

Materiales compuestos

para embarcaciones deportivas

Blanca Parga Landa

Dra. Ing. Naval. Prof. Titular UPM.

Francisco Hernández Olivares

Catedrático de Materiales de Construcción. UPM.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales compuestos convencionales y avanzados en Ingeniería ha aumentado enormemente durante las últimas décadas debido a las ventajas que presentan frente a los materiales metálicos.

El campo náutico deportivo ha utilizado los materiales compuestos convencionales desde los años cincuenta. Pero no ha comenzado a utilizar los materiales compuestos avanzados hasta hace relativamente poco.

Este artículo pretende tratar sobre los criterios de selección de materiales compuestos en embarcaciones deportivas, señalando qué ventajas o inconvenientes puede comportar la utilización de uno u otro material compuesto. Previamente, se define lo que es un material compuesto y se describen sus tipos.

2. DEFINICIONES. LOS MATERIALES COMPUESTOS

El término *material compuesto* cabría aplicarlo a todo material resultante de la combinación de dos o más materiales diferentes. Así, una aleación de aluminio, podría ser considerada como un material compuesto. Pero no es ésta su acepción en el mundo tecnológico actual.

El término material compuesto se aplica en nuestros días solamente a aquéllos que poseen las tres características siguientes (1):

1. Están compuestos por dos o más materiales, físicamente distintos y mecánicamente separables.

2. Se obtienen mediante un proceso controlado de mezcla que permite dotar al material resultante de propiedades óptimas.

3. La combinación de los materiales constituyentes produce un efecto sinérgico, de tal forma que las propiedades del material compuesto son superiores a las que exhiben aisladamente los materiales constituyentes.

Según esto, quedan excluidos del concepto actual de material compuesto algunos materiales artificiales, como por ejemplo las aleaciones y, por supuesto, los materiales natura-

«Es muy difícil, por no decir imposible, encontrar inspectores con experiencia en la fabricación de componentes en materiales compuestos avanzados.»

les, aunque es preciso señalar que algunos autores (2) denominan materiales compuestos naturales a aquéllos que están formados como combinación de dos materiales naturales. Por ejemplo, la madera, compuesta de fibras de celulosa impregnadas en una matriz de lignina.

En un material compuesto el material de refuerzo aporta generalmente propiedades mecánicas: resis-

tencia, rigidez y tenacidad de fractura fibrilar. Determinados tipos de refuerzo también pueden aportar otras propiedades como por ejemplo resistencia al fuego (fibra de vidrio) o conductividad (fibra de carbono).

El material llamado matriz permite mantener unidos los refuerzos y dota al conjunto de otro tipo de propiedades como pueden ser: durabilidad, tenacidad de fractura interlaminar, resistencia a la corrosión, moldeabilidad, resistencia al fuego, etc.

Los materiales compuestos se clasifican en función del tipo de matriz en las siguientes categorías:

1. De matriz cerámica
2. De matriz metálica
3. De matriz polimérica
4. Otros

En la construcción de embarcaciones deportivas los únicos materiales compuestos que aportan ventajas frente a la madera, el aluminio o el acero son los de matriz polimérica.

La utilización de materiales compuestos de matriz metálica no comportaría ninguna de las ventajas que se enumeran más abajo y, además, encarecería el proyecto.

Las matrices cerámicas son excesivamente frágiles por lo que no se emplean con este fin.

Y en lo que se refiere a otro tipo de matrices, en alguna ocasión se ha utilizado hormigón reforzado con fibra de acero (3), pero esta combinación no resulta habitual.

Por tanto, los materiales compuestos empleados en el diseño de embarcaciones deportivas son, fundamentalmente, matrices poliméricas (resinas) reforzadas.

Material	ρ kg/m ³ x 10 ³	E GPa	E ^{1/2} / ρ
Acero	7,8	207	1,8
Aluminio	2,8	71	3,0
Vidrio E/Poliéster Vf=18%	1,5	8	1,9
Vidrio E/epoxi Vf=52%	2,0	48	3,5
Kevlar49/epoxi Vf=52%	1,4	76	6,2
Carbono/epoxi (E=300 GPa) Vf=52%	1,5	167	8,6

En función del tipo de refuerzo los materiales compuestos se clasifican en los siguientes:

1. Materiales compuestos reforzados con cargas.

Se denominan *materiales compuestos cargados*, aquellos que resultan de dispersar en la resina pequeñas partículas, aditivos o filamentos (cargas) con el fin de elevar sus propiedades mecánicas o rebajar su precio.

Las cargas aumentan la masa y pueden tener una función estructural, en cuyo caso, mejoran algunas propiedades: aumentan la resistencia a compresión, el módulo de Young, la tenacidad de fractura, la resistencia al calor, y reducen el coeficiente térmico de expansión. Pueden añadirse también cargas a la resina para reducir su coste, dotarle de propiedades ignífugas, anticorrosión o de un color determinado, o bien modificar su tixotropía con el fin de mejorar su trabajabilidad.

Un ejemplo de utilización de este tipo de materiales compuestos en embarcaciones deportivas es el recubrimiento exterior o "gel-coat".

2. Materiales compuestos reforzados con fibras. Las fibras de refuerzo pueden ser cortas, de una longitud comprendida entre 25 y 50 mm, o bien largas y continuas (cintas).

El *mat* es un fieltro de hilos (generalmente de vidrio E) aglomerados entre sí mediante un liante químico.

Los hilos que forman un *mat* suelen ser cortados, de una longitud comprendida entre 25 y 50 mm y distribuidos aleatoriamente en el plano. Pero también se denomina *mat* (aunque no es lo corriente) a un fieltro de hilos largos continuos aleatoriamente distribuidos.

Cuando las fibras de refuerzo son largas, continuas y paralelas se denominan cintas. Normalmente las cintas suelen presentarse preimpregnadas en resina.

3. Materiales compuestos reforzados con tejidos de roving o tejidos propiamente dichos

El *roving* es un ensamblado sin torsión de hilos de vidrio E continuo, que ha recibido un ensimaje plástico compatible con la resina de estratificación. Una de sus aplicaciones es tejerse, dando lugar a los tejidos de *roving*.

Se denomina *tejido* al producto que resulta de tejer hilos a los que previamente se ha aplicado un proceso de torsión en S o en Z. Al tejer los hilos se pueden formar entramados diversos en función de la disposición geométrica entre los hilos de

trama y urdimbre. Se da lugar así a diversos patrones o cursos que dotan al tejido de determinadas características. Por ejemplo, los tejidos tipo satén son más adecuados para el moldeado de zonas con curvatura, mientras que los tejidos planos son más apropiados para paneles planos.

La diferencia entre los *tejidos* y los *tejidos de roving* es la torsión aplicada a los hilos de trama y urdimbre de los primeros con el fin de alcanzar una mayor fracción volumétrica de refuerzo en el laminado final. Por ello, los tejidos de *roving* se utilizarán en laminados con un tanto por ciento en peso de refuerzo comprendido entre el 35% y el 50% como máximo, mientras que los tejidos podrán utilizarse con fracciones gravimétricas de hasta un 65% y fracciones volumétricas que pueden alcanzar hasta un 60% cuando se emplea tecnología aeronáutica.

Se denominan tejidos unidireccionales aquéllos que son prácticamente una cinta, pero que contienen algunos hilos de trama con el fin de mantener alineados y unidos los hilos de urdimbre.

El material compuesto se obtiene combinando fibras con la arquitectura elegida con una resina a la que refuerzan para obtener una mezcla bien consolidada.

En función de las prestaciones que se exigen al producto final, la variedad de materiales compuestos que puede obtenerse combinando diferentes tipos de refuerzos es casi indefinida.

Antes de continuar conviene añadir cierta nomenclatura propia de los materiales compuestos.

