UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

PROYECTO FIN DE CARRERA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MATERIALES Y PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN EN EMBARCACIONES DE VELA

Cartagena, Octubre 2012

Antonio Martínez Megía

Tutor: D. Isidoro José Martínez Mateo

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA NAVAL Y OCEANICA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN……5

2. CASCOS……...7

2.1. Introducción……...7

2.2. Construcción de embarcaciones en madera.……11

2.2.1. El material……...11

2.2.2. Técnicas de trabajo…...……..16

2.2.2.1. Estopa y brea……..16

2.2.2.2. Clavazón y pernería……....19

2.2.2.3. Pintura……....21

2.2.3. El proceso de construcción…….23

2.3. Construcción de embarcaciones en aluminio y acero…….....37

2.3.1. Introducción……37

2.3.2. El aluminio……..38

2.3.3. Proceso de construcción……42

2.4. Construcción de embarcaciones en materiales compuestos…....49

2.4.1. Introducción……49

2.4.2. Los materiales……49

2.4.2.1. Las resinas……..51

2.4.2.1.1. Resinas de poliéster……51

2.4.2.1.2. Viniléster……52

2.4.2.1.3. Resinas de Epoxy……...53

2.4.2.2. La fibra……...53

2.4.2.2.1. Fibra de vidrio……....53

2.4.2.2.2. Fibra de aramida……....56

2.4.2.2.3. Fibra de carbono……....57

2.4.3. Otros componentes……....58

2.4.3.1. Desmoldeantes……...58

2.4.3.2. Gel Coat……....58

2.4.3.3. Top Coat……....59

2.4.3.4. Cargas……....59

2.4.3.5. Colorantes……..…59

2.4.4. Moldes……...…..60

2.4.5. Núcleo del laminado en sándwich……..…...62

2.4.6. Proceso de construcción……..……..66

2.4.6.1. Técnicas de moldeo por contacto……...……...67

2.4.6.1.1. Moldeo manual……...67

2.4.6.1.2. Proyección simultanea……69

2.4.6.1.3. Moldeo por impregnadores……70

2.4.6.2. Técnicas de moldeo asistido por vacío……..74

2.4.6.2.1. Moldeo por vacío – laminado manual…...75

2.4.6.2.2. Laminado de preimpregnados……....77

2.4.6.2.3. Proceso SCRIM……..79

2.4.7. Detalles constructivos……83

3. .MÁSTILES……..86

3.1. Introducción……..86

3.2. Madera……...87

3.3. Aluminio……89

3.3.1. Procesos de construcción……90

3.4. Fibra de carbono……94

3.4.1. Materiales……94

3.4.1.1. Moldes……....94

3.4.1.2. El mandril……...…94

3.4.2. Procesos de fabricación……..95

4. VELAS……...100

4.1. Introducción……...….100

4.2. Las velas de paños……..102

4.2.1. Materiales…….102

4.2.1.1. Dácron…….103

4.2.1.2. Mylar……...….112

4.2.1.3. Laminados……...……112

4.2.1.4. Nuevos laminados……...……115

4.2.2. Proceso de construcción……...……117

4.3. Las velas 3DL……...…….122

4.3.1. Materiales……123

4.3.1.1. Aramida……..……123

4.3.1.2. Kevlar……...……123

4.3.1.3. Twaron…….123

4.3.1.4. Fibra de carbono…….…….....123

4.3.1.5. Tafeta……124

4.3.1.6. Mylar……124

4.3.2. Proceso de fabricación……..……125

4.3.3. Hechos en la fabricación de los 3DL……128

4.3.4. 3DL bajo microscopio……...…129

4.3.5. Duración de una 3DL…….…..130

4.3.6. Comprobación de tejidos y laminados……..…131

4.4. Tecnología Fusion M…….….133

4.5. Comprobación de las velas 3DL con Fusion M…….…….……138

4.6. Velas 3Di…….……139

4.6.1. Materiales…...……...……139

4.6.2. Proceso de fabricación…….……....143

5. BIBLIOGRAFÍA……...……149

1. INTRODUCCIÓN

El término “regata” deriva de la *rigada* veneciana, que significa alineamiento ante de comenzar la carrera (específicamente, los encuentros de remo que constituyeron la primera forma de competición náutica). El espíritu competitivo esta tan arraigado en el hombre que ni siquiera barcos como los prototipos británicos del velero moderno, buques como el *Mary* inspirados en los modelos holandeses y diseñados más como ostentación que como una hazaña náutica, fueron inmunes al reto de las carreras. La modesta extensión del agua que representa el río Támesis no fue obstáculo, pues en octubre de 1661, justo un año después de la llegada del Mary, Londres pudo contemplar la primera carrera de vela registrada desde Greenwich hasta Gravesend, corriente abajo hacia el estuario del Támesis y vuelta. Este recorrido abarcaba un total de 40 millas en un rio de anchura no superior a una milla.

Es innegable que hubo carreras anteriores entre veleros de ricos mercaderes holandeses, al igual que las embarcaciones pertenecientes a los soberanos británicos habían competido anteriormente entre sí, pero el acontecimiento celebrado el uno de octubre de 1661 fue sin duda la primera carrera que se organizó con un recorrido fijado, así como la primera de la que se tiene informes fiables en los que se menciona también el valor del premio, 100 libras esterlinas.

Se disputo entre dos barcos muy parecidos, ambos inspirados en el *Mary* pero con una modificación fundamental: los diseñadores reemplazaron la deriva lateral tan laboriosa y bastante ineficaz utilizada en las aguas holandesas poco profundas por la quilla central más profunda de las embarcaciones británicas tradicionales. El primero fue el Catherine de Carlos II construido aquel año por Christopher Pett con una eslora de 15m, una manga de 6m, un calado de 2m y un peso de 94 toneladas. El segundo, el *Anne*, pertenecía al duque de York. Era ligeramente más largo, 16m, con 6 toneladas más y lo había diseñado Peter Pett.

Los dos veleros iban aparejados según la época: además de la línea del modelo holandés con un solo palo que llevaba una vela cangreja de eslora (diferenciándose solamente el foque de la vela más corta típica de los veleros holandeses) y velas cuadradas para navegar de cara al viento.

La primera parte del recorrido era corriente abajo (no se da ninguna información sobre el estado de la corrientes, pero es de suponer que no eran contrarias a los barcos, ya que, si no, habrían tenido dificultades para superarla dada la dirección del viento) con un fuerte viento de proa. La primera bordada debió implicar una táctica muy laboriosa, ya que en algunos puntos el río no tenía más de media milla de ancho y en aquella época ningún barco navegaba cómodamente de cara al viento.

El *Anne* había establecido una ligera supremacía sobre el barco del rey en la marca de Gravesend. La bordada de vuelta fue completada con viento de popa y los dos veleros fueron a toda vela hacia Greenwich, con todas las velas desplegadas, la verga cangreja y la vela mayor. El Catherine de Carlos II fue el primero que cruzó la línea de meta en Greenwich, con el rey en persona en el timón. Desde aquel momento la vela experimento un inevitable auge. Se celebraron otras carreras en Inglaterra, sobre todo tras la creación de los primeros clubes náuticos. De todas formas a lo largo del siglo XVIII estas regatas eran un juego de exhibición que una verdadera competición, con bastantes demostraciones y maniobras de estilo militar.

Los desafíos aceptados y ganados en 1662, y de nuevo al año siguiente por los catamaranes de Sir William Petty contra las lanchas y barcos del rey tampoco pueden considerarse como carreras exactamente, aunque sí que existen registros históricos de auténticas carreras de competición por mar. En 1749, por ejemplo, tuvo lugar la primera carrera entre veleros que eran propiedad de commoners, es decir, caballeros que no pertenecían a la realeza. La carrera fue ganada por el Princess Augusta, de George Bellas, y el recorrido fue desde Greenwich hasta Nore, un banco de arena de unas 40 millas de la desembocadura del Támesis y vuelta. Tal vez fue la primera carrera donde se abandonaron por primera vez la protegidas aguas del rio, pudiéndose describir como la primera en mar profundo que duró casi dos días.

La flota de Cumberland, rebautixada como la Royal Thames Yacht Club, organizó varias regatas a partir de la década de 1780, aún en el Tamesis y reservada a veleros de 2 a 5 toneladas. Ya no eran veleros “reales” de forma holandesa, recargados y dorados, botes de un solo palo de 6 a 10m de eslora y con una quilla profunda y estrecha. Se inspiraban en las fragatas utilizadas para capturar contrabandistas, diseñados para alcanzar una velocidad máxima.

Los verdaderos veleros de carreras empezaron por fin a salir a la luz.

2. CASCOS

2.1. Introducción

El yachting comenzó a mediados del siglo XIX, inspirándose los arquitectos navales en los barcos más rápidos que existían entonces como por ejemplo las goletas de pesca utilizadas en Nueva Inglaterra.



Ilustración 1: uno de los primeros barcos de regata.

Tenían que ser barcos marineros para poder afrontar cualquier estado de la mar y rápidos ya que una vez realizada la pesca el primero que llegaba a puerto era el que vendía la mercancía más cara.

En 1.848, el gran arquitecto naval Inglés, John Scott Russell, propuso justo lo contrario al diseño tradicional de la época, ofreciendo proas afiladas y popas amplias. Los armadores no lo tenían muy claro, pero tres años después la goleta "América", fue construido según este nuevo principio, despejando las dudas que todavía quedaban sobre la efectividad de esta nueva forma para los cascos. En los siguientes 40 años se optimizó la forma de los cascos para reducir la superficie mojada y por tanto el rozamiento por fricción, pero las quillas todavía eran largas de proa a popa y de poco calado.

La siguiente etapa en la evolución comenzó con yates de pequeñas esloras como el "Gloriana", dibujado por Nat Herreshof en 1.891. Su quilla profunda y corta conseguía reducir el rozamiento y maximizar el par de adrizamiento, es decir la estabilidad. Su gran alargamiento que permitía aumentar la flotabilidad al producirse escoras resultó revolucionario. Marco una época que duraría unos 70 años hasta mediados del siglo pasado. Sus líneas aventajaban netamente a los diseños anteriores, pero estas ideas llevadas al extremo condujeron a barcos débiles y caprichosos, con quillas muy cortas y poca maniobrabilidad, al quedar el timón muy cerca del centro de deriva en la quilla.



Ilustración 2: embarcacion Gloriana 1891

Por esta razón la siguiente evolución se encargó de separar el timón de la quilla lo cual rompía con todo lo que se había fabricado hasta entonces, pues se consideraba como una idea peligrosa y débil para afrontar alta mar. Ya en 1.963 el "Cap-40" un barco diseñado de serie por Bill Lapworth, acabó con los últimos prejuicios que quedaban al ganar varias TransPac y la carrera de las Bermudas. Por fin resultaba evidente que estos diseños conseguían barcos perfectamente marineros pero con prestaciones muy mejoradas.



Ilustración 3: evolución de la forma de los cascos

Actualmente se siguen separando los apéndices, y no solo el timón, también se separan las orzas de deriva, el bulbo de la quilla, alerones del timón,… La última evolución en las carenas ha consistido en ensanchar más la popa para facilitar el planeo. El Francés Jean-Marie Finot introdujo esta idea con el “Mistral Gagnant” y el “Tom Pousse" vencedores claros en la mini Transat de 1.989.

Junto con esta última etapa de la evolución en la forma de los cascos, ha cambiado muy profundamente la tecnología de construcción utilizando técnicas como la realización de cascos en madera moldeada, contrachapado, plásticos y resinas. Últimamente se utilizan fibras ligeras con las que se han conseguido ganancias de peso muy significativas. Estos avances en aplicación de nuevos materiales son los que han permitido alcanzar velocidades que a veces doblan la velocidad límite impuesta físicamente por la eslora del casco.

Ya en el siglo XIX aparece algún catamarán diseñado por Nathaniel Herreshoff en 1.875. Pero sólo a partir de 1.960 empiezan a aparecer distintos modelos de multicascos. La palabra ‘catamarán’ proviene del tamul, una lengua del sur de la India, en la que Kata significa ‘atado’ y Maran es ‘tronco de árbol’. Inspirados en las piraguas del índico aparecen catamaranes y trimaranes para vela ligera, a partir de los cuales evolucionan hacia los grandes catas de crucero.

Echando un vistazo a las proas de los diferentes barcos a lo largo de la historia, se puede comprobar que han sufrido un notable desarrollo.



Ilustración 4: diferentes formas de la proa en la historia

Las proas lanzada han sido siempre más elegantes y permiten un ataque más noble a las olas, además de crear una eslora de floración dinámica dependiendo de lo que esta se hunda en el agua, con lo que se crean empujes adicionales en proa que mejoran el comportamiento en función de las condiciones de navegación.

Con una proa lanzada echar el ancla y sobre todo recogerla es más fácil y menos comprometido para el casco. Con las proas verticales hay que estar muy atento para que el ancla al oscilar en la subida no golpeara el casco rayando el gelcoat.



Ilustración 5: proa lanzada

Sin embargo la tendencia actual es hacia las proas rectas cuando no totalmente verticales. Se trata de un problema económico y de modas. En los barcos de regatas se cuenta la eslora total y por tanto esta hay que aprovecharla al máximo haciendo que esta eslora total, coincida con la de flotación (proa vertical).



Ilustración 6: proa vertical

2.2. CONSTRUCCIÓN DE EMBARCACIONES EN MADERA

2.2.1. El material

La madera es uno de los materiales con los que más fácilmente se puede construir una embarcación .No todas las maderas son adecuadas para construcción naval, y en muchos casos la elección depende de las maderas adecuadas de las que se disponga en la zona de construcción. Entre las maderas de construcción naval se pueden citar: roble, caoba, teca, iroko, talí (elondo), pino, abeto y cedro, cuyas características mecánicas se pueden ver en libros especializados.

Para la construcción de los elementos estructurales de mayor responsabilidad, quilla, sobrequilla, roda, codaste, cuadernas, baos, durmientes, palmejares y otras se ha empleado tradicionalmente, el roble, por ser una madera dura y con buena resistencia mecánica, de buen comportamiento frente a la humedad y la acción del agua de mar, completando estas propiedades con una buena resistencia al ataque de hongos, insectos y moluscos.

ROBLE

Se trata de la madera que más se ha utilizado en Europa y América del norte, para construcción naval.

Tiene una buena durabilidad en agua de mar, del orden de 12 años. Es una de las maderas más resistentes después de la Teca.

El peso específico oscila entre 720 Kg/m3 a 890 Kg/m3, no se suele utilizar para forros debido a su alto peso específico.

Necesita de un periodo de estacionamiento elevado para evitar la posible aparición de alabeos o grietas.



Ilustración 7: madera de roble.

El tanino que encierran sus fibras acelera la oxidación de los pernos y clavos fabricados con aleaciones de hierro, problema que se ha resuelto históricamente con la renovación periódica de estos elementos o utilizando materiales metálicos no férricos como el cobre o sus aleaciones.

EUCALIPTO

La escasez de maderas de roble de la adecuada longitud obligó a la utilización de otras especies en algunas piezas concretas, como es el caso de la quilla y sobrequilla, donde comenzó a emplearse el eucalipto que es una madera pesada y fuerte de color pardo pálido con fibras entrecruzadas.



Ilustración 8: madera de eucalipto

El PINO

Para el forrado del casco y de la cubierta se ha mantenido la utilización del pino por tratarse de una madera de regular dureza, muy resinosa, color blanco amarillo con vetas rojizas que despide olor a trementina.

Como es bien conocido **el pino**, se trata de una variedad cuyo rápido desarrollo provoca que sea una de las maderas más baratas. Sin embargo, son pocas las variedades útiles para la construcción naval.

El pino “colorado” se utiliza en forros, cascos y cubiertas, cuadernas y baos. Su principal característica es la durabilidad en aguas frías.

El pino “clear” es una variedad baja del pino “spruce”, también conocido como pino blanco. Usada principalmente para mástiles y botavaras de encolado hueco. El pino “Sitka” es una variedad de “spruce” o abeto, y debido a su estabilidad y falta de nudos, la convierten en la más idónea para la construcción de mástiles huecos.



Ilustración 9: madera de pino

Para la elaboración de piezas menores se han utilizado especies como el castaño, haya, fresno, nogal, alerce y otras de aplicación marginal.

FRESNO

El Fresno es una especie con un veteado realmente característico y muy bello. Este tipo de madera presenta al menos sesenta variedades, particulares de cada clima y región.

Es una madera durable en seco, pero de poca duración si se moja y seca alternamente, proceso al que está sometida toda embarcación. Por eso, se solía utilizar barnizada y con fines decorativos.

Posee una extraordinaria flexibilidad, lo que lo hace ideal para embarcaciones ligeras. Su peso específico es de 650 Kg/m3.



Ilustración 10: madera de fresno

Cuando se empleaban maderas procedentes de los bosques situados en el entorno de la zona de ubicación del astillero, el carpintero de ribera acudía a los montes para seleccionar la madera más adecuada en cada caso para las diferentes piezas y supervisaba que el corte se realizara en las épocas más propicias con el fin de garantizar las mejores propiedades de la madera.

Debido a que la madera tiene su máxima resistencia y elasticidad en la dirección de las fibras, vasos leñosos o vetas, la selección de la madera que va a utilizarse en elementos estructurales de directriz curva, se realiza buscando aquellos troncos o ramas que posean una curvatura similar a la que tendrá la pieza. De esta forma se consigue que la dirección principal de la pieza coincida con la de las fibras de la madera. Esta forma de elegir los troncos o ramas recibe el nombre de selección dendromórfica.

Estos troncos o ramas dotados de curvatura natural, útiles para piezas con forma como son las cuadernas, rodas, etc., recibe la denominación de madera de vuelta o de figura.

Los troncos o ramas rectas, sin curvatura, llamada madera derecha se utiliza en piezas como quilla, codaste, sobrequilla, etc.

La presencia de la savia en la madera recién cortada significa la existencia de nutrientes que la hacen atractiva para el ataque de los hongos y xilófagos que encuentran así un medio ideal para alimentarse y reproducirse. Por otra parte la savia da lugar a un proceso de fermentación que facilita el fenómeno de pudrición de la madera.

Por este motivo en las maderas utilizadas en construcción naval era necesario reducir la cantidad de savia y para ello se elegía cuidadosamente el momento más adecuado para el corte. En algunas maderas como el roble, con una savia particularmente agresiva, se procedía a un proceso de curado posterior al corte.

Los meses más adecuados para el corte son aquellos en que se reduce la actividad vegetativa de los árboles debido a la disminución de la incidencia solar, que corresponde con los últimos meses del otoño y los meses invernales, concretamente de noviembre a febrero. En estos meses se minimiza la actividad de la savia en los vasos.

Dentro de este periodo los serradores esperaban a los días correspondientes a la luna en cuarto menguante para tener en cuenta la influencia de la gravitación de la luna, a través del periodo lunar, sobre la circulación vertical de la savia en el tronco del árbol, y por último elegían para el corte las horas correspondientes a la caída de la tarde en las que se reduce la actividad de la savia.

Se buscaba por tanto la coincidencia de los tres ciclos, solar, lunar y diario con el objeto de reducir la presencia de la savia en los vasos leñosos.

Estos eran criterios antiguos, presentes con algunas variantes a veces contradictorias, en todas las culturas ribereñas con tradición de construcción de embarcaciones.

Una vez cortado el árbol, se realizan dos operaciones para garantizar una adecuada conservación de la madera:

- Descortezado de los troncos, para eliminar los insectos alojados en esta zona, que atacarían al resto de la madera en el caso de no ser eliminada.

- Eliminación de la savia todavía presente en los vasos.

En la sección transversal de un árbol maduro, se distinguen una zona exterior denominada corteza o córtex y una parte interior llamada leño. La parte central, compacta, del leño constituye el cerne o duramen y es la zona preferida para la madera utilizada en construcción naval. La zona exterior del leño se llama sámago y está formada por los tejidos más jóvenes; es menos resistente que el cerne y muy sensible al ataque de los insectos y a la pudrición.

La eliminación de la savia residual puede realizarse bien mediante disolución de la savia o mediante secado.

El primer procedimiento se utilizaba en las maderas de roble que se sometían a un proceso de curado sumergiéndolas durante un largo periodo de tiempo, que podía llegar a ser de un año o más, en agua de mar con el fin de que la madera se desprendiera, por disolución en agua de mar, de la savia restante. Por este motivo los astilleros disponían una zona en la ribera donde se almacenaban los troncos de roble para garantizar la acción disolvente del agua salada, como se puede ver en la figura siguiente.

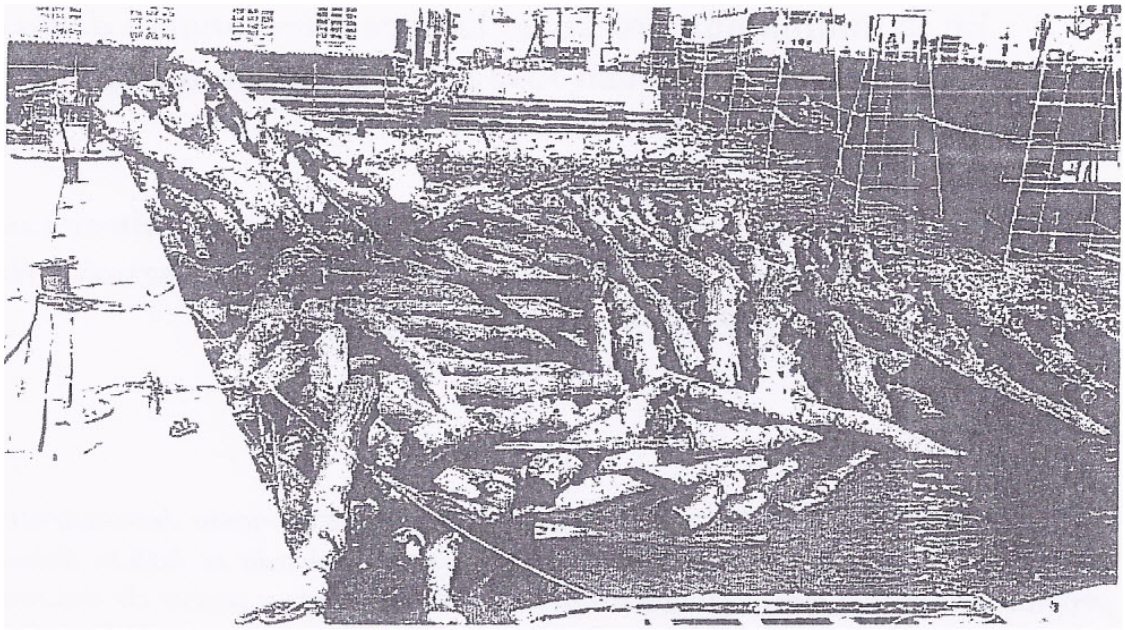


Ilustración 11: proceso curado maderas de roble

Era importante que durante el proceso de curado la madera se encontrara en la zona intermareal, de manera que al quedar parte del tiempo en contacto con el aire se evitaba el ataque de la broma, que es un molusco que penetra en la madera alimentándose de los tejidos leñosos y produciendo un efecto de barrena, que no sobrevive fuera del agua de mar.

Para el secado de la madera, una vez cortados los troncos por la sierra en piezas de caras paralelas se disponen en tijera al aire libre y al cabo de un tiempo se apilan unas sobre otras separadas por listones en un lugar bajo techo y a ser posible en una zona donde existan corrientes de aire con el fin de secarlas adecuadamente. Las maderas de pino utilizadas para el forrado y otras piezas se someten a este proceso.

El carpintero de ribera rechaza las piezas de madera con sámago, con rajaduras o con desprendimiento de los anillos de crecimiento y en general las que presenten cualquier defecto en la superficie. Asimismo descarta las tablas con nudos, pues en ellos se produce una discontinuidad de las propiedades de la madera.

2.2.2. TÉCNICAS DE TRABAJO

2.2.2.1. ESTOPA Y BREA

El calafateado de la zona del casco sumergida, denominada obra viva, y de la cubierta sometida al embarque de agua es el proceso por el que se estanqueizan las uniones a tope de las piezas que forman el forro y la cubierta, mediante la introducción de un material de relleno en la junta y posterior cubrimiento con una sustancia impermeabilizante.

Tradicionalmente el calafateado se realizaba con cordones de estopa y brea de calafatear llamada también “pez rubia”.

La estopa está formada por hilos de cáñamo, Cannabis Sativa, que antes de introducir en la junta hay que hilar según el diámetro adecuado al tipo de junta. El cordón de estopa se elabora con hilos de cáñamo impregnados en alquitrán, la estopa así tratada se denomina en algunos lugares estopa «con alma».

A mediados del siglo XIX, se distinguían dos tipos de estopa, la estopa blanca formada por las hebras producidas por la parte más gruesa y corta del cáñamo después de haberlo rastrillado tres veces y la estopa negra que procedía de los cabos viejos deshilachados a los que se daba una capa de alquitrán para preservarlos de la humedad.

La primera era empleada para la fabricación de lona y cables y la segunda se hilaba en cordones del grueso necesario empleándose con ventaja sobre la estopa blanca para el calafateo.

La brea utilizada en el proceso de calafateado es una resina obtenida como producto secundario en el proceso de destilación de la trementina para la obtención de la esencia o aceite de trementina conocida también como aguarrás. La trementina se obtiene de las coníferas realizando una incisión en su corteza.

Para extender la brea sobre las juntas es necesario someterla a un proceso de calentamiento mezclándola con alquitrán vegetal, en la medida necesaria para que quede suficientemente fluida y poder proceder a su aplicación.

El alquitrán vegetal se obtiene mediante un proceso de combustión incompleta de la madera de pino, es de color negro y bastante fluido.

La mezcla que se utilizaba estaba compuesta por brea rubia, alquitrán vegetal y sebo a partes iguales, esta mezcla, que recibía el nombre de brea gorda, se realizaba en un caldero a través de un proceso de calentamiento. La misión del sebo era dotar a la mezcla de una cierta elasticidad.

También se ha empleado directamente la mezcla de brea con sebo. Para comprobar la mezcla se mojaba el extremo de un hilo en la mezcla y con los dientes se comprobaba la elasticidad. Si el barco iba a navegar por aguas frías se añadía más cantidad de sebo porque existía el riesgo de que la brea estallase.

El proceso de calafatear un barco comienza por abrir las juntas que se van a calafatear con ayuda de los hierros de abrir, se introduce el cordón de estopa y se hace penetrar en la junta con el hierro de retacar.

Para introducir el cordón se le golpea con un mazo de madera dura, llamado mallo, que debe tener cierta elasticidad en el golpe para que la estopa penetre suavemente, y un mazo más pequeño llamado maceta.

Antes de introducir el cordón, el calafate hilaba la estopa arrollando las hebras sobre una rodilla, con la palma de la mano, en un gesto característico.

Dependiendo del espesor de la tabla se utilizan uno o varios cordones de estopa, que en expresión de los calafates correspondía a calafatear a uno o varios cáñamos. Después de introducir el último cordón, denominado colla, se procede a embrear las costuras.

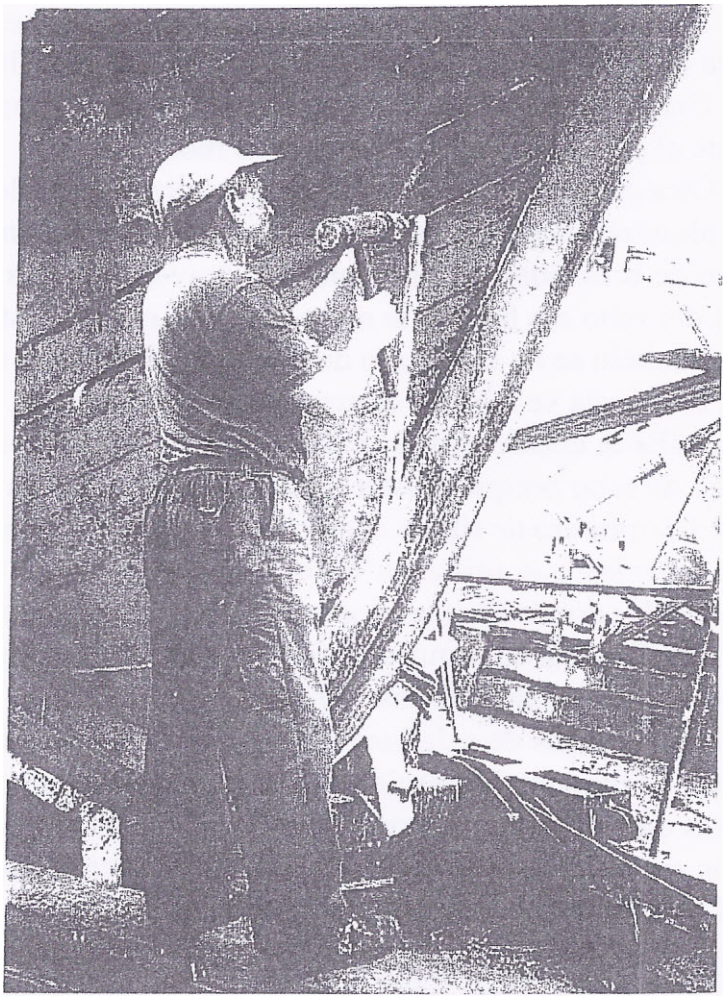


Ilustración 12: operario calafateando juntas con el hierro de retacar.

No todas las uniones de las tablas del forro y de la cubierta se calafatean, y cada carpintero tiene su propia práctica. En los barcos de gran tamaño, en general, se calafatean todas las uniones de cubierta y casco, y en los demás solamente las cabezas en los costados y todas las uniones en la cubierta. Las cabezas de las tablas del forro se calafatean debido a que en contacto con el agua la madera aumenta en anchura pero apenas en longitud.

Para el calafateado de las juntas se ha empleado también el yute, y el kenaf, variedad del yute.

Además de la brea se ha utilizado la masilla, que es una mezcla de aceite y albayalde, polvos de tiza o carbonato cálcico que son denominaciones equivalentes y alternativamente polvos Nevín, que era una marca comercial, conocidos también como blanco de España. Se empleaban aceites de diferente procedencia, como el aceite de sardina o saín, aceite de linaza y otros aceites vegetales.

Otras alternativas son calafatear todas las costuras del forro con estopa más masilla y, la cubierta con estopa y brea. En embarcaciones pequeñas también de utiliza algodón impregnado en minio y masilla.

El cáñamo fino se utilizaba para fabricación de lonas y velas y el cáñamo basto en cordelería. Para calafatear se empleaba la estopa de calafate, formado por las fibras cortas, de 20 o 30 centímetros que quedan en las púas al rastrillar el cáñamo.

En España se cultivaba el cáñamo en la ribera baja del Segura en Alicante, con Callosa del Segura como centro donde existe un Museo del Cáñamo, produciéndose en este lugar el mayor porcentaje de la producción española. También se cultivaba en Albacete, Sevilla, Calatayud y otros lugares.

2.2.2.2. CLAVAZÓN Y PERNERÍA

La conexión de las diferentes piezas de la estructura de un barco de madera se realiza mediante uniones estructurales trabadas y la utilización de clavazón, pernería y cabillas de madera.

La clavazón utilizada en carpintería de ribera está formada por las puntas o puntillas, los clavos y los tornillos o pernos. Todos ellos se galvanizan en caliente para asegurar una eficaz protección frente a la corrosión.

Las puntas se utilizan para uniones de poca responsabilidad, los clavos para la unión de las tablas del forro a las cuadernas y los tornillos para la unión de las grandes piezas estructurales.

Es regla general, en relación con la elección del clavo más adecuado para la fijación del forro a las cuadernas, que un tercio de su longitud debe quedar en la madera del forro y dos tercios penetrar en la cuaderna. Es este un criterio antiguo ya citado en el siglo XVII.

Para evitar que la punta o el clavo agrieten la madera es buena práctica perforar previamente un taladro de diámetro ligeramente inferior al correspondiente de la punta o del clavo. Si no se realiza el orificio taladrado, es posible que la madera se agriete.

El tornillo o perno roscado de cabeza redonda y cuello cuadrado se fabrica en diámetros de 6 a 25 milímetros y en longitudes de 200 a 400 milímetros y esporádicamente hasta un metro. El cuerpo es cilíndrico con la cabeza semiesférica y el primer tramo de sección cuadrada, con las esquinas sobresaliendo del diámetro para que al penetrar en la madera quede trabado y no gire. Se le denominaba también tornillo tipo carruaje.

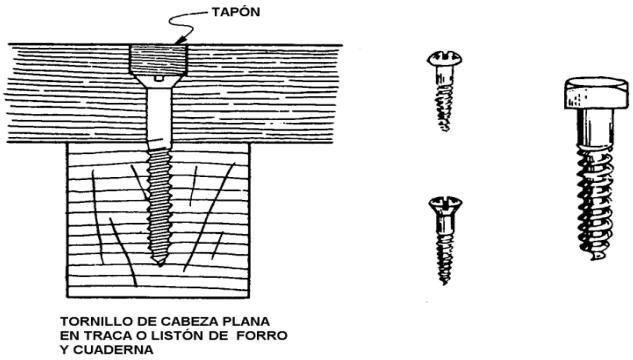


Ilustración 13: ejemplo pernería naval

El clavo empleado en carpintería de ribera se fabricaba tradicionalmente de forma artesanal partiendo de un tocho cuadrado, dando forma a la cabeza mediante forja y calentando a continuación el otro extremo para hacer la punta golpeando a mano. A continuación se decapaba y galvanizaba sumergiendo las puntas en un recipiente alimentado por leña.

Más tarde se introdujeron procesos de fabricación mecanizados, pero los carpinteros de ribera preferían los clavos fabricados a mano aunque fuesen más caros. También preferían que el galvanizado fuera irregular porque así el clavo agarraba mejor en la madera.

