

**UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO /
EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y
MÁQUINAS NAVALES**

GRADO EN MARINA



**Diseño en 3D, análisis hidrodinámico y cálculo del
escantillonado de una embarcación de 24 metros de
eslora fabricada con materiales compuestos**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

SEPTIEMBRE-2015

AUTORA: LORENA FOLCIA DEL CAMPO

DIRECTOR: ALBERTO LÓPEZ ARRAIZA

*Diseño en 3D, análisis hidrodinámico y cálculo del escantillonado de una embarcación de
24 metros de eslora fabricada con materiales compuestos*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. Normativa.....	3
2.2. Materiales compuestos.....	3
2.3. Herramientas informáticas.....	8
3. OBJETIVOS.....	11
4. MATERIALES Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO.....	13
4.1. Materiales utilizados.....	13
4.2. Herramientas de diseño.....	16
5. DESARROLLO.....	19
5.1. Diseño 3D y obtención de datos hidrostáticos.....	19
5.1.1. Modelado 3D mediante Rhinoceros.....	19
5.1.2. Cálculo de datos hidrostáticos.....	26
5.2. Cálculo del escantillonado según Norma ISO 12215-5.....	29
5.2.1. Escantillonado de los paneles.....	31
5.2.1.1. División de paneles.....	32
5.2.1.2. Cálculo de ajustes de presión.....	35
5.2.1.3. Cálculo de espesores de los paneles.....	42
5.2.2. Escantillonado de los refuerzos.....	53
5.2.2.1. Cálculo de factores de ajuste de los refuerzos.....	54

5.2.2.2. Cálculo de dimensiones de los refuerzos.....	60
5.3. Resistencia al avance.....	63
6. CONCLUSIONES.....	69
7. BIBLIOGRAFÍA.....	71
8. ANEXOS.....	75

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se desarrolla el procedimiento de diseño en 3D de una embarcación de eslora menor de 24 metros y la posterior determinación de su escantillonado siguiendo las indicaciones de la norma internacional **ISO 12215** para la construcción de cascos y escantillones de pequeñas embarcaciones.

Por otro lado, se analizarán las ventajas y desventajas de la construcción del casco de un velero con fibra de vidrio y fibra natural de lino. Se tendrán en cuenta todos los factores que influyan en la viabilidad del proyecto, desde el coste de ambos materiales dependiendo de la cantidad que se pudiera precisar de cada uno hasta su fin de vida y la sostenibilidad medioambiental de los materiales.

Para llevar a cabo el diseño 3D a partir de los planos 2D de la embarcación se ha utilizado el software Rhinoceros. Por último, los cálculos hidrostáticos, hidrodinámicos y el comportamiento en la mar se han estudiado con el programa Maxsurf, ampliamente utilizado en el sector naval.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Normativa

La normativa que se ha utilizado para el cálculo de presiones y la determinación del escantillonado de la embarcación en cuestión es la ISO 12215-5:2008: Pequeñas embarcaciones, construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón (Anexo 5). El objeto de esta parte de la Norma ISO 12215 es conseguir una resistencia estructural global que asegure la integridad de la embarcación tanto en su estanqueidad al agua como a la intemperie. Esta norma basa los requisitos del escantillonado principalmente en la obtención de una adecuada resistencia local, sin tener en cuenta las exigencias de funcionamiento tales como estabilidad, deformaciones bajo cargas de funcionamiento o la resistencia global [1].

A pesar de que existen otras normativas que regulan el mismo tipo de diseños, como por ejemplo las propias de las Sociedades de Clasificación como Lloyd's Register (Special Service Craft Regulations [2]) o DNV (Rules for High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft [3]), se ha decidido basar el proyecto en la normativa ISO debido a su carácter internacional, que hace de sus normas un estándar de referencia.