Se denomina *capa* a cada una de las láminas elementales que constituyen un *laminado o estratificado*. Está compuesta de una resina que impregna el material de refuerzo en cualquiera de las formas siguientes: mat, cintas, tejidos de roving o tejidos propiamente dichos.

Se denomina *laminado* a un conjunto de capas idénticas apiladas en

la misma dirección, y *estratificado* a un conjunto de capas apiladas con orientaciones diferentes. Pero en el lenguaje coloquial se utiliza la palabra laminado indistintamente.

Se denomina *híbrido* a todo laminado o estratificado formado por dos o más sistemas de materiales compuestos. La diferencia entre ellos estriba en las matrices y/o en los refuerzos.

Se denomina *material compuesto híbrido* al que resulta de combinar dos o más tipos diferentes de fibras que se impregnan con la misma matriz.

Las diferentes variedades que pueden obtenerse se clasifican en: *híbridos intercapas* e *híbridos intracapas*.

Los híbridos intracapas son laminados o estratificados en los que el tejido de refuerzo de cada capa está formado por dos tipos de fibras diferentes.

Los híbridos intercapas son laminados formados por una sucesión de capas (cada una del mismo sistema fibra-matriz), en los que el refuerzo de capas alternas es diferente.

Se denomina *estructura sandwich* a un conjunto formado por un alma o núcleo de baja densidad, generalmente espuma rígida, madera de balsa o *honeycomb*, y dos laminados o estratificados que forman el revestimiento exterior o alas.

Se utilizan a modo de vigas en I para aumentar la inercia del conjunto y mejorar notablemente la resistencia y rigidez a flexión del laminado con un coste en peso del conjunto que es mínimo.

3. PROPIEDADES DE MATERIALES CONSTITUYENTES

3.1. Tipos de matrices

Las resinas utilizadas en componentes estructurales son las termoestables: resinas que una vez polimerizadas no pueden volver a moldearse.

Las resinas termoestables más comunes son las tipo poliéster. Tam-

bién se emplean resinas viniléster y epoxi. Y en grandes embarcaciones comienzan a utilizarse resinas fenólicas ya que aumentan la seguridad de la embarcación en condiciones de incendio.

3.1.1. Resinas poliéster

Existen tres clases diferentes: ortoftálicas, isoftálicas y las tipo bisfenol.

Son baratas, con excelente resistencia a la humedad, resistentes también a ácidos y a álcalis.

Son las más utilizadas como matriz de refuerzos de vidrio E (*mat, roving* y tejido). Actualmente se emplean también con refuerzos de Kevlar.

Las resinas poliéster que se utilizan para embarcaciones deportivas son las basadas en el ácido isoftálico y en el ácido ortoftálico.

La cantidad de agua que absorben a largo plazo las isoftálicas y las ortoftálicas es diferente, siendo bastante superior la relativa a las ortoftálicas. Por ello, en las zonas de la embarcación que vayan sumergidas conviene utilizar resinas poliéster de tipo isoftálico.

Hasta hace poco, en la obra viva se han empleado resinas de tipo ortoftálico. De hecho, por ser más baratas algunos fabricantes continúan utilizándolas en toda la embarcación a pesar de estar recomendado que no se empleen en zonas sumergidas. Por ello, si se encarga la fabricación de una embarcación en vidrio E/poliesté-

ter (o si se compra) conviene cerciorarse de que el poliéster utilizado en la obra viva es de tipo isoftálico. El empleo de poliéster ortoftálico en obra viva condiciona la vida de la embarcación, ya que el material compuesto que resulta al entrar en contacto con el agua durante largos períodos puede degradarse por ósmosis. En tal caso aparecen burbujas (*blistering*) y también deslaminaciones.

Si bien las resinas tipo poliéster pueden utilizarse con refuerzos de características elevadas (Vidrio S, Kevlar, carbono), el material compuesto resultante exhibe unas propiedades mecánicas inferiores a las que se obtendrían con otras matrices.

Su tiempo de curado es bastante rápido dependiendo del tipo de poliéster y de la mezcla que se realice.

No precisan aportación de calor para que polimericen por lo que son idóneas para el moldeo manual y curado al aire libre.

Conviene tener en cuenta también que el trabajo con estas resinas debe realizarse con precaución (máscarilla de carbono y guantes-) ya que, durante su aplicación, produce emisiones de estireno, producto tóxico y teratógeno, extremo este último que no es conocido.

Si se les aplica un postcurado con calor (lámparas u otra fuente de calor), mejoran considerablemente su tenacidad de fractura.

En la tabla I se relacionan algunas de sus propiedades.

Propiedad	Unidades	Epoxi	Poliéster	Fenólicas
Densidad	10 ³ kg/m ³	1,1-1,4	1,2-1,5	1,2-1,3
Mod. de Young	GPa	3- 6	2- 4,5	2-4
Resistencia Trac. MPa	30-90	40-90	40-60	
Coef. de Poisson e rotura		0,38 - 0,4	0,37 - 0,39	0,37-0,4
		%	1-6	2
Coef.exp.térm.	10 ⁻⁶ C-1	40-70	60-90	60-90
Contracción por curado %	0,1-0,4	0,4-0,8	0,1-0,4	
Absorción de agua	(%)	0,08-0,15	0,15-0,60	13-15
Temp. de transición	°C	75-175	55-62	115

Tabla I: Propiedades de resinas curadas elaborada con datos de (1 y 2)

3.1.2. Resinas del tipo viniléster

Mejoran las propiedades mecánicas (resistencia a tracción, compresión, flexión, y módulo de Young), de las resinas tipo poliéster. Sus propiedades adhesivas son también superiores así como su resistencia al impacto. Es también ligeramente superior su resistencia a la absorción de agua. Su coste es aproximadamente un 70% superior al de las resinas poliéster.

Se han utilizado para impregnar fibras de Kevlar y de carbono por sus mejores características mecánicas pero la mayoría de los constructores de yates han abandonado su empleo.

Presentan los siguientes inconvenientes: son más difíciles de trabajar aunque se carguen para controlar su tixotropía y presentan dificultades en el curado entre otras, cambios de volumen durante el curado, por lo que producen numerosas deslaminaciones.

3.1.3. Resinas epoxídicas

Existe una gran gama de resinas epoxi. Presentan mejores propiedades mecánicas que las anteriores. Sus propiedades adhesivas son también superiores. Su coste duplica con creces el coste de las tipo poliéster y puede llegar a triplicarlo en función del tipo de resina.

Aunque el ciclo de curado de la mayoría de las resinas epoxídicas para embarcaciones deportivas es necesario realizarlo a altas temperaturas (60, 70 ó 90 °C) se han desarrollado endurecedores y aditivos que permiten realizar el curado a temperatura ambiente obteniendo unas propiedades mecánicas satisfactorias.

La fragilidad que presentaban las resinas epoxi de uso naval ha sido superada y actualmente existen resinas epoxi bifásicas especialmente aptas para usos marinos, que permiten obtener laminados de elevadas propiedades mecánicas y tenaces. La diferencia entre esta generación de resinas epoxi bifásicas y las convencionales estriba en la aparición de

una segunda fase discontinua, durante el curado, que queda dispersa en la matriz en forma de partículas microscópicas, y que actúan a la manera de obstáculos durante la propagación de fisuras, incrementando así la tenacidad del conjunto.

Aunque las resinas epoxídicas de curado a temperatura ambiente adquieren todas sus propiedades a 25 °C, si se aplica un postcurado incrementan notablemente la tenacidad de fractura.

Estas resinas son las más idóneas para embarcaciones ligeras de altas prestaciones con refuerzos de Kevlar, carbono e incluso vidrio unidireccional o tejido. Su uso no está justificado con *mats* de vidrio E.

3.1.4. Resinas fenólicas

Son las resinas termoestables más antiguas.