La cabeza del clavo se hace penetrar o embutir uno o dos centímetros en la madera del forro con el botador y se tapa con una pieza de madera llamada tapín, también llamada bitoque o clavicote. Otra práctica seguida en años más recientes ha sido utilizar masilla para cubrir la cabeza de los clavos.

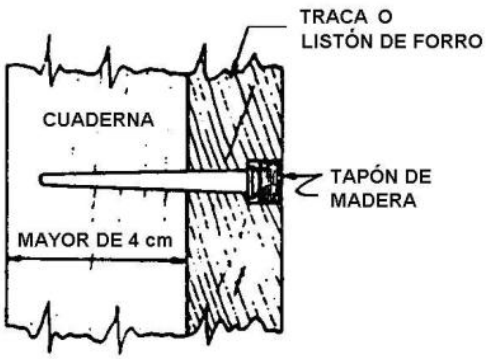


Ilustración 14: modo de introducir los clavos

El proceso de galvanizado de la clavazón en la carpintería de ribera data al menos de la mitad del siglo XIX.



Ilustración 15: clavo acero galvanizado

Las cabillas son piezas cilíndricas de madera que se introducen en el taladro que atraviesa las dos piezas a unir con un cierto aprieto. En los barcos en que se encabillaba el forro, las cabillas de las primeras tablas eran ciegas al ser el espesor muy grande. Para aumentar el ajuste de la cabilla en el extremo interior se disponía de una cuña del mismo ancho que al llegar al fondo abría la cabilla contra el barreno.

Los constructores ingleses que llegaron a España a mitad del siglo XVIII, trajeron la práctica de utilizar de manera generalizada cabillas de madera, en lugar de la clavazón y pernería habituales hasta entonces en la construcción tradicional española.

2.2.2.3. PINTURA

El principal problema de la madera como material de construcción naval es su vulnerabilidad frente al ataque de organismos vegetales y animales.

Los organismos vegetales que actúan sobre la madera pertenecen a los tipos de las bacterias, mohos y hongos cromógenos y de pudrición. Estos últimos se alimentan de celulosa o lignina según los tipos, se propagan con facilidad en ambiente húmedo, caso de la madera con más de un 20% de humedad, además se ven favorecidos por el aire viciado y la oscuridad de los espacios interiores de los barcos de madera.

Los organismos animales más dañinos son los insectos xilófagos como las larvas de polilla, carcoma y termitas, los crustáceos y los moluscos xilófagos como la broma (Teredo navalis) que horada y destruye la madera.

Históricamente se han utilizado en España diferentes procedimientos de protección de la madera del casco frente a la broma:

3. Forrado de la obra viva con láminas de plomo, práctica que se empleaba ya en el siglo XVI.

4. Utilización de un doble forro de madera en la obra viva, el más exterior destinado a sufrir los ataques de la broma por lo que era reemplazado periódicamente. Esta solución se empleaba cuando los barcos hacían el viaje a América donde el ataque de la broma era mayor.

5. Forrado de la obra viva con láminas de cobre, práctica que comenzó a utilizarse en España hacia el último tercio del siglo XVIII.

Para proteger la madera de los efectos del mar y la intemperie, se han utilizado diferentes tipos de aceites y alquitranes:

6. Aceites de pescado, como el obtenido de la sardina o saín empleado en Galicia y Portugal, y el obtenido del hígado del abadejo.

7. Aceite de linaza cocido hasta el punto de ebullición, utilizado también con minio muy diluido u otras sustancias similares. El minio facilita un mejor agarre de la pintura de terminación que se aplica a continuación en la madera.

8. Alquitrán vegetal. También se utiliza añadiéndole aceite de linaza o gasoil al 50. El gasoil actúa como secante, aunque tiene el problema de que la pintura que se aplica encima se desprende.

9. Alquitrán mineral, empleado para proteger los fondos de las chalanas y de las nasas.

Cuando los alquitranes eran muy gordos, se calientaban para poder extenderlos con brocha, aunque actualmente se comercializan más ligeros.

El saín actúa de manera que al aplicarse sobre la madera se oxida y forma una especie de barniz que protege la madera impermeabilizándola. El saín se obtenía como un subproducto en las fábricas de salazón, durante el proceso de prensado de la sardina, y se utilizaba también como combustible para alumbrado y en el proceso de refinado del cuero.

La primera capa de protección se realizaba aplicando a todo el barco saín mezclado con polvo de minio. A continuación se daba una capa de patente bajo la flotación, y una capa de saín con blanco Nevín, que era una marca comercial, para la zona situada sobre la flotación.

Sobre este tratamiento se aplicaba una pintura de terminación o acabado en la obra muerta cuya misión era cubrir completamente la madera e impedir que la humedad penetrase en la misma y se produjeran los fenómenos de ataque biológico que dañan la madera.

Estas pinturas se fabricaban con aceite de linaza añadiéndole unos polvos colorantes, en lugar de aceite de linaza se empleaba también aceite de pescado, saín.

El crecimiento de organismos animales y vegetales en la cara exterior del forro de la obra viva tiene un efecto negativo sobre las características marineras de la embarcación, porque aumenta de manera significativa la resistencia al avance de la carena.

Para impedir el crecimiento de las incrustaciones en los cascos de madera se han utilizado diferentes sistemas, como la aplicación de una mezcla de brea, grasa y azufre empleada en la construcción de las naos.

A finales del siglo XIX se generalizó el recubrimiento de la obra viva con pinturas antíincrustantes, conocidas popularmente como «patente» por tratarse de pinturas de composición patentada, que contenían en sus primeras formulaciones, compuestos de cobre que resultaban tóxicos para los organismos que se adherían al casco.

2.2.3. El Proceso Constructivo

A continuación se va a describir la puesta en quilla y proceso de construcción de una embarcación de madera.

La estructura de los barcos de madera está formada por un número muy elevado de piezas conectadas mediante uniones estructurales, fijadas por clavos y tornillos o pernos roscados.

La estructura básica es del tipo transversal formada por armazones, denominados cuadernas, unidos por su parte inferior a una pieza prismática longitudinal, la quilla, que se prolonga a proa y a popa con dos piezas que forman los cierres del barco, denominados roda y codaste.

Sobre el fondo de las cuadernas se dispone la sobrequilla que es otra pieza longitudinal que corre de proa a popa y que refuerza junto con la quilla la unión de las cuadernas.

Además de estas piezas, las cuadernas están ligadas entre sí longitudinalmente por los durmientes, en los que apoyan los baos que soportan la cubierta, las tapas trancaniles y los palmejares.

Para dotar de estanqueidad al casco la estructura se forra en los costados y la cubierta con piezas longitudinales de madera.

Hay que decir que antiguamente los carpinteros de ribera pocas veces realizaban algún tipo de cálculo que les permitan conocer los espesores de las piezas, sino que más bien se han basado en su experiencia y la tradición oral.

Siempre hay que disponer las fibras de la madera empleada a lo largo de la geometría de la pieza a construir de manera que esta tenga resistencia a las cargas a las que será sometida, tanto de pesos embarcados, como hidrodinámicas y aerodinámicas.

La quilla va empernada a tres o cuatro picaderos encastrados en el suelo del taller, el conjunto debe ir bien nivelado respecto del suelo que hará de línea de base a la cual las cuadernas serán perpendiculares. Niveles y plomadas en esta fase de la construcción son indispensables. La quilla es la pieza más resistente de la estructura y si es posible se debe hacer de una pieza, para lo que necesitaremos madera muy resistente de las debidas dimensiones.

Como es un elemento de la estructura de gran dimensión, a partir de esloras no muy grandes es muy difícil conseguir que sea de una sola pieza, por lo que se procede a la unión mediante ensamblaje de al menos dos piezas. Las piezas a unir se preparan por medio de entalladuras y cortes combinados, llamados escarpes, de manera que permitan juntar y enlazar los distintos elementos, asegurando su perfecto encaje y la indeformabilidad de la unión. En la ilustración 10 se muestra un escarpe típico de quilla con corta aguas o matadero para evitar que el agua penetre a través de la unión. Encima de la quilla y a lo largo de la misma se coloca la sobrequilla, empernadas entre sí manteniendo entre ambas a las cuadernas.

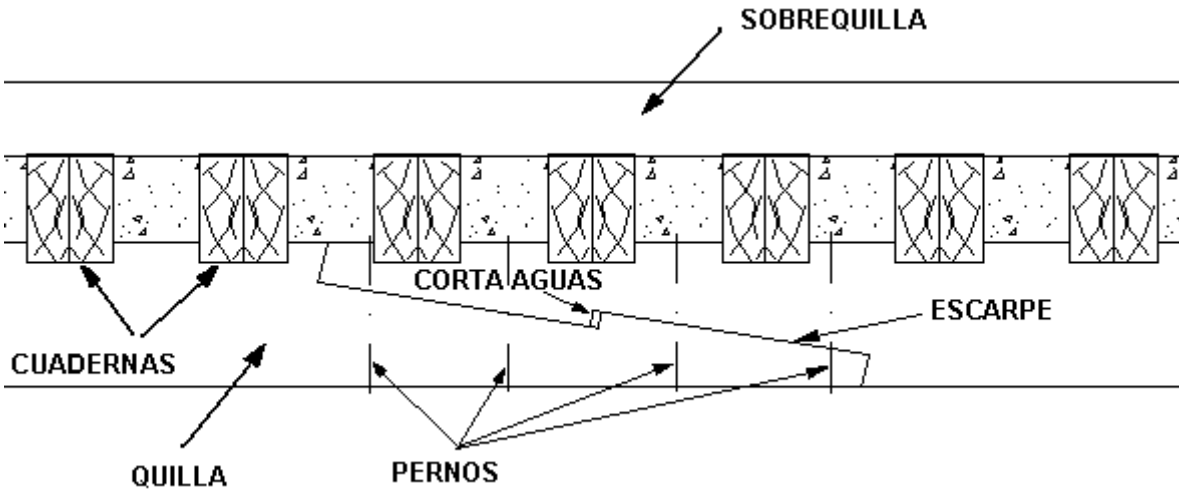


Ilustración 16: escarpe típico de quilla

Una vez colocada la quilla se ensamblan a la misma la roda y codaste, fijándolas verticalmente con la ayuda de una plomada. Mediante junta a escarpe se ensamblan roda y quilla a proa, reforzando interiormente la unión mediante la contra roda, que va empernada a ambas.

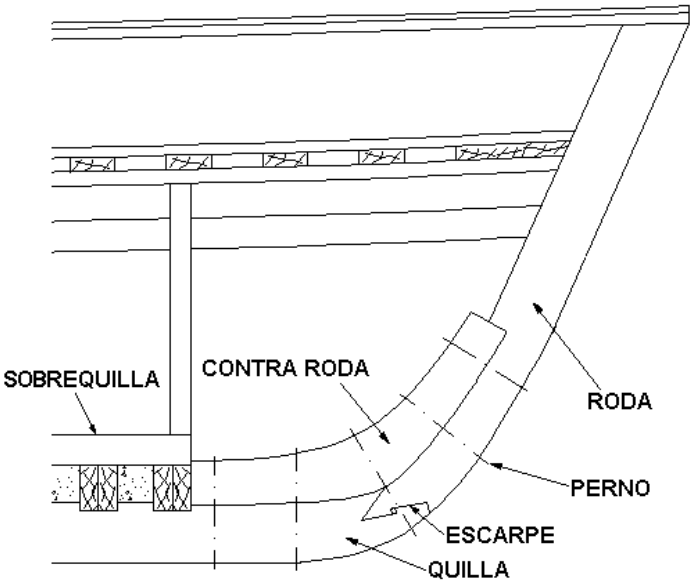


Ilustración 17: escarpe para unir roda y quilla

Asimismo, dependiendo de la forma en que se configure el vano del codaste, se dispondrá también una o varias piezas de refuerzo del codaste.

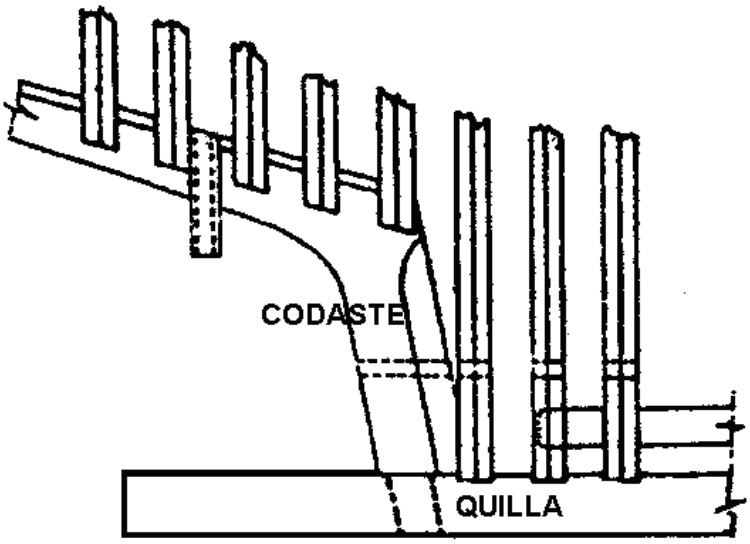


Ilustración 18: codaste de dos piezas



Ilustración 19: codaste de una pieza

Una vez ensambladas las tres piezas fundamentales de la estructura y erigidas verticalmente sobre los calzos se puede comenzar la tarea de montar sobre ellas las cuadernas. Las cuadernas son elementos estructurales transversales de formas variadas que pueden estar constituidas por una sola pieza o por varias, ya que en general, no se pueden obtener de maderas ya curvadas de manera natural con tales formas. En caso de ser de una pieza, serán conformadas con la ayuda de vapor de agua para ablandar la madera y hacerles tomar su forma según las plantillas necesarias. Si son de gran tamaño habrá que hacerlas de varias piezas y en este caso pueden ser sencillas, o dobles.

Por tanto, existen básicamente tres tipos de construcción de cuadernas: curvadas de una pieza, cuadernas sencillas formadas por varias piezas, y cuadernas dobles.

En embarcaciones pequeñas se puede conseguir curvar la madera con las formas de las semicuadernas, pero hay que tener en cuenta la dirección de los anillos para poder clavar o atornillar el forro correctamente a la cuaderna. El clavo o el tornillo deben entrar perpendicularmente a los anillos de la madera de la cuaderna, como muestra la figura.

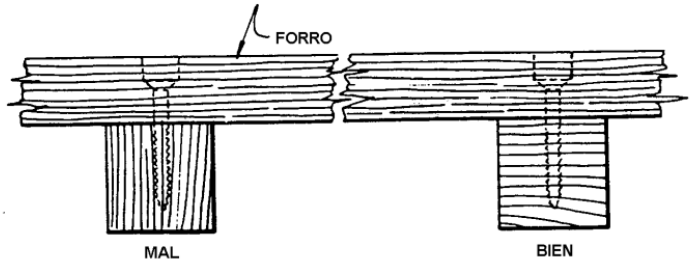


Ilustración 20: disposición correcta e incorrecta de fibras de cuadernas.

En embarcaciones medianas se utilizan cuadernas sencillas, donde cada cuaderna consta de varias piezas cortadas con la forma adecuada a cada banda y unidas mediante consolas y clavos. Las cuadernas de una pieza y las sencillas se utilizan en barcos de menor tamaño.

En los barcos más grandes se puede optar por construir las cuadernas dobles con un número de piezas elevado, 7, 9 u 11 según manga y puntal del barco, unidas a tope de manera que las juntas de cada pieza se alternen en cada una de las cuadernas sencillas de que constan.

Las cuadernas dobles son las más pesadas y están constituidas por los ligazones, que se van llamando por orden, primer ligazón, segundo ligazón, etc. desde la quilla hasta cubierta superior y de forma alterna de una cuaderna y de la yuxtapuesta. Sobre las cuadernas y en la zona de crujía, es decir, en la zona de varengas, se coloca la sobrequilla nombrada anteriormente que las mantiene unidas a la quilla. En la siguiente figura se puede ver lo explicado.

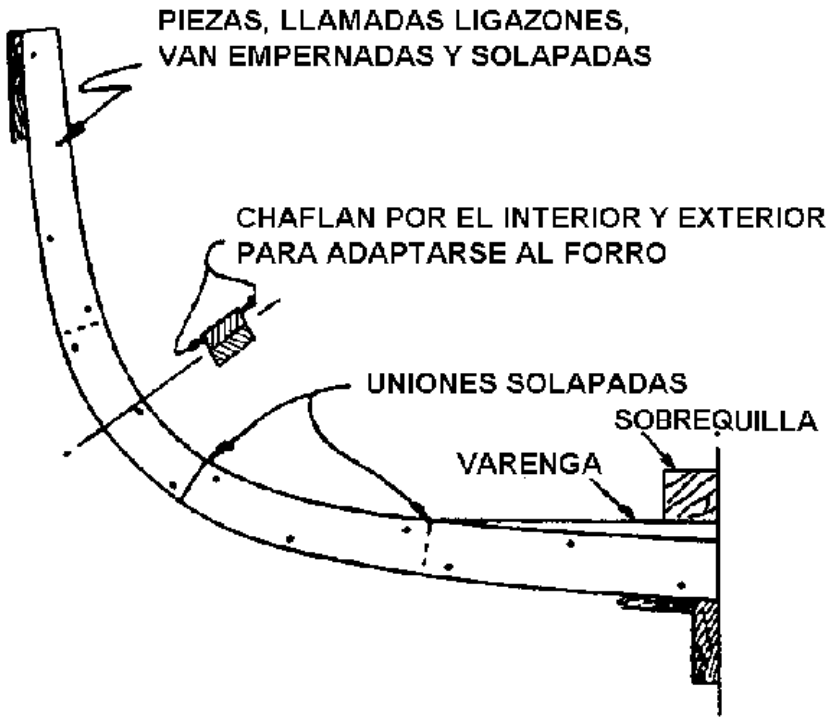


Ilustración 21: ejemplo cuaderna doble

Una vez se han construido las cuadernas, se van uniendo a la quilla en su posición y una vez empernadas se unen sus dos extremos superiores con un listón provisional para evitar que se abran. Siempre se comprueba el nivelado y aplomado de las cuadernas para evitar una distorsión en las formas del casco.

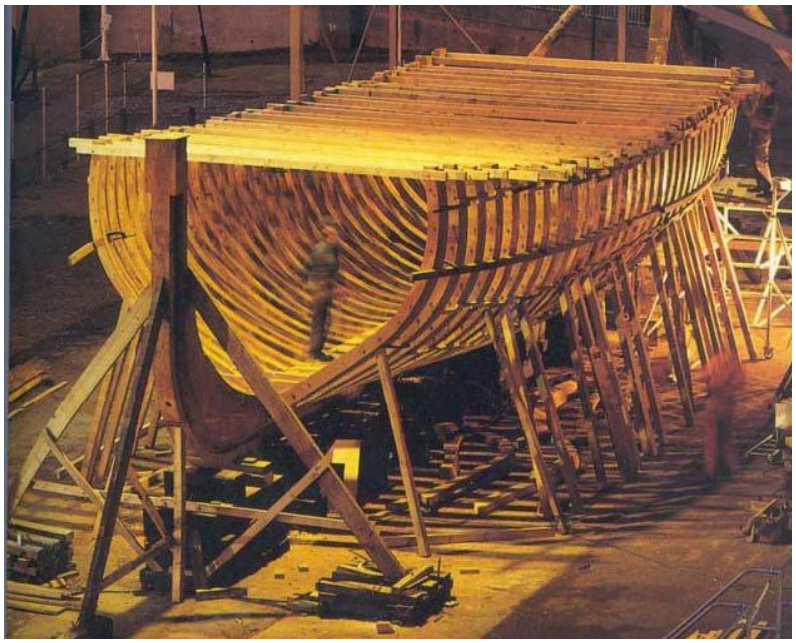


Ilustración 22: unión de cuadernas a la quilla

Una vez colocadas todas las cuadernas hay que comprobar el alisado de las formas del casco, lo que se lleva a cabo por medio de listones clavados a las cuadernas en lugares determinados por la intersección de planos paralelos a la quilla e inclinados determinados ángulos con la vertical. Estos listones son unos elementos auxiliares provisionales llamados vagras planas y se clavan en cada costado, ver siguiente figura. Tras clavar los listones se comprueba que su curva sobre las cuadernas es suave y toca a todas. Si no fuera así hay que corregir su posición en la parte afectada.



Ilustración 23: vagras planas

La clara o separación longitudinal entre cuadernas es mayor, proporcionalmente a la eslora. Este valor de la clara es un factor a considerar en función de la robustez del casco y de los mares en que se va a navegar.

Para embarcaciones pequeñas donde ya se pretendía optimizar el peso pensando en la regata en vez de utilizar sobrequilla, la unión entre cuadernas y quilla se realizaba por medio de las varengas. Siendo de mayor escantillón las varengas situadas bajo el mástil y la orza. Las varengas van empernadas a la quilla y a las cuadernas manteniendo las piezas un contacto perfecto.

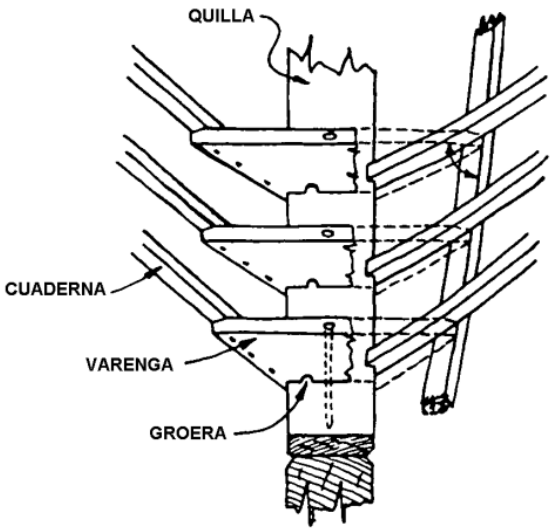


Ilustración 24: unión cuaderna quilla mediante varengas

Debido a la curvatura del casco desde la sección media hacia proa y popa, las varengas se colocan en el lado de proa de las cuadernas a proa de la sección media, y en el lado de popa en las cuadernas a popa de la citada sección. Los bordes de ambos costados se biselan para que el forro apoye adecuadamente sobre las varengas, al igual que se hace con las cuadernas.

Los palmejares se utilizan para reforzar costado y pantoque, recorren longitudinalmente el barco de proa a popa perfectamente fijados por el interior a todas las cuadernas mediante tornillos de cabeza plana, o pernos en barcos grandes. Si no hay material para hacerlos de una pieza, se pueden hacer de varias piezas unidas mediante escarpe. En el pantoque se sitúa un palmejar a cada banda compuesto de uno o dos tablones en anchura unidos firmemente.



Ilustración 25: palmejares

Los tablones de cubierta se colocan apoyados sobre los baos que van de banda a banda apoyados en los durmientes. El durmiente es la pieza estructural localizada por el interior de las cuadernas en la parte superior de las mismas, que sirve de apoyo a los baos, este puede ir clavado o empernado a las cuadernas. Si va empernado tiene mayor resistencia y hay que colocar los pernos antes de forrar el casco. El durmiente va apoyado en el sotadurmiente que va clavado a cada cuaderna.

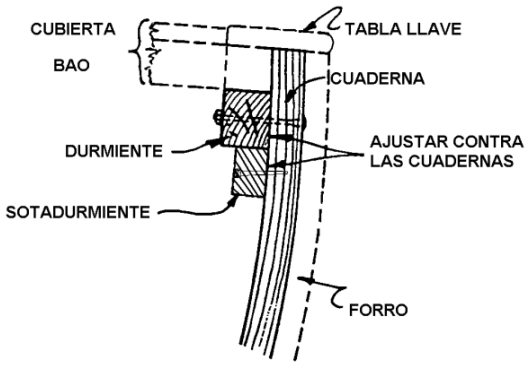


Ilustración 26: disposición de bao sobre durmiente y sotadurmiente.

A los baos se les da brusca y se apoyan también en esloras que recorren longitudinalmente el barco, bien totalmente o entre mamparos, dependiendo de la distancia a crujía a la que se encuentren. Para disminuir las luces de estos refuerzos de cubierta y dependiendo de las dimensiones del barco, se colocan puntales de apoyo repartidos a lo largo de la eslora y manga.

Cuando se ha terminado de instalar todos los elementos estructurales y el conjunto descansa verticalmente sobre los calzos, se puede comenzar la colocación del forro exterior con sus tracas formadas por listones o tablones. El forrado del casco requiere un estudio detallado de su disposición, pues el tamaño de los listones debe ser proporcionado y las líneas de las costuras deben ser "agradables a la vista".

Los listones no deben ser muy anchos, para conseguir una buena colocación sobre el casco y poder juntarlos entre sí por la zona interior, quedando algo abiertos por la zona exterior, lo que permite la introducción de la estopa y brea de calafateado. En la quilla y roda, los listones encajan en una ranura llamada alefriz.

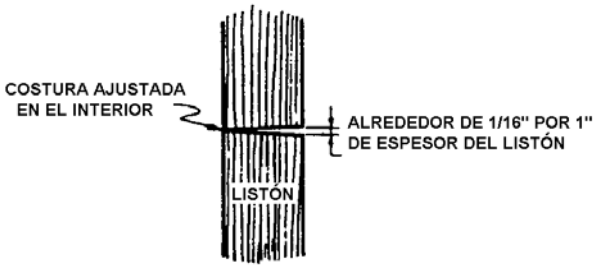


Ilustración 27: separación listones



Ilustración 28: listones encajados en quilla y roda

En las zonas de contacto entre cuadernas y tracas de forro, las primeras deben ser biseladas para que el contacto sea perfecto formando una superficie plana, figura 23. El ángulo con que se debe tallar la cuaderna varía según la disposición de la misma en el casco. Las del centro tendrán ángulo de bisel nulo ya que el forro será paralelo al plano longitudinal o de crujía, los biseles tendrán mayor ángulo progresivamente a medida que las cuadernas estén más cerca de la proa o la popa del barco. Los listones se fijan a las cuadernas mediante clavos.

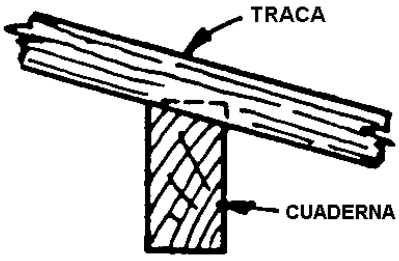


Ilustración 29: biselado de cuadernas

Salvo en barcos pequeños, los listones de las tracas no suelen ser lo suficientemente largos para llegar desde popa a proa, por lo que una traca se compondrá de dos o más tablones o listones unidos por las juntas a tope. Desde el punto de vista de la resistencia, la situación de los topes es importante y se debería saber antes de comenzar a forrar donde va a ir cada uno. La ilustración 24 muestra las características de separación que deben tener los topes. Así, no deben caer dos topes en la misma posición longitudinal sin que haya al menos tres tracas de separación, y las tracas adyacentes no deben tener topes sin que exista una separación de tres claras de cuaderna entre ellos.

Los topes se suelen realizar coincidiendo con las cuadernas, aunque también se pueden realizar entre cuadernas. En este caso se dispone una tabla del mismo grosor que el forro en la zona posterior de la unión, más ancha que el listón, y de largo la distancia entre cuadernas.

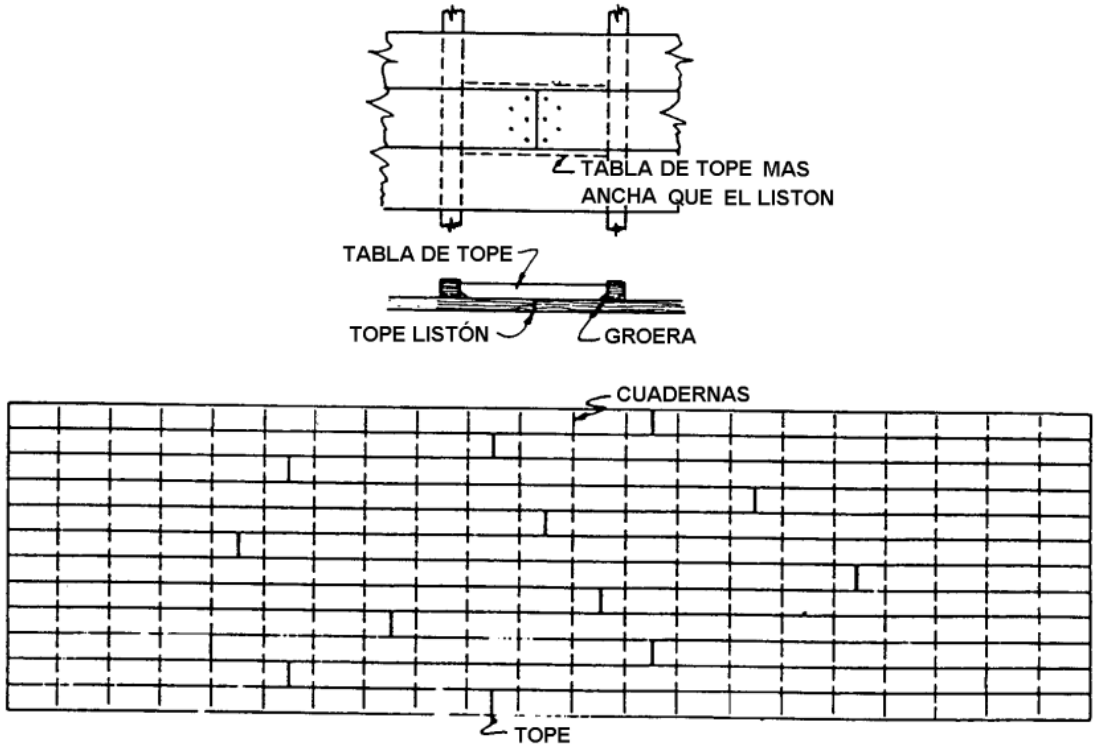


Ilustración 30: disposición de los topes

El forrado de un barco de pantoque redondo, sin codillos (como es el caso que se está tratando, ya que los veleros que se fabricaban tenían formas redondas) se realiza comenzando por la traca de cinta, a continuación con la traca de aparadura, las dos tracas adyacentes a la de aparadura, y las tracas de fondo hasta el pantoque.

Después, alternativamente una traca bajo la cinta y otra continuando en el pantoque, hasta colocar la última, que será la traca de cierre, aproximadamente a una distancia a la mitad entre las tracas del fondo y de cinta, como se puede ver en la figura 31.

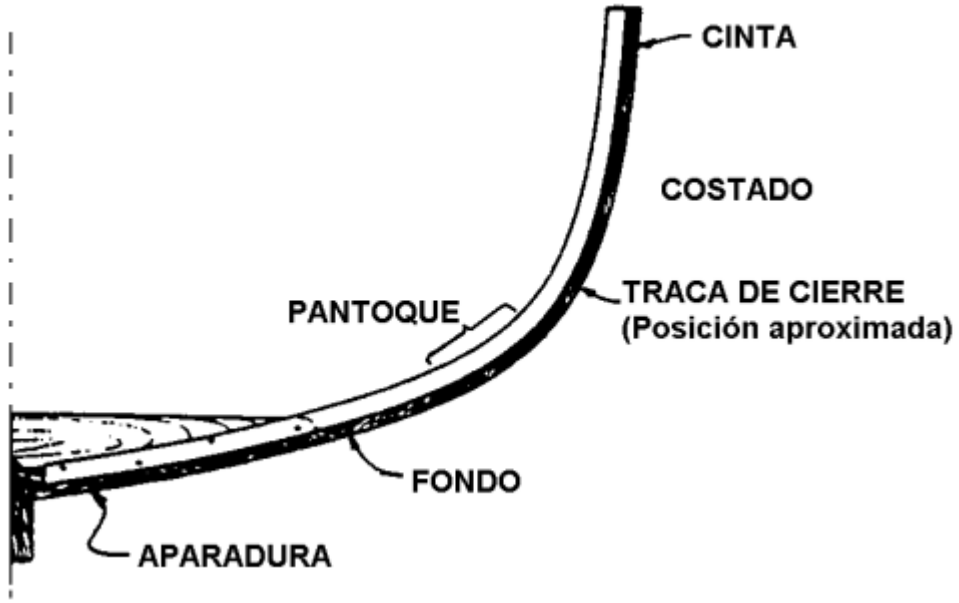


Ilustración 31: nombre de las tracas

Debido a la dificultad que plantea la traca de cierre debe ser una traca lo más recta posible, sin reviros o giros que impliquen que tenga que curvarse con vapor o calor.

Teniendo en cuenta que en algunas partes del casco, como ocurre en la proa y la popa, las tablas del forro adquieren una gran curvatura no es posible emplear listón recto por lo que se utiliza un listón con la curvatura aproximada a la de la tabla una vez trazada.

Las tracas pueden tener una anchura de entre 10 cm y 15 cm, siendo más anchas en el fondo y menos en el costado. Estas anchuras son en la zona central del barco, pues hacia los extremos se produce un estrechamiento en el espacio disponible para colocar todas las tracas, teniendo que disminuir el ancho de las tracas y en ocasiones realizar atunes, ya que alguna traca tiene que acabar antes de llegar a los extremos. El estrechamiento de las tracas se debe realizar de manera uniforme y similar en las tracas afectadas. Para realizar los estrechamientos se utiliza un junquillo, que permite decidir la forma final que se va a dar a la traca.



Ilustración 32: estrechamiento de las tracas

Una vez forrado el casco se procede al calafateado del mismo para hacerlo estanco. El calafateado es una técnica que consiste en introducir entre cada dos tablas estopa y brea, de manera que se evite la entrada de agua por las pequeñas separaciones que quedan entre los tablones.

La cantidad de estopa a introducir depende de la anchura de la abertura de la unión.