2.2. Materiales compuestos

La razón principal por la que se han tenido en cuenta los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras para la hipotética construcción del casco de la embarcación es el crecimiento constante que éstos han experimentado en la industria naval desde la década de los cuarenta. A pesar de que la construcción de este tipo de embarcaciones ha sido tradicionalmente de madera o de materiales metálicos como acero o bronce, las múltiples ventajas que ofrecen los composites han supuesto un incentivo para hacer de éstos una opción a tener en cuenta [4, 5].

El material compuesto se define como “combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa, debido a lo cual son heterogéneos” [6].

Aunque este tipo de materiales se utilizan desde hace siglos, su aplicación en el ámbito marino es relativamente una novedad. Las propiedades que éstos son capaces de ofrecer han supuesto el comienzo de un proceso de reemplazo de los materiales metálicos tradicionales por los materiales compuestos reforzados con fibras en diferentes industrias, entre ellas la naval. [7]

En general, estos materiales se componen de dos elementos, por una parte la matriz y por otra el refuerzo (Figura 1)

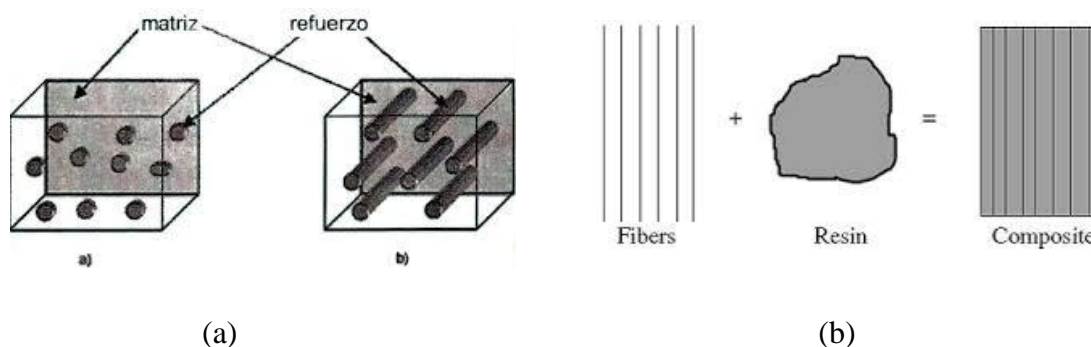


Figura1. Esquemas matriz/refuerzo [8, 9]

La característica más importante de estos materiales reside en que un componente conforma una matriz que envuelve el refuerzo de forma que ambos materiales trabajen como uno solo, pero ambos seguirán manteniendo sus formatos originales por separado.

La **matriz** es el aglutinante de las fibras de los refuerzos y es comúnmente llamada resina. Existen diversos tipos de matrices (metálicas, cerámicas, poliméricas...), pero las que más se adecúan al ámbito de las embarcaciones son las matrices poliméricas, debido a sus

propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión y agentes químicos, además de su absoluta libertad para el moldeo [10].

La matriz es, generalmente, líquida en un comienzo, aunque luego pasa a solidificarse y a mantener la forma final o aquella que había sido adquirida previamente del molde utilizado. Existen varios procesos de solidificación de la matriz una vez aglutinada a su refuerzo (moldeo por contacto, por vacío o por vía líquida), sin embargo, para que esa resina se pueda solidificar en un periodo de tiempo fijo, es necesario acelerar la reacción química. Esto se efectúa mediante el empleo de un catalizador, que puede resultar extremadamente tóxico, reactivo e incluso muy volátil [11].

A pesar de que la mayoría de las resinas que conforman estos materiales están compuestas por materiales derivados del petróleo, también existen otras no tan utilizadas resinas de origen vegetal [10].

Los materiales compuestos pueden clasificarse según el tipo de **refuerzo** en tres diferentes grupos: materiales compuestos reforzados con partículas, reforzados con fibras y materiales estructurales tipo sandwich.

En este caso se analizará la viabilidad del escantillonado con un material compuesto reforzado con dos tipos de fibras. Las fibras son las responsables de las propiedades estructurales del composite. Sobre todo logran que el material tenga unas elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal [12].

