es necesario realizar un proceso de curado a alta temperatura.
d) Los operarios que intervienen en el proceso deben poseer una alta cualificación.
e) La productividad es menor que en otro métodos.
f) Los materiales preimpregnados sólo se encuentran disponibles en forma de resinas *epoxi*, fenólicas y, en menor medida, viniléster.
g) Es imprescindible, para garantizar buenos resultados, realizar compactados previos antes del curado final.
h) Los moldes deben ser concebidos especialmente para el proceso (criterios de presión y temperatura, monitorización y control, recirculación de aire, etc.).
i) El tamaño de las piezas se ve condicionado por el tamaño del horno de curado.
j) El buen acabado superficial continua siendo sólo posible por una de las dos caras.
k) Existen mayores gastos de gestión para el control y seguimiento del material.
l) Generalmente se necesita de una distribución en planta específica, con zonas acotadas como laminado, compactado, corte, mecanizado, etc.

7.4.6 Conclusiones

El proceso de laminado con preimpregnados se utiliza en todas aquellas estructuras navales que requieren las cotas de calidad más elevadas. Se construyen así embarcaciones de regatas, de alta velocidad, de defensa, e innumerables componentes destinados al sector.

Su empleo en la construcción de embarcaciones es reciente, sin embargo, es muy común en la construcción de piezas aeronáuticas y espaciales.

Las ventajas que ofrece el proceso son muchas: los laminados poseen las mejores propiedades físicas y mecánicas; el planteamiento de trabajo es radicalmente diferente a otros métodos, pues se separan los procesos de preparación de los de curado; la manipulación de materiales es sencilla y limpia; y las emisiones COV se reducen a mínimos.

En contrapartida, su principal inconveniente es el precio del material y el coste de los equipos y de la infraestructura necesaria para el proceso, hecho que limita su utilización a productos muy específicos.

El empleo de fibras preimpregnadas en la construcción de embarcaciones es considerado como el máximo exponente de calidad en laminados.

7.5 Preimpregnados parciales

Considerados también como preimpregnados de segunda generación, la ventaja principal de los preimpregnados parciales respecto de los preimpregnados clásicos radica en que no es necesario realizar las compactaciones intermedias cada determinado número de capas de material.

Sin duda, esta interesante peculiaridad se traduce en una importante reducción del tiempo de proceso, sin renunciar por ello a características físicas y mecánicas similares a los preimpregandos tradicionales.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

7.5.1 Concepto fundamental

En esencia, los preimpregnados parciales son muy similares a los preimpregnados clásicos. Las resinas y las estructuras textiles que se utilizan en su confección sólo tienen pequeñas modificaciones respecto de las utilizadas en los preimpregnados tradicionales.

La diferencia fundamental respecto aquéllos se basa en que las fibras son impregnadas sólo parcialmente, mediante un impregnado selectivo o películas de resina preimpregnada (Fig. 7.11 y Fig. 7.12). 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 se somete al material al proceso de curado, la resina impregna las zonas secas del refuerzo. De esta manera, no se hacen necesarios los costosos compactados intermedios que caracterizan a los preimpregnados tradicionales, lo que reduce sustancialmente los tiempos de proceso.

Esta particular característica de los preimpregnados parciales permite, pues, realizar estructuras laminadas de diferentes espesores de una sola vez (*one-shot*), sin necesidad de plantear el laminado como etapas parciales de un laminado global.

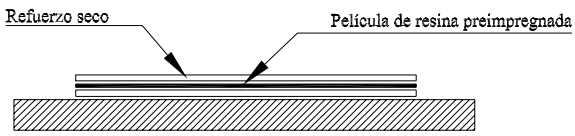


Fig. 7.11 Preimpregnado parcial por película de resina

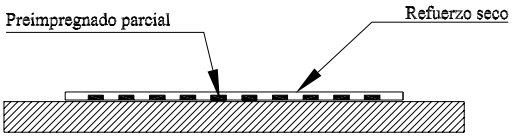


Fig. 7.12 Preimpregnado parcial selectivo

Si bien se puede disponer de casi todo tipo de estructuras textiles, en lo referente a matrices solamente se encuentran disponibles en resinas *epoxi*. Respecto a los materiales de núcleo, éstos deben ser capaces de soportar las temperaturas a las que serán expuestos durante el proceso de curado.

Respecto a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, no existe emisión ni en la fase de laminado ni en la fase de curado, ya que el laminado se encuentra confinado en una bolsa cerrada.

Las condiciones ambientales para el proceso son similares a las necesarias para los materiales preimpregnados. La temperatura del local debe situarse próxima a los 18º C para manipular fácilmente los materiales; a menor temperatura se produce un exceso de rigidez del material, y a temperaturas mayores de 25º C, la adhesividad del mismo convierten al proceso en inviable.

7.5.2 Ventajas

Los preimpregnados parciales presentan muchas similitudes respecto de los preimpregnados clásicos, pero también algunas ventajas respecto de aquéllos:

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

a) La calidad del laminado resultante es similar a la de los preimpregnados; se presenta con elevados porcentajes de refuerzo en su composición (hasta un 60 -65%).
b) Su coste es sensiblemente inferior al de los preimpregnados.
c) A diferencia de aquéllos, no es necesario realizar compactados intermedios, con lo cual se ven notablemente reducidos los tiempos de proceso comparado con los preimpregnados clásicos.
d) Al reducir las etapas de proceso, el coste en materiales fungibles es menor.
e) Los porcentajes de refuerzo son muy precisos en todo el material y la composición de la matriz es completamente homogénea. Poseen un bajo contenido de aire en su composición una vez procesados.
f) Los extensos tiempos de gel permiten organizar mejor el trabajo de laminado y compactación.
g) La manipulación del material es sencilla y limpia. Las condiciones de trabajo mejoran notablemente y las emisiones COV se reducen al mínimo.
h) Dado que el material que no se utiliza se puede volver a almacenar, los desperdicios se reducen notablemente.
i) Debido a los rigurosos controles que exige el proceso es más fácil identificar posibles fallos.
j) Se pueden realizar tanto estructuras *sandwich* como monolíticas.

7.5.3 Desventajas

a) El coste del material es notablemente superior al de los materiales compuestos tradicionales. Debe sumarse también el coste de los materiales fungibles.
b) Existe riesgo de que aparezcan defectos superficiales.
c) Son necesarios equipos y una infraestructura específica, como sistemas de vacío, hornos, autoclaves, congeladores, zonas de laminado, etc.
d) Es necesario realizar procesos de curado para que adquieran sus propiedades físicas y mecánicas.
e) Los operarios que intervienen en el proceso deben poseer una alta cualificación.
f) La productividad es menor que en otro métodos, aunque mayor que en el trabajo con preimpregnados clásicos.
g) Los preimpregnados parciales se encuentran disponibles hasta el momento sólo impregnados en resinas *epoxi*.
h) Los moldes deben ser concebidos especialmente para el proceso (criterios de presión y temperatura, monitorización y control, recirculación de aire, etc.).
i) El tamaño de las piezas se ve condicionado por el tamaño del horno de curado.
j) El buen acabado superficial continua siendo sólo posible por una de las dos caras.
k) Existen mayores gastos de gestión para el control y seguimiento del material.
l) El proceso se considera aún en fase de desarrollo, especialmente para el sector naval.

7.5.4 Conclusiones

Si bien es un proceso relativamente nuevo y en fase de desarrollo, los preimpregnados parciales permiten acceder a niveles de calidad similares a los materiales preimpregnados clásicos pero con unos costes más razonables para el constructor naval.

Se utilizan en la construcción de pequeñas series de embarcaciones con alto valor añadido, especialmente veleros de crucero y motoras de alta velocidad.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los laminados resultantes son de buena calidad, con elevados porcentajes de refuerzo, lo que se suma a una importante reducción de los tiempos de proceso comparado con los preimpregnados clásicos, debido a la ausencia de los compactados intermedios.

Como principales desventajas podemos señalar el elevado coste de equipos e infraestructuras, similarmente a los preimpregnados tradicionales, así como la posible aparición de fallos superficiales.

El proceso de fabricación de laminados con preimpregnados parciales es un proceso sumamente atractivo y ocupará un lugar destacado en la construcción de embarcaciones en los próximos años.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

8 Técnicas de moldeo por vía líquida

8.1 Introducción a las técnicas

Las técnicas de moldeo de materiales compuestos por vía líquida se fundamentan en que la resina y las fibras de refuerzo entran en contacto entre sí por primera vez en el interior de un molde cerrado; se colocan las fibras secas, y una vez cerrado el molde, por medio de diferentes mecanismos, se introduce resina catalizada en su interior. La presión de compactación se consigue mediante la utilización de contramoldes rígidos o la utilización de la técnica auxiliar de vacío.

Dentro de este grupo de técnicas podemos distinguir las técnicas de transferencia de resina (RTM) y la técnica de infusión.

8.2 RTM

8.2.1 Concepto fundamental

Las siglas RTM significan moldeo por transferencia de resina (*Resin Transfer Molding*). La técnica nace en la década de los cuarenta, pero no es hasta los años setenta que alcanza su madurez, impulsada por las industrias automovilísticas y aeronáuticas.

El proceso RTM es considerado como un proceso de molde cerrado de baja presión. En dicho proceso, se colocan los refuerzos de fibra secos en el interior de un molde, y una vez cerrado y bajo presión, se inyecta o transfiere resina catalizada al interior del mismo. Para reducir el tiempo de curado de las piezas se puede someter al conjunto a una elevación programada de la temperatura.