Ilustración 33: calafateado

Existía otro método utilizado para embarcaciones pequeñas donde se quería tener poco peso, este método se llamaba **forro a tingladillo.**

Los tablones del casco se disponen de tal modo que los bordes de las tablas, montan ligeramente los unos sobre los otros. Es un sistema de forrado muy rígido debido a la unión de los bordes solapados, permitiendo utilizar tracas de menor grosor que disminuyen por tanto el peso.

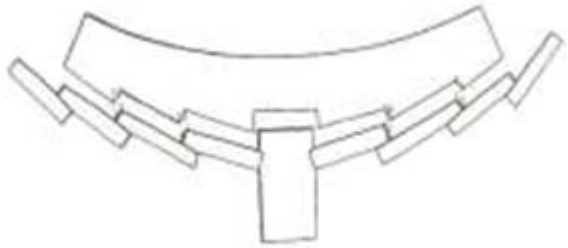


Ilustración 34: forro a tingladillo

Otro procedimiento de forrado es el **forrado doble**, es una técnica que se basa en el forro simple, pero aplicando una capa más, normalmente en una dirección diferente a la anterior para así dar resistencia a la embarcación en más sentidos. Este forrado asegura la estanqueidad sin calafateado, al colocar las costuras del forro interior en medio de una traca del forro exterior.

Es un sistema más pesado pues el forrado hay que hacerlo dos veces y hay que utilizar elementos metálicos de fijación para ambos forrados, aunque el grosor de las tracas de ambos forrados es menor que en el caso de forrado simple. Para ahorrar algo de peso se puede utilizar una madera ligera para el forro interior. La traca de aparadura se suele realizar simple para facilitar su reemplazo si es necesario.

El sistema de fijación a las cuadernas de las tracas interiores se realiza mediante tornillos. Entre cuadernas e interiormente, ambos forros se unen con tornillos con arandela a lo largo de los bordes de las tracas interiores, y también a lo largo de cada lado de la mitad de las tracas interiores para unir los bordes de las tracas exteriores. Naturalmente, las tracas exteriores deben ser suficientemente gruesas para poder poner clavos desde el interior.



Ilustración 35: forro doble

2.3 CONSTRUCCIÓN DE EMBARCACIONES EN ALUMINIO Y ACERO

2.3.1. Introducción

La información siguiente describe todos los procesos que hay que llevar a cabo para lograr una embarcación en aluminio.

En 1.974 aparecen las embarcaciones de aluminio en la Copa América que sustituyen a las de madera que participaban hasta el momento.

La razón por la que se empezó a construir barcos en aluminio es debido a diversos aspectos:

- **Mayor resistencia:** Es evidente que el aluminio tiene mayor resistencia que la madera. Esto se traduce en menos averías, el aluminio gracias a su elevada ductilidad, es uno de los metales que menos se fracturan, y no da problemas de fisuración.

- **Mayor rigidez:** Los cascos fabricados en aluminio, al realizarse mediante soldadura de todas sus pieza estructurales y estas a su vez con las chapas de recubrimiento adopta una estructura totalmente compacta que produce una gran rigidez estructural, traduciéndose en menores fatigas del material y por tanto en una mayor seguridad y posibilidad de soportar estados de la mar más duros.

- **Mejor estanqueidad:** El aluminio es mucho más impermeable que la madera además permiten soldar los distintos elementos de la cubierta o del interior directamente a su estructura. De esta manera no es necesario perforar las cubiertas o elementos estructurales para, por ejemplo, fijar mediante tornillos pasantes un carril de escotas o cualquier elemento o soporte para una jarcia. Al eliminar una parte importante de perforaciones se disminuye proporcionalmente las posibilidades de perder estanqueidad.

- **Mayor seguridad:** el aluminio no se quema con el fuego, además, gracias a su elevada ductilidad y baja fragilidad, se deforma y no se fisura. Por tanto para romper el aluminio el golpe tiene que ser especialmente violento.

- **Menor mantenimiento:** El aluminio no necesita ser pintado pues es prácticamente inmune a la corrosión. Por ello es normal ver cascos totalmente desnudos y brillantes como acabado final para tales embarcaciones, aunque por cuestión de gustos si se quiere pintar, puede también hacerse, siempre y cuando se utilicen las bases y procesos necesarios. La obra viva necesita necesariamente la aplicación de antifouling. El mínimo problema de corrosión que se pueda encontrar con el

aluminio es solucionado mediante la correcta utilización de ánodos de sacrificio de mayor electronegatividad que el aluminio como son los de Zinc o los de Magnesio.

- **Menor coste de reparación:** la reparación en aluminio es muy sencilla, al igual que en las chapas de los coches. Un bollo en el casco se puede reparar en tan sólo unas horas, cortando la chapa y soldando una nueva, devolviendo la embarcación a su estado original con total garantía de resistencia del casco.

2.3.2. El aluminio

Fue identificado en 1808 por el electroquímico británico Sir. Humphrey Davy, pero no se obtuvo por primera vez hasta 1825 por el danés Oersted, reduciendo cloruro de aluminio con una amalgama de potasio.

Hasta 1906 el aluminio se utilizaba puro, pero en este año Wilm descubrió inesperadamente el procedimiento de endurecimiento de la aleación Al-Cu por medio de temple y envejecimiento dando lugar a la entrada de las aleaciones del aluminio.

El aluminio es un material de considerable importancia en la actualidad, a la vez que de uso múltiple y es sin duda el metal después del acero con mayor volumen de producción.

Posee una combinación de propiedades que le convierten en un material extremadamente útil para distintas aplicaciones.

Propiedades del aluminio puro.

Antes de estudiar las propiedades del aluminio, hay que recordar que, el aluminio al igual que los demás materiales metálicos, está formado por cristales (granos). La estructura cristalina junto con las imperfecciones cristalinas es el origen de casi todas las propiedades importantes de los metales y, en consecuencia, también del aluminio y sus aleaciones.

Estas propiedades pueden mostrar distinta sensibilidad con las distorsiones en la estructura cristalina. Así, existen unas que son casi insensibles (a nivel atómico), otras presentan poca sensibilidad (módulo de elasticidad o calor específico), y un conjunto de éstas (tal vez las más importantes) que son muy sensibles con las distorsiones en la estructura de la red (resistencia mecánica o la conductividad eléctrica), esto es, dependen ampliamente de los defectos reticulares y de la existencia de otros elementos, ya sean de aleación o impurezas.

Propiedades físicas

Tabla 1: Propiedades físicas del aluminio (Aluminio purísimo Al99,99 a 20°C)	
Número atómico	13
Estructura cristalina	Cúbica Centrada en las Caras
Densidad (gr/cm³)	2,7
Temperatura de fusión (°C)	660
Temperatura de ebullición (°C)	2480
Calor específico medio (0-658°C) (cal/g°K)	0,25
Coeficiente de dilatación lineal x 10^6 (mm/°C)	23 (20-100°C)
Conductividad térmica (W/m.K)	235
Conductividad eléctrica (IACS)[3]	65,5%
Resistividad eléctrica (μΩ.cm)	2,69
Susceptibilidad magnética x 10^6	0,63

El aluminio puro es un metal de color plateado brillante con número atómico igual a 13 que cristaliza en la red cúbica centrada en las caras y no presenta modificaciones alotrópicas, por lo que solo se puede endurecer por procesos que originen acritud.

Propiedades mecánicas

Tabla 3. Propiedades mecánicas del aluminio (Aluminio purísimo Al99,99 a 20°C)	
Resistencia a tracción (MPa)	40-50
Límite elástico 0,2% (MPa)	10
Módulo de elasticidad (GPa)	62-70
Alargamiento (%)	50-60
Dureza Brinell (HB) (kg/mm²)	15

En aluminio de gran pureza, no hay definición de su límite de elasticidad, esto significa que, no hay un punto definido en la curva de tensión-deformación donde acabe la deformación elástica y se presente la deformación plástica. Por este motivo, se elige el limite elástico 0,2% (límite 0,2) qué es la tensión a la cual la probeta experimenta un alargamiento permanente de un 0,2% de su longitud.

La combinación de propiedades que presenta el aluminio, tales como su baja densidad, alta resistencia a la corrosión, altas conductividades eléctrica y técnica y relativa resistencia mecánica, unido a un precio relativamente bajo convierten el aluminio en un material extremadamente útil para la construcción de yates.

En relación con el acero, el aluminio disipa el calor (conductividad teórica) 5 veces más rápido que éste, lo que implica grandes concentraciones de calor para alcanzar la fusión en tiempo corto, lo que exige el empleo de energías considerables.

En cuanto al coeficiente de dilatación lineal el aluminio se dilata 2 veces más que el hierro y 1,5 veces más que el cobre lo que trae consigo una gran tendencia al agrietamiento y deformaciones cuando se contrae al enfriar.

La baja resistividad eléctrica del aluminio, hace que comparativamente con el acero sean necesarias corrientes muy fuertes y un control de parámetros más estrecho para el proceso de soldadura por resistencia, lo que origina máquinas de soldar más caras.

Al igual que en el cobre la buena disposición a la autoprotección a los medio oxidantes y corrosivos, especialmente después del proceso de anodizado, lo hace destacable para el campo de la construcción naval. Pero sobretodo, debido a su baja densidad aunque presente características mecánicas relativamente bajas comparadas con las del acero, su relación resistencia-peso es excelente. Es precisamente debido a esto por lo que el aluminio se utiliza cuando el peso es un factor importante.

Sin embargo, cualquiera de las aplicaciones descritas exige al aluminio un mínimo de características mecánicas, las que son difíciles de alcanzar en estado puro sin alear, por tanto, se hace necesario la adición de elementos de aleación que permitan alcanzar un mayor rango de propiedades, al mismo tiempo que posibiliten la aplicación de un número mayor de tratamientos.

El aluminio puede ser aleado con los siguientes elementos:

- **Cobre:** perjudica la resistencia a la corrosión del aluminio, confiere características apropiadas para el tratamiento térmico.
- **Magnesio:** en proporción superior al 7% perjudica la resistencia a la corrosión en ambiente marino, incrementa la resistencia y confiere características para el temple.
- **Manganeso:** perjudica la ductibilidad, incrementando la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión facilitando el trabajo en caliente.
- **Níquel:** mejora la resistencia a altas temperaturas.
- **Silicio:** facilita el tratamiento térmico.
- **Zinc:** incrementa fuertemente la resistencia mecánica de la aleación.

Genéricamente podemos distinguir entre las aleaciones de aluminio dos grupos bien diferenciados:

- Aleaciones tratables térmicamente.
- Aleaciones no tratables térmicamente.

La diferencia entre ambo grupos reside en que las primeras pueden recibir un tratamiento con alteraciones de temperatura sin que sus características se vean alterados por ello, mientras que las segunda al haber sido creadas mediante cambios de temperatura, al producirse estas en el tratamiento pueden alterar las características de la aleación. Estas últimas aleaciones, por lo tanto, no admiten soldadura.

En todos los casos, las aleaciones de aluminio deben tener como características las siguientes:

- Resistencia a esfuerzos mecánicos
- Resistencia a la corrosión
- Facilidad de trabajo
- Bajo coste

De entre las muchas aleaciones de aluminio existentes en el mercado, escogeremos 3 de ellas, cada una para una determinada finalidad:

1) NP5/6

Como indica en la normativa UNE, esta aleación no es tratable térmicamente, se presenta en forma de plancha, su contenido de magnesio oscila entre 4,5% y 6,5%, y se presenta tal y como se produce, sin posterior tratamiento térmico.

Esta aleación presenta un contenido de cobre no superior a 0,1% lo que confiere una buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

2) NE6

Aleación de aluminio no tratable térmicamente presentada en forma de perfil, con un contenido de magnesio comprendido entre 4,5% y 6,5%, y presentada tal y como se produce, sin tratamiento térmico posterior.

3) HE10

Aleación de aluminio tratable térmicamente presentada en forma de perfil, apto para ser remachado a la plancha, con un contenido en magnesio entre 0,4% y 1,5%.

2.3.3. Proceso de construcción

Se describe el proceso de construcción de una embarcación de aluminio:

1. Las cuadernas van siendo soldadas una a una a partir del diseño.



Ilustración 36: cuaderna soldada

2. Las cuadernas son dispuestas sobre una estructura de acero que soporta la construcción de todo el velero.



Ilustración 37: disposición de cuadernas.

3. Las vigas longitudinales van armando la estructura del casco y reforzando todo el conjunto.



Ilustración 38: vigas longitudinales.

4. Finalizada la estructura se revisan todas las soldaduras.



Ilustración 39: estructura al completo.

5. Los forros se van recortando poco a poco en diferentes grosores para cada zona.



Ilustración 40: soldadura de los forros.

6. Se recorta y suelda el mamparo de proa y los depósitos que forman un todo con el casco.



Ilustración 41: interior de la estructura.

7. Con la amoladora se repasan todos los cordones de soldadura para eliminar el material sobrante.



Ilustración 42: superficie del casco.

8. La superestructura va soportada sobre las cuadernas principales.



Ilustración 43: longitudinales de cubierta.

9. La estructura de la cubierta finalizada queda prepara para recibir los forros de cubierta.

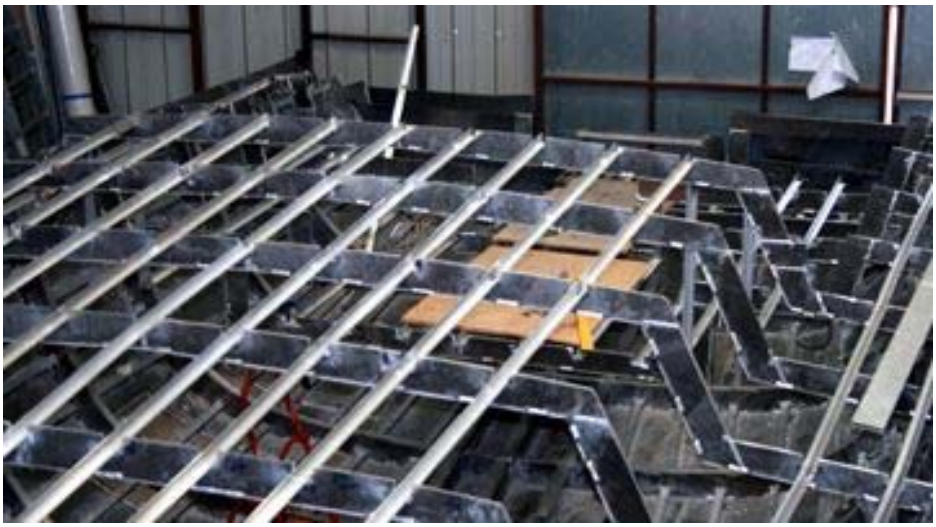


Ilustración 44: estructura de cubierta.

10. Se han soldado los refuerzos y placas que soportan el palo, y practicado los recortes para las escotillas.



Ilustración 45: superficie de la cubierta.

11. Todo el interior recibe una capa de 15 centímetros de espesor de espuma aislante de poliuretano.



Ilustración 46: interior del casco.

12. El casco está finalizado. Comienza la colocación de soportes para los diferentes elementos de la jarcia.



Ilustración 47: casco al completo.

13. Se forra con masilla y se pule de forma que queda listo para ser pintado.



Ilustración 48: operario masillando.

14. Se aplica la pintura y el casco queda listo.



Ilustración 49: operario pintando.

2.4. Construcción de yates en materiales compuestos

2.4.1. Introducción

La primera embarcación utilizada en la Copa América construida con fibra de vidrio y composites fue utilizada por el equipo de Nueva Zelanda llegando a la final de la Louis Vuitton en 1986 perdiendo contra Dennis Conner, compitiendo con una embarcación de aluminio. A pesar de esto en la siguiente edición todos los equipos participantes utilizaron barcos de fibra de vidrio, lo cual quiere decir que son mucho más eficaces debido a su desplazamiento.

Las primeras construcciones con materiales compuestos fueron con fibra de vidrio y resina de poliéster, se pasó a la resina epoxy y en la actualidad los barcos de alta competición se fabrican con fibra de carbono y epoxy.

Se estudiará un proceso de fabricación conjunto para fibras de vidrio y fibras de carbono así como para las diferentes resinas ya que son muy similares.

2.4.2. Los materiales

Un material compuesto se puede describir como una mezcla sólida de dos o más componentes, diseñada y preparada para aprovechar las propiedades más interesantes de cada uno de ellos al tiempo que se minimizan aquellas que son menos atractivas.

Los componentes son:

- una matriz uniforme como principal constituyente
- el material de relleno o refuerzo que mejora las propiedades de la matriz.

Los plásticos reforzados en fibras presentan alta cualidades mecánicas, gran facilidad de aplicación y libertad de diseño, que los ha acreditado como material muy adecuado para la construcción de ciertos tipos de embarcaciones, fundamentalmente yates, barcos de recreo, deportivos y pesqueros.

La mayor parte de los materiales que se emplean en construcción naval en materiales compuestos está constituida por materiales de fibras de tipo R y una matriz de resina de poliéster, debido a su buen precio y sus características. La optimización de estos materiales depende de la correcta orientación de las fibras.

Los materiales compuestos de alta tecnología como laminados en fibras de carbono o aramida con resinas epoxi normalmente solo se utilizan en barcos de alta competición debido a su alto coste.

Las **ventajas** de la aplicación de materiales compuestos son en la construcción de embarcaciones son:

- Resistencia al ambiente marino
- Peso ligero
- Alta resistencia en relación con su peso
- Construcción del forro del casco sin costuras
- Posibilidad de moldear formas complicadas
- Coste bajo
- Bajo mantenimiento
- Larga duración

Los **inconvenientes** son:

- Menor rigidez al tener bajo módulo de elasticidad
- Menor resistencia a la fatiga
- Tendencia a prolongar su deformación si está sometida a cargas de larga duración.
- Transmisión de vibraciones
- Vulnerabilidad al fuego.

2.4.2.1. Las resinas

Las resinas termoestables constituyen el elemento matriz que permite explotar las cualidades de las fibras. Las fibras utilizadas en construcción naval son polímeros termoendurecibles, es decir, se convierten en sólidos estables mediante un proceso de polimerización irreversible, con la ayuda de productos químicos llamados catalizadores. Con un proceso de postcurado a temperatura elevada se pueden mejorar las cualidades mecánicas y físicas de estas resinas.

El proceso de polimerización se divide en 4 fases.

- **Tiempo hábil de utilización:** la resina todavía está en estado líquido y se puede trabajar.

- **Tiempo de gel:** la resina está en forma de gel flexible.

- **Tiempo de endurecimiento:** tiempo necesario para que la resina esté suficientemente dura para poder sacarla del molde.

- **Tiempo de maduración:** la resina seguirá endureciéndose hasta lograr una solidez completa.

Existen tres tipos de resina: poliéster, vinilester y expoxi.

2.4.2.1.1. Resinas de poliéster

Existen dos tipos de resinas de poliéster:

- **ortoftálicas:** que se emplean para una fabricación de menor calidad ya que tienen un mayor riesgo de absorción de agua (osmosis)

- **isoftálicas:** son las más utilizadas por tener mejores propiedades mecánicas y resistencia al medio marino.

La fluidez de la resina se puede variar mediante un agente reticulante llamado estireno, lo cual permite aplicar la resina en superficies verticales, este agente además tiene la capacidad de permitir la polimerización del poliéster en su paso al estado sólido.

El curado de esta resina se hace a temperatura ambiente mezclándola con dos productos que actúan como sistema catalítico. Estos dos productos son: un agente catalizador que normalmente es peroxido de metil, y un agente acelerador que es el que remplaza al calor, por tanto la reacción química no produce calor.

El tiempo de solidificación dependerá de la cantidad de catalizador, se debe tener cuidado ya que si se pretende que la solidificación sea lenta posiblemente no se mezcle la proporción suficiente de catalizador, para controlar el tiempo de solidificación existen diferentes tipos de catalizadores.

Las resinas se pueden comprar ya mezcladas con un acelerador, y de esta forma nos aseguramos de que la proporción acelerador-resina es la adecuada. La resina debe almacenarse en un recipiente cerrado a temperatura razonablemente baja y en la oscuridad.

Un aspecto importante a destacar en este tipo de resinas es que, en el proceso de polimerización se produce una contracción bastante importante que junto a la reacción exotérmica pueden provocar tensiones que perjudiquen a la estabilidad dimensional de la pieza.

2.4.2.1.2. Viniléster

El viniléster es un tipo de resina muy resistente a la corrosión, incluso de ácidos. Soporta altas temperaturas, el exterior y la fatiga, también tiene buenas propiedades de aislamiento tanto térmico como eléctrico.

La buena resistencia química de las resinas viniléster se basa en que los dobles enlaces de las extremidades de la cadena son extremadamente reactivos, reaccionando casi completamente durante el proceso de polimerización. Por consecuencia sólo un número mínimo de doble enlaces queda expuesto al ataque químico.

Si bien las resinas de poliéster polimerizadas presentan dobles enlaces carbono-carbono, estos están expuestos aleatoriamente a lo largo de toda la cadena, permitiendo que numerosos enlaces no participen en el proceso de polimerización y queden severamente expuestos al ataque químico. Además en las resina viniléster polimerizada sólo intervienen las extremidades de la cadena molecular permitiendo que la cadena se alargue y absorba más fácilmente los impactos mecánicos y térmicos.

Las resinas viniléster tienen un mejor comportamiento que las resinas de poliéster no saturado ante la resistencia a la tracción y alargamiento a la ruptura. Además, presentan una muy buena compatibilidad y una excelente resistencia cohesiva a las fibras de refuerzo dándole al laminado una resistencia más sólida con respecto a las resinas de poliéster tradicionales.

2.4.2.1.3. Resinas Epoxy

Una resina epoxi o poliepóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador. Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre epiclorohidrina y bisfenol A.

En general, las resinas epoxi muestran buenas cualidades de resistencia mecánica, excelente estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos y a la abrasión, absorción de agua reducida y buenas propiedades eléctricas. Se contraen algo al curar (bastante menos que el poliéster) y poseen tan buena adhesión a otros materiales, que han de utilizarse al moldearlas agentes de moldeo que permitan la separación de las piezas.

Una de las principales ventajas de las resinas de epoxi sobre las resinas de poliéster es su baja contracción, que puede reducirse hasta prácticamente cero mediante aplicación de cargas.

2.4.2.2. La Fibra

2.4.2.2.1. Fibras de vidrio

Estas fibras están constituidas por delgados y duros filamentos con gran resistencia a la tracción. Existen diferentes tipos de tejidos que se forman por entrecruzamiento de hilos, llamándose “urdimbre” a los situados en la dirección más larga del tejido e hilos de “trama” a los situados a lo ancho.

Este tipo de fibras se clasifican según su gramaje (cantidad de peso de tejido que hay por unidad de superficie, medido en gr/m²) y según la forma de entrecruzamiento de hilos.

Los tejidos más utilizados son el mat y el roving, los cuales viene en rollos de aproximadamente un metro de ancho.

El **mat** está compuesto por hilos de fibra de vidrio de 4 ó 5 cm unidos aleatoriamente por un ligante en varias capas. Tiene gran facilidad para impregnarse bien en resina, es isotrópico, fácil de manejar manualmente adaptándose bien a las superficies difíciles.

En la fabricación sobre un molde hembra, después del gel coat, se coloca una capa de mat que proporciona una capa rica en resina, que va a proporcionar buena resistencia al agua de mar y al ataque ambiental. También mejora las propiedades del gel coat frente a las grietas, la abrasión y el impacto, aislando el resto del laminado.

El mat debe combinarse con tejidos como el roving que le confieren al laminado las propiedades de resistencia adecuadas.

Las principales características de la fibra de vidrio mats son:

- Utilización usar en laminación manual
- Moldeo contínuo
- Laminados con poca resina
- Fácil remoción de aire atrapado
- Rápida humectación con buena resistencia
- Tipo de vidrio: E
- Diámetro nominal del filamento: 11 micrones
- Longitud del filamento: 50 mm
- Variedades de mats: 225 G/m2; 300 g/m2; 250 g/m2 y 600 g/m2

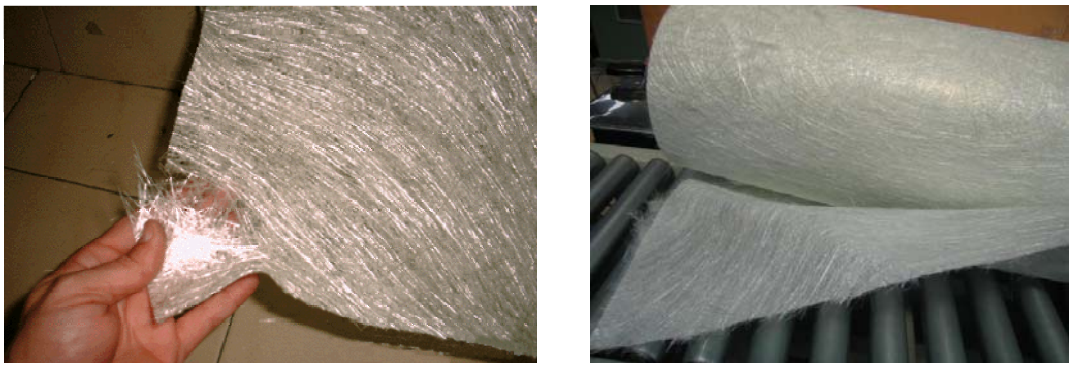


Ilustración 50: tejido mat

El tejido roving se forma entrelazando hilo de trama y urdimbre de forma alternada, figura 31, es decir, un hilo urdimbre pasa alternativamente por encima de uno de trama y al siguiente por debajo.



Ilustración 51: tejido roving

De esta manera se obtiene un tejido con una superficie de mayor espesor que ayuda a formar rápidamente el espesor del laminado. Mantiene sus características en las dos direcciones de trama y urdimbre, por lo que es un tejido biaxial. El excesivo entrelazado dificulta la penetración de la resina de poliéster, esta dificultad de la absorción de la resina hace que no sea aconsejable poner dos capas contiguas de roving, por lo que se intercala una capa de mat entre dos de roving, ya que el mat absorbe bien la resina y consigue la unión de todas las capas.

Hay otros tipos de tejidos llamados satenes, ilustración 32, cuya diferencia con el anterior es que el trenzado no es alterno, es decir, un hilo de urdimbre pasa por encima de dos o más hilos de trama consecutivos, y posteriormente pasa por debajo del mismo número de hilos de trama consecutivos. De esta forma la superficie del tejido es de menor espesor, se mejoran las propiedades mecánicas al estar los hilos más rectos y se consigue mejor absorción de la resina. Por una cara del tejido predomina la urdimbre y por la otra la trama, lo que aumenta la bidireccionalidad del reparto de esfuerzos en el mismo. Por el contrario, existe dificultad en el manejo a mano al aumentar el peligro de deshacer el tejido.

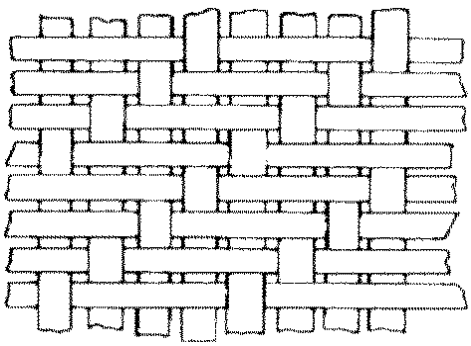


Ilustración 52: disposición tejido roving

2.4.2.2.2. Fibras de aramida

Las fibras de poliamida ofrecen ventajas en la relación resistencia a tracción / peso.

Con kevlar pueden fabricarse cables y cabos lo suficientemente fuertes como para amarrar equipos petrolíferos marinos. Los componentes para aviones, cascos de barcos y los cárteres de los motores de cohetes, se refuerzan actualmente con kevlar por su resistencia, dureza y poco peso.

Otra ventaja que presenta el kevlar es que, cuando se refuerza una pieza con este material, al producirse la rotura, ésta se efectúa progresivamente. Esta característica de ruptura gradual provee un margen de seguridad.

Kevlar mantiene sus propiedades correspondientes a la temperatura ambiente, hasta los 180º C. Puesto que no se funde ni favorece la combustión, el kevlar es ideal para usos a altas temperaturas.

También presenta una resistencia química excelente, ya que no se altera prácticamente al exponerlo a disolventes, combustibles, lubricantes o agua del mar. Aunque la luz ultravioleta afecta la capa exterior del kevlar.



Ilustración 53: fibras de aramida

2.4.2.2.3. Fibras de carbono

Hoy en día es posible obtener fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo, en grandes cantidades.

Con las fibras de carbono pueden obtenerse piezas de resina reforzada que ofrecen unas cualidades en cuanto a resistencia y rigidez que no poseen otros materiales compuestos.

Los compuestos a base de fibra de carbono se preparan generalmente con una técnica de moldeo a presión, con un contenido en fibra de 60% de volumen. En laminación a mano los compuestos con fibra de carbono tienen un contenido menor de fibra.

Las fibras de carbono reciben un tratamiento superficial para mejorar su adhesión a la resina.

Una propiedad a considerar en el proceso de diseño es que la fibra de carbono tiene un coeficiente de expansión térmica negativo en la dirección de la fibra y positivo en el sentido transversal. Esta deformación deberá ser soportada por la resina.

Las resinas utilizadas en laminados de carbono tienen un alargamiento a la rotura del 4 al 6% con objeto de adaptarse a los diferentes coeficientes de expansión térmica, quedando limitado el uso de estos compuestos hasta temperaturas máximas de 200ºC. Las fibras de carbono retienen sus propiedades hasta temperaturas de 900ºC y en algunos casos hasta 1800ºC.

Por no ser afectados por el agua de mar los compuestos de epoxi-carbono son los compuestos ideales para la construcción de embarcaciones de competición.



Ilustración 54: fibras de carbono

2.4.3. Otros componentes

2.4.3.1. Desmoldeantes

Una de las cualidades de todas las resinas es que se adhieren fuertemente a la mayor parte de las superficies, lo cual es una desventaja cuando se quiere sacar una pieza de un molde donde se ha laminado.

Para evitar que la pieza se pegue al molde es necesario preparar inicialmente su superficie. Esto se puede hacer cubriendo la superficie del mismo con un material al cual no se pegue el poliéster, como varias capas de desmoldeante, cuyo efecto es el de proporcionar una película no adherente sobre la superficie del molde. El desmoldeante más utilizado es la cera, y como precaución pueden utilizarse varias capas de cera y una capa final de otro desmoldeante, como alcohol de polivinilo.

Para obtener una buena separación del molde hay que aplicarlo correctamente. Una perfecta aplicación y cuidadosa inspección para asegurar que toda la superficie ha sido cubierta por el desmoldeante será recompensada con una limpia separación y una superficie de acabado que no requiere trabajo alguno de restauración sobre la pieza y molde.

2.4.3.2. Gel Coat

Es la primera capa del laminado, la cual lo protegerá de los ataques del medio exterior, además de aumentar la resistencia al impacto y darle un aspecto suave y bonito.

Las funciones del gel coat pueden resumirse en:

- Proporcionar una capa de resina que proteja la fibra de las influencias externas.

- Ocultar la fibra y presentar una superficie más suave y atractiva.

- Proporcionar las propiedades de superficie requeridas: color, resistencia, abrasión, etc.

Se pueden distinguir distintos tipos de gel coat de resinas de poliéster, para la fabricación de embarcaciones se utiliza un gel coat para moldes especialmente diseñado para la fabricación de moldes. Debe de tener unas características de rayado superiores a las normales.

2.4.3.3. Top Coat

La resina top coat contiene cera y se utiliza en la parte más exterior del laminado. El top coat tiene varios fines:

- Facilitar el curado de la última capa, evitando el contacto con el aire que perjudica el curado.

- Proteger el laminado y presentar una superficie más decorativa.

- Equilibrar el laminado para compensar la presencia del gel coat.

2.4.3.4. Cargas

Son sustancias que no inhiben ni aceleran el curado, se añaden a la resina con el fin de modificar sus características, dar resistencia a la tracción, a la compresión y al choque, además de modificar el volumen y el acabado.

Las cargas aumentan la densidad de la resina por lo que disminuye la contracción de la mezcla y hace más fácil la construcción en moldes. Se debe prestar especial atención a la proporción de cargas ya que pueden disminuir la calidad del laminado haciendo más frágil la resina solidificada.

2.4.3.5. Colorantes

Se añaden al gel coat para dar color a la superficie, no se debe añadir más colorante del requerido ya que disminuyen las propiedades de la resina. Este método es el mejor para dar color a la superficie pero solamente se conseguirá un acabado de brillo si se construye sobre un molde pulido.

2.4.4. Moldes

Para la obtención de piezas de materiales compuestos se necesita en todos los casos un molde. Los cascos de barco se hacen con un molde que represente el negativo de las formas, también llamado molde hembra, para obtener una superficie pulida en la cara exterior.

Los moldes se realizan fundamentalmente con madera, contrachapado, fibra o metálicos, siendo estos últimos más resistentes a las operaciones de desmoldeo, y los de fibra los más utilizados. La ejecución de un molde en fibra requiere previamente realizar el modelo en madera a tamaño natural con un acabado muy liso y pulido que reproduzca con toda fidelidad la forma requerida. Este modelo se lamina para obtener el molde en fibra, que se reforzará exteriormente y se empleará en la fabricación del casco. El molde se puede utilizar las veces que se necesite para la fabricación en serie.



Ilustración 55: molde hembra

Los últimos cascos de alta competición se han construido con modelos fabricados con materiales especiales de espuma al cual se le da forma mediante una fresados de almenos 5 ejes. En las siguientes fotografías podemos ver una fresadora trabajando sobre un molde de espuma.



Ilustración 56: fresadora trabajando 1



Ilustración 57: fresadora trabajando 2



Ilustración 58: fresadora trabajando 3

2.4.5. Núcleo del laminado en sándwich

Debido a la baja rigidez a la flexión de los laminados de fibra se han ido buscando diferentes formas de fabricar una embarcación con el mínimo desplazamiento posible de forma fiable.