Las características de las fibras de refuerzo que se estudiarán se explican a continuación:

- **Refuerzo de fibra de vidrio:** La fibra de vidrio es una fibra mineral producida artificialmente a partir de vidrio, desarrollada por primera vez en la década de 1920. Se trata de una base de resina generalmente de poliéster sobre la cual se unen hebras muy finas de vidrio tejidas entre sí (Figura 2).



Figura 2. Bobinas de fibra de vidrio [13]

Existen diferentes tipos de fibra de vidrio pero la que se aplica en el mundo naval es la fibra de vidrio E (eléctrico), que posee una buena resistencia a la humedad. En general, las principales propiedades de la fibra de vidrio son [4]:

- Excelente resistencia mecánica específica.
- Resistencia a la humedad.
- Resistencia al ataque de agentes químicos (ácidos).
- Buenas propiedades como aislante eléctrico.
- Débil conductividad térmica.
- Buena estabilidad dimensional.
- Bajo alargamiento.
- Propiedades isotrópicas.
- Excelente adherencia a la matriz.

El mayor inconveniente de este tipo de composites es su “fin de vida”, ya que pasado un periodo determinado de tiempo, el material genera un residuo muy difícil de reciclar, y por lo tanto poco sostenible. Además las fibras de vidrio están conformadas por componentes principalmente derivados del petróleo, un recurso natural no renovable [14].

- **Refuerzo de fibra natural:** se está realizando un esfuerzo importante a nivel científico e industrial para introducir materiales medioambientalmente más sostenibles como las resinas y fibras naturales [15]. La estructura de este tipo de composites es la misma que se utiliza en los materiales compuestos de fibra de vidrio, sin embargo en este caso las fibras que refuerzan la matriz son de origen natural. Estos denominados “biocomposites” pueden tener origen mineral, animal o vegetal. Este último es el más utilizado en la industria de materiales y estructuras. Esta posibilidad de reforzar matrices poliméricas con fibras naturales ha sido analizada como una opción potencial para reemplazar a los refuerzos sintéticos, los cuales resultan mucho más contaminantes para el entorno. Las propiedades mecánicas que ofrecen los composites de fibra natural son muy similares a las sintéticas y en comparación con éstas, más ligeras (suponen una reducción de peso del 30%), económicas (en general resultan un 20% más económicas) y menos abrasivas a la hora de procesar. Todo ello hace de éstas una opción muy interesante a tener en cuenta.[16]

La característica más importante y atractiva de este tipo de fibras es que son de origen natural y por lo tanto son ecológicas y son reciclables en su totalidad o su mayoría dependiendo de la matriz de resina utilizada. Ello supone que hoy en día, dada la tendencia a buscar materiales y procesos de fabricación respetuosos con el medio ambiente, las fibras de celulosa tengan oportunidades de competir en el mercado con otras fibras de origen sintético [17].

En este caso, se utilizarán los datos de una fibra natural de lino (Figura 3) para el escantillonado de la embarcación en cuestión. Es de origen vegetal y ofrece, entre otras características, una alta durabilidad y resistencia a la abrasión.



Figura 3. Fibra natural de lino [18]

2.3. Herramientas informáticas

En cuanto a los recursos informáticos utilizados para este proyecto, tanto el diseño del casco como la obtención de los datos hidrodinámicos del mismo se han obtenido mediante programas comúnmente utilizados en el sector naval.

Por un lado, el software elegido para modelar los planos 2D en 3D es el Rhinoceros 3D. Se trata de una herramienta que permite modelar todo tipo de elementos con total libertad de forma y tamaño, basándose en la obtención de superficies NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) para desarrollar diferentes sólidos y redes 3D [19].