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. Esto obliga a que los moldes sean muy robustos, así que se construyen en la mayoría de casos con metales como acero, aluminio o cobre, o bien materiales moldeados en masa, como la resina *epoxi*.

La evacuación del aire interior se realiza mediante drenajes colocados estratégicamente o mediante la ayuda auxiliar de la técnica de vacío.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

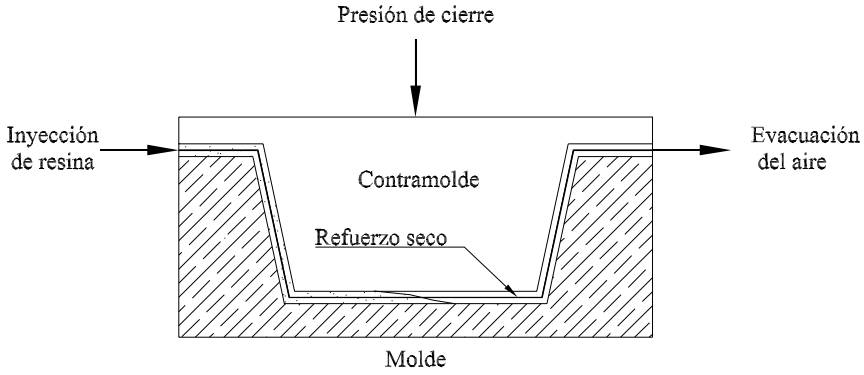


Fig. 8.1 Concepto RTM

8.2.2 Herramientas

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

a) Sistema de inyección de resina
b) Moldes especialmente diseñados para el proceso
c) Sistema de vacío
d) Equipos auxiliares para preparación y corte de refuerzos secos
e) Equipos y zonas para mecanizado de piezas
f) Cabinas de proyección de *gelcoat*
g) Zona de polimerización

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 aseguren en todo momento un control preciso (Fig. 8.2).

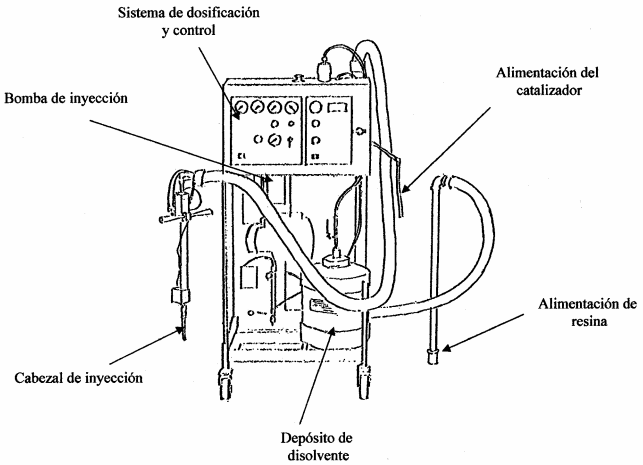


Fig. 8.2 Equipo RTM portátil

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los moldes de producción para RTM requieren de una serie de características que se deben tener en consideración durante su etapa de diseño, como: los materiales de construcción, la calidad de las superficies, la resistencia térmica, los controles de temperatura, la resistencia a la presión de inyección y cierre, el material aislante, el número y distribución de puntos de inyección, la cantidad y distribución de orificios de salida de aire, el mecanismo de cierre y desmoldeo de la pieza, el sellado, la expectativa del vida, etc.

Para series importantes, 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 resina más allá de los límites de la pieza; para ello, los molde 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

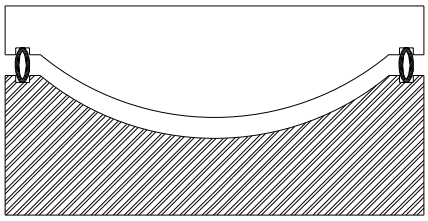


Fig. 8.3 Sellado con junta de elastómero

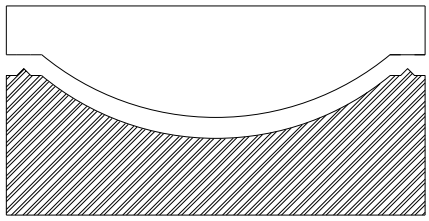


Fig. 8.4 Sellado con anillo de apriete

El vacío necesario para el proceso puede ser cubierto por una instalación fija con una red de distribución del vacío en las diferentes zonas de trabajo. Las conexiones de los moldes a la red se realizan mediante tomas rápidas, lo que permite flexibilidad a la línea de producción.

Los equipos auxiliares de corte consisten en mesas y plantillas de corte, lugar de almacenaje para preformas, así como todas las herramientas necesarias para realizar dicha labor.

Los equipos de mecanizado incluyen todas las herramientas necesarias para las operaciones de corte, perfilado y pulido de las piezas. Estas tareas deben ser realizadas en una zona destinada exclusivamente para tal fin.

En la distribución de las diferentes zonas de trabajo deben existir también cabinas para la proyección de *gelcoat* y zonas específicas de polimerización, espacios que deben ser especialmente adaptados mediante sistemas de extracción, filtrado y renovación del aire.

8.2.3 Materiales

Las resinas que se utilizan para los procesos RTM deben poseer viscosidades bajas (entre 80 y 250 cPs a 25º C). La razón de esta característica es permitir un fácil bombeado de las mismas y asegurar una

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

buena impregnación de los refuerzos. No obstante, la viscosidad óptima dependerá del tipo y volumen de fibra, el tiempo de gel de la resina y de si los moldes poseen control de temperatura o no.

Las resinas deben además poseer una exotermia baja para evitar problemas durante el proceso de moldeo como contracciones, deformaciones y marcados en la superficie de la pieza, y permitir también una conservación mejor de los moldes.

La reactividad de las resinas debe permitir unos tiempos de gel suficientemente largos para garantizar el llenado completo del molde, sin renunciar a una buena polimerización.

Existe un amplio rango de resinas aptas para ser utilizadas en RTM: *epoxi*es, uretanos, poliéster iso y ortoftálicos así como resinas viniléster. Dada esta amplia variedad de resinas, es común que los equipos de RTM sean muy versátiles en cuanto a los porcentajes de catalización y viscosidades de trabajo.

También se pueden incorporar cargas y aditivos a las resinas, con lo que se pueden obtener resinas con diferentes características como reducción de costes, mejora de acabados superficiales, reducción de las contracciones, resistencia al fuego, etc. La cantidad de carga es variable, pero pueden alcanzar el 50% y deben seleccionarse según criterios de calidad, cantidad y granulometría. El tamaño de las partículas tendrá una influencia directa en los patrones de flujo de la resina.

Respecto de los refuerzos, los más utilizados son los fieltros (*mats*) de hilos continuos, hilos de fibra de vidrio cortados, fieltros de superficies (velos) así como también estructuras textiles en forma de tejidos (*rovings*). Las características sobresalientes de los materiales deben ser: buena velocidad de flujo de resina durante la impregnación y buena adaptabilidad de formas a superficies complejas.

En la actualidad existe gran variedad de productos de refuerzo que permiten mejorar la productividad de los procesos RTM, como las preformas y estructuras textiles con ligantes termoplásticos que le permiten termoconformarse para adaptarse mejor a las formas de la pieza.

Dependiendo del tipo de refuerzo y resina utilizados en el proceso, mediante la técnica RTM se pueden obtener porcentajes de fibra-resina que varían entre un 25/75% y hasta un 50/50%.

8.2.4 El proceso

Los procesos de RTM son muy flexibles en relación con la elección de los materiales que se utilizarán y respecto de las formas geométricas que se pueden obtener. El proceso de fabricación de una pieza comprende cinco fases bien diferenciadas (Fig. 8.5):

1. Colocación del refuerzo
2. Cierre del molde
3. Inyección de la resina con el molde cerrado
4. Curado o reticulado de la pieza
5. Desmoldeo

El refuerzo debe ser preparado previamente. El preparado consiste en el corte de las fibras de refuerzo, bien sean fieltros o bien tejidos, acorde con las formas de la pieza y de acuerdo con la orientación que

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

se le quiera dar. También existen las preformas, aunque su elevado coste inicial sólo hacen justificable su uso en grandes series.