Su proceso de producción ha sido complicado, requiriendo temperaturas elevadas para su curado. Pero actualmente existen variedades de resinas fenólicas que curan a temperatura ambiente.

No adquieren color en masa por lo que hay que pintarlas.

Su característica más sobresaliente es la resistencia a la temperatura y su baja emisión de humos en caso de ignición.

No se utilizan en pequeñas embarcaciones pero en las de cierta eslora su empleo en obra muerta aumenta la seguridad en condiciones de incendio.

Estas resinas no se pueden utilizar en zonas sumergidas debido a su elevada absorción de agua.

Su coste es similar al de las resinas tipo poliéster.

3.2. Tipos de fibras

3.2.1. Fibra de vidrio

El refuerzo de vidrio E es el más utilizado en las embarcaciones deportivas. Son refuerzos baratos y su precio depende del gramaje (peso por unidad de superficie).

Las fibras de vidrio E, aunque son resistentes, tienen una flexibilidad elevada.

Se emplean generalmente bajo las formas de fieltro o *mat* de fibra corta de unos 18 a 30 mm de longitud distribuida aleatoriamente en el plano (*chopped strand mat*). Es muy común también en forma de tejidos de roving.

Por lo general, se utilizan para reforzar matrices del tipo poliéster por lo que el ensimaje más corriente es el compatible con dicho tipo de resinas.

El vidrio E en forma de fibras continuas, unidireccional o tejido se utiliza también como refuerzo de matrices de características superiores: viniléster o epoxi. En estos casos hay que advertirlo al fabricante o distribuidor para que el ensimaje de la fibra sea compatible con la matriz que va a reforzar.

Existe otra variedad de refuerzos de vidrio de características elevadas: el vidrio R o el vidrio S, también denominado vidrio S-2. Sus características son casi idénticas pero se designan de forma diferente porque son producidos por multinacionales diferentes.

El precio de estas fibras es aproximadamente entre cuatro y seis veces el de la fibra de vidrio.

En la tabla II se relacionan algunas de sus propiedades.

3.2.2. Refuerzos de aramida

Las fibras de aramida tienen una resistencia específica elevada y elevada resistencia al impacto, por lo que se emplean como protección en zonas estructurales susceptibles de recibir cargas de impacto.

Las fibras de aramida que se comercializan -Kevlar y Twaron-, presentan dos variedades: las de alto módulo (E 120 GPa), utilizadas con fines estructurales, y las de bajo módulo (E 60 GPa) para aplicaciones en las que se requiera elevada resistencia al impacto. Estas últimas suelen utilizarse en cabullería.

Propiedad	Unidades	Vidrio E	Vidrio S	Aramida	Carbono I	Carbono II
Diámetro	m ⁶	7-14	11,8	7-9,8	7,,5-8,8	
Densidad	10 ³ kg/m ³	2,56	2,49	1,45	1,95	1,75
Mod. Young	GPa	70	84	120	380	240
Resistencia Trac. Mpa		1,5-2,5	2,4-4,2	2,7-3,5	2,0	
e rotura %		1,8-3,0	4,5	2,0-2,7	0,5	1,0
Coef.Exp. térm. 10 ⁻⁶ °C ⁻¹		5,0	1,05	2,0	0,6 a -1,3	0,2 a -0,6

Tabla II: Propiedades de fibras de refuerzo. Elaborada con datos de (1 y 2)

Otra característica importante de los refuerzos de aramida es su baja densidad, lo que permite disminuir considerablemente el peso de la estructura.

A pesar de la elevada resistencia a tracción específica que presenta la fibra de Kevlar 49, su resistencia a compresión es notablemente inferior a la del vidrio E, dificultad subsanada utilizando configuraciones híbridas: aramida/vidrio o aramida/carbono.

Los refuerzos de aramida tienen varios inconvenientes. El primero es su dificultad de mecanizado. El segundo es la degradación que experimentan por la luz ultravioleta. Por ello, las zonas de la embarcación expuestas al sol donde se ha utilizado este tipo de material deben de protegerse para evitar que se degrade. Finalmente, las fibras de aramida tienen tendencia a desfibrilarse por lo que son poco recomendables en aplicaciones en las que estén sometidas a momentos flectores.

El precio de las fibras de aramida es unas 10-15 veces el de la fibra de vidrio E.

3.2.3. Refuerzos de carbono

Las fibras de carbono se utilizan actualmente en la construcción de yates ultraligeros.

Existen dos familias de fibras de carbono: las de alto módulo y las de alta resistencia. Actualmente existen fibras de carbono de módulo muy elevado (*ultra high modulus*) que alcanzan valores cercanos a los 1000 GPa, valores más de cuatro veces el módulo del acero, y fibras de resistencia muy elevada (*ultra high strength*) con valores de resistencia a

tracción de hasta 8 y 9 GPa, de nuevo, cuatro veces la resistencia de un acero de alta resistencia. El proceso de producción de estas variedades es bastante más complejo que el de las fibras de carbono que presentan propiedades medias por lo que su precio se dispara. Precisamente por ello reglamentos como el de la Copa América limitan el módulo de las fibras de carbono que pueden emplearse en casco, mástil y apéndices: las fibras de carbono que pueden utilizarse en el mástil no pueden ser de módulo superior a 310 GPa y las empleadas en el casco, cubierta y apéndices no pueden tener módulos superiores a 235 GPa.

Siempre que se seleccionen refuerzos de fibra de carbono para apéndices o bien para casco estructural, deben de impregnarse con matrices tipo epoxi de buena calidad, cuidando mucho el proceso de fabricación, que deberá llevarse a cabo con un estricto control de calidad para obtener así las mejores características en el laminado final.

El mayor inconveniente de estas fibras es su precio, que depende mucho de la variedad; ha descendido mucho estos últimos años. Por ello, en caso de seleccionar este tipo de refuerzo, lo mejor es hablar previamente con varios fabricantes.

Las fibras de alta resistencia son aproximadamente unas diez veces el precio del refuerzo de *roving* de vidrio E de 800 g/m². Las de alto módulo pueden multiplicar el precio de la fibra de vidrio E por veinte, treinta o cuarenta.

Otro inconveniente de las fibras de carbono es su potencial electrolí-

tico, que es diferente del del acero y al entrar en contacto con este último da lugar a una diferencia de potencial que tiene como consecuencia la corrosión por electrolisis del metal. Ello obliga a emplear pernos y remaches de titanio, lo que añade un mayor coste a la pieza final.

3.2.4. Refuerzos híbridos

Hoy día los fabricantes de tejidos de refuerzo ofrecen un abanico impresionante de refuerzos híbridos, que permiten aprovechar las ventajas que presenta cada tipo de fibra y compensar sus inconvenientes.

3.2.4.1. Híbridos carbono-aramida

La hibridación de fibras de carbono-aramida mejora la resistencia a compresión y la rigidez de los laminados de aramida, y la resistencia al impacto de los laminados de carbono.

Las propiedades mecánicas del laminado con refuerzo híbrido se obtienen fácilmente a partir de las propiedades mecánicas de los laminados de uno u otro tipo de refuerzo y el contenido en volumen de ambos ya que en los ensayos realizados sus propiedades evolucionan siempre siguiendo una ley lineal, función del contenido en volumen de uno de los refuerzos.

3.2.4.2. Híbridos vidrio-aramida

Este tipo de hibridación se utiliza cada vez más en la construcción de yates.

La fibra de vidrio aporta resistencia a compresión y reducción del coste del conjunto. Por el contrario, la fibra de Kevlar 49 aporta rigidez,

resistencia frente a impacto y reducción de peso.

En este caso, las propiedades mecánicas del conjunto no siguen una ley lineal o de mezclas.