Existen otros muchos programas similares para el modelaje en 3D como AutoCAD, Catia, Solid Edge o Revit, muchos de los cuales ofrecen herramientas específicas para su uso en el modelaje naval. Entre todas las posibilidades, Rhinoceros supone una herramienta sencilla, tanto para su aprendizaje como para su uso comparado con otros programas, y eficaz, ya que ofrece numerosas opciones de formato que hacen las estructuras creadas compatibles con otros programas y de este modo hacer el análisis o la animación de éstas más sencillo.

En cuanto a la obtención de datos hidrodinámicos y la comprobación del comportamiento del casco diseñado en la mar, se ha hecho uso del programa informático Maxsurf, el cual proporciona diversas herramientas de software para todas las fases del diseño del barco y su análisis de comportamiento en la mar, mediante diferentes sub-programas [20].

Hay otros programas similares para la realización de análisis hidrostáticos e hidrodinámicos de todo tipo de embarcaciones como por ejemplo Foram o Autoship. Sin embargo, Maxsurf y todos los programas que ofrece sí posiciona entre los más comúnmente utilizados. Su versatilidad, relativo fácil manejo y numerosas posibilidades de análisis han supuesto un crecimiento del interés en este software en la industria naval en general. Para este proyecto en concreto se ha decidido utilizar esta herramienta debido a la experiencia previa de la que se disponía por su utilización para proyectos de la asignatura de Oficina Técnica (3º Grado en Marina). Mediante dichos proyectos se comprobaron las amplias posibilidades que el programa ofrece y su rápido proceso de aprendizaje.

3. OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Calcular el escantillonado de los paneles de una embarcación de eslora $L < 24\text{m}$ de acuerdo a la norma internacional ISO 12215-5.
- Comprobar las diferencias que suponen la construcción del casco en fibra de vidrio y fibra natural de lino.
- Analizar las ventajas y desventajas de la construcción de un casco en diferentes materiales.
- Valerse del programa informático Rhinoceros para el diseño en 3D de la embarcación
- Utilizar el programa informático Maxsurf para los cálculos hidrostáticos, hidrodinámicos y el comportamiento en la mar de la embarcación.

4. MATERIALES Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO

4.1. Materiales utilizados

Para el cálculo del escantillonado se han tenido en cuenta dos fibras de refuerzo para los laminados:

Por un lado fibras de vidrio (E) tipo mat (Figura 4) con un gramaje de 600 g/m^2 . La fibra tipo E imparte a los laminados excelente resistencia mecánica, buenas propiedades de aislamiento eléctrico y larga durabilidad. Sus propiedades mecánicas se presentan en la Tabla 1.

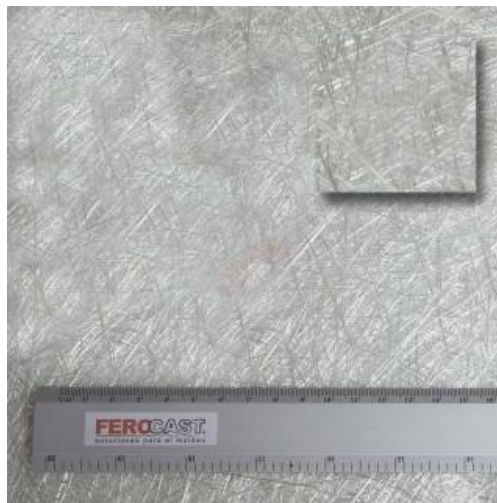


Figura 4. Fibra de vidrio tipo mat de gramaje 600 g/m^2 [21]

Tabla 1. Propiedades mecánicas del vidrio (E) [4]

Propiedad	valor
Densidad (g/cm ³)	2,6
Resistencia a la tracción (GPa)	3,4-3,5
Módulo de elasticidad E (GPa)	72-73
Elongación a la rotura (%)	3,3-4,8

El tejido de lino trenzado que se ha utilizado es bidireccional (0/90°) balanceado (Figura xx), con un gramaje de 300g/m² y suministrado por la empresa belga LINEO. Las propiedades mecánicas del tejido se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra natural de lino [22]