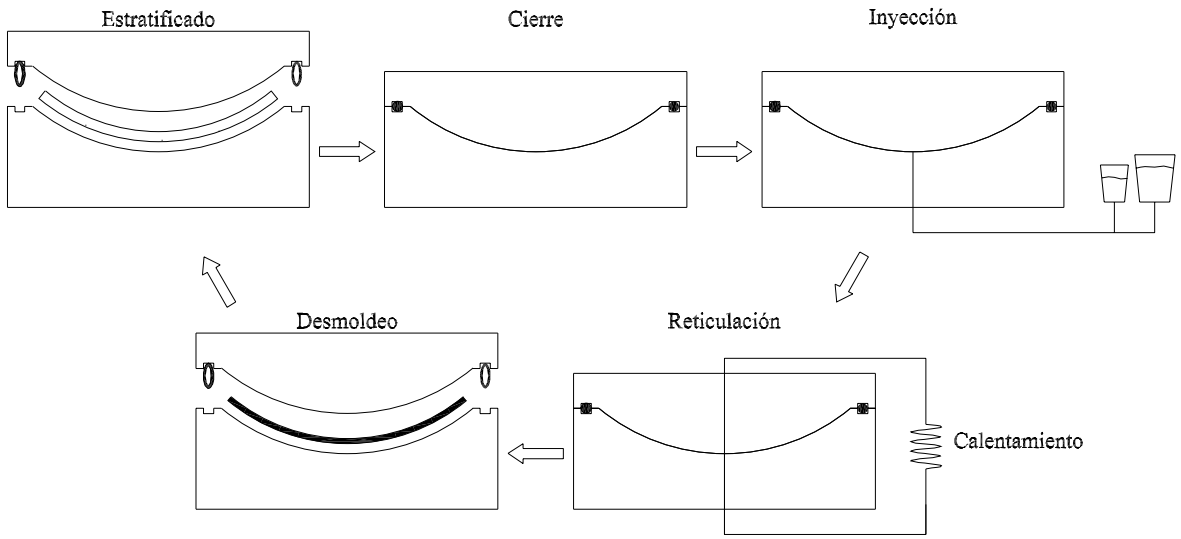


Fig. 8.5

Una vez cortadas las fibras se disponen sobre una de las partes del molde abierto, que ha sido previamente pintada con *gelcoat* (si cabe); con todas las pieles dispuestas sobre el molde, se procede a cerrar el molde. En esta etapa se pueden realizar insertos en las piezas, pero deben tenerse en cuenta de antemano, durante la etapa de diseño de los moldes.

Una vez cerrado el molde, se procede a transferir la resina catalizada en el interior del mismo, conjuntamente con los aditivos y cargas; así pues, el verdadero contacto entre la resina y las fibras se produce en el interior del molde, en ausencia de la mano del hombre.

Una vez impregnado el refuerzo se corta el suministro de resina y se deja curar la pieza; se considera la pieza curada cuando la reticulación de la misma alcanza el 80%.

El molde puede estar frío o poseer ya una determinada temperatura, dependiendo del proceso y de las propiedades de la resina utilizada. El atemperamiento se consigue con serpentines colocados en el interior del molde o con resistencias eléctricas distribuidas en forma de manta sobre el mismo.

Una vez la pieza se encuentra curada, se procede al desmoldeo de la misma. Normalmente se abre el molde mediante ayudas mecánicas debido al excesivo peso del mismo, y el desmoldeo de la pieza se realiza manualmente.

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. De esta decisión, dependerán los patrones de flujo de la resina.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Antiguamente, la óptima distribución de los orificios se determinaba por prueba y error. Ello conllevaba a la realización de costosas modificaciones en los moldes, inclusive la construcción de moldes de prueba. En la actualidad existen programas informáticos que permiten simular el proceso de inyección, con una notable reducción de los costes de desarrollo.

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

a) Inyección puntual
b) Inyección por canal de flujo lateral
c) Inyección periférica

Inyección puntual: el punto de inyección de la resina se encuentra en el centro del molde (Fig. 8.6) y el aire es evacuado por los bordes del mismo. Es el método más lento de llenado, pero es el que requiere menor cantidad de resina.

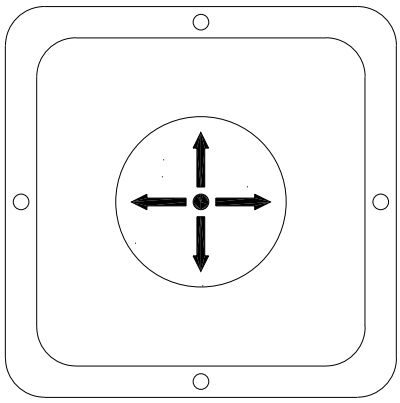


Fig. 8.6

Inyección por canal de flujo lateral: la inyección de la resina se realiza por un lateral (Fig. 8.7) y avanza como un frente hacia el otro lado del molde, por donde se realiza la evacuación del aire.

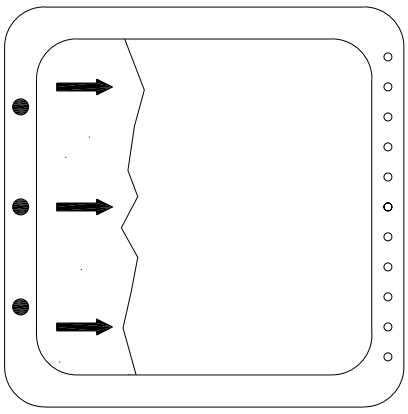


Fig. 8.7

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Inyección periférica: la resina es inyectada por el perímetro del molde (Fig. 8.8), 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.

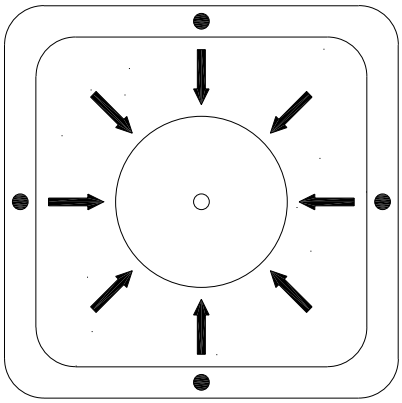


Fig. 8.8

La colocación de puntos de inyección adicionales en cada modelo de alimentación de resina reduce sustancialmente los tiempos de llenado.

8.2.5 VARTM

El moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) es una variante simplificada del método RTM tradicional; es un sistema muy similar al del RTM estándar, pero la resina es introducida en la parte baja el molde a través de bajas presiones, o inclusive por gravedad (Fig. 8.9).

En la parte más elevada del molde existen orificios conectados a un sistema de vacío, con lo cual, se establece un flujo de resina entre la parte baja y la alta que impregna todo el laminado.

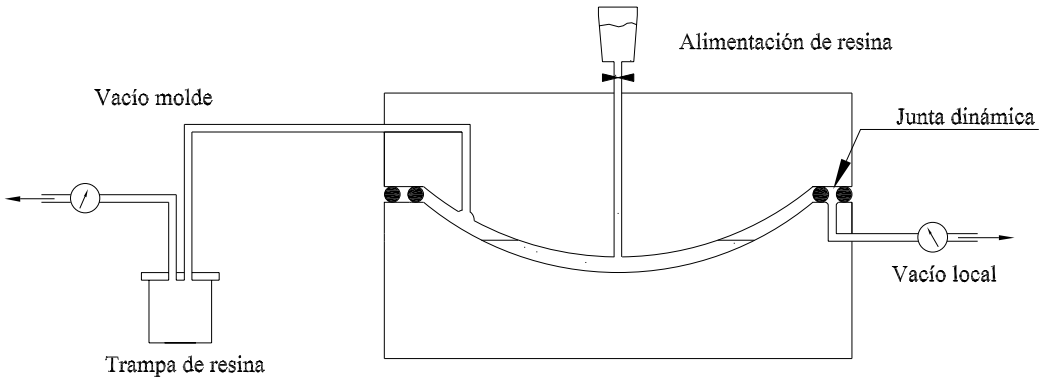


Fig. 8.9 VARTM. Esquema de funcionamiento

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Como las presiones de trabajo son muy reducidas, los moldes no deben ser tan robustos; esto permite construirlos con materiales más económicos, como los materiales compuestos. Sin embargo, los moldes deben ser ahora herméticos para garantizar el éxito del proceso. Para ello se dota a la periferia del molde de una junta dinámica, que consiste en una doble canal estanca que es sometida a un vacío parcial antes de permitir el ingreso de la resina en el interior del molde.

En función de los materiales constituyentes del molde, se puede acortar el proceso aumentando la temperatura exterior.

8.2.6 Ambiente de trabajo

Sin lugar a dudas, los procesos RTM representan un cambio importante en cuanto a las condiciones de trabajo. Se consiguen reducciones de compuestos orgánicos volátiles muy importantes, razón por la cual es un método de trabajo idóneo para aquellas industrias con alta producción y que busquen reducir sus tasas de contaminación ambiental.

Es importante, dado el volumen de producción de la técnica, disponer de zonas confinadas para las diferentes etapas del proceso; así, el ambiente de trabajo se torna más pulcro y es más fácil controlar las emisiones COV durante las etapas de inyección y polimerización. Todo esto, redunda en una mejor organización del trabajo y en un aumento de la productividad.

8.2.7 Ventajas

a) Las piezas obtenidas poseen buen acabado superficial en las dos caras (RTM).
b) La productividad del proceso es elevada, máximo 3 piezas por día para un mismo molde.
c) Los laminados resultantes poseen buenas propiedades mecánicas (los porcentajes de refuerzo pueden variar en un amplio rango, en función de la finalidad de la pieza).
d) Debido a la utilización de contramoldes, se ejerce un mayor control sobre los espesores.
e) El proceso se considera como un paso intermedio hacia la automatización de la producción.
f) Los controles durante todo el proceso son mayores.
g) La utilización de preformas reduce sensiblemente los costes y los tiempos de proceso.
h) Las pérdidas de material se ven reducidas por lo sistemático del proceso.
i) Se reducen las operaciones de mecanizado posteriores al desmoldeo.
j) Al ser un proceso de moldeo cerrado, se reducen las emisiones de COV.
k) Se pueden construir tanto estructuras monolíticas como *sandwich*, aunque en el caso de las segundas deben considerarse especialmente durante la etapa de diseño de moldes.