3.2.4.3. Híbridos carbono-vidrio

Este tipo de híbridos presenta algunos inconvenientes debido a las diferentes deformaciones de rotura de ambas (vidrio: 2,8% ; carbono: 1%) y coeficiente de expansión térmica (vidrio: $5.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; carbono: $-0.6 \text{ a } -1,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Su ventaja principal es el ahorro económico que comporta. No suelen utilizarse en embarcaciones deportivas.

3.2.5. Núcleos para sandwich

Cuando una embarcación adquiere cierta eslora, las formas geométricas que se dan a los laminados del casco y cubierta para rigidizar la sección no son suficientes y hay que rigidizar la estructura. En tal caso el proyecto puede acometerse empleando laminados con refuerzos en casco y cubierta o bien diseñando tanto el casco como la cubierta en "estructura sandwich".

La rigidez de un panel es proporcional al cubo de su espesor. Por tanto, si se forma un sandwich introduciendo entre dos laminados un material de gran espesor pero muy liviano (por ejemplo, una espuma) el panel incrementa considerablemente su rigidez, con un coste en peso que es mínimo. De ahí que se utilicen con gran profusión estructuras sandwich en casco y cubierta.

Los materiales seleccionados para uso como núcleos deben de ser de baja densidad, tener una elevada resistencia a cortadura y alto módulo a cortadura, elevada resistencia a compresión en la dirección del espesor, exhibir buena resistencia a fatiga, buena resistencia frente a impacto y, en la medida de lo posible, ser estancos o absorber poca agua.

Las espumas más utilizadas como núcleos son las de PVC. El único

inconveniente que presentan es que, en caso de incendio, producen gran cantidad de humos densos y tóxicos. Por ello, en grandes embarcaciones, o bien, si se quiere aumentar la seguridad en condiciones de incendio, conviene utilizar madera de balsa o espumas fenólicas.

Pueden utilizarse también núcleos de *honeycomb* plásticos o metálicos pero su precio se dispara y tan sólo están justificados en casos en los que el peso de la embarcación haya de minimizarse: en yates de regata.

4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAMINADOS

De la definición de material compuesto expuesta puede deducirse que las propiedades finales de un laminado van a depender de:

1. Las propiedades de los materiales constituyentes: fibras y matriz.
2. La arquitectura del refuerzo y su orientación.
3. La proporción de refuerzo.
4. El método de fabricación.

Estos cuatro factores están, de hecho, interrelacionados de tal forma que la proporción de refuerzo fracción volumétrica, y la arquitectura de los refuerzos seleccionados por el proyectista condicionan el método de fabricación.

Por ello, antes de relacionar las propiedades de materiales compuestos se hace una breve referencia a los métodos de fabricación.

4.1. Métodos de fabricación

La fabricación de materiales compuestos puede acometerse con diferentes técnicas cuyo objeto es combinar una fibra que va a reforzar una resina para obtener una mezcla bien consolidada.

El tipo de técnica que ha de seleccionarse para fabricar una pieza depende tanto del tamaño de la pieza como de la calidad y prestaciones exigidas al material final.

Las embarcaciones deportivas se fabrican normalmente con técnicas

de laminación manual por vía húmeda: se impregnan rollos de fibra (*mats*, tejidos de *roving* o tejidos propiamente dichos), con una resina tipo poliéster, viniléster o epoxi, de curado a temperatura ambiente, y el exceso de la misma se retira con los rodillos. Como ventajas de este método aparecen la sencillez de aplicación y la economía. Pero la calidad final que se obtiene con este método es escasa, y el peso de laminado no es fácilmente controlable ya que, aunque se pesen las cantidades de resina, su aplicación la realiza "a ojo" un operario y el sangrado depende de la presión que aplique el operario a los rodillos.

Una mejora importante de este método consiste en aplicar vacío para compactar mejor el laminado y sangrar el exceso de resina.

El método de laminación manual se optimiza cuando se emplean tejidos preimpregnados. En este caso, el propio fabricante del tejido combina la resina con el tejido en una proporción óptima. De esta forma el peso del laminado se minimiza, su homogeneidad es superior y el posterior sangrado de la resina es menor. El riesgo de que queden zonas de laminado secas -sin impregnar o quemadas como consecuencia de un pico térmico producido por acumulación excesiva de resina-, es menor, aunque si se produce un curado defectuoso también pueden aparecer zonas secas. Finalmente, el empleo de preimpregnados permite obtener mayores fracciones volumétricas de refuerzo.

Pero si se utilizan tejidos preimpregnados, las técnicas de fabricación son más complejas y se encarecen: las resinas utilizadas en tejidos preimpregnados son resinas epoxídicas que hay que almacenar en congeladores a la temperatura bajo cero que determine el fabricante y deben de curarse siguiendo un ciclo térmico también definido por el fabricante.

Hay resinas de curado a 60, 70 y hasta 90 °C.

En estos casos, los moldes deberán ser de un material que soporte estas temperaturas sin distorsionarse.

El calor puede aplicarse empleando un horno de grandes dimensiones, útiles autocalefactables, o bien, una manta con hilos de fibra de carbono por los que se hace pasar electricidad.

La calidad del producto final obtenido cuando se utilizan tejidos preimpregnados es muy superior a la que se obtiene con técnicas de vía húmeda.

Pero el material no lo es todo y el laminado sólo alcanza sus propiedades finales óptimas cuando se trabaja con pulcritud, limpieza y cuidado, controlando el vacío aplicado, la correcta evolución del ciclo de curado y la técnica empleada para sangrar el exceso de resina.

Si los materiales seleccionados para un proyecto son materiales compuestos avanzados, la mejor calidad se obtiene cuando todas las propiedades anteriores pueden ser controladas con precisión y, además, se aplica de forma también controlada una presión de compactación; es decir, cuando se trabaja con calidad aeronáutica y se utiliza un autoclave de calidad aeronáutica.

Y decimos calidad aeronáutica porque existen varios astilleros extranjeros que ofrecen autoclaves para fabricación de todo tipo de

componentes para yates y piezas fabricadas en autoclave: mástiles, botavaras, etc., pero su calidad no es comparable a la que se obtiene con técnica aeronáutica. Por otra parte, no se puede olvidar que en el sector naval falta todavía (tanto en España como en el extranjero), experiencia en producción de piezas en materiales compuestos avanzados y no existen todavía métodos homologados de inspección de piezas fabricadas en materiales compuestos avanzados. Por lo tanto, no existen criterios objetivos de aceptación o rechazo de piezas fabricadas en materiales compuestos avanzados en función de los defectos que presenten. De ahí que no existan garantías de que la pieza que se compre tenga la calidad que se requiere para obtener las mejores propiedades de unos materiales caros y un proceso, también, caro.

El autoclave puede emplearse para determinadas piezas, por ejemplo, mástiles o timones; o en aquellos casos en los que las dimensiones del autoclave sean compatibles con el tipo de pieza. En este sentido, hay que decir que en España sobran horas de autoclave. Y si no existen problemas de tiempo ni económicos (ya que en este caso el precio del utillaje se dispara), en determinados autoclaves aeronáuticos cabe hasta el casco o la cubierta de un One Tonner.

Teniendo en cuenta que en el proyecto de un yate el principal requisito que han de cumplir los laminados es la fracción volumétrica de refuerzo, en la tabla III tomada de (4) se comparan las fracciones volumétricas medias que se alcanzan con los diferentes métodos de fabricación utilizables en un astillero.

Se observa que la mayor fracción volumétrica se obtiene cuando se emplean tejidos unidireccionales preimpregnados de curado a alta temperatura compactados con vacío. Dicho de otra forma, un laminado de idénticos constituyentes presenta las propiedades mecánicas más elevadas en una dirección cuando se han seleccionado tejidos preimpregnados y se ha aplicado vacío para mejorar la compactación. Las mayores fracciones volumétricas que se han obtenido (5) en un casco de fibra de carbono han sido de 52-54%.