Propiedad	valor
Densidad (g/cm ³)	1,4
Resistencia a la tracción (MN/m ²)	800-1500
Módulo de elasticidad E (GPa)	60-80
E específico (E/Dens)	43-57
Elongación a la rotura (%)	1,2-1,6
Absorción de Humedad (%)	7

Se ha utilizado en este trabajo una resina bioepoxi de dos componentes: la resina SUPER SAP® CLR Epoxy y el endurecedor SUPER SAP® INF02;, suministrada por la compañía EntropyResins Inc. La relación de curado es de 100:33 partes en peso. A diferencia de las resinas tradicionales tipo epoxy que se componen principalmente de materiales derivados del petróleo, esta resina se obtiene de materiales renovables que son subproducto de procesos industriales tales como la pulpa de madera y la producción de biofuel.

Tabla 3. Propiedades físicas de la resina Super Sap® CLR epoxy [23]

Propiedad	Valor
Apariencia	Amarillo claro
Viscosidad (Pa-s @ 25 °C)	2-4
Densidad (gravedad especifica @ 25 °C agua=1)	1.17
Contenido de Carbono (ASTM D6866)	18,2% - 25,4%
Contenido masa	30,8% - 45,2%

Las propiedades mecánicas expuestas en la Tabla 3 se consiguen cuando se aplica un ciclo de curado de 24 horas a una temperatura de 25°C y postcurado de 50 °C durante 2 horas.

4.2. Herramientas de diseño

Tal y como se ha mencionado anteriormente, los programas que se han decidido utilizar para el modelado en 3D del buque y su posterior análisis hidrostático y simulación de comportamiento en la mar son los citados a continuación.

- Rhinoceros ®:



Figura 5. Logo de Rhinoceros® [19]

Rhinoceros (Figura 5) es una herramienta de software para el modelado en 3D basado en el modelo matemático de generación y representación de curvas “NURBS” (Non-Uniform Rational B-Spline), creado por Robert McNeel & Associates.

Es un programa muy comúnmente utilizado para el diseño estructural en diferentes industrias, entre ellas la naval. Ello se debe a, entre otros factores, sus múltiples funciones, diversidad y relativo bajo coste. Además da la opción de operar con una gran variedad de formatos, le permite operar como una herramienta de conversión, permitiendo romper las barreras de compatibilidad entre programas durante el desarrollo del diseño.

En este caso en concreto se ha decidido utilizar este programa debido, sobre todo, a su relativamente fácil manejo y rápido aprendizaje, y a la compatibilidad en cuanto a formatos con los demás programas a utilizar.

- Maxsurf



Figura 6. Logo de Bentley Engineering [20]

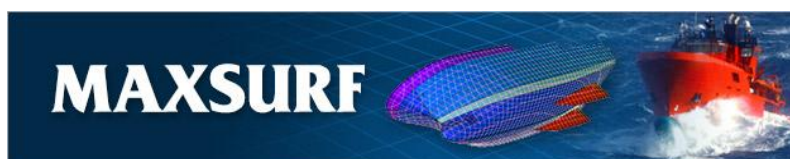


Figura 7. Logo de Maxsurf [20]

Se trata de una serie de programas desarrollados por el grupo Bentley Engineering (Figuras 6 y 7), que ofrecen herramientas altamente especializadas para modelar cascos, apéndices y superestructuras usando superficies NURBS trimadas. También incluyen herramientas de transformación paramétricas y análisis instantáneos de cálculos hidrostáticos y evaluación de curvaturas.

En relación con el velero que se va a tratar, se ha hecho uso de varios de los programas que ofrece el paquete Maxsurf. Por un lado, Maxsurf Modeller se ha utilizado para la importación de la embarcación en formato .IGES desde Rhinoceros y el análisis hidrostático de datos en la línea de flotación.