8.2.8 Desventajas

a) El principal inconveniente del proceso es su elevado coste en equipos, especialmente en los moldes y el equipo RTM.
b) Los moldes deben ser especialmente concebidos, no siendo posible la reutilización de moldes destinados a otros procesos.
c) La incorporación de mecanismos de control de temperatura en los mismos aumenta considerablemente su coste.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

d) Es necesaria una distribución de planta e infraestructura específica para poder optimizar la producción.
e) La mano de obra debe ser altamente especializada.
f) El proceso presenta limitaciones para realizar formas de grandes dimensiones.
g) El proceso no es apto para producciones medias y bajas.

8.2.9 Conclusiones

La industria de los materiales compuestos se encuentra en constante evolución y eso obliga a los constructores a tecnificarse cada vez con más fuerza.

La tecnología RTM es ideal para producciones medias-altas. Si observamos los niveles de producción de la mayoría de astilleros, podríamos decir que su implementación para la fabricación de embarcaciones se antoja dificultosa. Sin embargo, crecientes muestras en EE.UU. y norte de Europa alientan a reflexionar sobre su viabilidad en la construcción naval.

Si consideramos los métodos RTM como una evolución hacia la industrialización del sector, con calidades de laminado superiores a las técnicas convencionales, con una marcada reducción de costes y una mejora sustancial de las condiciones de trabajo, podemos asegurar que nos encontramos con métodos que serán una buena alternativa de futuro para la reconversión de procesos convencionales de molde abierto.

8.3 Técnicas de moldeo por infusión

El problema de las emisiones de estireno es un tema de máxima actualidad para todos los transformadores de materiales compuestos. La vigente normativa europea obliga a reducir drásticamente los niveles de emisiones al ambiente, por lo que los empresarios buscan soluciones constantemente a esta problemática.

Las líneas de trabajo discurren básicamente por dos caminos diferentes: uno consiste en modificar los valores de estireno en las resinas (disminuirlo o sustituirlo por otros monómeros); el otro consiste en modificar los procesos de fabricación, migrando de los métodos de molde abierto a los métodos de molde cerrado.

La industria naval, dadas las características de los productos que fabrica, restringe las alternativas de métodos de molde cerrado idóneos. La infusión es una alternativa perfectamente válida a los métodos tradicionales de molde abierto, que permite construir piezas de grandes dimensiones con bajo coste, y en la cual se pueden aprovechar la mayoría de los moldes ya existentes, con una reducción sustancial de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles al ambiente.

8.3.1 Concepto fundamental

El proceso de infusión (Fig. 8.10) consiste de varias etapas: primero se disponen las fibras de refuerzo secas sobre el molde; si la pieza lo requiere, se puede pintar el molde con *gelcoat* previamente.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

A continuación todo el conjunto es compactado mediante presión de vacío por medio de una bolsa, para extraer el aire atrapado entre capas de laminado.

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

Una vez lleno de resina todo el conjunto, se mantiene bajo depresión hasta que se efectúe la polimerización de la resina. Dicha polimerización se realiza a temperatura ambiente, aunque pueden reducirse los tiempos de curado mediante la aportación de calor externo.

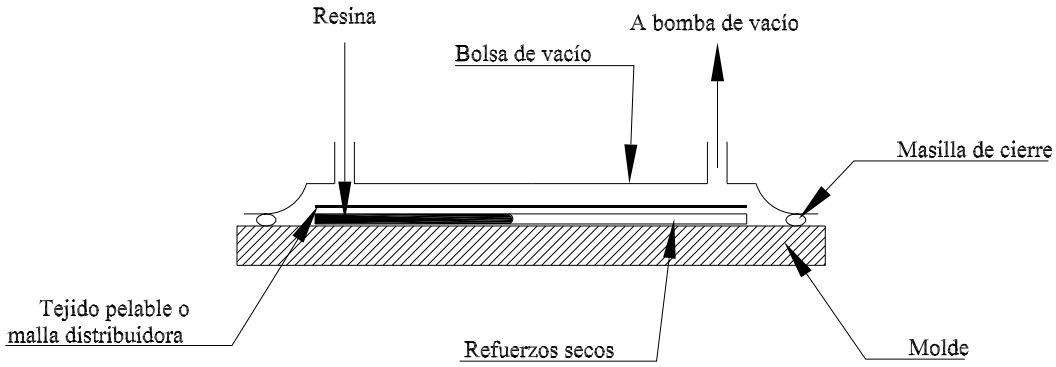


Fig. 8.10 Infusión

8.3.2 Herramientas

8.3.2.1 Moldes

Una de las razones por las cuales el método de infusión tiene amplia aceptación entre los constructores radica en que utiliza resinas que curan a temperatura ambiente. Este hecho permite utilizar una amplia gama de moldes, inclusive aquellos que fueron concebidos para otros procesos, como el laminado manual y la proyección simultánea. Deben los moldes, no obstante, cumplir con otras características para garantizar el éxito del proceso:

a) Que el molde sea estanco; si el molde está constituido por partes, se colocarán juntas entre las diferentes partes para permitir que funcione como un conjunto estanco.

b) Que disponga de suficiente espacio para el reborde del sistema de sellado; la mayoría de los moldes convencionales disponen de pestañas o bridas, que sirven para este cometido. La anchura mínima recomendable es de 100 mm.

c) Que sea suficientemente rígido para que no sufra deformaciones.

d) Si se utilizan resinas que requieren de procesos de postcurado, que los materiales que los constituyen posean resistencia térmica suficiente.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

8.3.2.2 Sistema de vacío y distribución de resina

El vacío necesario para el proceso puede obtenerse mediante bombas de vacío, ya sean éstas de paletas flexibles o de anillo líquido, así como mediante generadores de vacío (eyectores). Debido a que los niveles de vacío necesarios no son elevados (entre –0.5 y –0.8 bar), el uso de eyectores se presenta como la solución más adecuada (Sec. 7.2).

Es importante disponer de una trampa de resina por delante del sistema generador de vacío (Fig. 8.11); la resina se distribuye en exceso sobre el laminado, para asegurarse que impregna todas las fibras, por lo que es normal que parte del exceso tienda a introducirse en el sistema de vacío.

La introducción de la resina sobre el laminado se realiza mediante mangueras traslúcidas de pequeño diámetro. Dichas mangueras poseen un extremo en el interior del cubo que contiene la resina catalizada, y el otro, en el interior de la bolsa de vacío, sobre el laminado.

Las mangueras de alimentación deben ser de material resistente a los agentes químicos que contenga la resina, y ser capaces de resistir el nivel de vacío que se aplicará (no se pueden estrangular). Una vez utilizadas no se vuelven a recuperar.

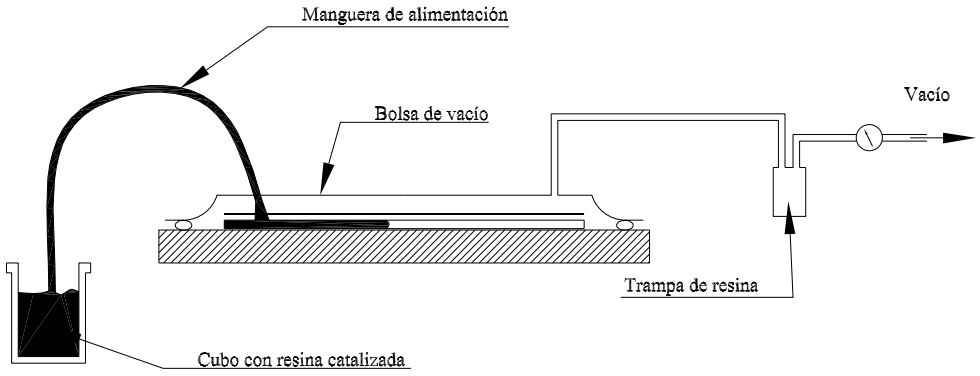


Fig. 8.11 Esquema de funcionamiento

8.3.3 Materiales

8.3.3.1 Resinas

Las características más importantes de la resina serán su viscosidad, su tiempo de gel y su reactividad.

La resina fluirá mejor cuanto más baja sea su viscosidad, aunque viscosidades excesivamente bajas pueden provocar la entrada de aire en el laminado. Por el contrario, si la viscosidad es elevada, los tiempos de llenado pueden tornarse largos, con riesgos de que aparezcan zonas secas de resina por insuficiencia de impregnación.

Los valores de viscosidad para resinas de infusión se encuentran en el rango de 50 a 300 cPs; dichos valores representan el buen compromiso entre tiempo de llenado y calidad del laminado.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

En general, las resinas de infusión poseen tiempos de gel más extensos que sus pares de laminado normal. Esta propiedad se consigue modificando su formulación, aunque a veces este aumento del tiempo de trabajo perjudica alguna otra característica.

Las resinas que se emplean en procesos de infusión se hallan modificadas para evitar picos exotérmicos elevados, más cuando los laminados suelen poseer espesores considerables.

Son aptas para el proceso la mayoría de resinas utilizadas en la construcción de embarcaciones, como las poliésteres, las vinilésteres y las *epoxies*.

8.3.3.2 Materiales de refuerzo

En la elección de los materiales de refuerzo, se debe lograr un equilibrio entre las propiedades del producto final y la permeabilidad del material de refuerzo. Por ello, se suele utilizar una combinación de diferentes estructuras textiles.

Generalmente se colocan los materiales con mejores propiedades de fluidez en el centro del laminado, para crear una capa de flujo que ayude a la impregnación (normalmente son los materiales que tienen menores propiedades mecánicas). Los materiales con mejores propiedades resistentes se colocan en los extremos del laminado (encima y debajo). Existen en el mercado combinaciones estándares de materiales especialmente concebidos para infusión que reúnen las citadas características, aunque su coste es ligeramente superior.