Los primeros barcos de competición fabricados con fibra de vidrio como el utilizado por los neozelandeses en la Copa América se diseñaron optimizando todo lo posible a partir de dos métodos para aumentar la rigidez:

- Aumentar el número de refuerzos del casco o mamparos para disminuir el espaciado entre ellos y por tanto que el tamaño de los paneles de plancha laminada sea menor.

- aumentar el espesor del laminado con el consiguiente aumento de peso.

Más adelante se diseñaron barcos mediante núcleo de laminado en sándwich método que consiste en utilizar paneles sándwich, colocando un material de núcleo de baja resistencia y densidad entre dos capas de laminado en fibra.

La rigidez de un panel sándwich no solo depende de la rigidez de los componentes, de su módulo de flexión, sino también de la distancia que el núcleo separa los laminados exteriores. De hecho, la rigidez es proporcional al cubo del espesor del panel. Esto significa que un ligero aumento del espesor aumenta considerablemente la resistencia a la flexión, en la figura se pueden comprobar las diferencias entre un laminado monolítico y un laminado en sándwich.

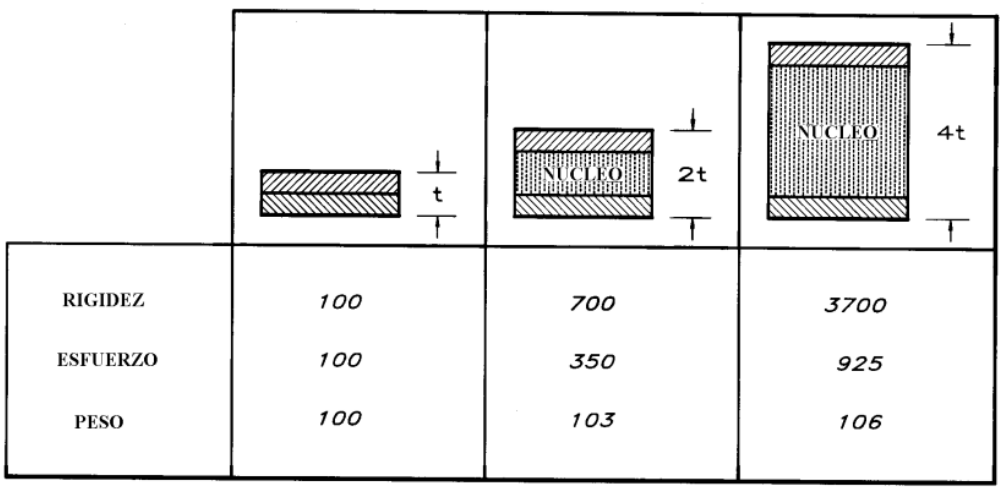


Ilustración 59: diferencias entre laminado monolítico y laminado en sándwich

Los materiales utilizados como núcleo de estructuras sándwich deben poseer las siguientes cualidades: baja densidad, buena resistencia a compresión, a cizalladura, a los agentes químicos y ambientales y buena adherencia a las resinas utilizadas en los laminados de las paredes.

Los materiales de núcleo que se han utilizado por orden cronológico son:

- **Madera de balsa**

Es una madera natural cuya densidad se encuentra entre 0.9 y 0.25 g/cm3.

Los paneles fabricados con madera de balsa proporcionan una relación rigidez/peso elevada por lo que se utilizaron durante un periodo muy breve. Hoy en día se utilizan en las zonas de refuerzos locales para aumentar el escantillonado y la inercia de los puntos del casco más solicitados, particularmente en los sitios de asemblaje del casco con otros componentes como pueden ser superficies donde se situen winches, poleas, cornamusas, etc.



Ilustración 60: madera de balsa para núcleo

- **Espumas**

Las espumas son los materiales de núcleo más comunes en construcción de embarcaciones en materiales compuestos, siendo el PVC uno de los más utilizados. Son materiales alveolares que permiten la construcción de barcos de bajo peso y altas prestaciones.

Antes de aparecer el panel de nido de abeja estos núcleos eran los utilizados para la fabricación de embarcaciones de regata.

Bajo esta denominación se incluyen un amplio grupo de materiales que responden a distintos polímeros:

- **Poliestireno y poliuretano:** tienen escasas propiedades mecánicas, y se utilizan exclusivamente como material de soporte para elementos rigidizadores, como los refuerzos de la estructura interior del casco en sustitución de la madera ya que tienen una menor densidad. La espuma de poliestireno es atacada por el estireno de la resina, por ello es aconsejable sellar la espuma con una resina de epoxi sin disolvente, reforzada con una capa de fibra de vidrio, aplicando la resina de poliéster inmediatamente después de gelificar el epóxido.

  En la primera imagen podemos ver paneles de poliestireno y en la segunda de poliuretano.



Ilustración 61: poliestireno y poliuretano

- **Cloruro de polivinilo (PVC).**

Estas espumas fueron muy utilizadas en su día, en la actualidad, se utilizan en embarcaciones de recreo y embarcaciones dedicadas a competiciones menores.

Existen dos tipos de espumas de polivinilo de utilización como núcleo estructural:

- *Las espumas lineales elásticas* que están compuestas por PVC puro. Estas separan el estireno de la resina de poliéster, lo cual tiene efectos adversos al causar un curado incompleto de la resina y una debilitación de la propia espuma. Para prevenir este inconveniente, se debe sellar la superficie de la espuma con una fina capa de resina muy catalizada. Estas espumas son ligeramente menos resistentes a compresión y a cizalladura, pero su alta capacidad de deformación les permite absorber impactos sin llegar a la rotura del material.

- *Las espumas reticulares o rígidas* formadas por una mezcla de polivinilo y poliuretano, poseen, en general, un buen comportamiento mecánico frente a esfuerzos de compresión y cizalladura, pero son frágiles. Estas espumas fueron las más utilizadas hasta la aparición del panel de abeja.

- **Panel de nido de abeja**

Los paneles de nido de abeja son estructuras celulares formadas por un conjunto de paredes verticales dispuestas geométricamente. Esta disposición perpendicular a los planos de las paredes exteriores les confiere gran rigidez, resistencia a la compresión y cizalladura transversal. Sin embargo, como otros materiales de núcleo tiene posibilidades de fallo ante cargas concentradas. El material utilizado para la construcción de las celdas es de tipo plástico, polietileno y polipropileno.

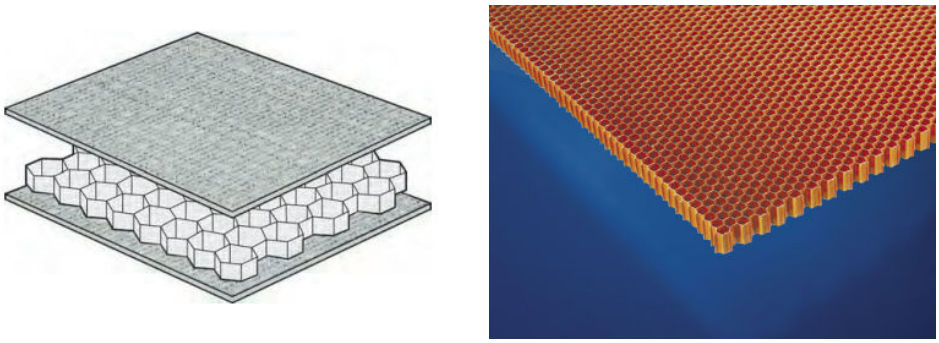


Ilustración 62: panel de nido de abeja

El panel de abeja comenzó utilizándose con fibra de vidrio pero desde hace una década los barcos de alta competición se fabrican con fibras de carbono y panel de abeja, excepto en las zonas a reforzar como se ha mencionado anteriormente que se utiliza poliuretano o poliestireno.



Ilustración 63: panel de nido de abeja de carbono

2.4.6. Procesos de construcción

A lo largo de los últimos 50 años, el proceso de construcción de embarcaciones con materiales compuestos ha ido modificándose, al igual que los materiales, para conseguir una mayor optimización de la resistencia del barco y de la sencillez del proceso.

En este apartado se describen por orden cronológico los procesos más utilizados.

Las fases que se siguen normalmente para la fabricación de la embarcación son:

- **El modelo:** Reproducción de la forma externa del casco, para la cual se utiliza un material barato ya que después de usado se rompe y se tira, pero con la suficiente estabilidad de formas. Se utilizan materiales como: madera, escayola, y en la actulidad espuma. El acabado superficial es bueno, y el casco del barco se construye normalmente con la quilla hacia arriba.

- **El molde:** En algunos casos no se utiliza ya que como ya se ha visto, las últimas embarcaciones se han construido sobre un modelo hecho de espuma y modelizado con una fresadora de 5 ejes.

Si se utiliza molde suele ser de plástico reforzado con fibra de vidrio y sobre él se lamina, dando antes una capa de antiadherentes o desmoldeantes para poder separar con facilidad pieza y molde una vez acabado. Posteriormente se da una capa de gel coat y por ultimo sucesivas capas de resinas y fibras, se termina con unos refuerzos. Una vez está curado se separa del molde, obteniendo una réplica en hueco de la forma del casco.

- **Laminado:** Una vez obtenido el molde se prepara su superficie para la operación de laminación, se comienza la aplicación de una primera capa de desmoldeante, seguida de capa de resina (gel coat) de un espesor de 0.50 - 0.6mm. Después se prosigue el trabajo añadiendo sucesivas capas de refuerzo y resina. En la actualidad existen hornos suficientemente grandes como para meter el molde completo, por lo que la curación se puede acelerar y mejorar controlando en todo momento la temperatura ambiente.

2.4.6.1. Técnicas de moldeo por contacto

El moldeo por contacto era la técnica más utilizada en la fabricación hasta hace unos años. Es el único método de producción que aprovecha las dos ventajas más importantes de las resinas de poliéster en su procedimiento de curado, la más importante es, el efectuar la polimerización completa en ausencia de calor exterior y de alta presión, ya que, hasta hace unos años no se pudieron fabricar hornos suficientemente grandes donde cupiera el molde completo; así que este método era el más utilizado. Hoy en día se sigue utilizando en astilleros pequeños o para realizar pequeñas piezas de barcos de competición.

Se van a describir los dos métodos de moldeo por contacto que se han utilizado, siempre por orden cronológico ya que se pretende demostrar cómo han ido evolucionando con el tiempo los procesos.

2.4.6.1.1. Moldeo manual de materiales compuestos (hand lay-up)

El moldeo o laminación manual es el método más sencillo para preparar una pieza reforzada con fibra. El proceso se lleva a cabo en un molde abierto, debidamente acondicionado (pulido y agentes desmoldantes). Inicialmente se aplica una capa de gelcoat en el molde, lo que da un mejor acabado a la pieza terminada. La resina utilizada se mezcla con un catalizador o endurecedor, de lo contrario, el curado puede llevar días o incluso semanas.

A continuación, el molde se moja con la mezcla mediante vertido o brochas y pinceles, las láminas de fibra se colocan sobre el molde y se asientan en el molde con rodillos de acero. La colocación del refuerzo se realiza con el material firmemente compactado contra el molde, ya que, el aire no debe quedar atrapado en medio de la fibra de vidrio y el molde. La relación de resina y fibra suele ser de 60 a 40 en peso, pero varía según el producto.

Las resinas utilizadas son de baja viscosidad, con el fin de mejorar el impregnado de las fibras, suele usarse resina de poliéster. Los rodillos se utilizan para asegurarse de que la resina entre en todas las capas, que la fibra se moja en todo el espesor del laminado y que las burbujas de aire sean eliminadas. El trabajo debe ser hecho con la suficiente rapidez para completar el trabajo antes de la resina empieza a curar.

Se puede lograr diferentes tiempos de curado mediante la alteración de la cantidad de catalizador empleado. Es importante la utilización de la proporción correcta de catalizador en la resina para asegurar el tiempo de curado correcto. Un 1% de catalizador es un curado lento, el 2% es la proporción recomendada, y el 3% dará un curado rápido. La adición de más del 4% puede dar lugar a que la resina cure antes de terminar la aplicación.



Ilustración 64: moldeo manual

Opcionalmente y para finalizar el proceso, un peso se aplica desde la parte superior para expulsar el exceso de resina y el aire atrapado. Se utilizan topes (como monedas) para mantener el espesor ya que, de otro modo, el peso podría comprimir más allá del límite deseado. Mediante el uso de herramientas de corte se eliminan excesos de material en los bordes (antes del curado). Una vez curado el material, se procede al desmoldado de la pieza. De ser requerido la pieza puede ser ajustada a su forma final mediante un proceso de mecanizado (limado, lijado, taladrado, corte, etc.) a fin de darle la tolerancia y acabado final a la pieza. Las piezas pueden ser pintadas o laqueadas (en general, cuando no se utiliza gelcoat).

Ventajas y desventajas del moldeo manual

Ventajas:

- Se pueden producir productos grandes y complejos, como son las embarcaciones.
- Proceso relativamente sencillo, no requiere maquinaria.
- Se pueden utilizar una amplia gama de materiales.
- Los cambios de diseño se ejecutan fácilmente.
- Los injertos dentro del molde y los refuerzos estructurales son posibles.
- Las construcciones tipo sándwich son posibles con este sistema.

Desventajas:

- La calidad depende en gran medida de las habilidades del moldeador (contenido de fibra, espesor uniforme en toda la extensión de la pieza, etc., lo que determina las propiedades finales de la pieza)

- La proporción de fibras que se puede incorporar es limitada

- Ciclos excesivamente largos

- Salud y consideraciones de seguridad: las resinas de peso molecular más bajo utilizadas tienen el potencial de ser más dañinos que los productos de mayor peso molecular y también tienen una mayor tendencia a penetrar la ropa. Las concentraciones en el aire de estireno (muy dañino) requiere sistemas de extracción costosos.

- Las resinas deben ser de baja viscosidad para ser utilizadas en el moldeo manual. En general, esto compromete las propiedades mecánicas y térmicas.

Estas desventajas llevaron a crear nuevos procesos de construcción, de más calidad, más rápidos y mayor seguridad para los trabajadores.

2.4.6.1.2. Proyección simultanea

Este método no se ha utilizado mucho para la construcción de embarcaciones de regata ya que no permite trabajar de forma directa estructuras textiles como tejidos, mallados y ensamblados, por lo que requiere de rigurosos controles para la obtención de buenos resultados.

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.

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.

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 por lo que siempre ha sido preferible utilizar el laminado a mano para la construcción de buenas embarcaciones.

A pesar de no utilizarse se va a describir el procedimiento para que el lector se haga una pequeña idea de cómo funciona este método.

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.

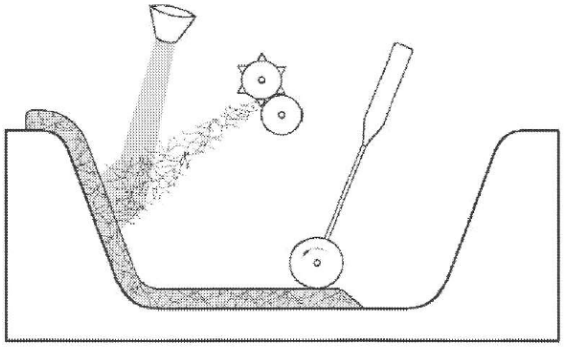


Ilustración 65: equipo proyección simultánea

2.4.6.1.3. Moldeo con impregnadores

El proceso de moldeo con impregnadores es una técnica que ha sido desarrollada originariamente para satisfacer las necesidades de 1os constructores de grandes embarcaciones en materiales compuestos y de embarcaciones de serie, pues requerían transformar elevados volúmenes de material con una alta velocidad de proceso. Por lo que, para embarcaciones de regata que suelen ser menores de 60 o 70 pies, excepto ocasiones especiales como las regatas de maxi-yates, no se ha utilizado este método a lo largo del tiempo. Los nombrados maxi-yates hoy en día son fabricados por el método de envasado al vacío descrito posteriormente pero hace unos años se construían mediante este método.

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.

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, la figura muestra un esquema del proceso.

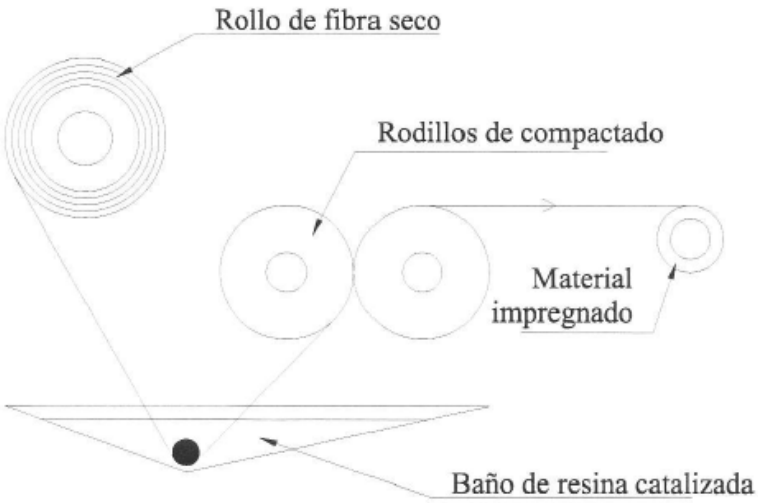


Ilustración 66: impregnadores

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.

Los sistemas impregnadores se ofrecen en diferentes opciones:

a) **Estacionarios:** se destinan a una zona de trabajo determinada y son ideales para la producción de elevadas de piezas pequeñas.

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.47): esta configuración facilita el traslado del 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.

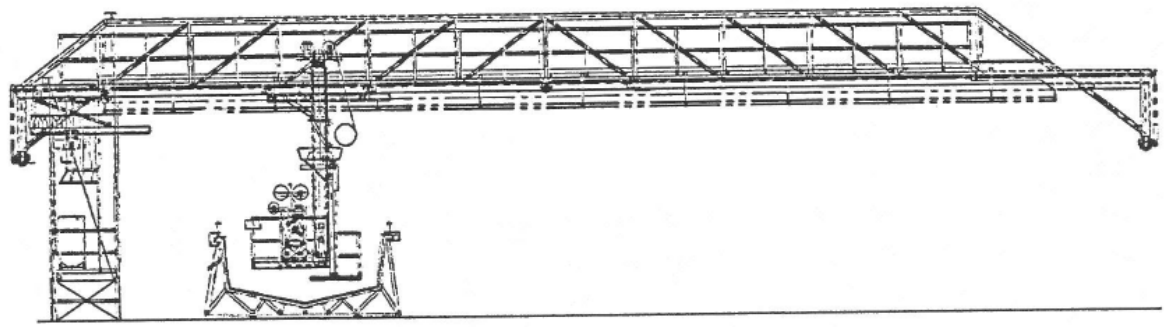


Ilustración 67: rieles de desplazamiento con impregnadores

Los impregnadores permiten trabajar con todos los sistemas de matrices actuales. Dependiendo de la viscosidad del sistema la 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 1os 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 que así lo requieran, se puede combinar dicho método de laminación con compactaciones mediante vacío.

Entre las principales **ventajas** que ofrece este método podemos mencionar:

- Importantes reducciones del tiempo de trabajo (laminado realizado in situ).
- Alta velocidad de fabricación de laminados (hasta 6 m lineales/minuto).
- El método es ideal para construcción de grandes piezas.
- Los laminados son de mejor calidad, ontenido de refuerzo variable entre 35 y 55%.
- Los laminados son más homogéneos (alto grado de control de las relaciones refuerzo-matriz y de porcentajes de catalización).
- El proceso no requiere de moldes especiales, adaptándose a los existentes para otras técnicas.

- El proceso minimiza los desperdicios.
- Las emisiones COV dinámicas se producen en una zona delimitada, lo que facilita su control.
- Se pueden construir tanto estructuras monolíticas como tipo sándwich.
- En general no requiere de procesos térmicos posteriores.

El método presenta también una serie de **inconvenientes** y **limitaciones**:

- El coste del equipo impregnador es elevado, por lo que solo se encuentra en astilleros muy grandes.
- El manejo del equipo requiere una elevada capacitación.
- Si bien la impregnación la realiza una máquina, la distribución, compactado y desburbujeo todavía depende del operario.
- Es necesaria numerosa mano de obra durante el proceso de compactado y desburbujeo.
- Existen limitaciones en cuanto al espesor máximo de la estructura textil que se quiera procesar.
- Existen limitaciones respecto de la viscosidad de la resina que se pretenda utilizar.
- El equipo requiere una limpieza minuciosa al final de cada jornada laboral y un riguroso programa de mantenimiento.

La finalidad de los equipos impregnadores es la construcción de grandes embarcaciones de materiales compuestos, como pueden ser los maxi-yates construidos hace unos años. Son equipos costosos, que requieren una alta capacitación para su operación y deben seguir un riguroso programa de mantenimiento, por lo que lo utilizan muy pocos astilleros.

2.4.6.2. Técnicas de moldeo asistidas por vacío

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, por esta razón hoy en día la mayoría de casco ya sean de alta competición o de crucero se utiliza esta técnica.

Esta técnica aprovecha 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, por lo que hoy en día en todos los astilleros dedicados a embarcaciones de competición tienen hornos especiales para poder mantener todo el molde a una temperatura adecuada.

La evolución de estos procesos es muy similar a la anterior ya que primero se empezó impregnando manualmente la fibra para después aplicarle el vacío, el segundo método utilizado utiliza fibras preimpregnadas para una vez dispuestas aplicarles el vacío. La técnica utilizada hoy en día es la más eficaz y rápida, donde preparando las fibras secas sobre el molde, se inyecta la resina mediante un sistema de tuberías con una presión determinada y una vez empapadas las fibras se aumenta la presión para conseguir el grosor deseado.

Materiales requeridos

El **saco de vacío** constituye, junto con la bomba, el elemento principal del sistema y es el responsable de mantener la presión sobre la pieza del laminado. Los materiales más utilizados son los plásticos de polietileno, preferentemente transparentes. El espesor del plástico está en función de las dimensiones de la pieza y de la presión de vacío deseada.

Peel ply (tejido pleable) es un tejido sintético removible, extremadamente resistente, y sobre el que no se adhiere la resina. Se coloca sobre la última capa de laminado para absorber la resina sobrante del proceso de compactación y puede arrancarse con facilidad, una vez que la resina haya polimerizado. El peel ply protege el laminado de la contaminación ambiental y facilita la adherencia de capas posteriores, por lo que también se puede emplear en el laminado manual cuando sea necesario.

La **manta de aireación** es un fieltro fabricado a partir de fibras sintéticas que tiene como función principal el facilitar el paso del aire en toda la superficie de la pieza hacia el colector de aspiración, evitando de paso, que la resina pueda migrar hacia la bomba.

2.4.6.2.1. Moldeo por vacío - laminado manual

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 1a resina aún en un estado previo al de gel.

La técnica consiste en crear presión sobre un laminado durante su ciclo de curado. La presurización del laminado cumple varias 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.
- Reduce la humedad.
- Optimiza las relaciones refuerzo-matriz en las piezas de materiales compuestos.

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 desmolde y disminuirán las emisiones de elementos volátiles orgánicos al ambiente.

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 de1 grado de estanquidad alcanzado, obtendremos mayor presión de compactado.

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

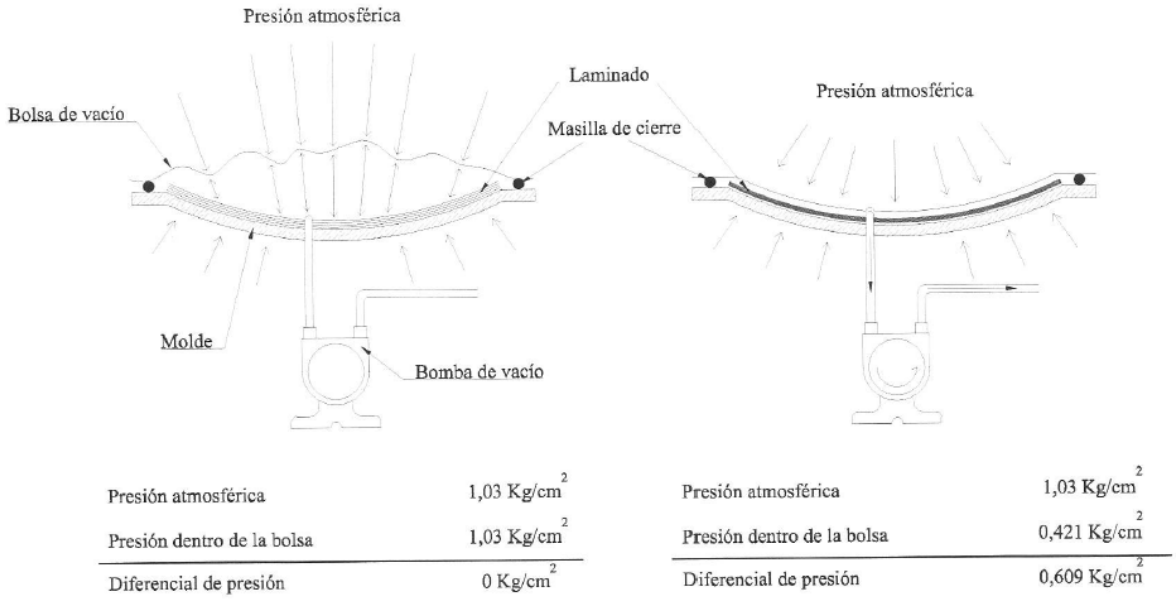


Ilustración 68: esquema principio moldeo por contacto asistido por vacío

En la siguiente figura se puede observar la distribución correcta de los materiales sobre el laminado.

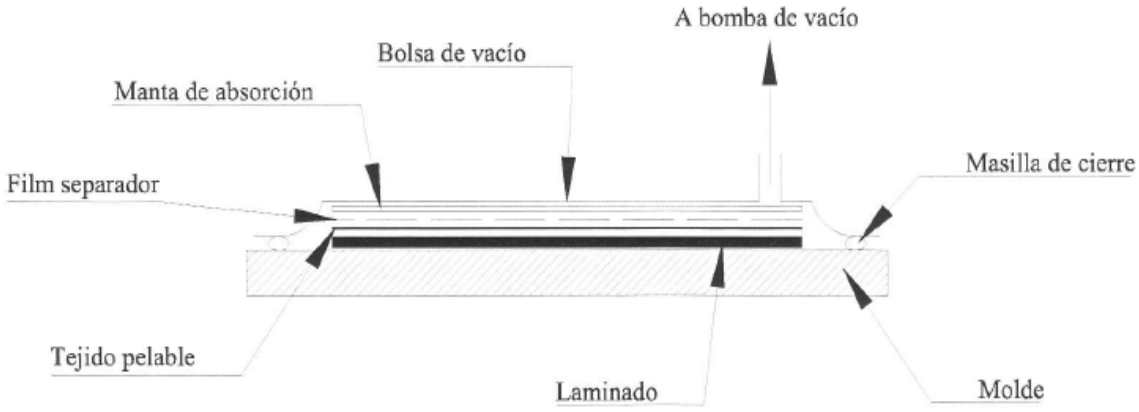


Ilustración 69: distribución correcta de los materiales sobre el laminado

Las condiciones ambientales requeridas son la mismas que para el laminado manual con la particularidad que se reducen las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, esta técnica de consigue reducir una parte de las emisiones.

El proceso de laminado manual asistido por vacío surgió debido a la búsqueda de la construcción de embarcaciones que perseguían mejorar las propiedades mecánicas del laminado con una importante reducción de peso.

2.4.6.2.2. Laminado de preimpregnados

Se designan con este término combinaciones de resinas y refuerzos dispuestos en láminas o telas fácilmente manejables. Las resinas se mantienen en el preimpregnado en una situación de polimerización parcial, lo que permite su almacenamiento en ciertas condiciones. Al someter a calor y presión los preimpregnados en el momento de elaboración de las piezas, se efectúa el curado total de la resina.

Los refuerzos preimpregnados deben guardarse en congelador a temperaturas del orden de -18ºC, para evitar que se inicie el proceso de curado. Esto exige también que el material que no se haya utilizado en el trabajo, y que haya sido devuelto al congelador, deba ser debidamente anotado, ya que su vida útil ha sido reducida, en función del tiempo de exposición a la temperatura de la nave de trabajo.

Antes de desprender la capa de protección del refuerzo, hay que colocar el material durante un par de horas a exposición a temperatura ambiente, o bien, aplicar aire caliente con moderación. La humedad relativa de la nave de trabajo debe mantenerse por debajo del 70%. Este requisito es muy importante, ya que con valores superiores podría depositarse una película de condensación de agua sobre la superficie del refuerzo que podría inhibir el proceso de curado. Por la misma razón no son aceptables los núcleos de madera de balsa en estructuras sándwich con pre-pregs, la humedad retenida en las fibras de la madera podría originar problemas similares.

La utilización de preimpregnados requiere el empleo de la técnica de laminación por vacío. Para recubrir con materiales preimpregnados una determinada superficie se debe cortar a la medida correcta cada tela de material. Se retira la capa de protección inferior y se coloca el tejido cuidadosamente sobre la superficie del molde, compactando la tela con un rodillo duro para eliminar las burbujas de aire. Se extrae seguidamente la capa superior procurando no alterar la disposición de las fibras, compactando con el rodillo. Se sigue este proceso hasta conseguir el laminado especificado.

Con todas las telas en su sitio, se coloca el tejido de absorción de resina, peel ply, el tejido perforado, la manta de aireación y el saco de vacío perfectamente sellado, procurando no sobrepasar las 0.8 atmósferas.

Existen diferentes sistemas de curado en los pre-pregs. El más corriente es el de mantener el material bajo vacío de 0.4 a 0.8 bar, durante dos horas a temperatura ambiente para conseguir una buena compactación. Seguidamente se realiza un curado a alta temperatura, que puede ser de 5 horas a 75ºC o bien de una hora a 90ºC.

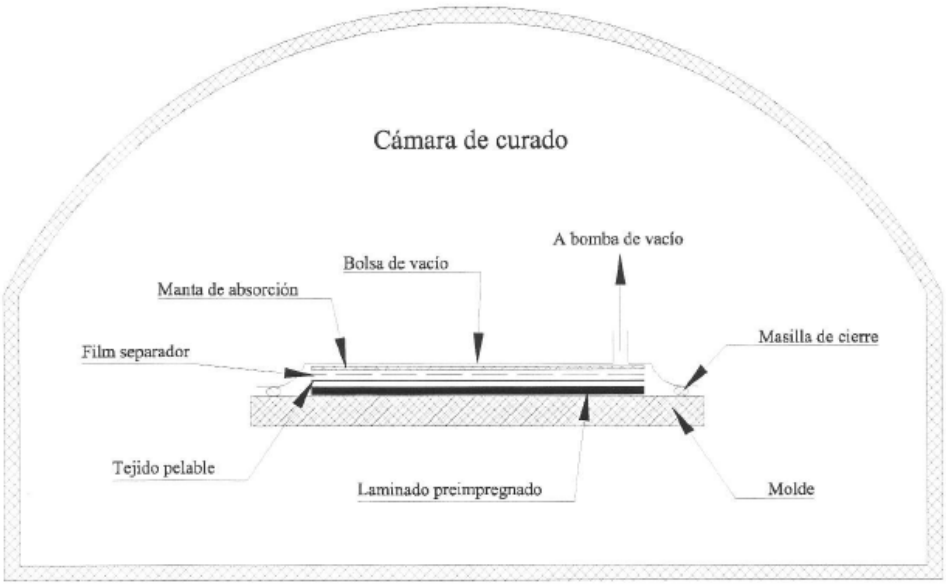


Ilustración 70: sistema de curado en los pre-pregs

El proceso de laminado con preimpregnados se utiliza en todas aquellas estructuras navales que requieren las cotas de calidad más elevadas, la única técnica más avanzada que esta es la del proceso SCRIM. Mediante esta técnica se han construidos muchas de las embarcaciones de competición hasta hace muy pocos años, ya que hoy en día se utiliza la técnica SCRIM.

2.4.6.2.3. Proceso SCRIM

La realización completa del laminado por el proceso SCRIM se hace en el molde del casco.

Primero se hace la laminación a mano en el fondo del molde de la piel exterior, y después, se superpone el núcleo y se lamina el conjunto por vació. Se asegura la cohesión entre capas antes de la laminación aplicando una fina capa de resina en spray.

Resumiendo, una forma de realizar un casco de materiales compuestos seria:

• Laminado por contacto para la obtención de la piel exterior del casco.

• La laminación por el proceso SCRIM para obtener el laminado final.

El laminado por infusión al vacío es una técnica que utiliza el vacío para repartir la resina en el laminado. Las telas se disponen apiladas en seco sobre el molde según la secuencia de laminado y se aplica vacío antes de dejar entrar la resina. Una vez conseguido el vacío, la resina es literalmente succionada hacia el laminado a través de unos tubos dispuestos adecuadamente.

Este método de infusión al vacío utiliza muchos de los principios del método de vacío-laminado a mano, pero presenta algunas mejoras:

- Mejor relación fibra resina

- Optimización de la cantidad de resina adecuada al laminado

- Menos resina sobrante

- No hay problema con el tiempo

- Proceso más limpio

El procedimiento de infusión al vacío tiene la ventaja de que el vacío se realiza con las telas secas y la resina se introduce por esa diferencia de presiones. No se trata de eliminar el exceso de resina que previamente se ha utilizado, como en el método de laminado al vacío.

Como resultado, sólo entrará al laminado la cantidad de resina necesaria, obteniéndose un laminado de menor peso y mayor resistencia que maximiza las propiedades tanto de la fibra como de la resina. Con este método se puede calcular con precisión la cantidad de resina necesaria en una determinada pieza.