4.2. Propiedades mecánicas de laminados

Las propiedades mecánicas de un laminado están determinadas por las propiedades mecánicas de la fibra de refuerzo y la fracción volumétrica de refuerzo.

La arquitectura del refuerzo determina la distribución de las propiedades mecánicas en el plano.

Así, un laminado formado por varias capas de *mat* de vidrio E presenta unas propiedades mecánicas isotropas en el plano, o lo que es lo mismo, las mismas propiedades en todas las direcciones del plano.

Un laminado formado por varias capas de un tejido de *roving* equilibrado con idéntica orientación de capas presenta sus propiedades máximas en las direcciones de trama y urdimbre 0° y 90°. En cambio, si se forma un estratificado y las capas se orientan a 0°/45°, se obtiene una distribución de propiedades mecánicas cuasi-isótropa.

Un laminado formado por varias capas de cinta unidireccional con idéntica orientación de capas pre-

Metodo de fabricación	Fracción volumétrica de refuerzo %
Vía húmeda sin vacío curado a temp. ambiente (refuerzo:tejido).	33
Vía húmeda sin vacío curado a temp. ambiente (refuerzo:unidireccional)	36
Vía húmeda con vacío curado a temp. ambiente (refuerzo:tejido)	40
Vía húmeda con vacío curado a temp. ambiente (refuerzo:unidireccional)	43
Tejido preimpregnado curado a 75 °C con vacío	46
Cinta o tejido unidireccional preimpregnado curado a 75 °C con vacío	50

Tabla III: Fracciones volumétricas de fibra (%) obtenidas con diferentes métodos de fabricación.

senta propiedades máximas en la dirección de la cinta o las fibras del tejido unidireccional. En cambio, en dirección transversal el laminado responde como si fuera una resina reforzada con cargas.

Por otra parte, la arquitectura del refuerzo condiciona también la fracción volumétrica final de refuerzo en el material compuesto. Porque para que el material compuesto trabaje como tal la resina debe de mojar e impregnar completamente todas las fibras. Así, cuando se trabaja con feltros de Vidrio E la resina debe mojar e impregnar toda la superficie de todas las fibras; de ahí que la propia distribución aleatoria de las fibras cortadas impida que se alcancen fracciones volumétricas elevadas de refuerzo, rondando los valores que se alcanzan el 11%-18%.

Los tejidos de *roving* precisan menos cantidad de resina para ser impregnados completamente. Y tal cantidad es todavía menor en los tejidos unidireccionales.

En la figura 1, tomada de (6), se comparan los valores de resistencia que exhiben tres laminados con idéntica fibra de refuerzo y matriz pero con diferente arquitectura de refuerzo. Se compara también la variación de la resistencia a tracción en función del ángulo de carga que presenta un laminado (CSM) con un contenido de refuerzo del 25% en peso formado por capas de mat de vidrio E y resina poliéster, un laminado (WR) con un contenido de refuerzo en peso del 50% formado por capas de tejido de *roving* equilibrado de Vidrio E y resina poliéster y, finalmente, un laminado (UD) con un contenido de refuerzo en peso del

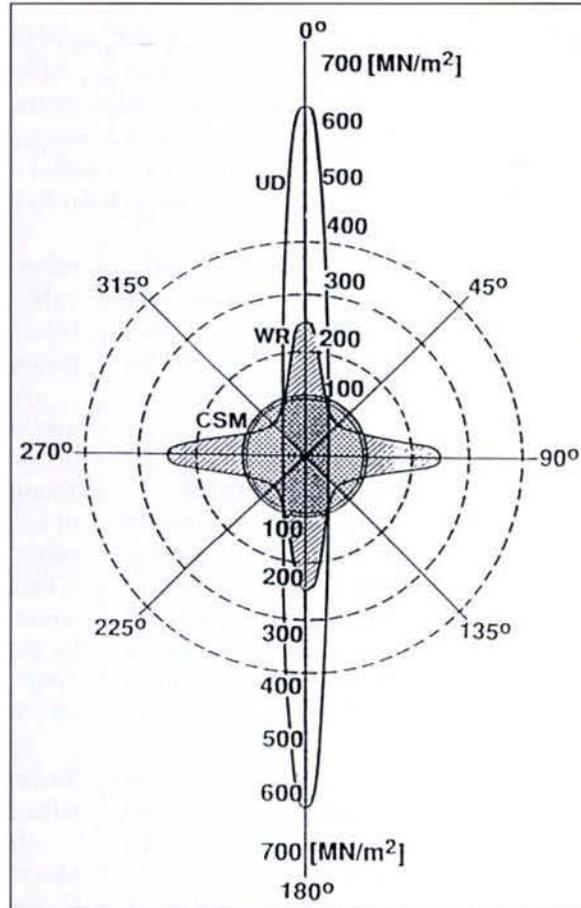


Figura 1: Valores de resistencia de MPa que presenta un laminado (CSM) con un contenido de refuerzo del 25% en peso formado por capas de mat de vidrio E y resina poliéster, un laminado (WR) con un contenido de refuerzo en peso del 50% formado por capas de tejido de *roving* equilibrado de vidrio E y resina poliéster y un laminado (UD) con un contenido de refuerzo en peso del 75% formado por capas de tejido unidireccional de vidrio E y resina poliéster

75% formado por capas de tejido unidireccional de Vidrio E y resina poliéster.

En la figura 2, tomada también de (6), se comparan los módulos de Young que se obtienen para los tres laminados anteriores: CSM, WR y UD.

La figura 3, tomada de la misma referencia, compara de forma muy gráfica los valores de módulos y resistencias que se pueden obtener en los laminados finales en función de la arquitectura del refuerzo: cuando el refuerzo seleccionado es un fieltro o un *mat* (*Chopped Strand Mat*) un tejido de *roving* (*Woven Roving*) o

bien cintas o tejidos unidireccionales. Se observa que, en los tres casos, las fracciones gravimétricas de refuerzo (porcentaje en peso) empleadas son diferentes. Con tales fracciones el refuerzo debe de estar en todos los casos totalmente impregnado de resina.

En la tabla IV, tomada de (7), se comparan las propiedades mecánicas de diferentes laminados con otros materiales de uso naval.

Considerando los datos que se aportan en la citada tabla, se recuerda que fracciones volumétricas del 62% tan sólo pueden obtenerse empleando autoclave de calidad aeronáutica con vacío y presión de compactación.

5. VENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

5.1. Materiales compuestos convencionales

Las embarcaciones deportivas construidas con materiales compuestos convencionales presentan fundamentalmente tres ventajas respecto de las construidas en madera, aluminio o acero (8).

La primera y más importante es su bajo mantenimiento.

El poliéster reforzado con fibra de vidrio no experimenta fenómenos de corrosión al estar expuesto al ambiente marino, o incluso, sumergido en agua de mar. Tampoco es susceptible de putrefacción ni atacable por gusanos marinos. Y no muestra pérdidas importantes después de estar sumergido en agua de mar durante largos períodos, superiores a 20 años (9).