8.3.3.3 Materiales de núcleo

La mayoría de materiales que se utilizan como núcleos en la construcción de estructuras *sandwich* son aptos para los procesos de infusión. No son recomendables aquellos que sean excesivamente porosos, como el Coremat®, o aquellas espumas que no sean de celda cerrada, debido a que favorecen una absorción mucho mayor de resina y, por lo tanto, contribuyen a aumentar el peso de la estructura.

Los materiales de núcleo ranurados deben ser cuidadosamente seleccionados. Un ranurado excesivo provoca un aumento de peso por un excedente de resina, y puede provocar marcas y deformaciones por un alto pico exotérmico.

Las transiciones entre las pieles interior/exterior del laminado *sandwich* deben ser graduales para evitar zonas abundantes de resinas. Los ángulos deben ser suaves para evitar cambios bruscos en el laminado o que produzcan concentraciones de tensiones.

Si se utilizan materiales naturales como elementos de núcleo (madera de balsa, contrachapado, etc.) hay que asegurarse de que sean previamente impregnados con resinas para evitar una excesiva absorción.

8.3.3.4 Materiales fungibles

A diferencia del laminado por vacío convencional, el método de infusión necesita de menos medios para realizar el proceso. Los materiales son:

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

a) Tejidos pelables (*peel-plies*) o mallas de distribución
b) Película o *film* de nylon transparente para bolsa vacío
c) Masillas de cierre (*tacky-tape*)

El tejido pelable o la malla de distribución (según el caso) realizan las funciones de canal distribuidor de resina y de medio de drenaje-evacuación del aire que existe en el interior del laminado. Una vez polimerizada la resina, actúan como barrera removible para extraer el exceso de resina que pueda haber quedado sobre el laminado.

La bolsa de vacío debe poseer buenas propiedades de elongación (400-600%) a efectos de que se adapte a la geometría de la pieza que se pretende realizar. Debe ser transparente para permitir controlar en todo momento el flujo de la resina y poder rectificar la distribución de la misma si se presenta algún problema. Debe ser resistente al estireno y otros agentes químicos.

La masilla de cierre cumple la función de junta estanca entre la bolsa y el molde. Debe ser resistente a los agentes químicos que contenga la resina y debe ser fácilmente extraíble una vez finalizado el proceso.

8.3.4 Principios de distribución de la resina

Las resinas de infusión deben tener una baja viscosidad para permitir que fluyan de la mejor manera sobre el laminado. Este proceso debe estar acompañado de una correcta distribución de los puntos de alimentación de la resina. De nada sirve tener una resina con un extenso tiempo de gel si no se hace una correcta distribución de los puntos de alimentación; inclusive podrían quedar zonas secas de resina, cuestión que se presenta como un enorme problema puesto que su reparación se antoja dificultosa, y la pieza probablemente debería ser descartada por completo.

Lo que se intenta conseguir es el llenado lo más rápidamente posible del molde. Por lo tanto, la distancia que recorrerá la resina debe ser la más corta.

La distribución interna de la resina se puede conseguir por tres principios:

a) Distribución a través de conexiones
b) Flujo a través de canales precortados en el núcleo (si es estructura *sandwich*)
c) Flujo de resina través de una malla

a) *Distribución a través de conexiones*: para resinas de poliéster y viniléster, una longitud de flujo razonable es del orden de 50 a 80 cm para 30 minutos (tiempo de gel). Si las superficies que deben cubrirse son más amplias, no se puede impregnar toda la pieza a través solamente del refuerzo, puesto que habría zonas a las cuales la resina no arribaría por una cuestión de tiempo. Es necesario entonces realizar conexiones adicionales que permitan cubrir estas zonas alejadas de los puntos de infusión periféricos o puntuales.

b) *Flujo a través de canales precortados en el núcleo*: los ranurados que presentan muchos materiales de núcleo nos pueden servir para realizar una mejor distribución de la resina. Existen materiales preparados especialmente para infusión, pero deben utilizarse siguiendo las recomendaciones del fabricante, orientándolos siempre de acuerdo con la dirección del flujo de resina.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

c) *Flujo de resina a través de una malla*: la distribución de la resina es mejorada por la adición de una red o malla sobre el tejido pelable, actuando como un canal de distribución de la resina. Esta malla es removida una vez la pieza está curada (método *Scrimp*).

En lo que respecta a la alimentación externa de la resina, existen tres formas contrastadas de realizarla:

a) Infusión puntual

b) Infusión por canal de flujo lateral

c) Infusión periférica

a) *Infusión puntual*: el punto de alimentación de la resina se encuentra en el centro del molde y el aire es evacuado mediante tomas de vacío por los bordes de la bolsa (Fig. 8.12). Es el método más lento de llenado del molde, pero requiere menor cantidad de resina.

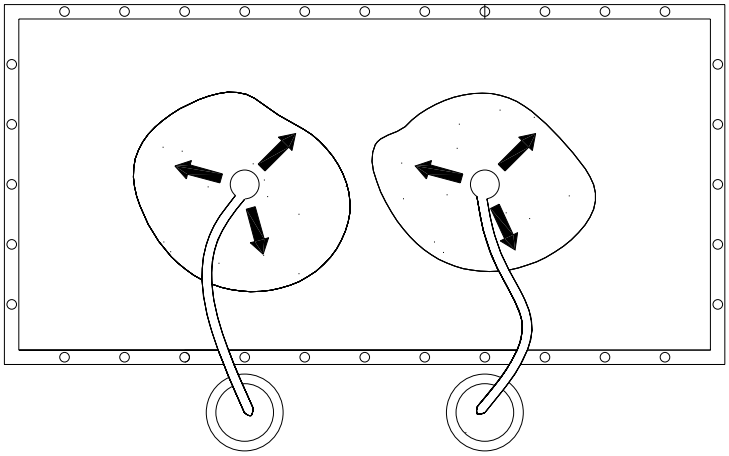


Fig. 8.12 Infusión puntual

Este método es el recomendado para piezas de pequeñas dimensiones. Es importante que no existan fugas de la bolsa puesto que este método es el más lento de los tres estudiados, y cualquier pérdida retardaría aún más el proceso, con riesgo de que queden zonas secas de resina por un nivel de vacío inadecuado.

b) *Infusión por canal de flujo lateral*: la alimentación de la resina se realiza por un lateral y avanza como un frente hacia el otro lado del molde (Fig. 8.13), por donde se realiza la extracción del aire. Deben elegirse cuidadosamente los materiales que actuarán como canales de flujo y debe prestarse especial atención a la orientación que se le dé a los mismos.

En este método los recipientes de resina se encuentran solamente en uno de los lados del molde. La dirección del flujo es en un solo sentido, hacia la zona donde se realiza la extracción por medio del sistema de vacío.

Es el método más apropiado para piezas esbeltas o piezas estrechas, puesto que la resina tiene que recorrer un camino más corto.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

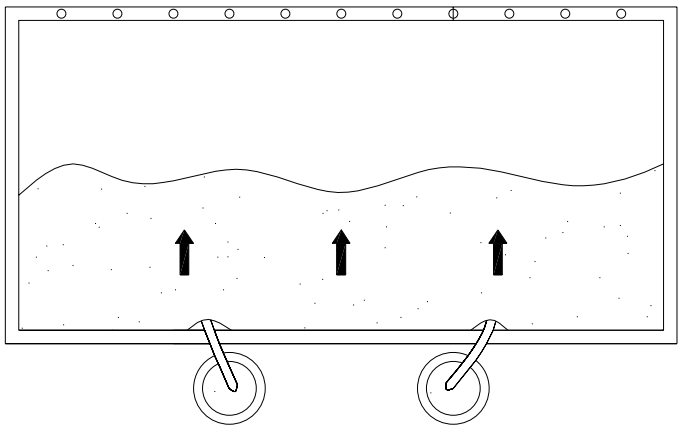


Fig. 8.13 Infusión por canal de flujo lateral

c) *Infusión periférica*: la resina es colocada en recipientes en los bordes de la bolsa de vacío (Fig. 8.14), propagándose hacia el interior del molde. La evacuación del aire interior se realiza por el centro del molde.

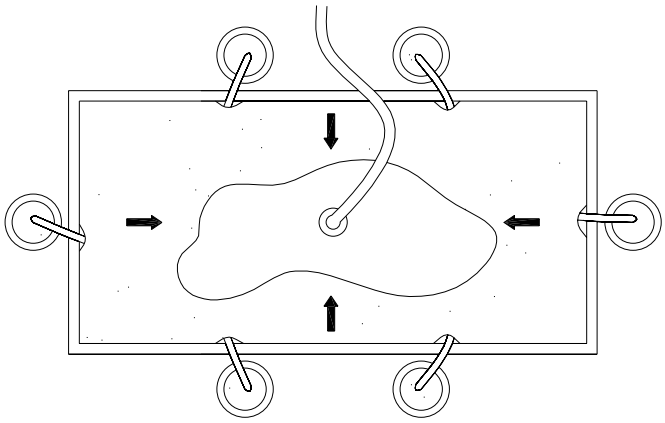


Fig. 8.14 Infusión periférica

Este método es mucho más rápido que la infusión puntual, con lo que es el más recomendable para las resinas que tengan tiempos de gel cortos, como las de poliéster y viniléster. Su desventaja más significativa radica en que el consumo de resina es mayor, y buena parte de esta resina se torna en exceso que luego debe ser eliminado mediante operaciones de saneamiento.