El laminado por infusión al vacío presenta otra ventaja que es el tiempo, pues al realizar el vacío con el material seco, si existe problema con el sellado y hay una fuga de aire, no hay problema de tiempo para arreglarla. Sin embargo, en el laminado al vacío hay problema de tiempo para arreglar una fuga, porque las telas llevan resina y el proceso de polimerización comienza antes de realizar el vacío. El laminado por infusión es también más limpio, pues no se producen salpicaduras como en el laminado a mano, y sobre todo es más limpio porque no desprende gases al entrar la resina directamente a la zona de las telas que está aislada del entorno.

Requiere una preparación adecuada de los tubos de distribución de la resina para que pueda llegar a todos las zonas del molde de la pieza a laminar. Estos tubos conforman las líneas de distribución de resina que varían de una pieza a otra, por lo que su disposición requiere un estudio previo.

Realización del laminado:

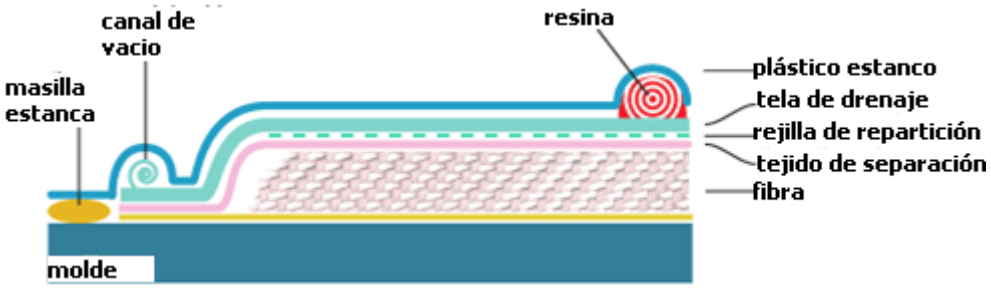


Ilustración 71: disposición de los elementos de repartición de resina

La disposición de los elementos de distribución de la resina constituye el elemento principal de este proceso.

Hay que distinguir dos zonas:
- una zona de distribución
- una zona de laminación

La superficie del molde se impregna con desmoldeante, o se coloca sobre ella tejido peel ply si no es necesario un acabado con gel coat.

Esta zona de distribución se compone de un medio poroso, formado por una rejilla de repartición, una tela de drenaje, y de un plástico estanco para la creación de vacío. Este plástico bordea el canal de vacío y emprisiona completamente el futuro casco realizándose la estanqueidad en el contorno del molde con una masilla estanca. Se fijan después los tubos de llegada y salida de resina de manera estanca los de llegada se disponen en paralelo, perpendicular o en aristas de peces según el tipo de pieza que se fabrican tejido de distribución.




Ilustración 72: preparación de los tubos para introducir la resina

Con una bomba se crea una depresión de 2 atmósferas creando así el vació en el molde. Esta operación permite comprobar la ausencia de faltas de estanqueidad y la compactación de los tejidos. Se rellena el depósito de resina con la cantidad necesaria de catalizador.



Ilustración 73: depósito de resina

Se aspira la resina a través del medio de distribución y, después, a través de la preforma. La resina ya catalizada avanza en el laminado hasta que los tejidos lleguen a saturación, se para la bomba cuando la resina empieza a salir de los tubos de recuperación.



Ilustración 74: moldes preparados para el proceso

Los tiempos operativos son aproximadamente los siguientes:

Tiempo de gel: 1h30

Tiempo de subida al pico exotérmico: 3h00

Para endurecer el material se necesita más tiempo, ya que la resina viene con nos agentes inhibidores para aumentar el tiempo de reacción y así conseguir una buena impregnación del laminado antes de la polimerización.



Ilustración 75: laminado bajo vacío

2.4.7. Detalles constructivos

A lo largo de la laminación se producen zonas de unión de telas en las diferentes capas, de tal forma que si la unión de telas coincidiera en el sentido del espesor del laminado se tendría una zona debilitada como consecuencia de la acumulación de uniones (figura 56). En todo el laminado se deberán respetar los 50mm de solape entre telas de la misma capa y una distancia de 150mm entre solapes de distintas capas. Este método se denomina escarpiado.

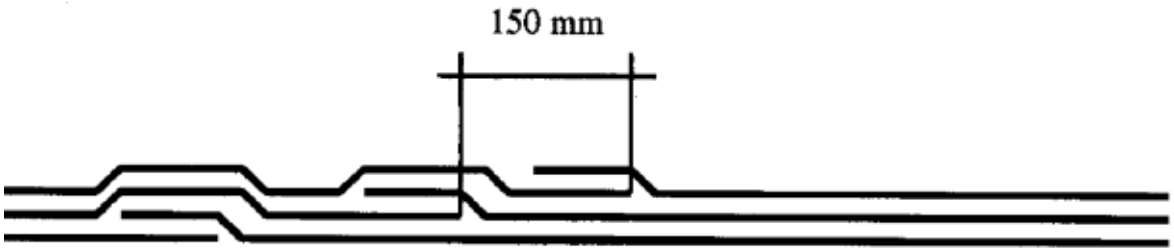


Ilustración 76: escarpiado de las telas

Los refuerzos realizados en fibra tienen forma trapezoidal y se denominan refuerzos tipo omega. La unión de un refuerzo al casco o cubierta requiere en la mayor parte de los casos el empleo de espuma de poliuretano con la forma omega, que se utiliza como formero para fabricarlo (figura 57). En caso de perfiles rectos, se pueden fabricar en taller sobre un formero metálico de acero inoxidable, por lo que no se necesitará el empleo de espuma. En ambos casos la unión del refuerzo con el casco o cubierta se realiza mediante escarpiado de las capas.

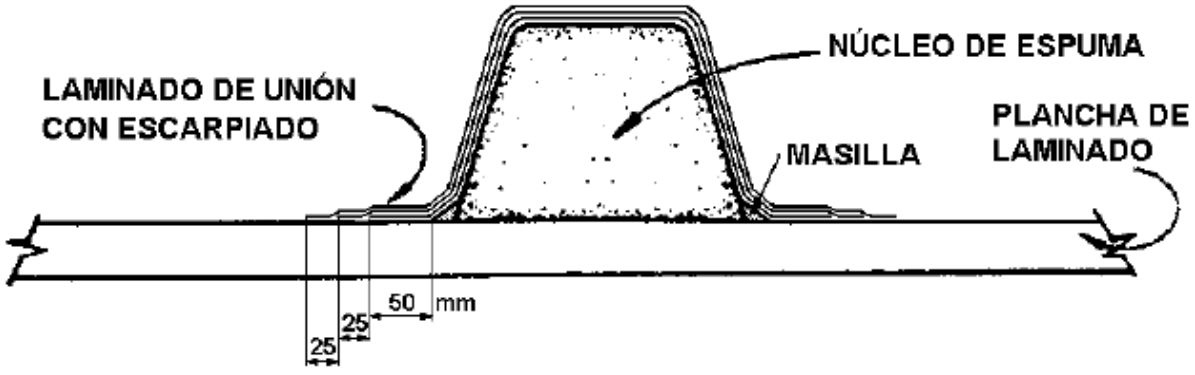


Ilustración 77: refuerzo en embarcación de fibra

Aquí se muestran algunos detalles constructivos:

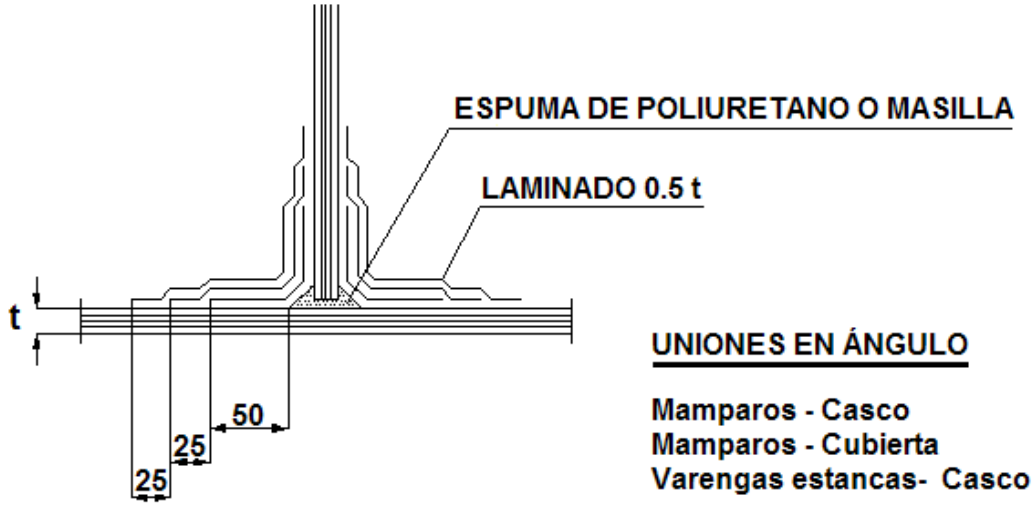


Ilustración 78: detalle construcción para ángulo de 90º

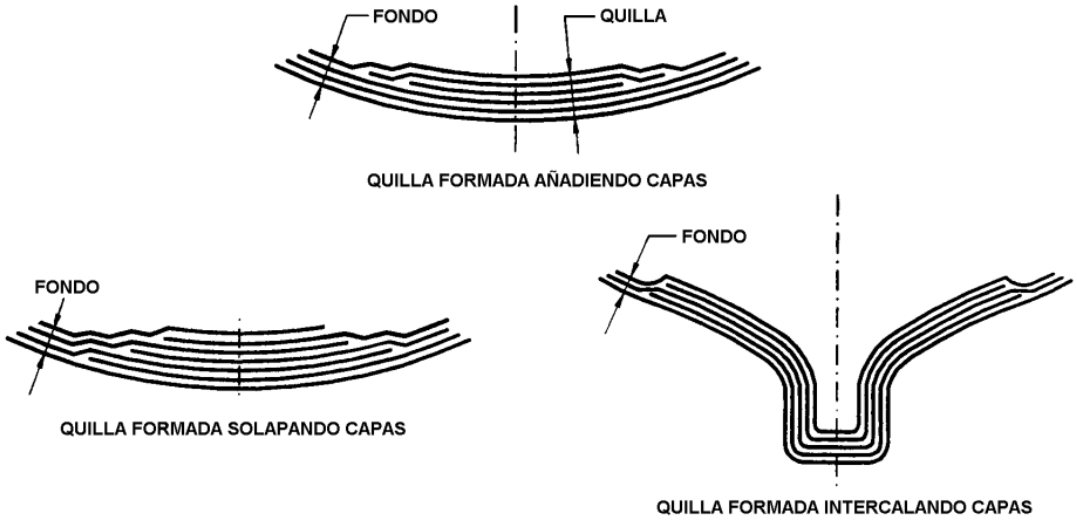


Ilustración 79: distintas formas de quilla

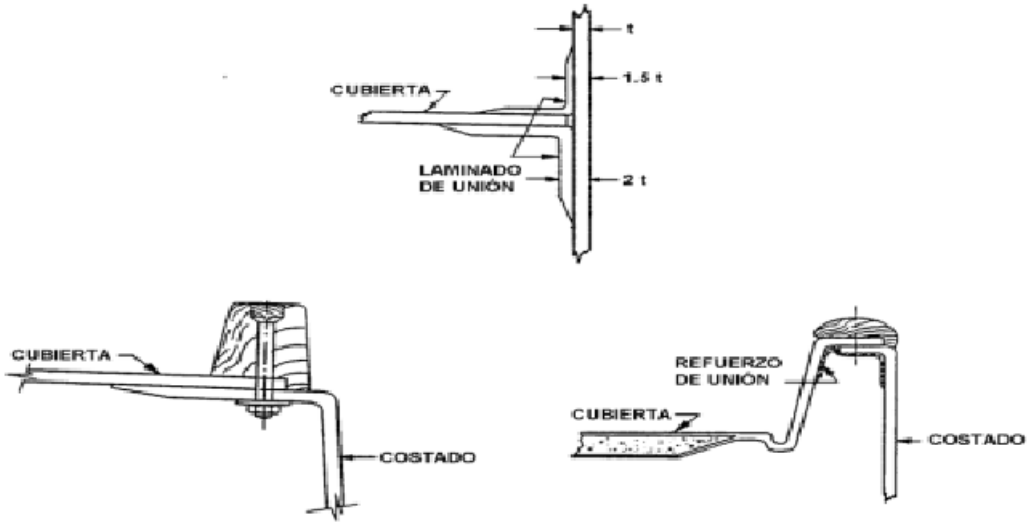


Ilustración 80: distintas formas de unir el casco y la cubierta

3. MÁSTILES

3.1. Introducción

El verdadero motor de un velero es el complejo sistema que componen las velas y el mástil, uniéndolos al casco y transfiriendo el empuje propulsor. Los mástiles eran palos de madera y los obenques también se hacían de fibras naturales trenzadas, tal vez recubiertos con alquitrán para aumentar su duración. No fue hasta el siglo XIX cuando a alguien se le ocurrió probar a "aligerar" el mástil taladrando agujeros en él, primero transversalmente y después en la dirección de las fibras. La práctica no se consolido hasta el siglo XX, cuando los desafiantes de la Copa América británicos utilizaron mástiles de madera huecos. Mientras tanto, los norteamericanos habían empezado a construír, como siempre para la Copa América, mástiles con placas de aluminio y acero remachados y curvados.

El primer mástil moderno apareció en un velero norteamericano en 1939, el *Vim* 12 metros según la Regla Internacional, diseñado por Olin Stephens; era un perfil hueco en aluminio extruido (se hace pasar el material fundido a través de una matriz con la sección del artículo acabado). Hoy en día los mástiles se siguen haciendo de la misma manera y del mismo material. Los de metal se comportan de forma distinta a los de madera. Dado que la madera se compone de fibras longitudinales, se pueden flexionar y, de hecho, es necesario que lo hagan ya que si no podrían romperse por las tensiones de compresión y de flexión impuestas por los obenques que los soportan. Lo contrario ocurre con los perfiles de las aleaciones livianas, ya que aunque estén sometidos a tensiones de flexión y de compresión combinadas no se pueden doblar, pues si no se caerían. Por esta razón, los obenques de un mástil de madera no deben ser demasiado rígidos, sobretodo en el caso de un mástil solido más que uno hueco: los obenques de cáñamo, abacá o algodón eran ideales, mucho más que los cables de acero totalmente rígidos.

Con la introducción de mástiles de metal, se adoptaron también obenques de metal: en la edición de 1934 de la Copa América se introdujo simultáneamente de la mano del ingeniero Murdock en el *Endeavour* y del diseñador Starling Burguess en el *Rainbow*. Lo mismo que se ha dicho con los mástiles de aluminio se puede aplicar a los obenques de cable de acero, ya que se siguen utilizando en embarcaciones de regata.

La verdad es que desde principios de siglo XX hasta el día de hoy, se han introducido importantes avances en lo que se refiere a mástiles y obenques: los mástiles actuales son cónicos y por lo tanto más ligeros y más flexibles en la punta, una característica posible gracias al desarrollo de las técnicas de soldadura de aleación de aluminio. Hoy en día se fabrican obenques de cable de acero inoxidable, con unas cuantas hebras más fuertes, o incluso cables de monofilamento con secciones aerodinámicas. De todas formas, el concepto básico sigue siendo el mismo.

3.2. Madera

En los primeros mástiles de madera no se realizaba ningún mecanizado laborioso. Comenzaron a construirse pequeños mástiles a partir de árboles individuales. Los dos tipos de madera más utilizados en los primeros mástiles fueron el roble y el pino.

Más adelante se hacía un mecanizado muy sencillo a la madera para darle una forma de octágono con una azuela. Continúo la evolución cuando se decidió realizar con mástiles de 16 caras, cepillando las esquinas y lijando el mástil completo conseguían una forma redonda.

A medida que el siglo XVIII avanzaba, la escasez de madera adecuada para la construcción de un solo tronco de grandes mástiles llevó al desarrollo de un nuevo sistema de construcción mástil. El sistema fue perfeccionado a finales del siglo XVIII por el ingeniero naval inglés, Sir Robert Seppings, el problema fue que la madera de los bosques primarios de América del Norte era menos accesible a los mercados europeos.

Los ingenieros navales europeos se vieron obligados a utilizar maderas más pequeñas que podían encontrar en otros lugares. El sistema Seppings consistía en combinar diferentes secciones del corazón de la madera en diferentes longitudes. En primer lugar, las secciones de madera se enfrentaban dejando proyecciones rectangulares conocidos como "coaks". Los coaks se cortaban cuidadosamente para que fuesen iguales unos a otros, ya que al unirlos longitudinalmente se pretendía crear un mástil del mismo grosor en toda la sección.

Una vez unidas las piezas, las superficies exteriores se trabajaban para lograr una forma circular. Se creaban anillos de acero que calentados se ponían sobre el mástil para reforzar la unión. Se aplicaba una capa abundante de grasa a la madera para evitar daños y facilitar la colocación de las bandas de hierro. Los anillos se enfriaban con agua fría para contraer el metal, de esta forma se apretaba alrededor de la madera. El número de bandas de hierro que se requerían para asegurar un mástil era proporcional al número de segmentos en su construcción. Cuanto mayor era el número de segmentos (coaked) en un larguero, menor era la distancia entre los anillos en el mástil. A finales del siglo XVIII, los mástiles de la armada inglesa se fabricaban con anillos espaciados a intervalos de aproximadamente cuatro pies.

Una vez que los anillos de hierro se enfriaban, se revestía con madera la parte delantera del mástil para evitar rozaduras. El revestimiento se aplicó en tres secciones que recorren la longitud del mástil, la sección central era conocida como la parte frontal y las piezas laterales eran conocidas como los "rellenos". Los anillos también se revestían para asegurar que las juntas fueran herméticas.

Un eminente en la construcción naval, David Steele, escribió en 1794 que “este sistema compuesto de muchas piezas unidas de los troncos de varios árboles, es más fuerte que cuando se hace de un solo árbol, y es menos propenso a la primavera. "

Estos métodos de construcción mástil se han mantenido prácticamente sin cambios en el día de hoy.



Ilustración 81: unión botavara y mástil

3.3. Aluminio

En los años 30 se introdujeron los mástiles de aluminio en los barcos de clase J. El aluminio tiene ventajas importantes sobre la madera, al ser más ligeros, resistentes e inmunes a la podredumbre. Además, un mástil de aluminio se puede construir de una sola pieza.

Tras la Segunda Guerra Mundial los mástiles de aluminio se popularizaron en todos los veleros, incluso los pequeños. Los buques de alto rendimiento usaban mástiles de aluminio aligerados quitándoles una sección triangular a lo largo del mástil.

Desde mediados de los años 90 las embarcaciones de regata introdujeron el uso de fibra de carbono y otros materiales compuestos, en la construcción de mástiles, con mejores relaciones resistencia-peso. Además se van perfeccionando los perfiles aerodinámicos. En algunos yates de carreras se han llegado a utilizar materiales piezoeléctricos para poder controlar la rigidez del mástil.

El aluminio se ya se ha descrito en el apartado 3.4.2.1., al igual que para la construcción de cascos no se utiliza el aluminio puro, si no que se crea una aleación de aluminio con otro material para mejorar sus características.



Ilustración 82: mástil de aluminio

3.3.1. Proceso de construcción

Los mástiles de aluminio se fabrican mediante fundición, este proceso se ha fabricado desde el año 2000 ac. Consiste en vaciar metal fundido en un recipiente con la forma de la pieza u objeto que se desea fabricar y esperar a que se endurezca al enfriarse.

Para lograr la producción de una pieza fundida es necesario hacer las siguientes actividades:

- Diseño del modelo de la pieza
- Diseño del molde
- Preparación de los materiales para los modelos y lo smoldes
- Fabricación de los modelos y los moldes
- Colado de metal fundido
- Extracción de la piezas fundidas
- Terminación de las piezas fundidas
- Recuperación de los materiales de los moldes

El producto de la fundición es una pieza colada. Puede ser desde unos gramos hasta varias toneladas.

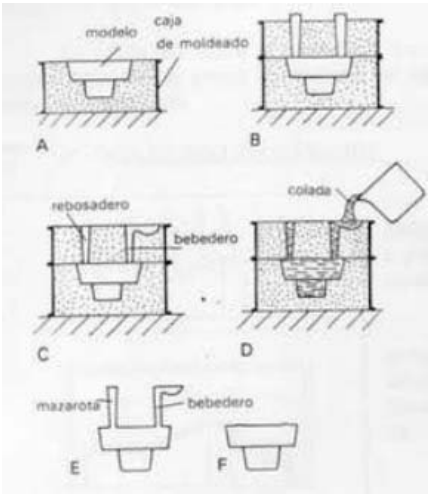


Ilustración 83: proceso de moldeado en arena. Proceso seguido

Existen diversos factores para la realización de una correcta fundición:

- Procedimiento de moldeo
- Modelo
- Arena
- Corazones
- Equipo mecánico
- Metal
- Vaciado y limpieza

Los mástiles de aluminio se pueden fabricar de una misma pieza o dos piezas simétricas que serán soldadas posteriormente.

Existen muchos tipos de procesos de fundición según el tipo de molde que se utilice:

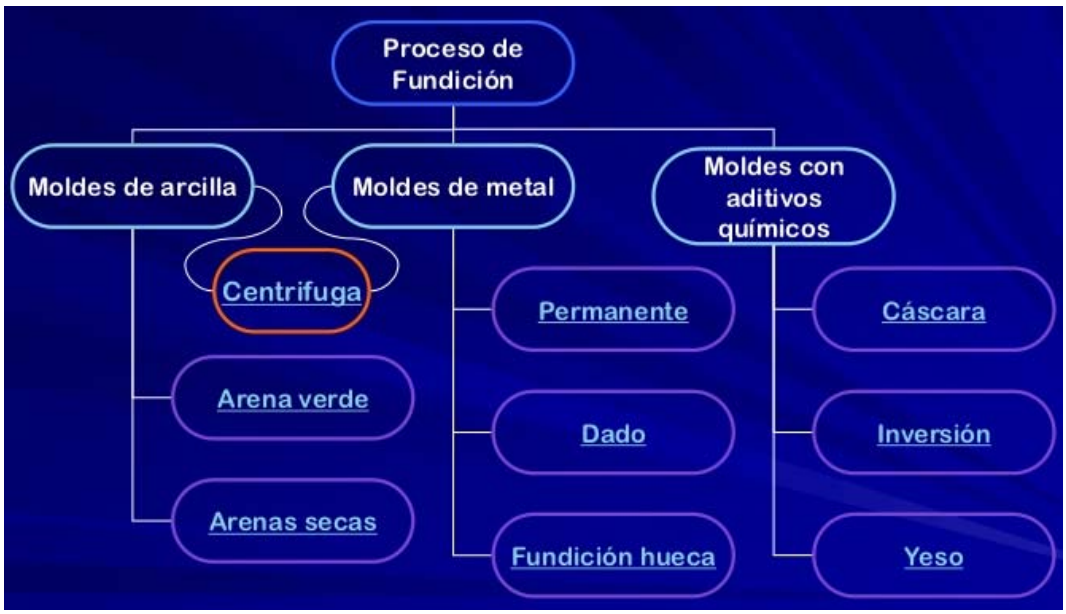


Ilustración 84: procesos de fundición.

A continuación se explican los dos procesos de construcción más utilizados para la construcción de mástiles.

Fundición en arena seca

En los moldes de arena seca, en los cuales se emplea un aglutinante orgánico, la humedad se elimina completamente calentándolo en un horno o estufa grande a una temperatura que fluctúa entre 200ºC y 316ºC. Esto da como resultado un molde más duro y más resistente con una menor tendencia a la formación de gases.

Los moldes de arena seca se usan para producir fundiciones de mayor exactitud dimensional que las producidas en moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca es más costoso y la velocidad de producción es reducida debido al tiempo de secado de la pieza. Sus aplicaciones se limitan generalmente a fundiciones de tamaño medio y grande y velocidades de producción bajas, como es este caso.

Fundición en yeso

Este proceso es similar a la fundición en arena. Se mezclan aditivos como talco y arena de sílice con el yeso para controlar la contracción y el tiempo de fraguado, reducir los agrietamientos e incrementar la resistencia. Para fabricar el molde, se hace una mezcla de yeso y agua, se vacía en un molde de plástico o metal en una caja de moldeo y se deja fraguar.

En este método, los modelos de madera son generalmente insatisfactorios, debido al extenso contacto con el agua del yeso.

La consistencia permite a la mezcla de yeso fluir fácilmente alrededor del patrón, capturando los detalles y el acabado de la superficie. Esta es la causa de que la fundiciones hechas en molde de yeso sean notables por su fidelidad al patrón.

El molde debe dejarse fraguar cerca de 20 minutos antes de sacar el molde y, posteriormente, debe cocerse por varias horas para remover la humedad.

Aún cocido, el yeso no se desprende de todo el contenido de humedad. Una desventaja es que la resistencia del molde se pierde cuando el yeso se deshidratado, en el caso contrario, la humedad remanente puede causar defectos en el producto de fundición, por tanto es necesario encontrar un equilibrio entre estas alternativas indeseables. Otra desventaja del molde de yeso es que no es permeable limitando el escape de los gases de la cavidad del molde.

Este problema puede resolverse de varias formas:

- Evacuar el aire de la cavidad del molde antes de vaciar.

- Batir la pasta de yeso antes de hacer el molde, de manera que el yeso fraguado contenga pequeños poros dispersados.

- Usar composiciones especiales del molde.

Este proceso consiste en utilizar cerca de un 50% de arena mezclada con el yeso, calentar el molde en una autoclave (estufa que usa vapor sobrecalentado apresion), y después secar. El molde resultante tiene permeabilidad considerablemente más grande que el de yeso convencional.

Los moldes de yeso no pueden soportar temperaturas tan elevadas como los moldes de arena. Por tanto, están limitados a fundiciones de bajo punto de fusión como aluminio, magnesio y algunas aleaciones de cobre (en este caso se habla del aluminio). Los tamaños de las fundiciones varían desde menos de una onza hasta varios ciento de libras.

Las ventajas de estos moldes son un buen acabado superficial, su precisión dimensiona y su capacidad para hacer fundiciones de sección transversal delgada.

Corazones

Para la realización de piezas huecas como son los mástiles, si se quieren fabricar de una única pieza es necesario la utilización de corazones. Dependiendo de la forma de la forma de la pieza el corazón puede o no requerir soportes que lo mantegan en posición en la cavidad del molde durante el vaciado. Los soportes se fabrican de un metal cuya temperatura de fusión sea superior a la del metal que se va a vaciar. Estos sujetadores quedan atrapados dentro de la fundición, por lo que no se utilizan en la construcción de mástiles.

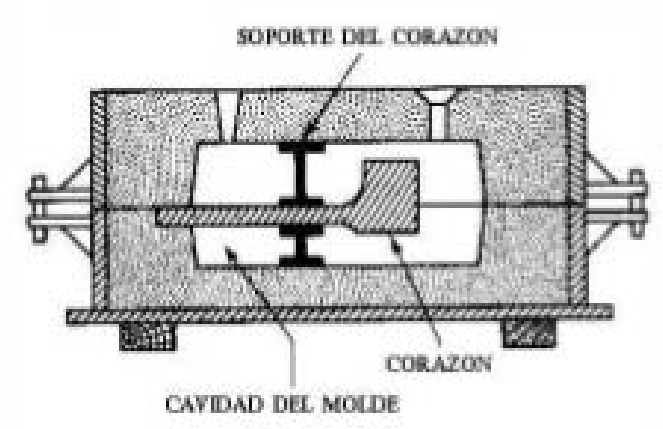


Ilustración 85: molde con corazón

3.4. Fibra de carbono

3.4.1. Materiales

3.4.1.1. Moldes

Se utiliza una amplia variedad de moldes, machos y hembras, para cumplir todos los requisitos de inercia y resistencia al viento.

Los moldes macho que se utilizan para mástiles, crucetas y esparcidores se suelen construir en aluminio extruido para garantizar una absoluta precisión. Los moldes de botavara son usualmente hembra.

Se suelen construir con una fresadora de 5 ejes que permite construir con exactitud moldes a medida en muy poco tiempo, proporcionando una gran libertad de diseño considerando todas las formas y geometrías con absoluta precisión.



Ilustración 86: fresadora de 5 ejes trabajando

3.4.1.2. El mandril

Este elemento puede estar fabricado en materiales compuestos, pero es muy frecuente que sea de aluminio y en algunos casos se trata de un propio mástil. En primer lugar se aplica una imprimación, en general, una película de teflón, para asegurar el fácil tirar de la fibra de carbono del mástil; en segundo lugar, el mandril está reforzado para evitar que se deforme cuando la tela se aplica durante la manipulación o el tiempo de curado.

3.4.2. Proceso de fabricación

Los mástiles de fibra de carbono se pueden fabricar de dos maneras: mediante la laminación de los tejidos en el interior de dos mitades de un tubo más grandes (los moldes), a continuación, separando las dos mitades del mástil obtenidos de los moldes y, finalmente, mediante la unión de ellos (generalmente la mitad delantera con la mitad posterior, rara vez la mitad derecha con la mitad izquierda); o por envoltura (laminado) de las telas alrededor de un mandril y tirando hacia fuera del mandril para que quede el mástil acabado.

En un análisis más superficial el método de molde macho parece más fácil debido a que la operación difícil de unir las dos mitades se evita (incluso más que en el caso de grandes mástiles) y porque ofrece otras ventajas que se tratará de describir a continuación.

Sin embargo, este método oculta varias trampas, el primero siendo el acabado estético. Como cuestión de hecho, uno debe recordar siempre que un artículo caro como es un mástil de fibra de carbono también debe ser hermoso. A pesar de que el aspecto parece ser innecesario para un objeto que se utiliza para aumentar el rendimiento del barco, es innegable que la apelación de fibra de carbono no reside en sus características mecánicas, sino también en la imagen de alta tecnología que transmite a todo barco.

Un mástil construido en un molde hembra definitivamente será más suave y más uniforme que el que fue fabricada en un molde macho. En el primer caso, las fibras están en contacto con una superficie perfectamente lisa, el molde, mientras que en el segundo caso - trabajando con un mandril - el producto final tendrá una superficie rugosa con arrugas (debido a la inevitable aplicación de refuerzos y no al fallo del fabricante). Por tanto, después de sacar el mástil del mandril, tendrá que ser molido, perfectamente alisado y pintado o bien con un barniz transparente que revela la fibra o con una de color.

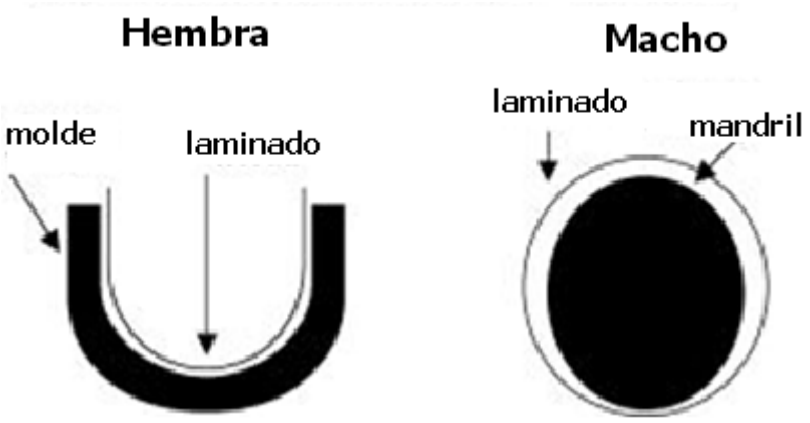


Ilustración 87: ejemplo de los dos tipos de molde

La aplicación de la "prepregs" sigue un plan específico llamado horario de laminación. El calendario es el resultado del análisis estructural realizado por el diseñador de acuerdo con la definición de las cargas sobre el mástil y en la determinación del número de capas necesarias para soportar tales cargas.

Como ya se ha visto, los preimpregnado, en fibra de carbono con resina epoxi, se transportan y se conservan en un congelador para garantizar su viabilidad y la duración. A partir de ahí, se sacan del congelador y se cortan justo antes de la aplicación.

En este punto, la capacidad de los laminadores es esencial para la realización de un mástil bueno porque la tensión con la que se coloca el tejido determina la cantidad de huecos, es decir, su rigidez y duración. Es intuitivo que, cuando la aplicación de telas en superficies convexas, el riesgo de huecos que tienen es menor que en las superficies cóncavas, en las telas del primer caso (macho hembra) se puede estirar más fácilmente para hacer que se adhieran mientras que en el segundo caso las telas deben ser presionadas.

En general, durante la laminación, cada segunda capa se procede a una aspiración para eliminar cualquier posibilidad de vacío. Es obvio que cuanto mayor sea el número de interrupciones y consolidaciones mejor será el resultado final. Por desgracia, esta operación requiere horas de trabajo a menudo con material desechable (bolsas de vacío y masilla), es por eso que los fabricantes tienden a reducir al mínimo el número de ciclos de grado medio de embolsado al vacío. Normalmente para conseguir un producto de calidad se necesitan consolidaciones cada 1-3 capas mientras que los ciclos de menor frecuencia aumentan los riesgo de "vacíos" que no pueden ser eliminados.