Por el contrario, la madera exige un mantenimiento cuidadoso para evitar que se pudra o pueda ser atacada por gusanos; el aluminio es susceptible de corrosión y descomposición por electrolisis; y el acero debe

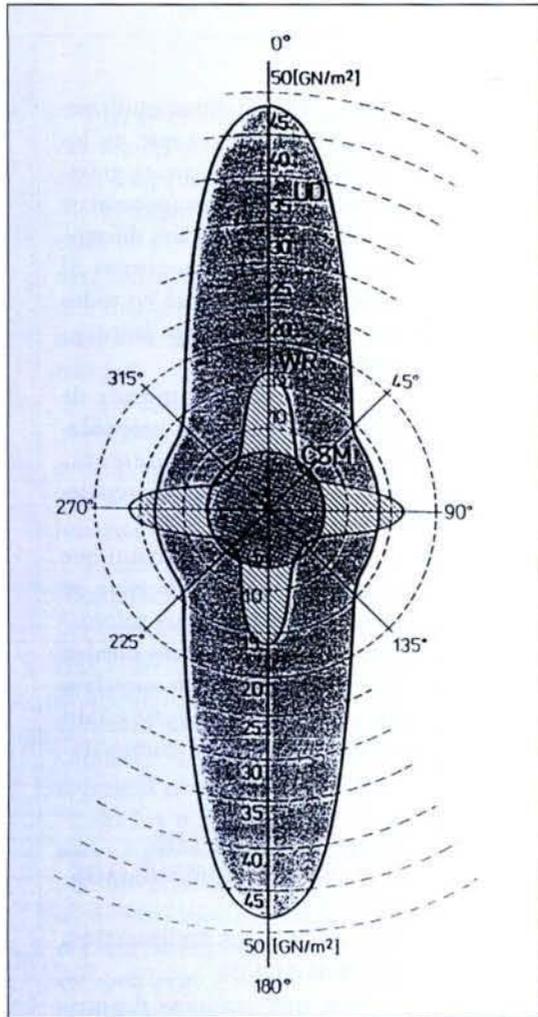


Figura 2: Valores de los módulos de Young en GPa que presentan un laminado (CSM) con un contenido de refuerzo del 25% en peso formado por capas de mat de vidrio E y resina poliéster, un laminado (WR) con un contenido de refuerzo en peso del 50% formado por capas de tejido de roving equilibrado de Vidrio E y resina poliéster y un laminado (UD) con un contenido de refuerzo en peso del 75% formado por capas de tejido unidireccional de Vidrio E y resina poliéster

Como única desventaja, cabe señalar que su peso no es el óptimo y las características mecánicas del material son bajas (Véase tabla IV).

5.2. Materiales compuestos avanzados

Los materiales compuestos avanzados ofrecen al proyectista grandes ventajas. Su anisotropía permite diseñar el material adecuado para cada zona del barco. A ello se unen sus elevadas propiedades específicas que, como se verá más adelante, en caso de yates de regata, convierten a estos materiales en la selección óptima.

La resistencia y rigidez que ofrecen (que dependen, como ya se ha dicho, del tipo de

refuerzo, su arquitectura y la fracción volumétrica del mismo), es muy superior a la de los materiales compuestos convencionales.

Por poner un ejemplo, mientras que un poliéster reforzado con mat de vidrio E exhibe un módulo de Young comprendido entre 7 y 8 GPa, una epoxi reforzada con tejido de vidrio E ($V_f = 50\%$) alcanza los 25 GPa en direcciones 0/90°; si el refuerzo es de fibra de aramida (Kevlar 49), los 32-40 GPa en direcciones 0/90°, y si es fibra de carbono, los 70-90 GPa en direcciones 0/90°.

Pueden conseguirse módulos de Young más elevados utilizando refuerzos unidireccionales.

La variedad de valores alcanzables con fibras de carbono es increíble ya que pueden alcanzarse hasta los 800 GPa con refuerzos de carbono de muy alto módulo. En tal

de pintarse constantemente para protegerlo del efecto devastador de la oxidación.

Otra ventaja que comporta la utilización del poliéster reforzado con fibra de vidrio es su facilidad de construcción. El proceso de laminación en moldes no ofrece grandes dificultades si bien es preciso controlar las condiciones ambientales del lugar donde se realice la laminación: temperatura y humedad. El tiempo de construcción es inferior y la posibilidad de utilizar el mismo molde para varias embarcaciones permite aumentar la tasa de producción.

Por último, hay que señalar que el precio de la embarcación de poliéster reforzado con fibra de vidrio es inferior a la de otros materiales. El único factor que puede encarecer las embarcaciones pequeñas es el molde, pero su coste se amortiza con facilidad.

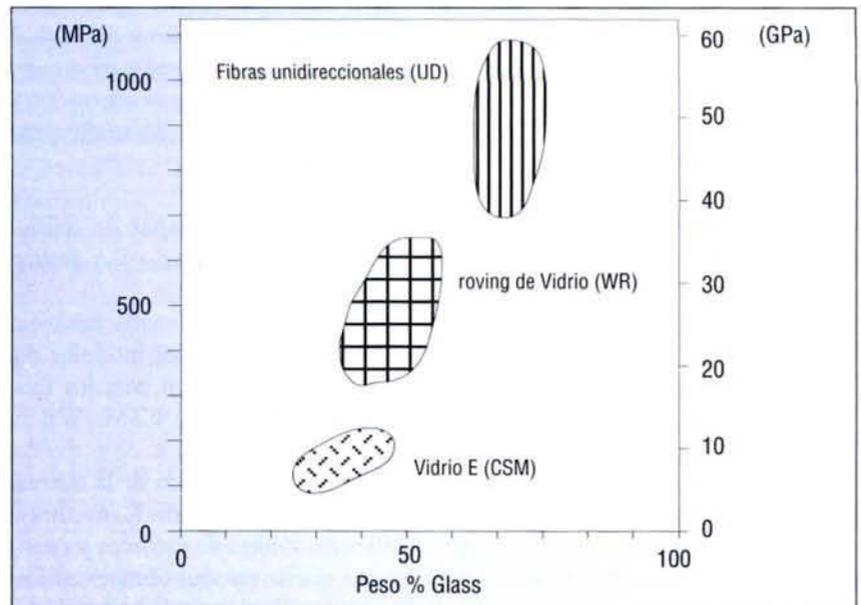


Figura 3: Valores de módulos de Young (GPa) y Resistencia a tracción (MPa) que se pueden obtener en los laminados finales para fieltros o mat de Vidrio E (Chopped Strand Mat), tejidos de roving de Vidrio E (Woven Roving) o bien cintas o tejidos unidireccionales de Vidrio E en función de fracciones gravimétricas de refuerzo

MATERIAL	Fracción volumétrica Vf	Densidad 10 ³ kg/m ³	Módulo Young (GPa)	Módulo cortadura (GPa)	Resistencia Tracción (MPa)	Resistencia Compresión (MPa)	Resistencia Cortadura (MPa)	Módulo Y. específico (GPa/t/m ³)	Resistencia Tr. Especif. (MPa/t/m ³)
VE/P CSM	0.18	1.5	8	3	100	140	75	5.3	67
VE/P WR	0.34	1.7	15	3.5	250	210	100	8.8	147
VE/P UD	0.43	1.8	30	3.5	750	600	-	16.7	417
VE/F WR	0.61	1.6	13	-	180	170	91	8.1	112
C/E alta resist. UD	0.62	1.6	140	15	1500	1300	-	87	937
C/E alto mód UD	0.62	1.7	300	20	700	650	-	176	412
A/E UD	0.62	1.4	50	8	1600	230	-	36	1143
Acero EH32	-	7.8	207	80	325	340	190	26.5	42
calidad B Aluminio 5083	-	2.8	70	26	150	150	87	25	54
Contrachapado Marino	-	0.6	7	1.0	40	25	8	11.7	67

VE/P Vidrio E/Poliéster
VE/F Vidrio E/fenólica
C/E Carbono/Epoxi
A/E Aramida/Epoxi

CSM Feltro de Vidrio E
WR Tejido de roving equilibrado
UD Cinta unidireccional

caso, el coste del material también se dispara.

Estas elevadas propiedades mecánicas junto con la baja densidad que presentan ofrecen unas características específicas tales que permiten incrementar de manera muy notable las prestaciones de una embarcación.

Si este material se utiliza en el casco y cubierta, la rigidez específica que ofrecen frente a otro tipo de materiales queda patente en la tabla IV.