8.3.5 Ventajas

a) Se obtienen piezas laminadas con buenas propiedades mecánicas (porcentajes de refuerzo sumamente interesantes 40-55%). La calidad tiene menor dependencia del operario.
b) Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles al ambiente de trabajo se ven notablemente reducidas. El ambiente de trabajo es más agradable, menos cargado y en general más pulcro.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

c) El coste de los equipos auxiliares es similar al del proceso de laminado asistido por vacío.
d) El coste de los moldes es bajo, y se pueden reconvertir los moldes de proceso abierto.
e) El tiempo de fabricación es menor que el de otras técnicas, como por ejemplo el laminado por vacío. La mano de obra necesaria es menor.
f) Al producirse piezas por completo (*one shot*) se reducen las uniones secundarias.
g) Pueden utilizarse la mayoría de las estructuras textiles.
h) Se pueden realizar tanto estructuras monolíticas como *sandwich*.
i) Existe un importante ahorro de materia prima y una reducción de los residuos.
j) No existen limitaciones del tamaño de pieza.
k) En la construcción de piezas de gran tamaño, el proceso posee la mejor relación coste/calidad.

8.3.6 Desventajas

a) Es necesaria la utilización de equipos auxiliares de vacío.
b) El proceso de infusión emplea materiales fungibles, lo cual aumenta ligeramente el coste.
c) La utilización de materiales de refuerzo específicos encarece el proceso.
d) Las resinas que se utilizan deben poseer una viscosidad muy baja.
e) El proceso requiere de mano de obra especializada.
f) La productividad del proceso no es muy elevada.
g) El proceso puede verse afectado por las condiciones ambientales.
h) Existe dificultad para obtener espesores constantes. Los excesos de resina que deben ser removidos aumentan el tiempo de saneamiento.
i) El acabado superficial sólo es bueno por una de las dos caras.
j) El proceso no es rentable para producción de piezas pequeñas.

8.3.7 Conclusiones

La técnica de infusión se emplea actualmente en la construcción de cascos, cubiertas y mamparos de diferentes tipos de embarcaciones, tanto de vela como de motor.

La infusión es un método sencillo, rentable económicamente, con calidades de laminado muy aceptables, mejores que las de procesos de moldeo por contacto. Aprovecha muchas de las herramientas existentes de los métodos tradicionales de molde abierto, con una parte de la técnica del laminado asistido por vacío.

Considerando las restricciones a las que obliga la normativa europea respecto de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, podríamos decir que la infusión es la alternativa técnicamente más válida y económicamente más razonable a los procesos de fabricación por molde abierto.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

9 Autoclave

9.1 Introducción

Si bien el moldeo de materiales compuestos con autoclave no es aplicable a la construcción de embarcaciones, fundamentalmente por razones dimensionales, se utiliza para un sin fin de pequeñas piezas relacionadas con el sector. Dichas piezas suelen ser exclusivamente estructurales y se les requiere máxima resistencia con un mínimo peso.

9.2 Concepto fundamental

Un autoclave es un recipiente donde se introducen laminados de materiales compuestos, generalmente preimpregnados, a efecto de someterlos a una mayor presión de compactación y a una temperatura de curado más elevada (Fig. 9.1). La mayor presión es para obtener un material más denso, con menor contenido de poros, que proporcione un material más resistente; la temperatura más elevada tiene dos finalidades: ciclos de curado más cortos y mejores propiedades finales de la pieza.

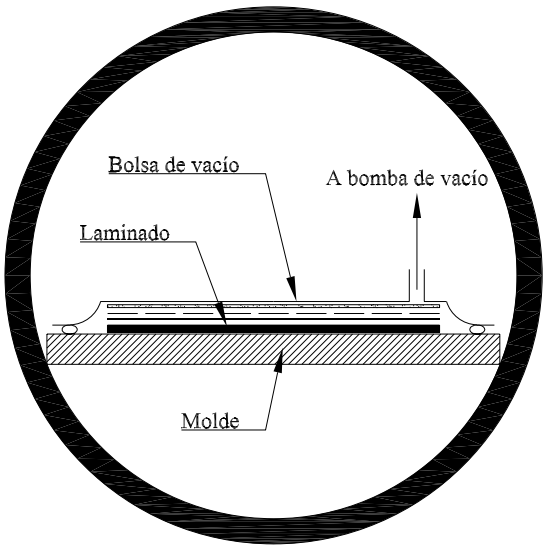


Fig. 9.1 Autoclave

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

9.3 Herramientas

Los autoclaves son cámaras cilíndricas presurizadas de acero al carbono, que poseen dispositivos de calentamiento, presurización, vacío y control (Fig. 9.2 y Fig. 9.3).

Dependiendo de la temperatura que se desee alcanzar, existen autoclaves pequeños, con resistencias eléctricas, hasta autoclaves de gran tamaño con sistemas de combustión de gas. Poseen en general un ventilador en uno de los extremos para garantizar la uniformidad de la temperatura interior. La velocidad del flujo del aire interior no debe ser mayor a 3 m/s para evitar que las bolsas de vacío se desprendan de los moldes.

La presurización se suele realizar mediante gases como aire, nitrógeno y dióxido de carbono. Si las temperaturas de servicio son relativamente bajas, hasta 150º C, se recurre al aire. Para temperaturas más elevadas (algunos autoclaves alcanzan los 550º C) existe riesgo de combustión del aire. El nitrógeno y dióxido de carbono solucionan este problema, ya que inhiben la combustión, pero el coste de operación es más elevado debido a que deben almacenarse a muy bajas temperaturas, el primero en estado gaseoso, el segundo en estado líquido.

La presión de trabajo admisible de un autoclave varía en función del espesor de la cámara de presión, llegando a alcanzar algunos hasta 20 bar.

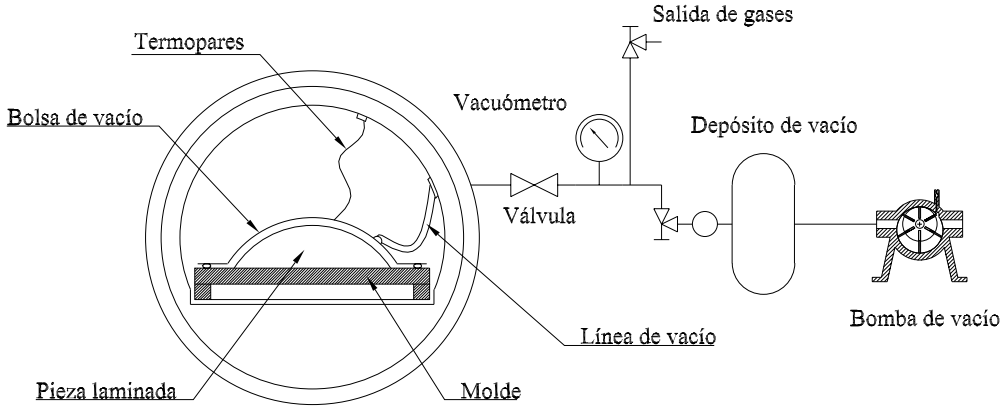


Fig. 9.2

Las variables que deben ser controladas son: temperatura, vacío y presión. Este control debe ser llevado a cabo durante todo el proceso para obtener una buena consolidación del laminado, un control de la porosidad de la pieza, y para evitar posibles exotermias en diferentes zonas. En la actualidad, este control se efectúa informáticamente, con la ayuda de termopares, transductores y sensores ultrasónicos, que permiten una reproductividad mayor de los ciclos de curado. Existen, sin embargo, algunos autoclaves más anticuados en los cuales el proceso de control debe realizarse manualmente.

Dada la existencia de un gran número de fabricantes de resinas preimpregnadas, los autoclaves deben ser muy versátiles respecto de las diferentes ventanas de proceso, para permitir así un campo de accionamiento más amplio.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Los moldes pueden ser tanto abiertos como cerrados, y deben tenerse en consideración, durante la etapa de diseño de los mismos, factores como presión, vacío y temperaturas de servicio.

Las herramientas de soporte de piezas en el interior del autoclave juegan un papel importantísimo, ya que deben cumplir requisitos como el aprovechamiento del espacio interior y la resistencia a la presión y temperatura de trabajo. Deben ser ligeros y deben poder acoplarse a las líneas de vacío.