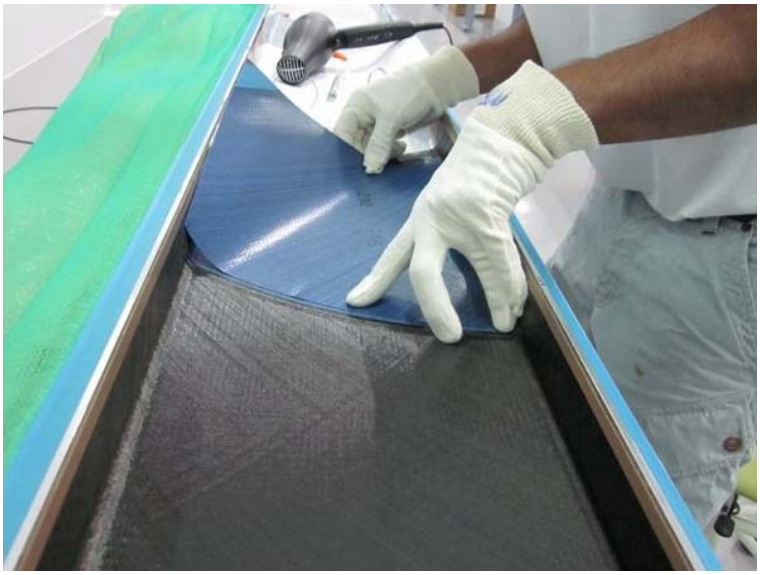


Ilustración 88: Operario colocando fibra carbono en molde hembra

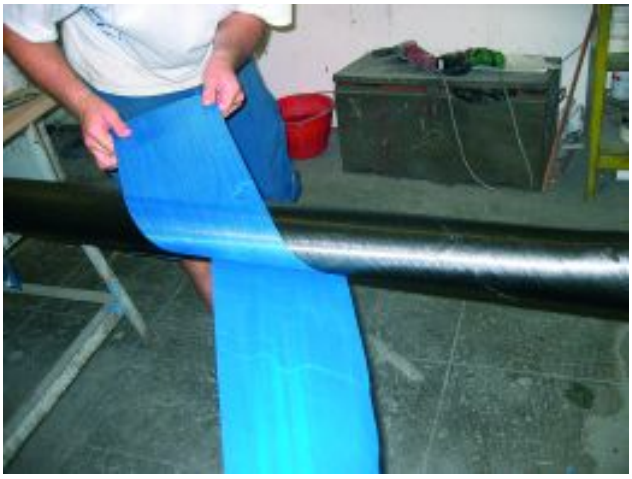


Ilustración 89: Operario colocando fibra carbono en molde macho

El calor de curado

Curado por calor es el término utilizado hoy en día para el proceso de polimerización de la resina caliente. Antes del curado del mástil, como se puede ver en las anteriores fotografías se debe aplicar una bolsa de vacío última e introducirlo, en una cámara hiperbárica, que aumenta la presión ambiental en el interior de la misma. Este ciclo de ensacado se utiliza para presionar las fibras, lo cual garantiza un mástil capaz de soportar las condiciones de clima más exigentes.

Por lo general, se necesitan aproximadamente nueve horas para el curado térmico a una temperatura entre 80 y 100 ° C. Sin embargo, por razones de seguridad y con el fin de evitar los choques térmicos del ciclo de calentamiento preferido es: calentamiento inicial del horno a una velocidad de 1 º por minuto hasta 90 °, luego curado por calor durante aproximadamente nueve horas y, finalmente, enfriamiento lento para unas tres horas. La presión normalmente que se pretende tener en la cámara es de 6 bares.

Resultado: aprox. 13 horas en el horno.

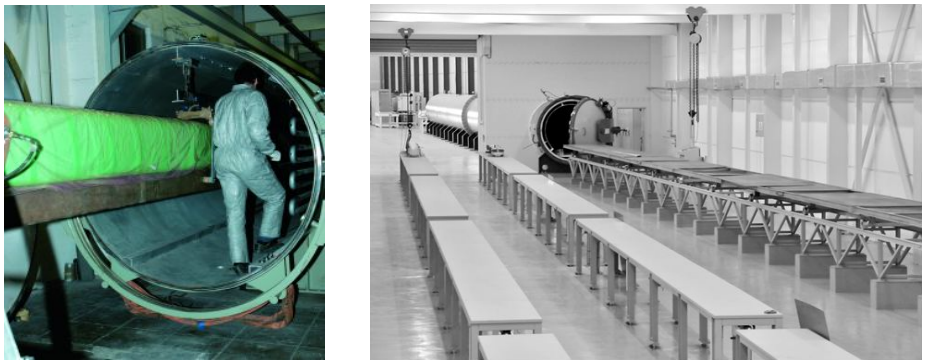


Ilustración 90: molde macho en horno y horno para mástiles

Despegue y terminado

La extracción del mandril, por razones prácticas se hace mediante pistones hidráulicos. Se necesita una nave muy grande para la fabricación de mástiles, ya que si el mástil mide 30m de largo, el mandril de una sola pieza debe ser como mínimo igual de largo. Así al extraer el mandril, se necesitara más de 60 metros.

Una vez que el mandril está separado, la fabricación del mástil no ha terminado. Deben realizarse agujeros para las drizas, amantillos, poleas, etc. Además de pasar todos las drizas y cables electicos necesarios. En el procedimiento de acabado se deben unir algunas piezas al mástil como el cabezal, carro de tangón, etc.



Ilustración 91: mecanismos con fibra de carbono

Las formas complejas de algunas piezas - refuerzos locales de Kevlar, protección de rozaduras o hasta un "grabado" en la superficie - se consiguen gracias a un cúter de control numérico. Esta herramienta no solo asegura una correcta geometría sino que reduce enormemente el tiempo de producción y desperdicio de material.

Test

Prácticamente todas las empresas someten a cada mástil y botavara a un test para confirmar que cada valor de diseño ha sido alcanzado. Se verifica, la inercia longitudinal y transversal de los mástiles, inercia de botavaras, fuerza de la trapa (contra de mayor), y la resistencia del cabezal del mástil.



Ilustración 92: test trapa de botavara

Existe una diferencia más entre los dos métodos de fabricación de molde hembra y macho. En el primer caso, las dos mitades tienen que ser inevitablemente unidas y, por lo general, esta operación se realiza con adhesivos estructurales, apoyada por una gran cantidad de remaches o tornillos durante el curado térmico que se unen a las pestañas de las dos mitades para permitir un buen agarre del adhesivo.

Debido al elevado número de agujeros se necesita tela adicional para evitar el debilitamiento de la estructura, lo que resulta un exceso de peso, además, si la persona a cargo de la fase de encolado no es experimentado el daño puede ser enorme.

En la tabla a continuación, los dos métodos de fabricación de la producción por encargo de un mástil largo 30m se comparan:

Detalle	Molde macho	Molde hembra
Acabado Estética	En la mayoría de los casos se necesita relleno mucho	No hay necesidad de rellenos
Presencia de huecos	Normalmente, un volumen de menos de 2%	Si el vacío en bolsas menos de 2% de otra manera mayor
Los trabajos de reparación	Simple	Sencilla en el tubo, difícil en los refuerzos
Las propiedades mecánicas	Bien en el promedio	Bueno, en promedio - mucho depende de los operadores
Defectos recurrentes	Grietas en los rellenos, las superficies irregulares	Los huecos en los edgesCracks puede ocurrir a lo largo de la línea de encolado

Tabla 1: diferencia entre molde macho y molde hembra

4. VELAS

4.1. Introducción

En la historia de las velas, este aparato no experimentó modificación alguna hasta finales del siglo XIX: desde los "veleros" de Cleopatra hasta la goleta América, las velas como los trajes se hacían de telas tejidas a partir de fibras naturales, y no presentaban ninguna otra forma tridimensional que la que asumían de forma natural bajo la presión del viento.



Ilustración 93: goleta América

Se empleaban velas hechas con diferentes telas, entre las que destacaba el lino tejido a mano, que daba lugar a velas porosas que se empapaban continuamente, quedando compactas y con menor propensión a deformarse (cada cubo de agua, sin embargo, significaba más peso en la arboladura). Una muy significativa mejora que se introdujo en la segunda mitad del siglo XIX, tras el viaje triunfal de América a Inglaterra fue que el velero norteamericano izó unas velas de algodón tejidas a máquina. Pero a pesar de esas pequeñas innovaciones, hasta el siglo XX no se introdujo un verdadero avance revolucionario.

En 1937, el *Ranger*, el defensor de la Copa América, incluyó velas hechas con rayón, una fibra sintética derivada de los hidrocarburos, en lugar de algodón. El rayón fue seguido del terileno, el tergal y, por último, después de la segunda guerra mundial, por el de Dacrón, que sigue siendo el material más comúnmente utilizado para la fabricación de velas. Una vela consiste actualmente en un material compuesto preformado uniéndose los paneles en lugar de ser cosidos. En realidad, se componen de dos capas de un material sintético transparente cuya única función es mantener las hebras de materiales superresistentes como el kevlar o la fibra de carbono, en un sitio a lo largo de los puntos de tensión.



Ilustración 94: embarcación con velas de materiales laminados actuales

Las velas se diseñan con la ayuda de programas informáticos con los que se calcula hipotéticamente la concentración y dirección de las fuerzas inducidas por la presión del viento, de modo que la mayoría del peso de la tela se compone de material resistente correctamente alineado y distribuido.

Actualmente, una vela ha dejado de ser una lámina de lona que asume determinada forma con el viento para pasar a ser más bien un panel con una forma aerodinámica eficiente.

4.2. Las velas de paños

Antes que nada, un paño es una parte de la vela la cual va unida a otros paños formando la vela. Los paños suelen ser rectangulares o triangulares, antiguamente eran cosidos unos a otros y formaban dicha vela, hoy en día los paños se pegan con un adhesivo y posteriormente se cosen para una mayor resistencia.

4.2.1. Materiales

El problema de los materiales de las velas es cuanto menos complejo. El diseñador aeronáutico que calcula el mejor perfil aerodinámico para sus alas, goza del privilegio de saber que no va a deformarse al ponerlo a trabajar. El diseñador de velas sabe que lo primero que va a hacer su perfil aerodinámico es deformarse.

En el momento en que la vela se hincha, adoptando lo que se conoce como su forma izada, las fuerzas generadas por el viento al ejercer presión sobre los puntos de sujeción por los que está unida al yate, van a deformar lo que es básicamente una membrana móvil. La interacción de las tensiones no acaba ahí. Si el viento fuese a permanecer constante en velocidad y dirección, la ecuación sería relativamente sencilla, pero no es así. Cualquier pequeña racha modifica el equilibrio de las tensiones que comunica, por ejemplo, la escota del puño, al igual que toda ola en la que el yate clava la proa.

La resistencia tanto a lo ancho como a lo largo del paño se puede fijar por el diseñador variando la resistencia de los hilos de la trama y de la urdimbre, bien modificando su mena o bien aumentando su número por centímetro cuadrado en una dirección. Esto último se conoce como gramaje. También se puede controlar, por ejemplo, el estiramiento relativo longitudinal del paño de tela variando el grado de deformación que los hilos de la trama provocan en los de la urdimbre al pasar por debajo y por encima de ellos y viceversa. Esto se conoce con el nombre del factor de ondulación.

Los avances más importantes desde que aparecieron las primeras velas de Dacrón, a mediados de la década de los cincuenta, han estado dirigidos a disminuir el estiramiento diagonal, sin poner en peligro importantes características de resistencia del paño al estiramiento en sentido transversal.

4.2.1.1. DACRÓN

Hoy en día se puede decir que no existe navegante que no haya navegado nunca con velas de tetraftalato de polietileno, éste es un poliéster derivado del petróleo, mas popularmente conocido como Dacrón (en cada país adopta un nombre).

El Dacron nace en forma de filamentos. Al trenzar unos con otros, como se hace con los cabo, se convierte en un hilo. El diseñador debe decir el grosor del filamento y el número de vueltas por centímetro que se da a cada uno. Ambos parámetros van a afectar al volumen y a la resistencia de los hilos. En este paso, y prácticamente en todos los que restan hasta que el tejido está terminado, la temperatura y la humedad tienen que estar controladas con mucha precisión. En contra de lo que la gente cree el Dacrón absorbe agua, y esto, en su proceso de fabricación, puede tener un efecto muy marcado en la resistencia final del hilo y, por tanto, del paño. Es interesante el hecho de que hasta la tensión con la que se enrolla el hilo en la bobina para su entrega a los telares es crítica para su entrega. Estos parámetros cargan con un coste adicional al Dacrón destinado a las velas.

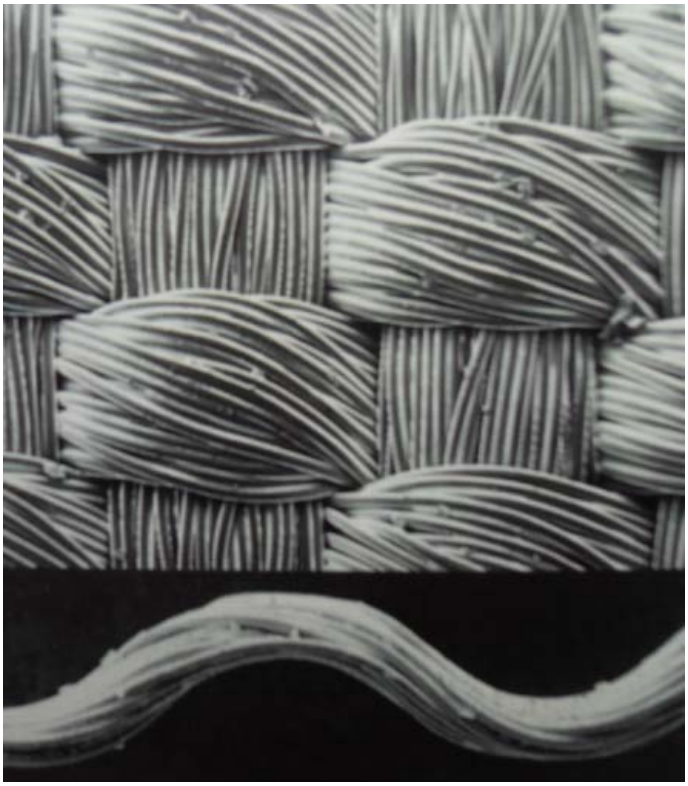


Ilustración 95: géneros recién tejidos de Dacrón antes del acabado, aumentados 80 veces. En este tejido de 6,5 onzas, las hebras de la urdimbre (en horizontal) tienen una mayor ondulación. Debajo, un solo hilo de la urdimbre en el que se ve la ondulación que se consigue durante el proceso textil.

En la práctica, el diseñador de velas especifica dos tipos distintos de hilo antes de su llegada al telar. Las telas de todo tipo se tejen por piezas. En el caso de algunas industrias textiles muy conocidas una única pieza puede tener hasta más de quince kilómetros. La anchura del paño, por el contrario, es bastante constante, al estar determinada por la anchura del telar; en el lado de las velas es de 120cm. Los hilos designados por recorrer la pieza longitudinalmente se llaman urdimbre y los que van a atravesar el paño de lado se llaman trama.

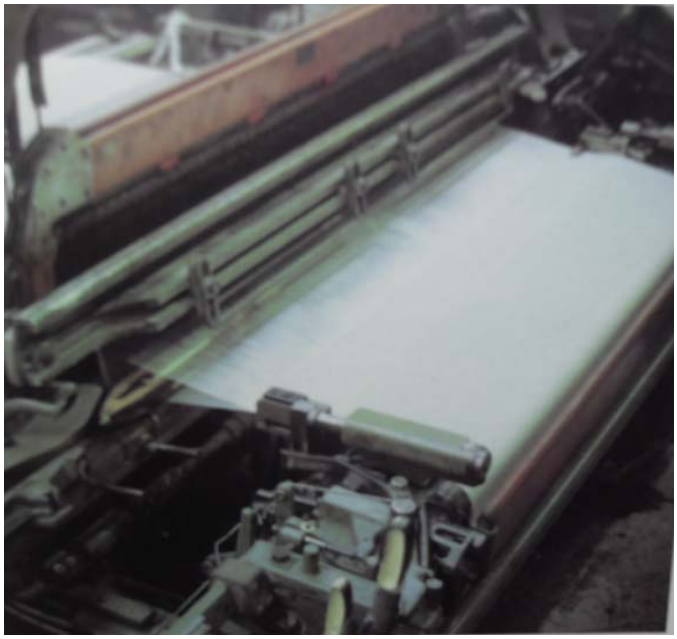


Ilustración 96: a la izquierda de este telar puede verse la lanzadera, que lleva el hilo de la trama, saliendo de entre los hilos separados de la urdimbre

Curado térmico

La adopción del Dacrón para la fabricación de las velas y, por supuesto, sus casi treinta años de monopolio, se deben en gran parte a una propiedad que contribuye más que ninguna otra a su papel como elemento constituyente del tejido de velas. Al calentar los hilos de poliéster se acortan y aumentan irreversiblemente.

Al llegar a la planta de acabado, la tela recién tejida se lava primero para quitarle el lubricante (apresto) que se aplica a las hebras de la urdimbre para facilitar el proceso textil. Antes se calentaba luego el tejido, bien pasándolo a través de un horno o sobre rodillos calientes. Hoy en día el proceso térmico es más gradual y se lleva a cabo en etapas a la vez que toda una serie de otras mejoras o acabados. No obstante, el objetivo sería el mismo en los dos casos, exponer el tejido un total de unos sesenta segundos a una temperatura de 200ºC.

El resultado de esta inyección de energía en los hilos es generar una fuerza de torsión entre ellos para cerrar el entramado hasta un punto imposible de alcanzar mecánicamente en el telar.

Este proceso es irreversible, la tela encoge en el proceso en el sentido longitudinal y transversal en un 20 por 100 aproximadamente. Una tela de anchura de 120cm pasará a medir unos 95 cm tras el tratamiento térmico.

La disminución de la elasticidad en la diagonal que se consigue en este tejido tan apretado y obtenido térmicamente, es evidente. Es su versión más sencilla, hasta aquí llegaba el proceso de acabado de los primeros paños de Dacrón.



Ilustración 97: el mismo Dacrón de antes, pero ahora tras el curado térmico. Los hilos se han acortado y han aumentado de volumen. El ondulado, definitivo ahora, hace más compacto el tejido

Dacrón primitivo

Las primeras velas de Dacrón eran, en esencia, muy parecidas a sus predecesoras de lona, fueron las exigencias de los navegantes de regata los que condujeron al progreso.

A Ratsey y Lapthorn de Cowes se les atribuye el haberse dado cuenta que los hilos de la trama que van de un lado a otro del paño son más resistentes al estiramiento que sus hermanos, los hilos de la urdimbre. Hasta entonces las velas se cortaban a la escocesa, es decir, los paños se disponían paralelos a la baluma, de forma que las costuras más débiles estuvieran sobre la línea de máximo esfuerzo (figura 98).



Ilustración 98: se pueden ver los paños paralelos a la baluma.

Orientando los paños de la tela 90º de la baluma y alineando los hilos de la trama, que son más estables entre el puño de driza y el de escota, ellos hacían grandes progresos en el control de la baluma.



Ilustración 99: nueva distribución de los paños.

En las mayores, que estaban sostenidas por perchas a los largo del grátil y del pujamen, los hilos de la trama se disponían paralelos a la baluma, que era la que soportaba los esfuerzos.

En los foques, que solo tenían sujeción a lo largo del grátil, se disponían paralelos tanto a la baluma como al pujamen. Los paños se encontraban a lo largo de una línea, la bisectriz del ángulo del puño de escota, que se llama inglete. Esto provocaba por si solo un importante problema, ya que cada paño se encontraba con su pareja del otro lado de la vela en la diagonal, que, evidentemente se estiraba y encogía más que la tela cercana a los bordes. La maestría con la que un velero cortaba sus ingletes para compensar este efecto, era uno de los principales criterios por los que se juzgaba.

A mediados de los setenta, al comenzar los diseñadores de velas a ejercer influencia, se empezó a caer en la cuenta de que se podía lograr cierto control sobre la posición de la máxima curvatura dentro de una vela aprovechando las propias características de estiramiento de la diagonal, que hasta entonces habían sido un grave inconveniente.

Antes de aquel momento todas las velas de proa iban provistas de una relinga de grátil metálica. Al izarla del todo se conseguía la flecha de curvatura que el diseñador pretendía. Si el viento arreciaba se arriaba la vela y se sustituía por una más plana o más embolsada según el caso. No había control alguno sobre la posición del punto de máxima bolsa, como no fuera la cuestionable integridad del propio tejido.

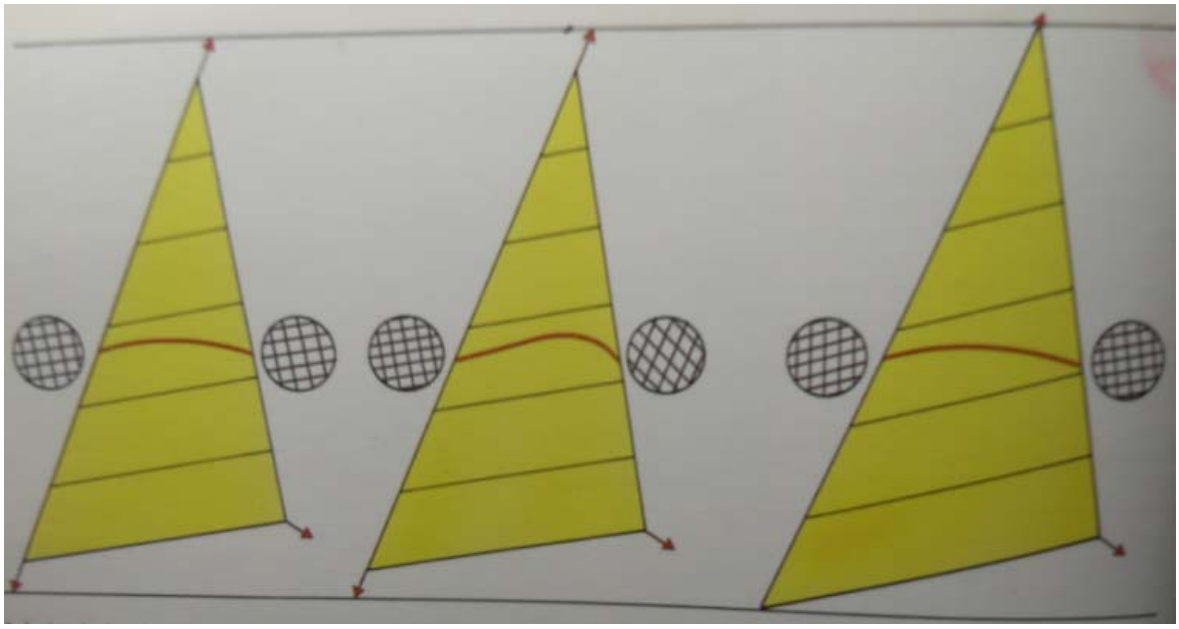


Ilustración 100: a la izquierda, el tejido está equilibrado, pero en el centro un aumento de la velocidad del viento ha empujado la curvatura hacia popa y ha estirado el entramado cuadriculado cercano a la baluma, transformando los cuadros en rombos. A la derecha, la curvatura, al estirar el grátil, ha sido atrasada de nuevo hacia proa, al centro de la vela, para volver a equilibrarla frente al viento

Al descartar la relinga metálica en el grátil a favor de una gruesa cinta de Dacrón, se cayó en la cuenta de que la tensión entre el puño de driza y el de amura, es decir, la tensión a lo largo del grátil, podía contrarrestarse con la de la escota como bisectriz del puño de escota. El factor de la diagonal en toda la vela, pero sobre todo a lo largo del grátil, podía aprovecharse para aplanar las vela al arreciar el viento y, tan importante como lo anterior, para controlar con exactitud el punto de máxima bolsa dentro del perfil aerodinámico.

Mientras que con el grátil metálico la forma izada de la vela había sido una lotería entre las fuerzas que la empujan y la sujetan, ahora se introducía un tercer factor. Con habilidad y la necesaria tracción de los chigres que se disponía, el navegante podía intervenir en la ecuación produciendo la forma deseada en las condiciones del momento. Uno de los resultados era que no había que llevar tantas velas, ya que se podía variar la forma de todas ellas para que hicieran frente a vientos de un rango más amplio de velocidades. El otro fue la aparición a bordo de los barcos de regatas de ese exótico especialista que es el trimador de velas.

Material de relleno

Mientras tanto, en los botes de vela ligera y los monotipos más pequeños, las cosas empezaban a funcionar, principalmente como resultado del trabajo de los fabricantes de tejido de velas. Descubrieron que introduciendo un material de relleno en la vela, podían disminuir el movimiento entre los hilos y, por tanto, reducir el estiramiento en la diagonal, hasta el punto que foques que realizaban esfuerzos relativamente pequeños en botes casi sin desplazamiento podían adoptar el mismo corte horizontal que se utilizaba para las mayores, a pesar de que, a diferencia de estas, el foque solo si sujetaba por uno de sus lados. Las ventajas para el velero a la hora de obviar el inglete eran evidentes.

De nuevo hubo problemas con los primeros materiales de relleno, porque se estropeaban enseguida y dejaban a la tela que se las apañase por su cuenta. También estaba el hecho de que estas telas revestidas eran sumamente rígidas para manejarlas y estibarlas abordo.

Este último era un argumento tan convincente, que durante muchos años un importante velero contrarrestaba con éxito las pretendidas ventajas de las telas rígidas en evolución disminuyendo la anchura de los paños de su tejido “suave” no revestido, en un esfuerzo por aumentar la cogida de su producto entre los usuarios. En aquella época, el argumento del paño más estrecho y de entramado más apretado encontró mucha aceptación en los campos de regata; pero en los laboratorios ya estaba en camino un nuevo adelanto.

La impregnación

La química del tejido de velas, siempre en evolución, fue la responsable de los mayores avances, haciendo del Dacrón un material utilizable en todas las velas de corte horizontal de los yates. Descomponiendo un único proceso de curado térmico, en una serie de etapas progresivamente más calientes, se obtenía un control mucho mayor sobre la integridad del producto terminado.

Un refinado adicional es la impregnación, se sumerge la tela en una solución de melanina, que es químicamente parecida al hilo. Al calentarla, los hilos de Dacrón y la melanina se convierten en una sola cosa, las moléculas de ambas sustancias se alinean formando fibras más duraderas y resistentes al estiramiento.

A diferencia de los primeros revestimientos, la melanina impregnada no forma un cemento alrededor de la tela; ni afecta a su porosidad al rellenar los huecos que existen entre las fibras.

La relación entre el estiramiento de la trama y el de la urdimbre sigue siendo la misma que la diseñada para la tela del principio, sin embargo, como el estiramiento en cada dirección ha disminuido proporcionalmente, el de la diagonal lo ha hecho aún más, debido a que el entramado es más fuerte, más apretado y más estable. La melanina tampoco introduce un peso adicional apreciable en la tela. Por supuesto, la resistencia adicional que le comunica el proceso, para empezar permite al diseñador de telas especificar un hilo más ligero.

El revestimiento

El revestimiento es un refinado más, destinado a reducir extraordinariamente el estiramiento diagonal en relación al longitudinal y al transversal.

En el proceso, la tela impregnada se pasa a través de un baño de cola de uretano, que se introduce luego a la fuerza en el tejido cuando este es comprimido al pasar por el borde de una pesada cuchilla metálica. Al aplicar calor, la película de cola se endurece, reforzando el tejido. Esto se conoce con el nombre de *templado de los hilos*, termino patentado inicialmente por *Bainbridge*, pero que actualmente es parte del léxico habitual de los veleros. Su principal defecto es que fija las hebras, disminuyendo drásticamente el estiramiento diagonal. El revestimiento también rellena los pequeños huecos que existen entre los hilos entrecruzados, dándole un acabado uniforme a la vela.

El tejido resultante representa un final de trayecto, únicamente a lo que se refiere a productos textiles, en la campaña para eliminar el efecto distorsionante del viento sobre la forma izada de la vela. Con el estiramiento en la diagonal reducido casi al valor del que existe en la trama, el diseñador puede confeccionar velas que conserven la forma sin que sea necesario un constante ajuste para lograr el equilibrio.

Por otra parte, la propia firmeza del acabado exige que se manejen con cuidado. De igual modo, su excelente estabilidad depende en cierta medida de la integridad del revestimiento, que es menos elástico que la base de Dacrón. Una vez se ha estirado más allá de su límite, el revestimiento se estropea y la vela queda prácticamente inservible.



Ilustración 101: el mismo Dacrón que antes, pero ahora con un acabado de hilos templados. La zona "suave" que hay alrededor de cada intersticio corresponde al revestimiento de melanina.

El calandrado

Dado que la capacidad de propulsión depende de la diferencia de presión entre ambas capas de la vela, la porosidad (grado en que el aire puede filtrarse a través del tejido de la vela pasando del alta a la baja presión) cuenta mucho. El arma principal con la que cuenta el que realiza el acabado de la tela de velas para evitar la porosidad es el calandrado.

Durante este proceso, se hace pasar la tela entre enormes rodillos de acero a alta temperatura que ejercen materialmente toneladas de presión, aplanando el tejido y sellando los intersticios existentes entre los hilos entre tejidos. El calandrado también interviene apretando más aun el tejido al allanar y aplanar todos los hilos. El acabado resultante, suave al tacto, realza el atractivo superficial de la vela, pero probablemente contribuye poco a favorecer sobre la vela terminada, el flujo laminar o incluso turbulento, que da lugar a la propulsión.

Así que, desde el Dacrón tratado simplemente con calor, pasando por el impregnado y hasta el tejido de hilos templados, se pueden seguir dos caminos diferentes.

La textura o “tacto” de la tela se hace más dura y rígida al disminuir la relación entre la elasticidad de la diagonal y la de la trama. En su más simple expresión, un acabado sin resina es suave al tacto, fácil de estibar y no le afecta tanto el ser sometido a vientos fuertes, pero va a requerir constantes ajustes para mantener una buena forma una vez izado.

En el otro extremo está el tejido de hilos templados, que es rígido para su manejo y necesita ser doblado o incluso enrollado para estibarlo y sufre un estiramiento irreversible al exponerlo a vientos excesivos, pero que mantiene intacta la forma que se propuso el diseñador. Aun con los cuidados más exagerados, su vida se mide en meses, en comparación con los años con los que se mide la vida de una vela si resinado.

Entre ambas encuentra el tejido impregnado, con infinidad de grados de firmeza y de relaciones entre elasticidad de la diagonal y elasticidad de la trama, en la que cada una depende de su fórmula de proceso textil y de acabado.

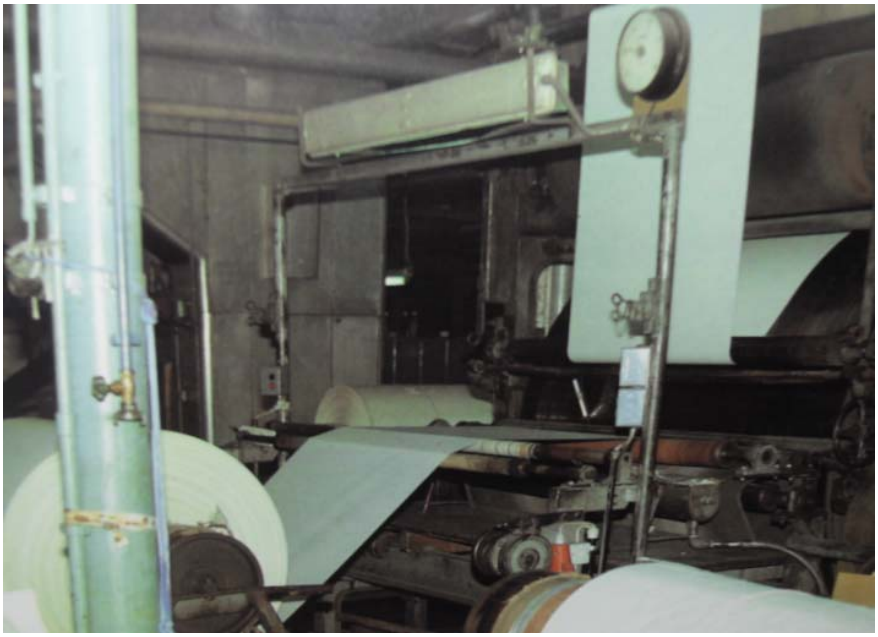


Ilustración 102: el enorme rodillo de la derecha da una idea de la presión que se ejerce sobre un tejido en el calandrado.

4.2.1.2. Mylar

El grado de elasticidad en la diagonal de un tejido depende por tanto de:

a) Lo apretado del entramado;
b) El grado de acabado

Por muy apretado que sea en entramado o por muy fino que sea el acabado del tejido, la elasticidad en la diagonal seguirá siendo mayor que en la dirección principal de los hilos.

A finales de la década de los sesenta, la frustración de los veleros en sus intento de eliminar la elasticidad, o estiramiento en la diagonal condujo a la realización de experimentos con un material químicamente muy parecido al Dacrón, pero de propiedades físicas muy distintas.

Mientras el origen de Dacrón está en un delgado filamento cuyas moléculas se alinean en una única dirección, el nuevo material, llamado Mylar, es una película cuyas moléculas están orientadas por igual en todas direcciones. La resistencia del Mylar al estiramiento es, por tanto, igual en el sentido longitudinal que en el transversal y, por supuesto, también en la diagonal del paño.

Las primeras velas experimentales de Mylar se hicieron simplemente sustituyendo el material tejido por una película, pero los inconvenientes se hicieron enseguida evidentes. La película se rompía muy fácilmente, sobre todo por los agujeros que hacia la máquina de coser al unir un paño a otro. Sin embargo, un hecho más importante para el diseñador de velas, era que la propiedad de la película de presentar el mismo estiramiento en todas direcciones daba lugar a más problemas de los que resolvía.

Como se verá más adelante, a pesar de que los veleros buscan reducir el estiramiento en la diagonal, un cierto grado de este es esencial en las velas triangulares para mantener la forma contra las fuerzas que actúan sobre ellas. Con velas de una sola película, por ejemplo, simplemente no había forma de poder controlar la posición de la bolsa de la vela.

4.2.1.3. Laminados

La respuesta está en la combinación de las ventajas del tejido y de la película mediante la unión de ambos por laminado. Se ha experimentado con innumerables combinaciones y la principal ventaja es que el paño tejido para un laminado, conocido como sustrato, puede ser extraordinariamente más ligero, para la misma intensidad de viento, que su equivalente fabricado enteramente con paño tejido. El principal inconveniente, por otra parte, reside en la unión de los dos materiales para obtener un producto que dure lo mismo que el paño tejido por el método convencional.