En caso de yates de regata, el criterio de diseño que preside la selección de los materiales del conjunto casco-cubierta es, tal como se explica más abajo, la rigidez. De ahí que los materiales compuestos avanzados (epoxi reforzada con fibra de car-

bono), permitan reducir notablemente el peso de la embarcación exhibiendo rigideces incluso superiores a las del acero.

La elevada rigidez que aportan estos materiales permite obtener el máximo rendimiento del velamen, ya que al reducirse la deformación proapopa de la embarcación el perfil aerodinámico se acerca al óptimo proyectado (10). Y su baja densidad se traduce en un aumento de velocidad para idéntica potencia propulsora: la del viento.

En caso de emplear materiales compuestos avanzados (epoxi reforzada con fibra de carbono), en mástiles la elevada resistencia específica del material permite disminuir el peso del mástil y situar su centro de grave-

dad donde más convenga, lo que redundará en una mayor estabilidad de la embarcación (11).

En lo que a desventajas de estos materiales se refiere, la más importante es el precio, que, en el caso de la fibra de carbono, puede resultar excesivo.

Como ya se apuntó anteriormente, no todos los yates de regatas pueden beneficiarse de las ventajas de los materiales compuestos avanzados porque determinados reglamentos de regatas no permiten plena libertad al seleccionar los materiales del yate.

6. ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

6.1. Selección de materiales para minimizar el peso de veleros

La estructura resistente de un yate puede ser considerada como aquella que proporciona la resistencia

y rigidez necesarias para soportar las sollicitaciones a las que un yate puede estar razonablemente sometido.

El buque viga o, en nuestro caso, el "yate viga" consiste básicamente en el casco y la cubierta. Este "yate viga" deberá proporcionar a la embarcación la resistencia y rigidez necesarias para soportar el empuje y el conjunto de cargas tanto estáticas como dinámicas que se originan en condiciones de regata, en las que están incluídas las procedentes del velamen que transmite el mástil y las que se transmiten a través de la jarcia.

La resistencia de un yate concierne a su habilidad para soportar las distintas cargas a las que está sometido sin que el material falle.

En el caso de materiales metálicos, la resistencia es la adecuada cuando no se presentan fenómenos de plastificación ni, en el caso de emplear aluminio, aparecen fisuras por fatiga.

En el caso de materiales compuestos, puede establecerse como criterio de fallo del "yate viga" el de rotura de la matriz del material compuesto (1).

En ambos casos (embarcación de material metálico o bien embarcación de material compuesto), el criterio de resistencia es fácilmente alcanzable siempre y cuando no existan limitaciones de peso.

La rigidez del buque viga puede definirse como su resistencia a presentar deformaciones bajo cargas inferiores al límite elástico del material en el caso de materiales metálicos, o cargas inferiores a la de rotura de la matriz cuando se trata de materiales compuestos.

En el caso que nos ocupa, el "yate-viga" deberá exhibir rigidez suficiente para soportar el momento flector total al que está sometido un yate en condiciones de regata. Éste puede considerarse como la suma del momento flector en aguas tranquilas (que se calcula con gran aproximación), el momento flector en olas (que solamente puede ser calculado

suponiendo una ola estándar), y el momento al que dan lugar las cargas que recibe el "yate-viga" procedentes del velamen a través del mástil y de la jarcia.

La rigidez de una viga es directamente proporcional al módulo de elasticidad del material seleccionado y al momento de inercia de la sección, y varía inversamente con la luz. Ello significa que la rigidez del yate resulta de combinar tanto formás como escantillones, geometría de los refuerzos y, por supuesto, el material seleccionado para el "yate viga" o estructura principal.

Ambos criterios, resistencia y rigidez, han de ser considerados en el proceso de selección del material adecuado. Pero, una vez superados, quien gobierna en un yate el proceso de selección final es la rigidez.

Una elevada rigidez del "yate viga" evita deformaciones a lo largo de la eslora y, como ya se ha dicho, permite en todo momento un mejor conocimiento de la geometría del velamen lo que supone un incremento del rendimiento aerohidrodinámico (10).

Teniendo en cuenta lo expuesto, cabría afirmar que "incrementos de rigidez del casco comportan incrementos de velocidad del yate" para las mismas condiciones de viento y de mar. Tal afirmación, así enunciada, podría ser discutible. Pero si la rigidez del "yate-viga" se supone constante y se comparan los pesos de viga cuando se utilizan distintos materiales estructurales, la afirmación "para idéntica rigidez del "yate-viga", cuanto menor es el peso del "yate-viga" la velocidad que alcanza el yate es mayor" aparece evidente.

El estudio comparativo de las rigideces que aportan los diferentes materiales es inmediato si se asume la teoría de la viga simple. Esta teoría, sencilla, tiene sus limitaciones. Cuando se trata de materiales compuestos y tanto el casco como la cubierta son de estructura *sandwich*, deben de tenerse en cuenta los efectos

de tipo membrana (12). Sin embargo, para el propósito que nos ocupa (una rápida comparación entre distintos materiales estructurales) se tomará como válida.

El momento flector máximo M_f en una viga simplemente apoyada de longitud L , sección cuadrada, de manga B , y sometida a una carga continua P es:

$$M_f = PL^2/8 \quad (1)$$

La deformación d que aparece en la sección media es:

$$d = K PL^4/24 EI \quad (2)$$

donde K es una constante.

El valor del momento de inercia de la sección I viene dado por:

$$I = 1/12 B^4 \quad (3)$$

La masa de la viga se obtiene de forma inmediata:

$$M = r LB^2 \quad (4)$$

donde r es la densidad del material.

Si B , después de introducir (3) en (2), se substituye en (4) por el nuevo valor de (2), se obtiene la siguiente relación:

$$M = r L(KPL^4/2Ed)^{1/2} \quad (5)$$

Reorganizando la expresión anterior en un término dependiente de las características de la viga y las condiciones de carga, y en otro término, únicamente función de las características del material seleccionado se obtiene:

$$M = (KPL^6/d)^{1/2} (r/E)^{1/2} \quad (6)$$

La ecuación (6) se ha obtenido para una carga continua P . Si las condiciones de carga variaran, es decir, si la viga estuviera sometida a carga aislada, o a otras distribuciones de carga, únicamente se vería afectado el primer término de la ecuación (6). Por ello se proseguirá con el razonamiento expuesto y la ecuación se supondrá válida con el único fin de establecer una jerarquía entre los materiales posibles.

Una primera interpretación de dicha ecuación permite afirmar que para vigas simples de diferentes materiales para las que se supone constante la deformación, dimensiones de la sección y condiciones de carga, el peso de la viga depende exclusivamente del material seleccionado: del término $r/E^{1/2}$. Por tanto, la viga de peso mínimo que exhibe idéntica rigidez que las restantes es aquella para la cual la relación $r/E^{1/2}$ es mínima o, lo que es lo mismo, su inversa es máxima.

En la tabla V se comparan las relaciones anteriores para vigas de idéntica rigidez pero construidas con diferentes materiales.

La tabla V muestra que la viga más ligera de rigidez idéntica a las

permite comparar la reducción de peso que se obtiene en cualquier otro tipo de embarcación manteniendo la rigidez.

Tales reducciones tienen como consecuencia incrementos de la velocidad de la embarcación para idéntica potencia propulsora. Por lo tanto, cuando se trata de mejorar la rigidez o minimizar el peso de una embarcación deportiva los materiales compuestos avanzados son la selección óptima.

6.2. Tipo de astillero en el que se va a fabricar el yate

Cuando se trabaja con materiales compuestos, el método de producción determina las propiedades finales del material obtenido. Por ello, en

Material	r kg/m ³ x 10 ³	E GPa	E ^{1/2} /r
Acero	7,8	207	1,8
Aluminio	2,8	71	3,0
Vidrio E/poliéster V _f = 18%	1,5	8	1,9
Vidrio E/epoxi V _f = 52%	2,0	48	3,5
Kevlar49/epoxi V _f = 52%	1,4	76	6,2
Carbono/epoxi(E=300 GPa) V _f = 52%	1,5	167	8,6

Tabla V

restantes es la fabricada con un material compuesto avanzado: resina epoxi reforzada con fibra de carbono de módulo intermedio.