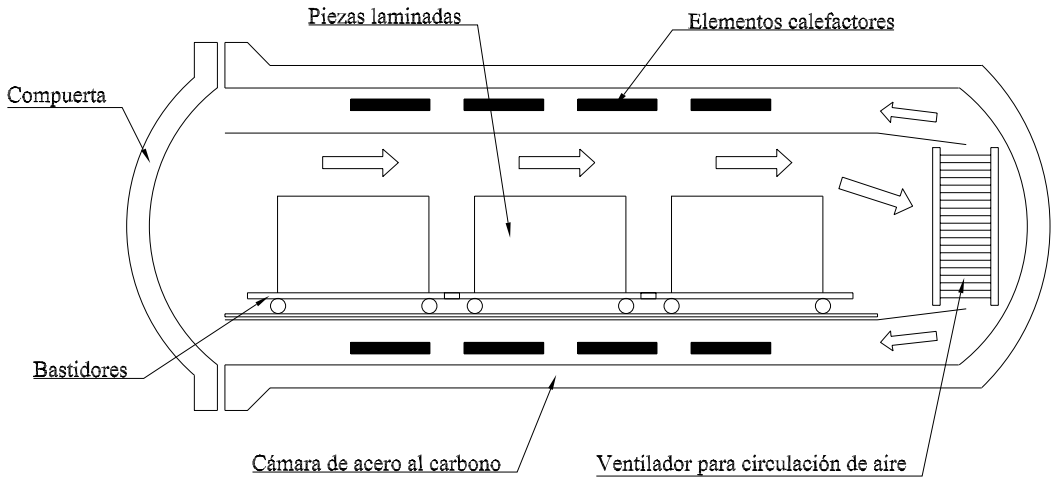


Fig. 9.3

9.4 Materiales

Debido a que el moldeo con autoclave es un proceso costoso por las variables que intervienen en su funcionamiento, el moldeo de piezas sólo es rentable en la fabricación de piezas de elevada resistencia estructural. Por lo tanto, el tipo de material más acorde con el proceso son las fibras preimpregandas. Las más utilizadas son las de carbono, *kevlar* y vidrio, por ese orden, y las resinas *epoxi* y fenólicas las matrices más frecuentes.

Respecto de las estructuras textiles, no existe limitación alguna, y pueden procesarse todo tipo de ordenamientos planos. En cuanto a los materiales de núcleo, deben ser cuidadosamente seleccionados según criterios de resistencia a la temperatura y a la presión.

9.5 El proceso

El autoclave es una herramienta que permite mejorar la calidad de los laminados de material compuesto. El material que se utiliza como partida suele ser el preimpregnado, con toda su técnica asociada, aunque es posible procesar por autoclave laminados realizados por contacto.

Una vez la pieza se encuentra laminada, y previamente a la fase de curado, se aplica presión mediante vacío para efectuar un compactado y para eliminar los componentes volátiles de la resina. Los niveles de vacío mínimos son superiores a los de otras técnicas, siendo el mínimo recomendable -0.9 bar; el

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

tiempo de compactado estará en función del espesor del estratificado y de las recomendaciones del fabricante del preimpregnado.

Una vez realizado el compactado, la pieza es introducida en el interior de la cámara de presión manteniendo el vacío inicial. Las posibles configuraciones de curado dependen de las características y comportamiento de la resina; con la variación de la temperatura y la presión se controla y modifica la viscosidad de la resina, para permitir la impregnación del laminado (Fig. 9.4). Sin embargo, existen ciertos límites indicados por el fabricante que se deben respetar: una elevada presión combinada con una baja viscosidad puede producir laminados resecos, y una baja presión con elevada viscosidad puede provocar una incorrecta compactación.

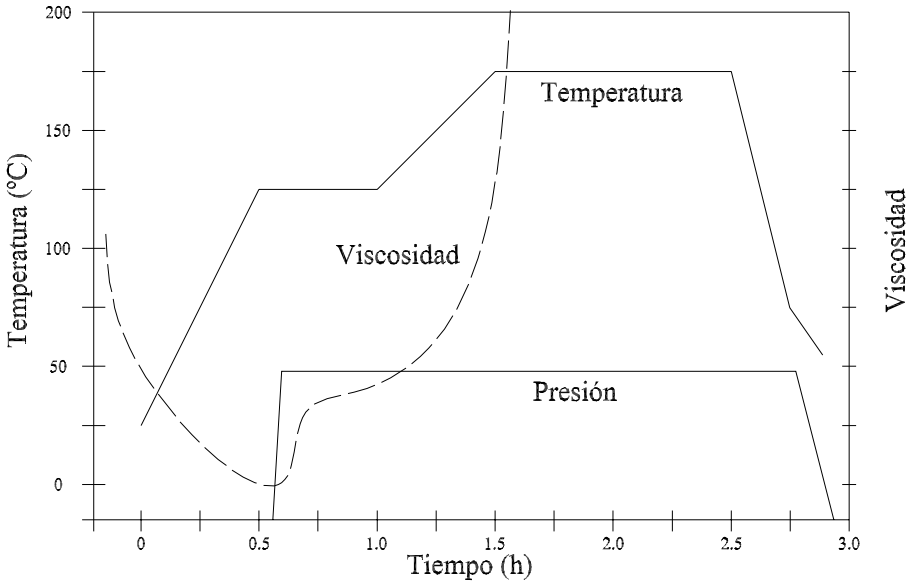


Fig. 9.4 Variación de los parámetros durante el ciclo de curado

En el empleo de autoclaves, la selección de los materiales fungibles adquiere máxima importancia; deben ser acordes a la temperatura y presión del proceso, así como ofrecer resistencia al tipo de gas utilizado en el interior del recinto. La bolsa de vacío cumple, además de la función de presión sobre el laminado, la de aislante del laminado respecto de la atmósfera del autoclave.

9.6 Ambiente de trabajo

Como todo el proceso de curado se realiza dentro del recinto interior del autoclave, el proceso de moldeo es sumamente inocuo; el trabajador ve así minimizada su exposición a emisiones de compuestos orgánicos. Quedan por cumplir, sin embargo, las recomendaciones sanitarias propias del material preimpregnado durante la fase previa de manipulación.

Respecto de las características ambientales, son valederas aquellas relacionadas con la manipulación y procesado de los preimpregnados.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

9.7 Ventajas

a) La utilización de autoclaves provee laminados con altas propiedades físicas y mecánicas.
b) Se produce una importante reducción de los tiempos de curado.
c) Los curados son más homogéneos que los producidos por otras técnicas.
d) Su empleo posibilita la fabricación de piezas de geometría compleja.
e) La baja porosidad del laminado está en relación directa con la presión de trabajo del autoclave.
f) Se produce un mejor control de todas las variables del proceso, lo que mejora la trazabilidad del laminado.
g) Las emisiones COV se ven sustancialmente reducidas.

9.8 Desventajas

a) El inconveniente principal de operar con autoclaves es la elevada inversión del equipo, su elevado coste de operación y el elevado coste de la materia prima que se utiliza (generalmente preimpregnados).
b) Los autoclaves poseen limitaciones importantes en relación al tamaño de las piezas que se procesan.
c) La cadencia de producción es baja.
d) Las herramientas y útiles de trabajo deben ser específicos para el proceso.
e) La multiplicidad de variables que hay que controlar favorece el encarecimiento del proceso.
f) El personal de operación debe estar altamente capacitado.

9.9 Conclusiones

La utilización de autoclaves para confeccionar laminados no se considera como proceso en sí mismo, sino como un complemento a otros procesos de laminado como el moldeo por contacto asistido por vacío, el laminado con preimpregnados y el laminado con preimpregnados parciales.

Su empleo permite mejorar aún más los resultados de dichos procesos, al obtenerse piezas mejor curadas, más densificadas, más homogéneas y con menor porosidad. En síntesis, con propiedades físicas y mecánicas mayores.

Sus principales desventajas son su elevado coste de adquisición y operación, así como su limitación de espacio interior. Por estas razones sólo se construyen así componentes navales de altas prestaciones como palos, botavaras, tangones, ruedas de timón, timones, orzas, cañas de timón, topes de palo, etc.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Bibliografía

AEMAC. *Materiales compuestos 97*. Madrid, J.A.Guemes y C. Navarro Editores, 1997.

ANTOR, PHILIPPE. Artículo "Proceso RTM: infusión por vacío". Barcelona, *15ª Jornadas de materiales compuestos/plásticos reforzados*, 2000.

ATC. *Core-Cell design manual*. Canadá, 2001.

AXSON IBÉRICA. *Catálogo modelaje.* 1999.

BANNISTER & NESS. *Processing notes for SE84 prepegs.* Reino Unido, SP Systems, 2000.

BESEDNJAK, ALEJANDRO. Apuntes del curso de postgrado *Diseño y tecnología de la construcción de embarcaciones de recreo y competición*. Barcelona, 2003.

BINKS. *Equipos para plásticos reforzados.* Bibliografía comercial.

BUSCH, S.A. *Equipos de vacío industrial.* Bibliografía comercial.

CAPART, LUDOVIC. Artículo "RTM Light". Barcelona, *16ª Jornadas de Materiales Compuestos/plásticos reforzados*, 2002.

CAUCHOIS, JEAN PIERRE. Artículo "Simulación del proceso RTM". Barcelona, *15ª Jornadas de materiales compuestos/plásticos reforzados*, 2000.

CENTRE DE DOCUMENTACIÓ I MUSEU TÈXTIL DE TERRASSA. *El Teixit*. Barcelona, edición de la Diputació de Barcelona, Servei de Cultura, 1995.

CLAUGHTON, WELLICOME & SHENOI. S*ailing Yacht Design, Theory*. Essex, Addison Wesley Longman Limited, 1998.

CLAUGHTON, WELLICOME & SHENOI. S*ailing Yacht Design, Practice.* Essex, Addison Wesley Longman Limited, 1998.

CRAY VALLEY. *Poliéster no saturado. Manual de aplicación.* Edición Cray Valley, 1998.

ECHEGARAY, A., BOSCH, E. *Entendiendo el diseño naval*. Barcelona, Editorial Noray, 1985.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

FRANCO GIMENO & MARTÍN SANJOSÉ. *Ensayos destructivos para la industria y la construcción*. Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza, 1999.

GARCÍA SÁEZ, JOSÉ RAMÓN. *RTM:* Artículo "De la laminación por contacto a la industrialización. El RTM económico". Barcelona, *15ª Jornadas de materiales compuestos/plásticos reforzados*, 2000.