Los múltiples y variados intentos de solucionar los problemas se extractan en tres grandes respuestas. Para velas muy ligeras se cubre por ambos lados una tela fina de entramado suelto con una delgada lamina de Mylar; para velas pesadas se lamina, solo a uno de los lados de la película, bien Dacrón tejido poco apretado o bien una tela fina con apariencia de ser de punto, proporcionada por un fabricante; y para velas muy pesadas, la película es laminada a uno de los lados de lo que es básicamente una tela de vela convencional tejida muy apretada.

En todos los casos, el sustrato textil puede ser diseñado con las mismas características incorrectas que podría tener una vela convencional, de las cuales la más patente es la de tener una trama muy reforzada para un laminado destinado a usarse en la confección de una mayor de corte horizontal, que sufre gran tensión en la baluma. Por supuesto, alguno de los sofisticados laminados que se utilizaban en los lujosos yates de regata incorporaba en el sustrato otras fibras además del Dacrón para reforzar el laminado en una determinada dirección.

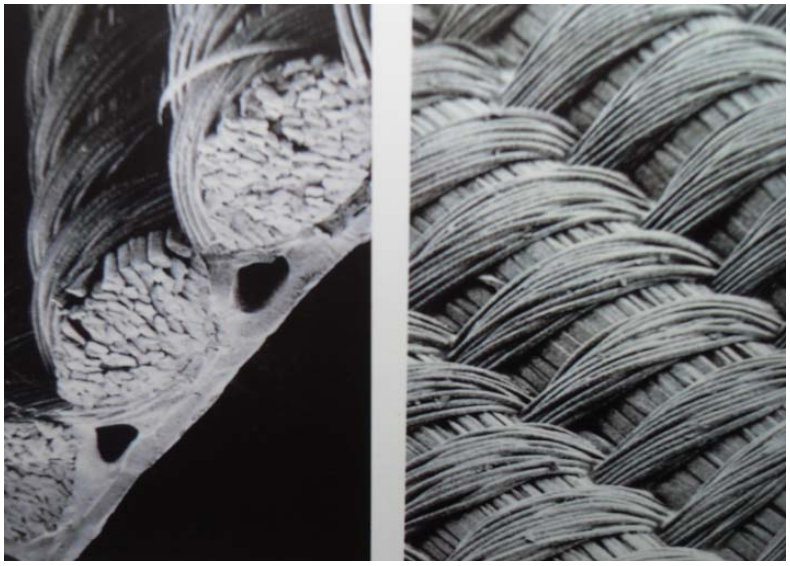


Ilustración 103: a la izquierda, una sección transversal de un laminado de Kevlar/ Dacrón aumentado 80 veces. La película y la cola se hayan bajo el sustrato textil. A la derecha, se observan los hilos de la urdimbre de Kevlar en este laminado de cortes verticales. Los hilos de la trama de Dácron únicamente se mantienen alineados.

El Kevlar era una de las fibras utilizadas en zonas que soportaban tensiones muy grandes, empezó también a utilizarse el Spectra.

Las técnicas del laminado de Mylar a su sustrato eran un secreto muy bien guardado. Esta actitud reacia por parte de los fabricantes del tejido provenía fundamentalmente del esfuerzo individual para lograr disminuir la tendencia de la película a separarse, hoy en día sigue ocurriendo lo mismo, ya que cada fabricante tiene su propio método.

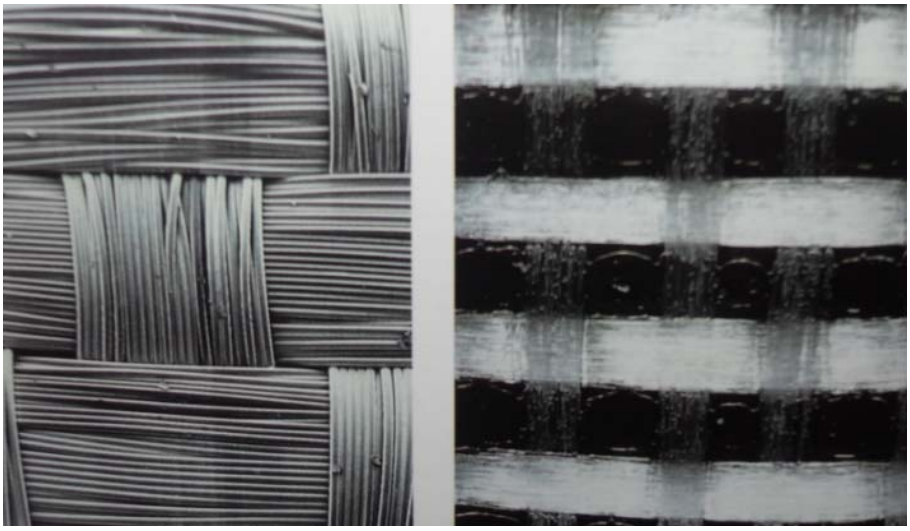


Ilustración 104: a la izquierda y a escala 80, se muestra un tejido de Dacrón mucho más suelto, que sirve de sustrato al laminado Powerweave de Bainbridge. A la derecha, aumentado 10 veces, se observa el fino tejido de entramado suelto de Kevlar/ Dacrón que usaba la misma compañía en su laminado de tres capas. La cola que unía los laminados entre si es lo que brilla entre hebra y hebra.

Los primeros laminados también eran muy rígidos debido a la cola utilizada para llevar a cabo la unión. La obtención de laminados de Mylar, más flexibles y duraderos, se debió en gran parte a la aparición de mejores colas fijadas al calor, que logran una unión química fuerte y flexible mediante calor y presión.

Al contar con la película para contener el estiramiento en la diagonal, el fabricante puede concentrarse en diseñar una tela de velas con menos compromisos y mucho más ligera, para satisfacer las necesidades específicas de los veleros.



Ilustración 105: obsérvense los paños amarillo oscuro de laminado de Kevlar, cada vez más comunes reforzando las balumas.

4.2.1.4. Nuevos laminados

Existe un sistema de construcción de velas por paños en el que los paños, confluyen radialmente hacia los puños de las velas de donde parten las mayores tensiones. Con este sistema, se pueden utilizar además materiales con distinta concentración de fibra según las necesidades de cada zona de la vela, este sistema es el de cortes radiales.



Ilustración 106: disposición de cortes radiales

Otro sistema utilizado consiste en subdividir la vela en varias zonas planas de material laminado, fabricadas unitariamente para cada vela y de tal forma que las fibras queden bien dirigidas en el sentido de las tensiones. Estas zonas planas se unen entre sí con las correspondientes curvas de unión para inducir la forma tridimensional de la vela acabada.

Otro sistema utilizado, y a destacar, consiste en cortar la vela de forma clásica en paños horizontales. Posteriormente se colocan sobre toda la superficie de la vela unas bandas de film de Mylar adhesivas que contienen la fibra. Estas bandas se colocan en orientación y cantidad según las tensiones que tendrá que soportar la vela.

Normalmente el tejido utilizado para las velas de regata hechas a paños es Kevlar o Pentex entre scrimm o tafeta, esta segunda hace que pese más el material pero lo protege mejor de los rayos solares.

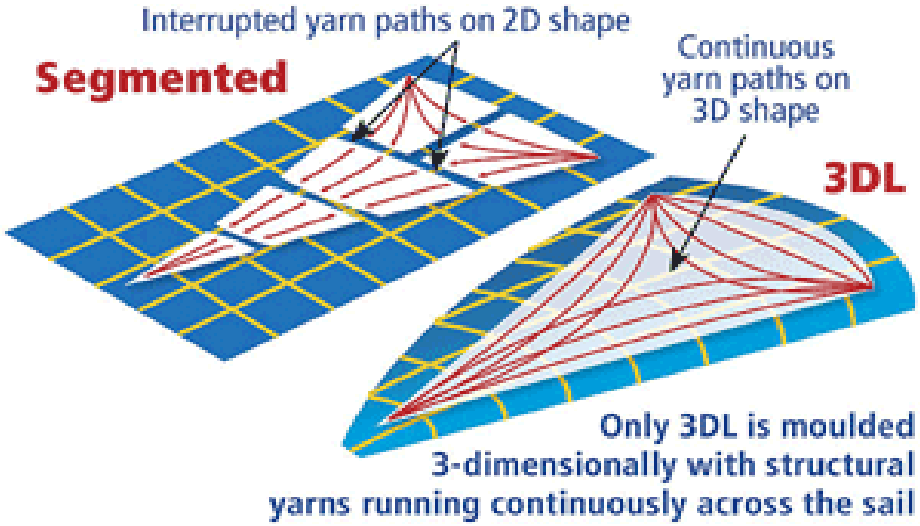


Ilustración 107: diferencia entre vela de paños y 3DL

4.2.2. Proceso de construcción

El proceso de la confección de las velas en si no había cambiado mucho con respecto a los tiempos de Nelson. Se disponían los paños del tejido y se cortan según un contorno dibujado en el suelo de la velería y poco después se cosen entre sí.

No obstante el futuro ya está aquí, desde los noventa el diseño pasa directamente desde el ordenador, a través de un disco blando, hasta una mesa de corte automática que le da la forma a cada paño automáticamente.



Ilustración 108: corte computarizado, se cortan paños de forma automática.

Con la vela extendida sobre el suelo de la velería, en años setenta los paños no estructurados de Dacrón hubieran ido directamente de ahí al maquinista para su costura. En los años 80, las costuras eran rectas y la curvatura definitiva de la vela dependía del tejido adicional en la curva del grátil. Con los tejidos actuales se da esa forma a la vela ahusando hacía el grátil y la baluma las costuras solapadas de una serie de paños. Así es la costura ancha y se lleva a cabo a márgenes muy exactos indicados en los offsets originales.

Se pega primero cinta adhesiva de doble cara entre los puntos marcados inicialmente durante la disposición de esas costuras a las que se desea dar forma. Se vaya o no hacer costura ancha, los paños están ahora unidos entre sí con una cinta adhesiva de doble cara, listos para mandarlos a coser.

En el caso de velas laminadas para unir un paño con otro debía usarse una cinta adhesiva de doble cara de Dacrón, mucho más fuerte. Esto solucionaba uno de los primeros problemas de las velas de Mylar, en las que las puntadas de cada costura tenían tendencia a deslizarse al entrar la vela en tensión. Al insertar una cinta textil de las películas de Mylar, se proporcionaba la sustancia suficiente para contrarrestar este deslizamiento.

Hoy en día la mayoría de veleros disponen de pegamentos lo suficientemente fuertes como para pegar los laminados con mucho éxito además, lo que es más importante, de poder pegar los paños sin ser cosidos posteriormente.

La costura

La vela, con los paños unidos con cinta adhesiva, está ya preparada para ser cosida. La comparación entre el volumen de material y la necesidad de una costura precisa, llevo a los veleros a inventar muchas disposiciones para sus operarios de costura, desde la simple mesa de velero para las velas pequeñas hasta agujeros en el suelo sobre los que se sienta el maquinista.

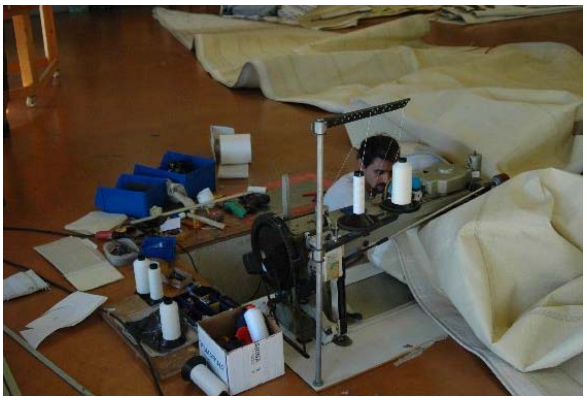


Ilustración 109: se ve al velero coser en un agujero en el suelo.

De eficacia se trata, sobre todo cuando cada costura antiguamente tenía que pasar tres o cuatro veces por la máquina de coser.

Para reforzar balumas y disminuir el estiramiento, se daba un grosor adicional a todos los paños que hay entre el puño de driza y el de escota. Estos paños de dos capas había que cortarlos en el suelo a la vez que los demás. Un típico plan de costura en una mayor, para un barco de unos 11 metros requeriría cuatro filas de puntadas en las zonas de doble capa, bajando a tres en el centro de la vela y a dos en acercarse la costura del grátil. Estas filas serían las puntadas cortas en zig-zag con las que todos los marinos están familiarizados.

Un nuevo avance en velas de gran tamaño fue que cada zig-zag estaba constituido por tres puntadas independientes. Esto hacia disminuir el tamaño de la costura, haciendo la vela más flexible y fácil de manejar; y también puede que redujese los roces con la piel. Una costura grande tardaba menos en hacerse y por tanto era más barata.

El color del hilo que se ha utilizado y todavía se usa es de distinto color al de la vela, por dos propósitos. Permite al velero, y más tarde al navegante, observar si algún hilo se está deshilachando o roto; esto es fundamental, ya que las velas de Dacrón o laminado son muy poco flexibles. La puntada siempre va a sobresalir y, por tanto, va a estar expuesta al desgaste. En segundo lugar, un color llamativo en las costuras permite al marino leer la forma de la curvatura una vez la tela está izada y portando. A pesar de que hoy en día se colocan líneas desde el grátil hasta la baluma con este propósito.

La vela cosida se pone de nuevo en el suelo de la velería para darle la forma a los tres lados (en la actualidad, esto se sigue haciendo de la misma manera). El más importante de ellos es el grátil, cuya curvatura juega un papel muy importante en la forma tridimensional definitiva de las velas.

En algunos casos, los puntos iniciales de offset del ordenador para la curva de grátil, ya habrán sido marcados en los paños oportunos. Si no es así, habrá que medirlos y marcarlos ahora al igual que los de la baluma y el pujamen. Se clavan entonces los punzones de velero en el suelo de la velería atravesando el tejido. Se doblan sobre ellos unos sables largos y flexibles para obtener una curva limpia antes de recortar la tela sobrante. Lo corriente en esta etapa es añadir los refuerzos y, en velas grandes, si hace falta, las cintas de tensión para que soporten la altas cargas adicionales de las tres esquinas.

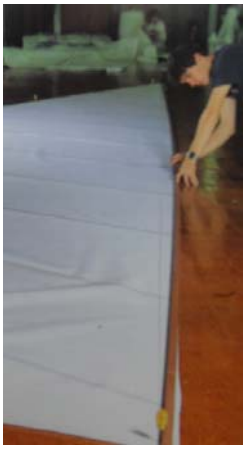


Ilustración 110: el grátil se corta en una curva limpia.

En una vela convencional de Dacrón de corte horizontal, los refuerzos son simples capas triangulares de tela de espesor decreciente, pero alguno en alguno de los más avanzados cortes y materiales, puede haber complicadas disposiciones radiales e incluso laminados unidireccionales. Un vistazo a las líneas de tensión nos revela la concentración de carga en estas zonas, que los refuerzos tienen que contrarrestar sin deformar el resto de la vela.



Ilustración 111: todos los puños llevan refuerzos estirados.

En la mayoría de las velas que se hacen hoy en día, la forma izada depende en cierto grado de que la tensión en el grátil sea regulable y, en el caso de las mayores también en el pujamen. Sin embargo, están unidas al aparejo, ya sea por garruchos patines o el equivalente moderno de una relinga de cabo y lucen algún tipo de cinta fuerte y regulable en el grátil tanto de foques como de mayores y en el pujamen de estas últimas. El grado de control a lo largo de estos bordes viene dictado por la resistencia al estiramiento del material más fuerte y resistente.

En la baluma de ambas velas y en el pujamen de los foques, hay que añadir un dobladillo para evitar que el tejido se deshilache. Esta parte añadida de tejido más grueso hace disminuir la elasticidad cerca de los bordes de la vela, en comparación con el resto de la misma. Bajo tensión, la baluma se endurecería y se arquearía.

Para contrarrestar esto, se estira la vela antes de ponerle cintas y dobladillos. Se estira entre tres puntos firmes de la velería y se le ponen las cintas y los dobladillos a los bordes, normalmente con grapas para mantenerlos en su sitio hasta el acabado y el estiro finales.

Es bajo el dobladillo, por donde se pasan las finas relingas para el control de la baluma tanto de foques como de mayores.

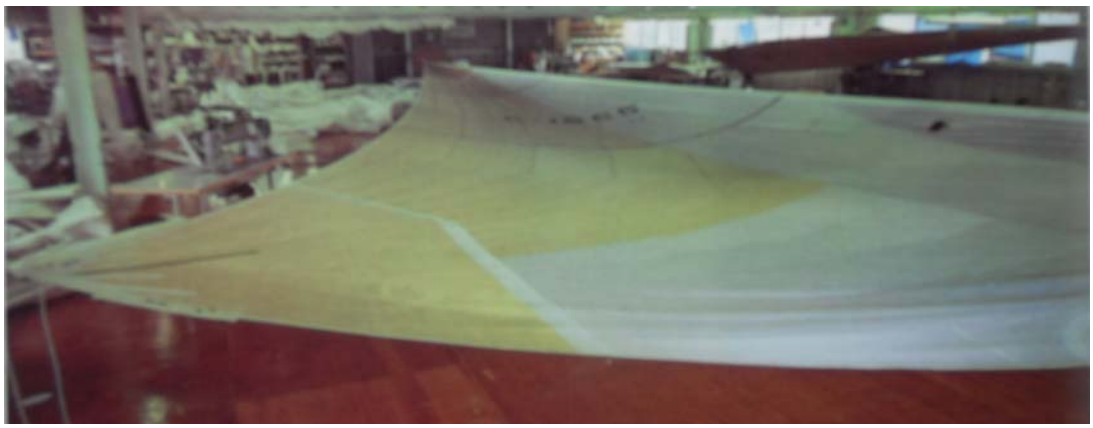


Ilustración 112: enorme foque para un yate de 18 metros estirado en la velería

Acabado

La última etapa incluye una gran cantidad de técnicas; desde estampar los ollados de rizo de acero con grandes prensas hidráulicas, hasta coser un forro contra el desgaste cerca de los puños de escota. Los veleros se enorgullecen de sus detalles de acabado, muchos de los cuales aparecen en sus anuncios publicitarios. De algún modo, la adición de algún pequeño adorno comercial hace que un producto sea mejor que otro.



Ilustración 113: el acabado a mano de un ollado cosiéndole un forro de cuero blando, es un trabajo que requiere gran habilidad.

4.3. LAS VELAS 3DL

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

Todos los equipos que participaron en la Copa América 2002-03 utilizaron exclusivamente velas 3DL. En la edición de la Copa 2007 en Valencia las utilizaron 11 de las 12 embarcaciones. En cuanto a la Volvo Ocean Race 2002-03 y 2005-06 la totalidad de la flota navegó con 3DL.

Cuando se compara una vela 3DL con una vela de construcción de paños con Dacrón con las mismas características de utilidad, una vela 3DL normalmente pesa un 20% menos.

Las velas 3DL están disponibles en Aramida, y Carbono en numerosas combinaciones y se pueden pedir con tafeta en una o ambas caras o en su estructura interna. Para embarcaciones de competición pura sin límite de presupuesto se fabrican con mylar a los dos lados, ya que de esta forma la vela pesará mucho menos que si lleva tafeta.

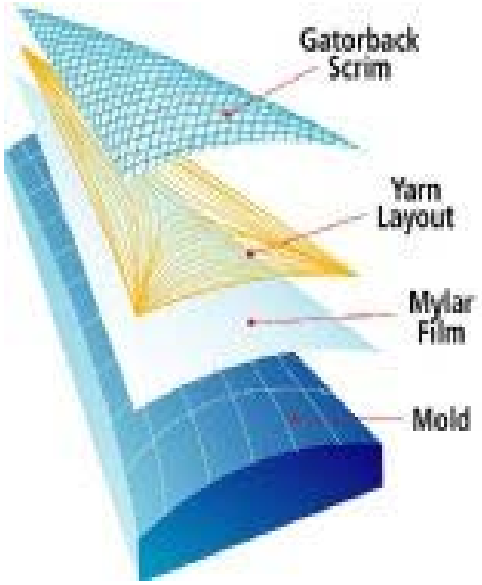


Ilustración 114: disposición de los materiales

4.3.1. MATERIALES USADOS PARA LAS 3DL

4.3.1.1. *Aramida:*

La palabra aramida es una abreviación del término "aromatic polyamide", y designa una categoría de fibra sintética. Sensible al ultravioleta. Buena resistencia a choques, a la abrasión, a los disolventes orgánicos y al calor. Sensible a la humedad. La fibra de aramida tiene una amplia aplicación, se usa tanto en el campo naval, como en la fabricación de chalecos antibalas, ingeniería civil, refuerzo de cordaje, etc. En este caso es la fibra utilizada para las velas de baja competición. La aramida consta de Kevlar y de Twaron.

4.3.1.2. *Kevlar:*

Es una poliamida, es muy resistente, alta fuerza extensible, alargamiento bajo o rigidez estructural, conductividad eléctrica baja, alta dureza y alta resistencia al corte. Su mecanización resulta muy dificil. El Kevlar 49 se emplea cuando las fibras se van a embeber en una resina para formar un material compuesto. Se emplea como equipamiento para deportes extremos, para altavoces y para la industria aeronáutica, aviones y satélites de comunicaciones y cascos para motos y veleros de alta competición.

4.3.1.3. *Twaron:*

Es una fibra ligera de para-aramida de alto modulo, es térmicamente estable y tiene una gran resistencia química, al impacto y al corte.

4.3.1.4. Fibra de Carbono:

Se denomina 'fibra de carbono' a un compuesto no metálico de tipo polimérico. Es un material muy caro, de propiedades mecánicas elevadas y ligero. Se utiliza como fibra en las velas utilizadas en alta competición.

Al tratarse de un material compuesto, en la mayoría de los casos (aproximadamente un 75%) se utilizan polímeros termoestables. El polímero es habitualmente resina epoxi, de tipo termoestable aunque otros polímeros, como el poliéster o el viniléster también se usan como base para la fibra de carbono aunque están cayendo en desuso.

Las propiedades principales de este material compuesto son:

- Elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad.
- Elevado precio de producción.
- Resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico y buenas propiedades ignífugas.

4.3.1.5. Tafeta:

Tela fina ligeramente armada que se utiliza para proteger de los rayos ultravioletas a los otros materiales que constituyen las velas; como el kevlar y la aramida. Esto hace que la vela tenga una duración más larga y el inconveniente de que al usar la tafeta la vela pesa más. Se utiliza para embarcaciones con poco presupuesto por su larga duración.

4.3.1.6. *Mylar:*

El film de poliéster mylar es un film flexible, fuerte y duradero con un abanico de propiedades que lo hacen recomendable en múltiples aplicaciones industriales.

El material es totalmente transparente para espesores entre 12 y 23 micras, adquiriendo opacidad a medida que el espesor es mayor. Se utiliza para veleros de alta competición.

4.3.2. FABRICACIÓN DE LAS 3DL

1. Una vela 3DL comienza con un archivo de diseño CAD/CAE creado por un diseñador. El software de diseño propiedad exclusiva de North crea un archivo a medida del "molde" para cada vela individual.



Ilustración 115: diseñador.

2. Un sofisticado software lee el archivo de diseño e instruye a uno de los moldes físicos 3DL para que adquiera la forma del diseño. Aquí se puede ver la parte inferior de un molde 3DL con los mecanismos que controla el avanzado programa.



Ilustración 116: parte inferior del molde con su maquinaria.

3. Después se dispone una capa de film de Mylar sobre el molde y se le da tensión. Entonces un cabezal de 6 ejes suspendido de una grúa controlada por ordenador va extendiendo las fibras estructurales sobre la superficie del film base siguiendo con precisión la curva en tres dimensiones del molde. El "dibujo" de fibras que va dejando el cabezal sigue las tensiones que experimentará la vela durante su uso. Todas las fibras estructurales se aplican con una tensión uniforme y se adhieren a la superficie del film para asegurar que no se muevan ni un milímetro antes de que el proceso de laminado las bloquee, si se mueve un milímetro el proceso tendrá que repetirse y la vela no valdrá para nada y tendrá que ser desechada.



Ilustración 117: operario colocando las fibras.

4. Una vez dispuestas las fibras, se añade un segundo film al que se le aplica tensión y después se cubre con una gran bolsa de vacío que comprime el laminado con una fuerza aproximada de 100 kilos por centímetro cuadrado. Este segundo film contiene un entramado secundario de fibras que absorben las tensiones derivadas de las líneas de tensión primarias.



Ilustración 118: operario colocando film de Mylar.

5. El cabezal de disposición de las fibras se sustituye entonces por una especie de "manta" de calor compuesta de carbono que cura el laminado mediante una dosis uniforme y controlada de calor y presión. Con esta operación el laminado se ajusta al molde absorbiendo su forma exacta. Después de este tratamiento se deja reposar la vela durante cinco días antes de ser rematada.



Ilustración 119: sellando el laminado.

6. Los veleros se hacen cargo de la vela curada y le añaden todos los elementos necesarios para terminarla. Debido a la eficacia inherente del material creado en el proceso que hemos descrito, una vela 3DL acabada puede tener un peso hasta un 20% inferior que una vela convencional de paneles o una vela de tensión tutelada con un nivel de estiramiento similar o tiene su nivel óptimo de eficacia dentro de un rango de viento mayor.



Ilustración 120: cosiendo los detalles de acabado.

4.3.3. HECHOS DE LA FABRICACIÓN DE LAS 3DL

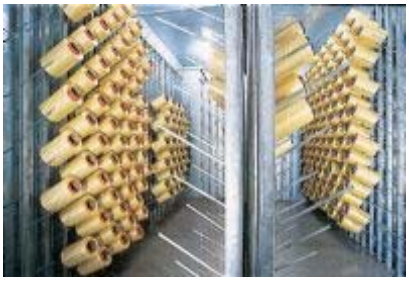


Ilustración 121: fibras de aramida en el horno.

Antes de que el proceso de moldeado comience, todas las fibras de Aramida utilizadas en los laminados 3DL se secan en unos hornos apropiados para eliminar todo indicio de humedad. De esta manera se evita que las fibras de Aramida generen vapor durante el proceso de curación del laminado.

Una vez fuera de los hornos, las bobinas de fibra se guardan en estanterías transportables herméticas y controladas, que, a su vez se introducen en cámaras herméticas controladas con acceso directo al cabezal de aplicación que interviene en el proceso de moldeado.

Los adhesivos avanzados que se utilizan en los laminados 3DL son los únicos adhesivos que se fabrican específicamente para la fabricación de velas y se han diseñado para curar en dos fases. La primera forma una robusta superficie de adherencia entre la fibra y los films que las envuelven. La segunda trabaja en el interior, ajustando firmemente las fibras en su lugar e incrementando la durabilidad de la vela.

El Cabezal que se utiliza para aplicar las fibras en el molde opera a una fuerza de 3.500 Kg/m^2.

Todos los materiales utilizados en una vela 3DL deben ser verificados para comprobar su consistencia y eficacia.



Ilustración 122: operario trabajando con el cabezal.

4.3.4. 3DL BAJO EL MICROSCOPIO

El microscopio mostró que en las 3DL el adhesivo y las fibras se suceden de manera continua pero en los otros compuestos existen huecos de aire donde debería haber fibra o adhesivo. Este es un claro indicio de que la adhesión no es correcta y que no durará tanto como otra en la que el laminado constituye un continuo de fibras y film.

Otra cosa que reveló el microscopio es la diferencia entre fabricar un laminado utilizando la presión de vació y hacerlo con la presión de rodillos, que es como se fabrican la mayoría de las velas "similares". El material de las velas 3DL se construye utilizando una atmósfera de presión de vacío, que es aproximadamente 3.500 Kg/m2. Algunas de las velas similares se construyen pasando láminas planas de film y fibras a través de rodillos que las comprimen. La diferencia con las 3DL radica en que, al aplicar la presión de vacío y en curado térmico, el laminado se comprime y rodea las fibras. A eso se le llama "consolidar el laminado", ya que el vacío se aplica entre las capas y succiona el film hacia las fibras. Pero si se intenta formar el laminado únicamente con presión externa, por mucha presión que se le aplique, un rodillo no puede conseguir envolver la fibra con el film, por lo que siempre quedarán huecos en el material."

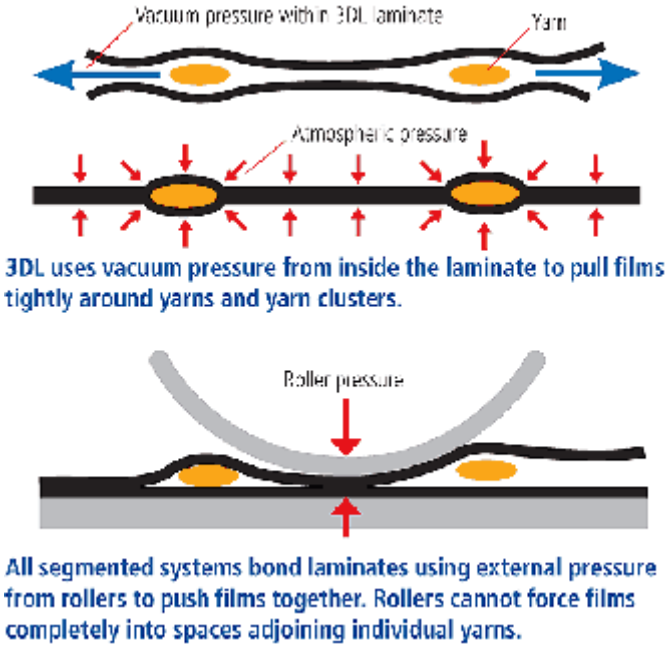


Ilustración 123: evacuación del aire por completo

4.3.5. DURACIÓN DE UNA 3DL

Las embarcaciones de regata Grand Prix, generalmente utilizan una mayor de Aramida entre 150 y 200 horas. Por ejemplo, el "Team Denis Conner" utilizó la misma mayor pesada 3DL durante toda su campaña de Copa América del 2000.

En la edición de Copa América de 2003, muchos sindicatos utilizaron sus 3DL de carbono durante más de 400 horas. Las trasluchadas y el flameo tienen su coste en los Génovas, que duran considerablemente menos que las Mayores. Los sindicatos de Copa América y los grandes proyectos, en ocasiones utilizan sus Génovas no más de 20 horas. (Aunque suene demasiado poco, un día típico de regatas incluirá una hora y media de trabajo en ceñida y eso supone unas 13 regatas para un solo Génova, que, dependiendo de la intensidad del viento se utiliza solamente parte del tiempo).

De todas formas, si se cuidan apropiadamente y se guardan en el saco, evitando los flameos y teniendo cuidado de utilizarlo en su rango apropiado de viento, un Génova 3DL pueden mantener todas sus prestaciones durante varias temporadas.

Una vela 3DL puede costar un poco más cara comparada con una vela de paneles pero si se tiene en cuenta su mayor duración, resulta una buena inversión a largo plazo. Esta es una de las muchas razones por las que el 100% de los sindicatos de Volvo y Copa América las eligieron.

4.3.6. COMPROBACIÓN DE TEJIDOS Y LAMINADOS

Todos los lotes de tejidos se prueban y califican antes de pasarlos al almacén para asegurase de que cumplan con las especificaciones. De la misma manera se prueban los materiales en desarrollo para poder compararlos con los tejidos establecidos.

Los ensayos de estiramiento de los tejidos siempre han sido claves para conocer las posibilidades del material y comprobar su calidad.

Se utilizan máquinas que son capaces de hacer pruebas de estiramiento y robustez regularmente y también puede aislar zonas específicas de la muestra para medir la tensión.



Ilustración 124: ensayo de estiramiento de la tela

Los ingenieros de 3DL también han desarrollado un nuevo aparato de pruebas que proporciona conocimiento sobre la fatiga de los materiales a largo plazo. El North Fatigue Simulator flexa las tiras de muestra del tejido mediante unos rodillos oscilantes que simulan los movimientos del tejido en las velas. Mediante el simulador de fatiga se puede observar la degradación progresiva de los materiales.



Ilustración 125: ensayo fatiga de la vela



Ilustración 126: ejemplo 3dl de aramida



Ilustración 127: ejemplo 3dl de carbono

4.4. Tecnología Fusión M

A diferencia de otras velas que utilizan paneles de material compuesto ensamblados mediante una triple configuración radial, las velas de crucero elaboradas con tecnología Fusión M se han diseñado como membranas de tamaño completo en las que se han dispuesto las fibras a modo que éstas se adapten a los esfuerzos de diseño de la vela.

La tecnología FM se basa en el estudio de una estructura íntegramente flexible y adaptable, una estructura inteligente. El punto de partida es el cálculo de la carga en un punto de la vela, mediante una división del tejido en pequeñas partes.

El software utilizado por la firma Quantum Sails, permite trabajar con todas las variables a la vez, es decir, casco, jarcia y mástil, modificando independientemente cada variable sin tener que volver a empezar.

Partiendo del formulario citado con anterioridad en el cual constan las dimensiones de la embarcación, la posición y dimensión del aparejo, etc., mediante un programa CAD/CAM propiedad de la velería se calculan las distancias (E/J) grátil-baluma y (P/I) botavara-altura, el diseño y posición de los sables y puños, así como los detalles necesarios para el trimado óptimo, quedando así definida la forma de la vela (perfil) y el perímetro de ésta, obteniéndose un modelo del cual se han especificado áreas de atención e inventarios.