Se observa también que el peso de la viga de acero y la de fieltros de vidrio E/ poliéster que exhiben idéntica rigidez es similar y que los materiales compuestos superan al aluminio cuando se utilizan refuerzos unidirecciones de fibra de vidrio E.

Una vez seleccionado el material que aporta la máxima rigidez con peso mínimo, es preciso tener en cuenta la geometría de las secciones para optimizar la rigidez sin variar el peso y el propio diseño constructivo. Este razonamiento anterior también

caso de acometer la construcción de una embarcación en materiales compuestos es muy importante contar con un astillero o un equipo de laminadores que estén familiarizados con los materiales compuestos.

No es lo mismo construir una embarcación con materiales metálicos o con madera que con materiales compuestos.

Cuando se trabaja con los primeros el astillero es un "utilizador de materiales", que aprovisiona materiales que en el momento de ser recepcionados poseen ya todas sus propiedades ingenieriles.

En cambio, cuando se trabaja con materiales compuestos el astillero

es un "transformador de materiales", que aprovisiona materiales precederos que deben ser sometidos a reacciones químicas controladas antes de exhibir sus propiedades ingenieriles. En este caso, el control de calidad incide sobre aspectos que no se tienen en cuenta cuando se trabaja con madera o acero porque la calidad de la embarcación depende totalmente de las condiciones del proceso. Por ejemplo, no puede olvidarse que el espesor de un laminado se obtiene a base de apilar capas de refuerzo impregnadas con resina. Si entre capa y capa quedan depositadas partículas de polvo se originan ya en el propio proceso de producción pequeños defectos que cuando la embarcación entra en servicio y está sometida a carga coalescen formando fisuras interlaminares o deslaminaciones.

Finalmente, si se cometen determinados errores durante el proceso o posterior montaje pueden aparecer defectos que impidan que el laminado alcance las propiedades mecánicas para las que ha sido diseñado (5).

Resumiendo, la construcción de un yate en materiales compuestos difiere considerablemente de la de un yate en madera o acero y precisa personal y un control de calidad adecuados.

6.3. Otras consecuencias derivadas del tipo de refuerzo

Ya se ha dicho que las propiedades finales que alcanza un material compuesto dependen de las condiciones del proceso de producción y que los materiales compuestos avanzados son la selección de material óptima tanto para veleros como para minimizar el peso de una embarcación deportiva. Pero, hoy por hoy, la selección del tipo de refuerzo para una embarcación deportiva tiene otra consecuencia que conviene considerar.

Si se selecciona un material compuesto convencional (Vidrio E en forma de mats o tejidos de roving impregnados en poliéster) existe

experiencia en fabricación de embarcaciones con dichos materiales. Además, las diferentes Sociedades de Clasificación (**Lloyds' Register of Shipping, Det Norske Veritas, etc.**) tienen Reglamentos de construcción de embarcaciones en materiales compuestos convencionales que indican cómo acometer el cálculo de los materiales y definen el control de calidad mínimo que hay que realizar para asegurar la calidad de la embarcación.

Pero cuando se seleccionan materiales compuestos avanzados para una embarcación la experiencia es muy reducida.

Las oficinas de diseño (**Bruce Farr Associates, Vrolijk** y otros) se limitan a especificar los tipos de material, la arquitectura de los refuerzos y una fracción volumétrica mínima en los laminados de determinadas zonas de la embarcación, pero no establecen ningún otro criterio ni dan pauta alguna respecto del proceso de fabricación.

En este caso no existen Reglamentos de Sociedades de Clasificación que informen ni sobre el cálculo de los materiales ni sobre el control de calidad que debe aplicarse durante el proceso de fabricación.

Si el control de calidad se encarga a una Sociedad de Clasificación, se suele requerir que se envíen los planos a la oficina central, se sugieren pautas y se exigen requisitos mínimos (en lo que a propiedades se refiere) pero en ningún momento establecen criterios de aceptación o rechazo de componentes en función de la existencia de defectos en el mismo. El control de calidad a pie de obra lo realiza la Sociedad de Clasificación. Pero es muy difícil, por no decir imposible, encontrar inspectores con experiencia en la fabricación de componentes en materiales compuestos avanzados.

Por lo tanto, cuando se seleccionan materiales compuestos avanzados el armador debe de tener en cuenta que la selección de materiales reali-

zada es la óptima, pero es imprescindible que tanto el diseño del estratificado (15) como el proceso de producción sean los adecuados para que tales materiales adquieran sus propiedades ingenieriles y no presenten defectos de fabricación que acortarán la vida de la embarcación o de los apéndices. Por ello debe de exigir al astillero que establezca un control de calidad adecuado en todas y cada una de las fases del proceso de producción.

7. BIBLIOGRAFÍA

1.- **Hull, D.** An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press (1981)

2.- **Ashby.** Engineering Materials Vol. I y II. Pergamon Press (1991)

3.- **B. Parga Landa; A. Sarabia Alvarez UDE** "The Bribon: High Curing Temperature and vacuum for the Lightest One Tonner in Spain". Proc. Fourth Int. Conf. on Marine Applications of Composite Materials MACM 92 (1992) Editor: Composites Education Association Inc. Melbourne (USA)

4- **B. Parga Landa** "El proceso de producción de materiales compuestos avanzados: Influencia de las variables del proceso en las propiedades finales de los laminados" Revista de Ingeniería Naval. Núm. 694: 295-305 (1993)

5.- **B. Parga Landa; L. Martín Sánchez** "Quality Assurance of Marine Structures for Yachts Made on Advanced Composite Materials" ICCM 9 Composites Application vol 6. A. Miravete. Ed. University of Zaragoza. Woodhead Pu. Ltd ISBN I-85573-135-1(1993)

6.- **Johnson, A.F.** Engineering design Properties of GRP. BPF Publication nº 215. London (1978)

7.- **C.S Smith** "Design of Marine Structures in Composite Materials" . Elsevier Applied Science. ISBN 1 851664165 (1990)

8.- **Laszlo, PD.** Polyester/Glass Boat Hulls. Glas Reinforced Plastics. Ed. Phillip Morgan. British Plastics (1957)

9.- **Johnson, A.F.** Comparison of the Mechanical Properties of SMC with laminated GRP materials. Composites Vol. 17 N. 3 July (1986)

10.- **Belgrano, G.** The Right Time for Advanced Composites. Small Craft. RINA, Nº 12 March (1986)

11. **R. Gabarró; A. Lacruz; B. Parga Landa** Instrumentation and Calibration of an Americas' Cup Mast Proc. Students- SAMPE 92. Hamburgo. The Society for the Advancement of Material and Process Engineering (1992)

12. **Reichard, R.P.** The Design of FRP Panels for Ship and Boat Hulls. Sandwich Constructions 1. Ed. Karl-Axel Olsson and Ronnal P. Reichard. EMÁS 1989

13. **Riley, C. and Honey, R.** Construction and Design Details of the 1988 America's Cup Yacht Hull and Deck Structures. Sandwich Constructions 1. Ed. Karl-Axel Olsson and Ronnal P. Reichard. EMAS 1989

14. Varios. "Primer Curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval". 2ª Edición ISBN Vol 1 y 2. 84-88565-03-8 (1992) (1994).

15. **B. Parga Landa; S V. Legels; F. Hernández Olivares; S. D. Clark** "An Analytical Study of the Effect of Slamming Pressures on the Interlaminar Behaviour of Composite Panels" Int. J. Composite Structures. En imprenta (1999) ■