GERMANISCHER LLOYD. *Rules for classification and construction. Ship Technology. Pleasure Craft*. Hamburg, published by Germanischer Lloyd, 2002.

GIBBS & COX, INC. *Marine design manual for fiberglass reinforced plastics*. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.

GLENZ, W.,GUYOT, H.,MARCHELLI, R., SANTOLARIA, M. *Glosario de terminología de los plásticos*. Barcelona, Hanser Editorial, 1992.

GONZÁLEZ DIEZ, J.L. *Materiales compuestos. Tecnología de los plásticos reforzados*. Madrid, Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 1995.

GREENE, ERIC. *Marine Composites.* Edición on-line. Estados Unidos.

HUGGER, TED. Artículo "Bacuum Bagging". *Professional Boatbuilder Magazine*, nº 1, octubre/noviembre 1989.

INASMET. *Materiales compuestos. Aplicaciones en el transporte terrestre*. San Sebastián, edición propia, 1998.

INASMET. *Materiales compuestos. Tecnologías de producción.* San Sebastián, edición propia, 1998.

INP 96 S.L. *Catálogo comercial.* Madrid, 2000.

LARSSON & ELIASSON. *Principles of yacht design*. Londres, Adlard Coles Nautical, 1994.

LOISIRS NAUTIQUES. *La construction poliéster dans la plaisance, amateur/professionnelle*. Francia, 1981.

LOISIRS NAUTIQUES. *Le composite bois-époxy, techniques de mise en ceuvre et applications pratiques.* Francia.

LOISIRS NAUTIQUES. *Matériaux composites*. Francia, 1991.

MICHAELI/GREIF/KAUFMANN/VOSSEBÜRGER. *Introducción a la tecnología de los plásticos. Libro de texto con preguntas.* Barcelona, Hanser Editorial, 1992.

MIRAVETE Y COAUTORES. *Materiales compuestos I y II*. Zaragoza, editado por Antonio Miravete, 2000.

NASSEH, JORGE. *Manual de construçao de barcos*. Rio de Janeiro, editado por Jorge Nasseh, 2000.

NICOLSON, IAN. *Boat data book.* London, Adlard Coles Nautical, 1994.

REGISTRO ITALIANO NAVALE. *Rules for the construction and classification of pleasure vessels*. Génova, 1995.

SERRANO NICOLÁS, A. *Neumática*. Madrid, Editorial Paraninfo, 2000.

SICILIANO, EDUARDO. *Construcción de embarcaciones en plástico reforzado*. Buenos Aires, Editorial Hobby, 1986.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

SMITH, WILLIAM F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.* Madrid, McGraw-Hill/Interamericana de España, SAU, 2000.

SOLER, XAVIER. *La construcción sandwich*. Barcelona, edición del autor.

SOLER, XAVIER. *Métodos de construcción Hi-Tech en composites*. Barcelona, edición del autor.

SP SYSTEMS. *Guide to composites.* Edición on-line.

STATON BEVAN, TONY. *Ósmosis en embarcaciones de fibra.* Madrid, Ediciones Pirámide, 1998.

TEGEDOR DEL VALLE, JORGE. *Construcción de buques de pesca en poliéster reforzado con fibra de vidrio.* Madrid, Colegio oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos de España, 2001.

VENUS-GUMER. *7Th Edition catalog, volume I, spray-up, resin injection, cast and pour*. Washington, 1993.

VENUS-GUMER. *7Th Edition catalog, volume II, special equipment*. Washington, 1992.

VIVIER, FRANÇOIS. *Construction bois: les techniques modernes*. Le Chasse-Marée–ArMen, 1996.

WARRING, R.H. *El libro práctico del poliéster y la fibra de vidrio*. Barcelona, Editorial Borrás, 1982.

WEGENER, CAPELLA, MICHAELI. *Tecnología de los composites. Plásticos reforzados*. Barcelona, Hanser Editorial, 1992.

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Índice alfabético

A

Acelerador, 24, 28-30
Activador, 28
Aditivos, 33-35
Autoclave, 63, 121-125

B

Baja emisión de estireno, resina de, 31
Biaxial, 50
Bisfenólica, resina, 30
Bismaleimida, resina, 33
Bolsa de vacío, 91, 92, 93-94
Bomba de anillo líquido, 88-89
Bomba de paletas flexibles, 88-89

C

Cargas, 33, 34-35
Catalizador, 24, 28-30
Cedro rojo, 56
Contenido de refuerzo, 64-65
Contrachapado marino, 56-57
Cuatriaxial, 50
Curado de resinas, 24, 28-30
    factores que intervienen, 26
    resina poliéster, proceso de curado, 28
Curado final, 25

E

Elastómeros, 20, 21-22
Emisiones COV, 65-68, 74, 80, 84, 95, 100, 103, 112, 119, 125
Encadenados, 51
Endurecimiento, 25
Ensamblados, 49-50
Ensimaje, 40
Epoxi, resina, 27, 31-32
Equipo impregnador, 82-83
    tipos, 83
Equipo proyección simultánea, 76-78
Equipo RTM, 106-107
Espumas sintéticas, 57-60
    cloruro de polivinilo (PVC), 57-58
    estireno-acrilonitrilo (SAN), 59
    poliestireno (PS), 59
    polimetacrilimida (PMI), 59-60
    poliuretano (PU), 58
    sintácticas, 60
Esteres cianato, resina, 33
Estructura *sandwich*, 53-54
    concepto, 53
Estructuras textiles, 46-51

F

Fase dinámica, 66
Fase estática, 66
Fenólica, resina, 27, 32-33
Fibras aramídicas, 44-46
    composición química, 45
    obtención, 45
    propiedades, 45-46
    tipos, 45
Fibras de carbono, 42-44
    composición química, 42
    obtención, 42-43
    propiedades, 43-44
    tipos, 43
Fibras de vidrio, 39-42
    composición química, 40
    obtención, 40
    propiedades, 41-42
    tipos, 41
Fibras inorgánicas, 39-44
Fibras sintéticas, 44-46
Fieltros, 46, 47
Film separador / sangrador, 91, 92-93
Fire Coremat®, 61-62

G

Gel, punto de, 25
Gelcoat, 35-36

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

Gelcoat,
clasificación, 35
Generadores de vacío, 88, 89-90
Géneros de punto, 51

I

Impregnadores, 63, 81-85
Infusión, 63, 113-120
Infusión periférica, 118, 119
Infusión por canal de flujo lateral, 118
Infusión puntual, 118
Inhibidores, 29
Iniciador, 28
Inyección por canal de flujo lateral, 110
Inyección periférica, 110, 111
Inyección puntual, 110
Isoftálica, resina, 27-28
Isoftálica NPG, resina, 28

K

Kevlar, 44-46

L

Laminado por contacto, 63, 69-75
Límites exposición estireno, 67

M

Madera balsa, 54-55
Maduración del laminado, 25
Mallados, 51
Mantas de absorción / aireación, 91, 93
Masilla de cierre, 91, 94
Mat, 47
Materiales compuestos, 15-18
concepto matriz-refuerzo, 16-18
definición, 15
tipos, 16
Materiales fungibles, 91, 99, 116-117
Matriz, 15, 19-33, 72
funciones, 24
polimérica, 24
termoestable, 23-24
Moldeo asistido por vacío, 63, 87
laminado manual asistido por vacío, 90-96
Moldeo con autoclave, 63, 121-125
Moldeo por contacto, 63, 69-75
Moldeo por vía líquida, 63, 105-120
Monómero, 19
Multiaxial, 50

N

Nido de abeja, 60-61
Núcleo, 53
tipos de núcleo, 54-62

O

Ortoftálica, resina, 28

P

Panal de abeja, 60-61
Peel-ply, 91-92
Pico exotérmico, 26
Poliéster, resina, 27-30
formulación, 27
propiedades, 27
tipos, 27
Polieteramida, resina, 33
Poliimida, resina, 33
Polímeros, 19-22
clasificación de, 20
origen, 19
procedimiento de síntesis de, 19
Postcurado, 25
Preimpregnados, 63, 87, 96-101
almacenaje y manipulación, 99
ciclo de curado, 98
elaboración, 97
tipos, 98
Preimpregnados parciales, 63, 87, 101-104
Presiones absolutas, 87
Presiones relativas, 87
Procesos de fabricación, 63-68
clasificación, 63
Proyección simultánea, 63, 75-81

R

Raso, 49
Recubrimientos, 35-37
Refuerzo, contenido de, 64-65
Refuerzo, fibras de, 15-18, 39-46, 72
Resinas, 27-33
clasificación, 27
RTM, 63, 105-111
proceso, 108

S

Sarga, 48
Satén, 49
Saturadoras, 77, 79
SCRIMP, método, 118
Silionne, 40
Sistemas catalíticos, 29
Sistemas mallados, 46, 51
Sistemas no mallados, 46, 47-51

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005

T

Tacky tape, 91, 94
Tafetán, 48
Tejidos, 47-49
Tejidos pelables, 91-92
Tela, 48
Termoestables, 20, 22
Termoplásticos, 20, 21
Topcoat, 36-37
Trenzados, 50-51
Triaxial, 50

U

Unidireccional, 50

V

Vacío, 63, 87
    formas de obtención, 88-90
VARTM, 63, 117-118
Velo de superficie, 47
Verranne, 40
Viniléster, resina, 27, 30

© Los autores, 2005; © Edicions UPC, 2005