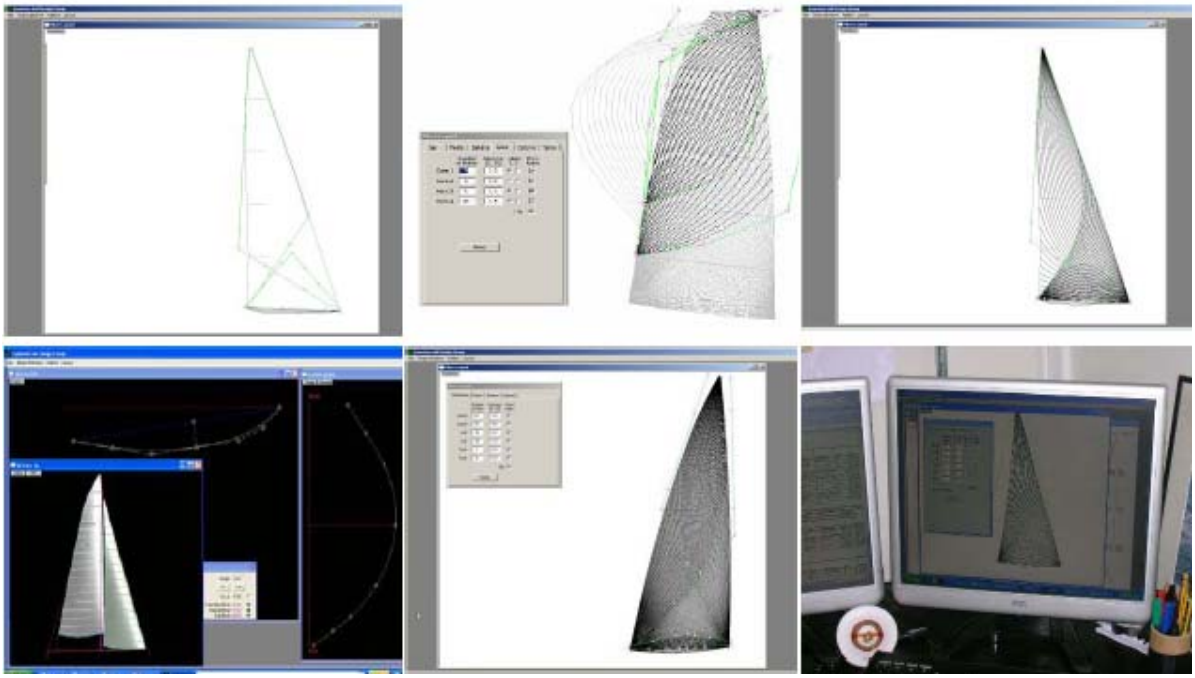


Ilustración 128: definición del perfil, dimensionamiento de la vela y selección tipo y cantidad de fibras.

El software genera un archivo que facilita el estudio del diseño de la vela, permitiendo variar la disposición y distribución de las fibras, indicando la fuerza a la que estos pueden ser sometidos. Permite al diseñador elegir la cantidad de hilos y la distancia entre los mismos en función del tipo de vela y el volumen definido.

Posteriormente se procede a la modelización y customización de la vela mediante software denominado CFD, que permiten el estudio matemático del comportamiento del fluido, aire, habiéndose definido previamente ciertas condiciones como la dureza de los sables, la tensión de la escota, y ángulo de escora obteniendo así diferentes gráficos de las presiones y velocidades que actúan sobre la vela.

Para la optimización de la vela, previo a proceder a su elaboración, se realizan diversos análisis de VPP con cada tipo de vela sobre diferentes rangos de viento, aplicándose límites razonables para cada una en función del criterio del diseñador.

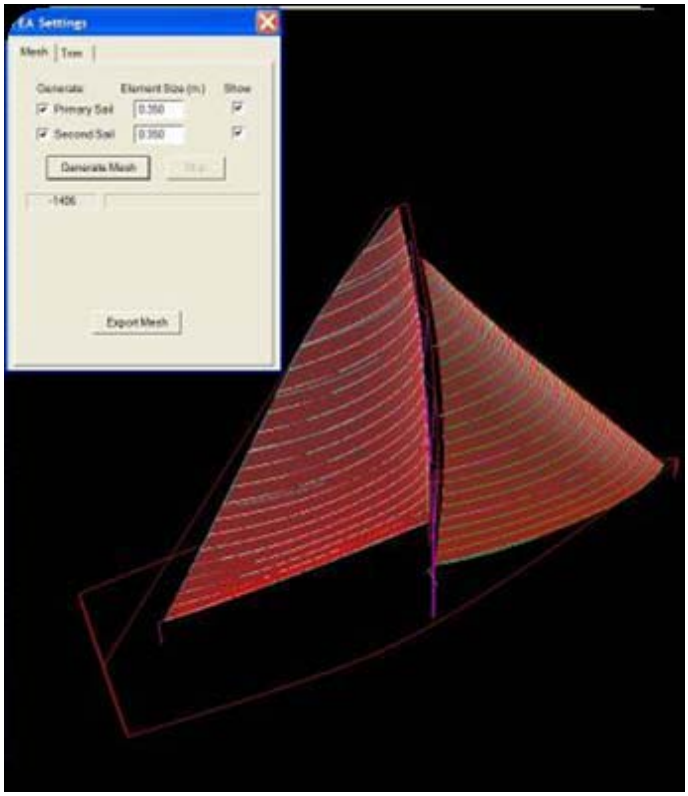


Ilustración 129: optimización en VPP, presiones, velocidades y tensiones

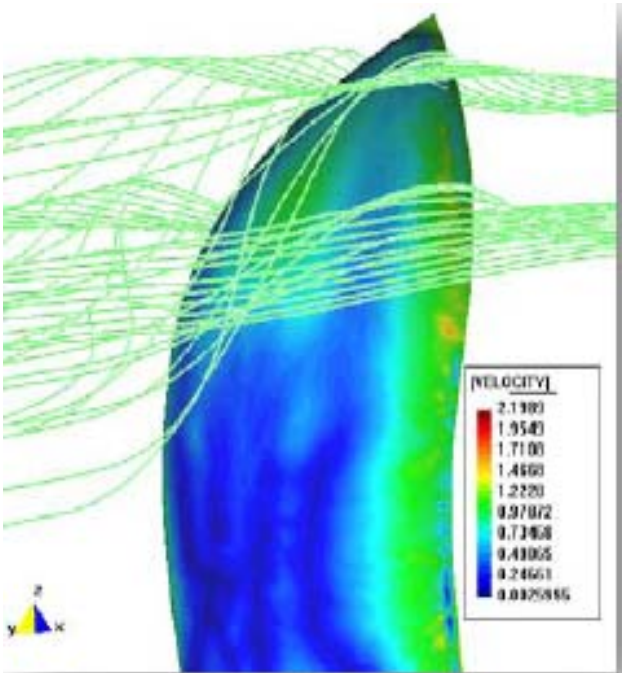


Ilustración 130: modelización en CFD, definición de condiciones

Las velas son confeccionadas sobre una mesa plana y mediante una mano robótica se distribuyen los hilos según se ha definido en el software de base CAD. L a confección de la vela puede variar en una distribución continua o una distribución en paneles dependiendo del tipo de vela y de la función a la que esté destinada. Es decir, una vela mayor de crucero o regata, un foque, un spinacker, etc.

Posteriormente el material compuesto es sometido a un proceso de vacío y prensado a una presión de 20 kilogramos centímetro cuadrado, dejándolo reposar durante una semana aproximadamente. De igual modo que en el caso de las velas 3DL, la tecnología fusión M utiliza el proceso de adherencia de las fibras de material “resistente” entre dos capas de film de poliéster con la aplicación de un adhesivo, el cual en ocasiones se tiñe de algún color oscuro o se le añaden aditivos especiales para proteger mejor las fibras de los rayos UV.

Dicha composición debe reposar o curar igualmente, mediante la aplicación de presión y temperatura. Sin embargo, para la aplicación de temperatura en Fusión M se emplean infrarrojos en las películas de *Mylar*. Una de las ventajas de los materiales laminados en plano (no en tres dimensiones) es que esto permite unos procesos de unión a una temperatura y una presión de varias toneladas imposibles sobre un molde. La confección sobre una mesa plana facilita que la tensión sobre el material compuesto sea igual a lo largo de todo el hilo, siendo así el material más estable y obteniendo una menor distorsión/deformación de la vela.



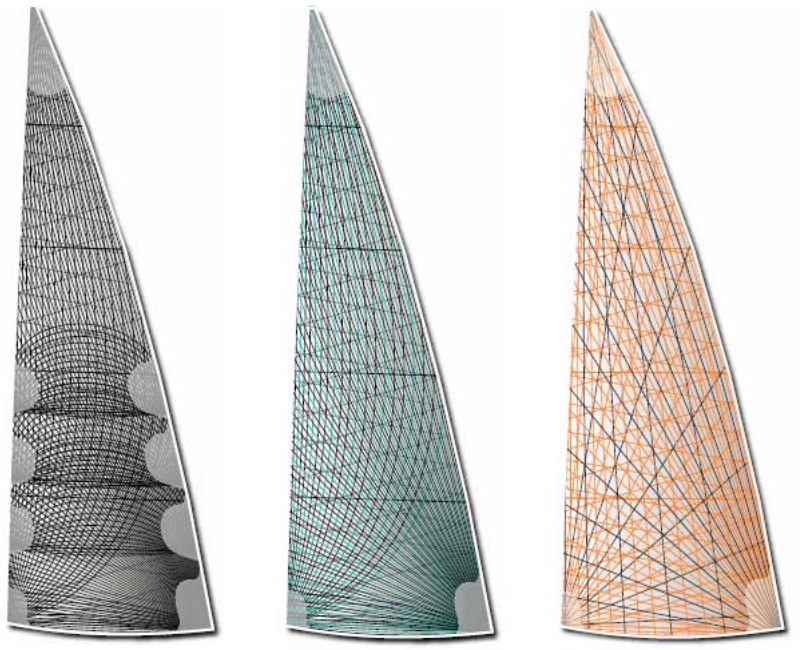
Ilustración 131: colocación de las fibras sobre mesa plana mediante sistema de plotter



Ilustración 132: Finalización proceso de laminado

En la siguiente ilustración se muestra las diferentes opciones que da una de las marcas de vela de hoy en día, como es Quantum Racing.

SAIL SELECTION CHART



	9000 Series	7000 Series	5000 Series
Description	These top-of-the-line, Grand Prix sails feature 100% Carbon to deliver superior strength coupled with lightweight, low-stretch performance. Custom string Xply base.	These high-performance sails offer a superior strength-to-weight ratio and stretch resistance for optimal shaping and ease of trim. Excellent heel control and upwind performance. Choose from a blend of Carbon and Aramid fibers or 100% Twaron®.	Designed for mid-size racers, the 5000 series sails offer excellent versatility in a broad range of wind speeds and are easy to trim. Choose from a blend of Carbon and Twaron® or 100% Twaron®.
Boat Size	40-80'	35' - 80'	25' - 40'
Material/Fiber	100% Carbon	Carbon/Aramid	Carbon/Twaron®
Sail Color	All black fiber	All black fiber with gold X-ply scrim	All black fiber with gold X-ply scrim
Strength/Weight Ratio	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
Ease of Trim	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★
Control of Heel	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
Upwind Performance	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
Wind Range Versatility	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★
UV Resistance	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★
Fiber Resistance to Flogging	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★
Durability	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
Optimal Shape Retention	◷ ◷ ◷ ◷ ◷	◷ ◷ ◷ ◷	◷ ◷ ◷
Cost	$$$$$	$$$$	$$$
Sails in Series	**MR 9000** Boat Length: 40+ Fiber: 100% Carbon	**MR 7600** Boat Length: 40'-80' Fiber 60% Carbon/40% Aramid **MR 7300** Boat Length: 30'-60' Fiber: 30% Carbon/70% Aramid **MR 7000** Boat Length: 25'-55' Fiber: 100% Black Twaron®	**MR 5300** Boat Length: 25'-40' Fiber: 30% Carbon/70% Twaron® **MR 5000** Boat Length: 25'-40' Fiber: 100% Twaron®

FIBER KEY
TWARON
CARBON
ARAMID

Ilustración 133: tabla de velas Quantum para regata

4.5. Comparación de velas 3DL con velas Fusión M

Los procesos de diseño mediante el uso de softwares informáticos, con respecto a los sistemas convencionales, permiten definir con mayor precisión la forma, perfil, adecuado de la vela para alcanzar un mayor rendimiento, debido a que el estudio virtual previo a su confección se aproxima mucho al comportamiento real de la vela.

La elaboración de velas con material compuesto, en lugar del clásico ensamblaje de paños tejidos, proporciona una mayor ligereza a la vela de hasta un 20% -30%, una mayor resistencia al estiramiento y una superficie uniforme, ofreciendo así una mayor aceleración y facilidad en el trimado.

Debido a que están totalmente constituidas por los mismos componentes, el paso del tiempo no tiene el mismo efecto destructivo sobre las prestaciones y la durabilidad de éstas velas. Es decir, tienen mejores prestaciones sobre una amplia gama de vientos y durante más tiempo. Así mismo las velas de laminado sufren una menor reducción de tamaño, un efecto que se produce cuando las velas son utilizadas o plegadas tras su uso. A diferencia de otros sistemas de laminado, los aquí descritos, se caracterizan por la utilización de presión de vacío durante el curado del material en lugar de rodillos. Mediante la aplicación de presión de vacío se facilita la adherencia de las fibras al laminado, evitando la aparición de “bolsas de aire”, proporcionando una mayor calidad del mismo.

Pudiéndose destacar las diferencias básicas entre ambos sistemas en la siguiente tabla:

3DL	**Fusión M**
Molde tridimensional	Mesa plana
Presión vació 1 bar	Presión vacío 20 bar
Temperatura manta	Temperatura infrarrojos
Hilos puño a puño	Control tensión hilo
---	Hilos continuos

Tabla 2: comparativa de diferencias básicas entre laminados.

4.6. Las velas 3Di

3Di es una tecnología velera única y patentada que permite a las velas laminadas parecerse al equilibrio a la hora de soportar tensiones y a la capacidad de conservar la forma equivalente a un plano aerodinámico rígido. En términos técnicos simples, 3Di es una membrana compuesta flexible construida con cintas formadas por filamentos pre-impregnados y dispuestas en múltiples direcciones y termoformadas en un molde 3D (3DL).

Este tipo de velas ha sido el que la mayoria de embarcaciones a elegido este último año. En las flotas de Tp 52, Soto 40, Melges 32 la mayoria de embacaciones llevan este tipo de velas. En la America´s Cup hoy en día se utilizan mayores que son similares a alas de avion, pero para la fabricación de sus foques utilizan este método.

4.6.1. Materiales

Lo que se ve como una fibra individual en una vela es en realidad un haz de filamentos muy pequeños, cada uno de los cuales de menor diámetro que el pelo humano.

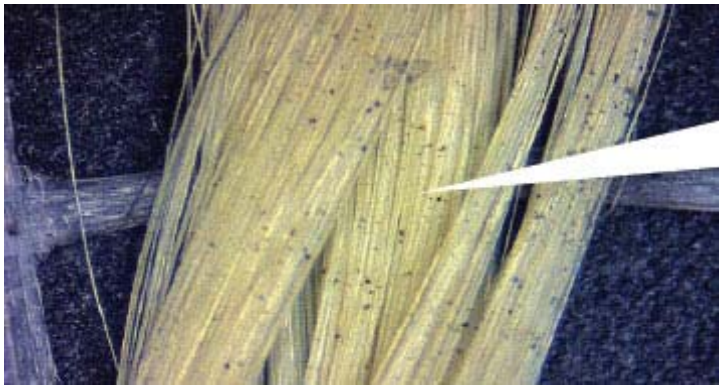


Ilustración 134: fibra individual

Una cinta de filamentos esparcidos se prepara separando un haz de fibras en filamentos individuales y dispuestos en paralelo que conforman una cinta ultrafina que se fija con adhesivo y se dispone sobre un papel de base. Aquí se ve una cinta preimpregnada con filamentos de carbono/UHMWPE (Spectra/Dyneema) que tiene un grosor de unos 35 micrones.

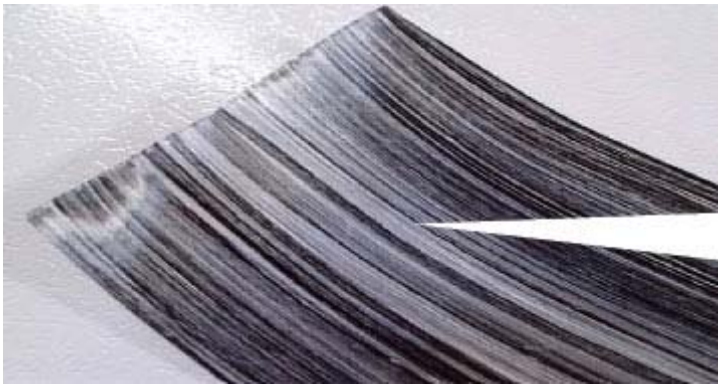


Ilustración 135: cinta de filamentos esparcidos

La ilustración de abajo muestra como las cintas ultra finas de filamento extendido se ordenan en capas y luego se termomoldean para formar la vela. Cada color representa una capa diferente de cinta/s. Las cintas pueden tener cualquier longitud y orientarse en cualquier dirección lo que permite alcanzar una precisión nunca vista a la hora de hacer coincidir la estructura de la vela con las tensiones previstas. Todos los refuerzos de una vela 3Di (capas azules) se integran internamente como parte del laminado de la vela.

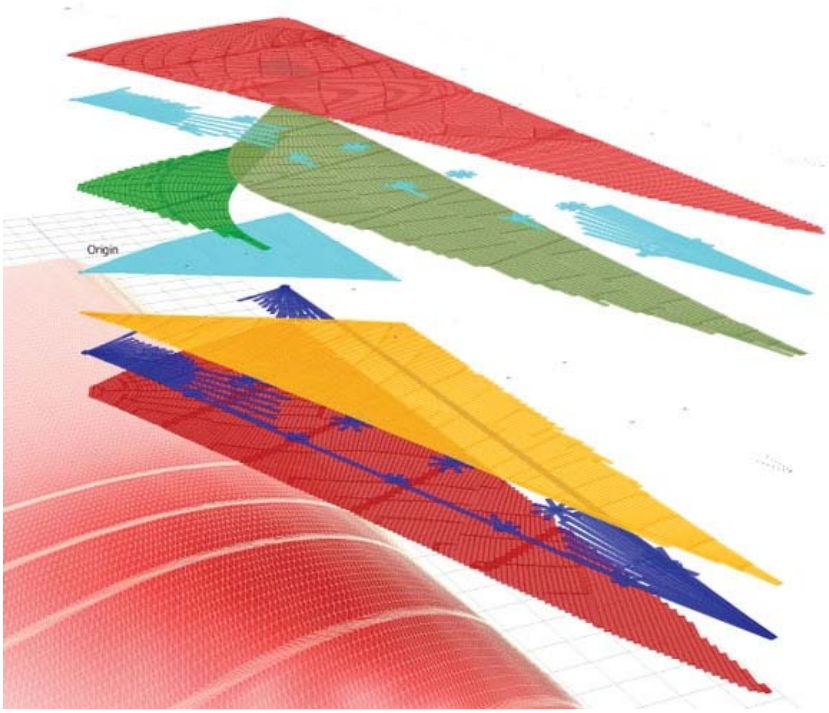


Ilustración 136: capas de una 3di

Hay algo que no se ve en estas velas: el FILM. Debido al hecho de que las cintas forman la superficie completa de la vela no es necesario utilizar films para conformar el laminado.

Con la tecnología 3Di las velas tienen una resistencia equilibrada a la deformación en todas las direcciones, esto es perfecto, ya que, cualquier tipo de deformación en una vela (estiramiento, encogimiento, rotura…) tiene un efecto negativo en el comportamiento de la vela. Equilibrar la resistencia tanto al estiramiento como a la compresión implica que el cambio en la forma de la vela debido al viento y las olas sea menor.

Se acerca más al comportamiento de un plano aerodinámico rígido que ninguna otra tecnología velera.

Las velas 3Di tienen estan compuestas por:

- Capa exterior gris: Superficie exterior de poliéster no-tejido sobre Dyneema soldado con adhesivo “thermoset” con protectores UV y colorante.
- Cintas negras con aramida: filamentos de Dyneema y carbono adheridas a un scrim con X de aramida con adhesivo “thermoset” con protectores UV.
- Cinta negra: filamentos de Dyneema y carbono adheridas con adhesivo “thermoset” con protectores UV.

En la foto podemos diferenciar todos estos componente.

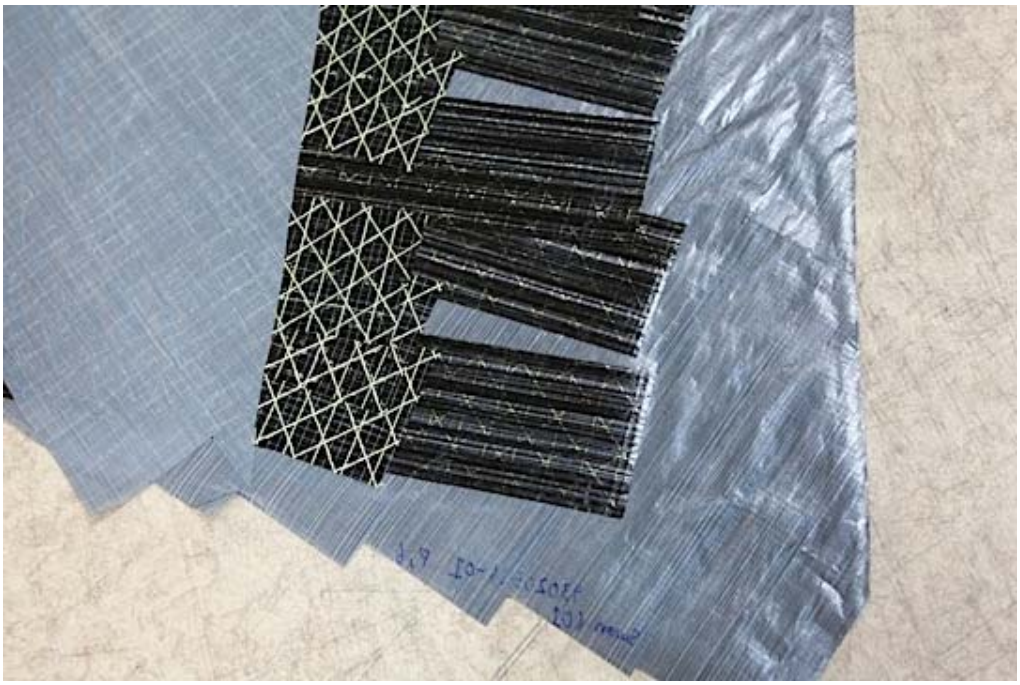


Ilustración 137: componentes de una 3di

A continuación se describen todos los materiales utilizados:

- **Las fibras de carbono** son rígidas y resisten tanto la tensión como la compresión pero son frágiles y las fibras individuales no se pueden doblar.

- **Las fibras de aramida** son robustas y resisten tanto la tensión como la compresión. No son tan frágiles como las de carbono pero son sensibles a los rayos UV.

- **Las fibras de Dyneema** resisten la tensión pero no la compresión. Son muy duraderas y flexibles.

La combinación de esas fibras permite obtener materiales que reúnan todas las características necesarias. El Dyneema 100% es blando y fácil de manejar pero sin tensión se arruga. El carbono 100% es fuerte pero difícil de manejar y quebradizo. Ahora mismo parece existir una mezcla óptima entre el 50/50 y el 70/30 carbono/Dyneema o aramida/Dyneema. Pero esto va cambiando con el tiempo, ya que con las experiencias en competición se van cambiando estos niveles y se busca la combinación óptima.

La empresa que fabrica este tipo de velas ha deseado englobar las opciones en tres categorías según el material (como se ha dicho,pueden cambiar con el tiempo).

- 3Di 870 Carbono/Dyneema, regata club

- 3Di 880 Carbono/Carbono, TP52, Melgues 32.. (contiene menos Dyneema)

- 3Di 670 Aramida/Dyneema, VOR o Open 60 que no pueden usar carbono.

4.6.2. Proceso de fabricación

El proceso comienza con filamentos no trenzados de carbono, aramida y Dyneema.



Ilustración 138: filamentos

Éstos pasan por una máquina denominada “pregger” que los esparce individualmente. Aquí se introducen las fibras de Dyneema en la máquina.

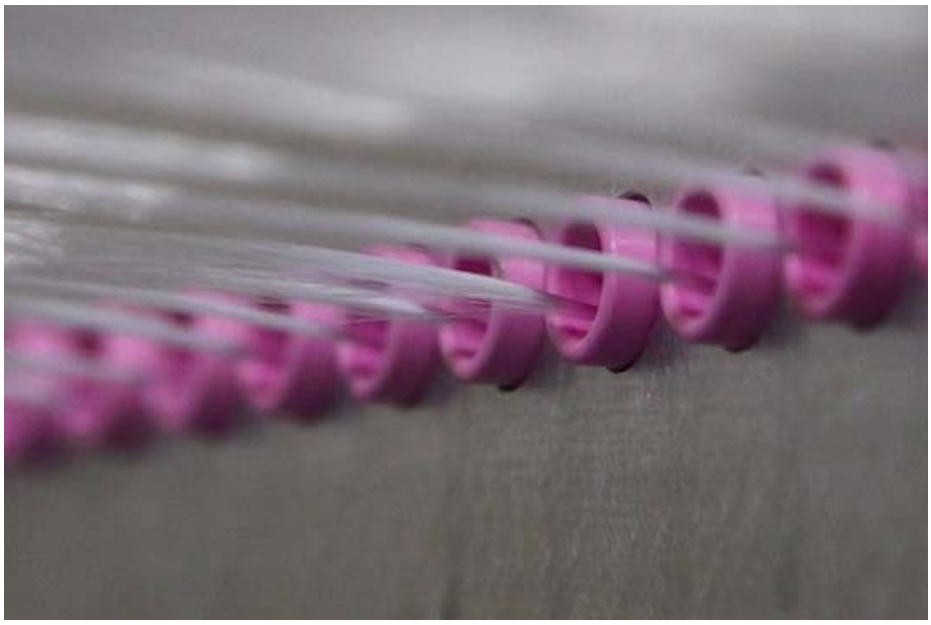


Ilustración 139: fibras de Dyneema

Las fibras de carbono, aramida y Dyneema se esparcen en esta máquina. Ésta tiene diferentes trazados y técnicas para los diferentes materiales. Las fibras están recubiertas por una fina capa de adhesivo térmico que las mantiene unidas tanto en forma de cinta para construir la vela como para consolidar todas las partes que conforman la vela final.



Ilustración 140: máquina para esparcir las fibras

Las fibras se sitúan sobre un papel de base, se secan, se enrollan y se cortan en rollos más estrechos. Dependiendo de la mezcla de fibras las cintas pueden pasar dos o tres veces por la máquina.



Ilustración 141: máquina para esparcir las fibras 2

Aquí se ve la máquina al completo.



Ilustración 142: máquina para esparcir las fibras 3

El cabezal “aplica-cintas” va adelante y atrás sobre una superficie plana aplicando las fibras según indica el diseño. Recoge el papel base y corta las cintas.



Ilustración 143: cabezal aplica cintas

Aquí se ve la sección de driza de una mayor de Swan 601. Se producen muchas partes pequeñas que sean fáciles de manejar cuando se trasladan al molde. También se utiliza mejor la maquinaria trabajando en varias pequeñas zonas que en pocas zonas grandes.

Las cintas son lo suficientemente adhesivas como para mantenerse unidas cuando se maneja la vela pero no tanto como para no poder desplazarse cuando se les da forma en el molde.



Ilustración 144: sección de driza de una mayor de Swan 601.

Aquí se tiene una buena imagen de las diferentes capas de cinta. En el fondo una capa externa gris, después las capas internas de cinta debajo de la última capa. Existen 20 tipos de cinta diferentes, cada una de ellas con un conjunto de características.

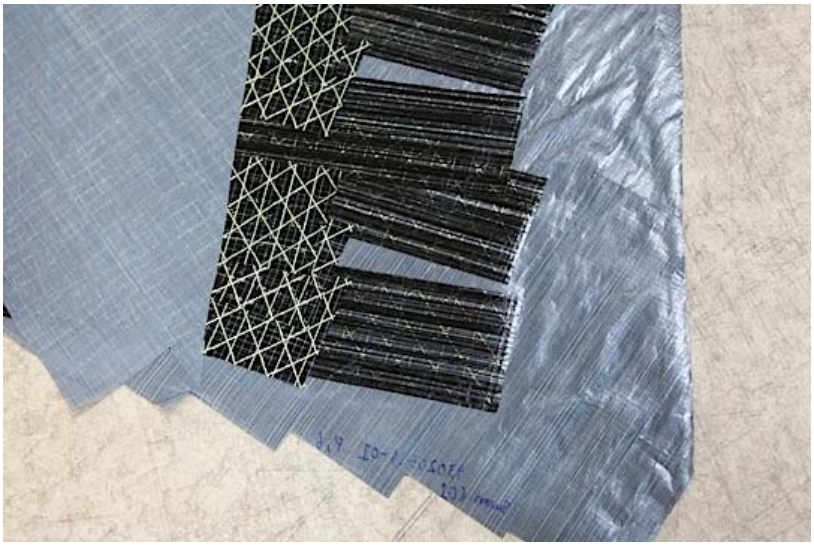


Ilustración 145: diferentes capas de cinta.

Las piezas se transportan a los mismos moldes que se usan para 3DL y los bordes se intercalan y encajan como si las cintas fuesen puestas de una vez. La forma real se obtiene al estirar las cintas sobre el molde y aplicarle después calor. Aquí se ve una vela 3Di dispuesta sobre el molde antes de su consolidación.



Ilustración 146: 3Di dispuesta sobre el molde.

La vela al completo es sellada con una aspiradora y todas las capas consolidadas con calor en una estructura casi isotrópica (resistente a las tensiones en todas direcciones). Existe una diferencia entre la laminación (mezclar materiales con propiedades diferentes, como en las 3Di y demás velas) y la consolidación (mezclar materiales con propiedades similares, como en las 3Di).



Ilustración 147: vela sellada con una aspiradora

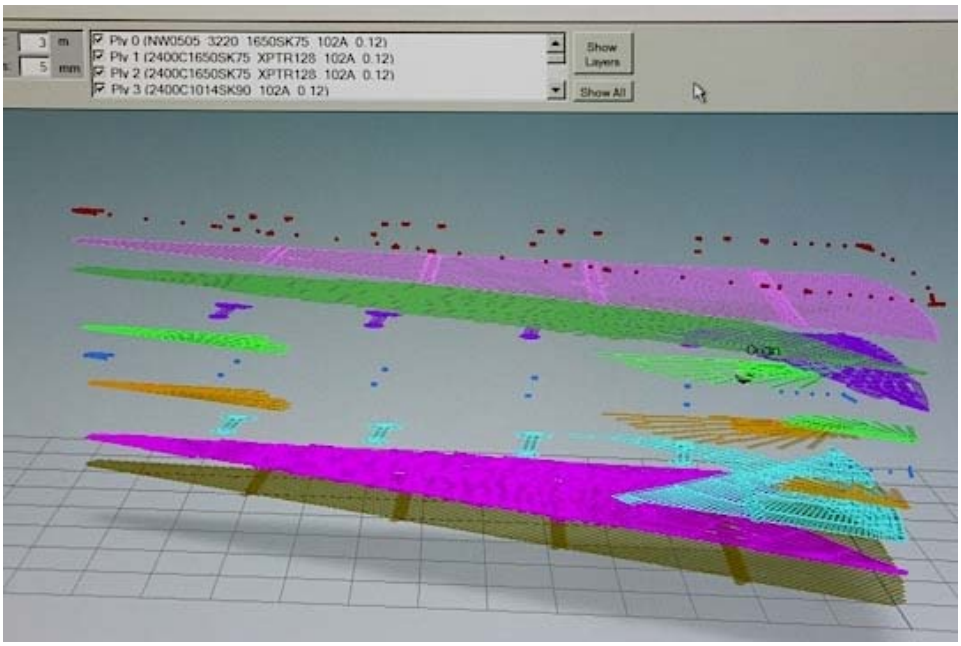


Ilustración 148: las diferentes capas de cinta.

Existen muchas ventajas en construir las velas de esta manera. Por una parte se obtienen velas más rígidas que mantienen mejor su forma y son estables en todas las direcciones. Además las fibras individuales no absorben agua. Todas las velas que llevan hilos de fibra en la dirección de la tensión tienden a absorber agua por capilaridad.

Después de que las velas se hayan consolidado y endurecido se rematan en el suelo de la velería. Como los refuerzos y las fundas de sables ya están integrados en la vela éstas requieren menos trabajo de acabados.



Ilustración 149: 3Di acabada para el Puma.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Proyectar para el mar. Arturo Catalá Benet
- Veleros. Flavio Serafini. H KLICZKOWSKI
- Aluminium Boatbuilding. Ernest H Sims.
- Historia y evolución de los yates de regata. Franco Giorgetti. Libsa
- Las Velas. Dick Kenny. Pirámide
- La carpintería de ribera en Galicia (1940-2000). José Mª de Juan García Aguado. Publicación universidad de Cataluña.
- www.futurefibers.com
- www.northsails.com
- www.quantumsails.com
- Las velas. Estudio de materiales y nuevas metodologías para hacer un velero sostenible. PFC: Ingenieria Técnica Naval. Neide Hidalgo Sales
- www.fondear.com
- Proceso de cálculo, diseño y construcción de una embarcación menor. Proyecto final de carrera. Jordi Torralbo Gavilán.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutor D. Isidoro José Martínez Mateo por su tiempo y colaboración es este proyecto.

También agradecérselo a todos mis compañeros con los que he pasado estos años de mi vida estudiando esta carrera y me han apoyado en todo momento, Miguel Alberola Oltra, Sandra Boo Tarazona, Daniel Graham Wood, Francisco Martínez Carrasquer, Pablo Martínez Sánchez, Manuel Pérez Gímenez y Libertad Soro Pérez.