Por otro lado, el análisis de la resistencia al avance y la potencia efectiva necesaria del velero se han llevado a cabo mediante Maxsurf Resistance el cual utilizando algoritmos basados en estándares internacionales ofrece numerosos métodos de cálculo para la estimación de este tipo de requerimientos para todo tipo de embarcaciones [24].

Se ha elegido este programa teniendo en cuenta que es uno de los más completos y de creciente uso en las Oficinas técnicas especializadas, ya que ofrece numerosas opciones para diseñar, calcular, analizar y modificar estructuras navales.

5. DESARROLLO

5.1 Diseño 3D y obtención de datos hidrostáticos

En este apartado se desarrolla el proceso del modelado en 3D partiendo de los planos en 2D del velero utilizando el programa Rhinoceros y su posterior análisis hidrostáticos mediante el programa Maxsurf.

Los planos 2D del velero han sido facilitados por la Fundación Ingeniero Jorge Juan y se presentan en el Anexo 1.

5.1.1. Modelado 3D mediante Rhinoceros

Seguidamente se describe el proceso que se ha seguido para el modelaje de la embarcación.

Al abrir el programa, el aspecto inicial de la pantalla es el que se muestra en la Figura 8.

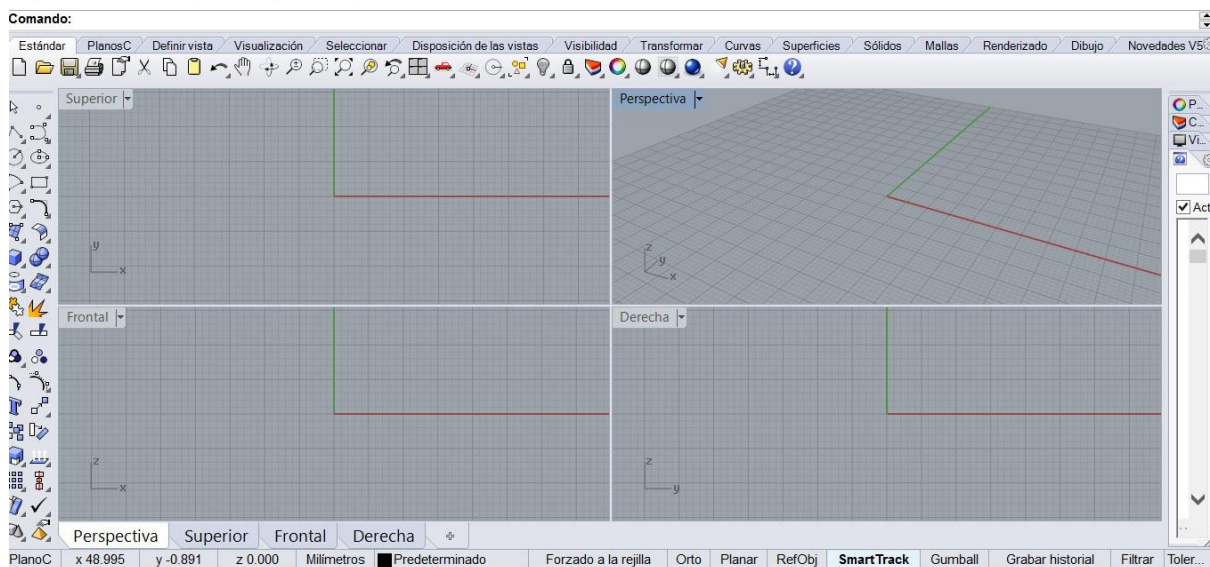


Figura 8. Pantalla principal de Rhinoceros

El programa ofrece un plano en 3D con diferentes vistas que se presentan en diferentes ventanas: superior, frontal, perfil y perspectiva.

Para comenzar con el modelado del velero, debe insertarse la imagen de los planos en 2D en la vista superior del plano de Rhinoceros. Se calcarán las líneas sobre el plano para después posicionarlas y crear una malla que de lugar a una superficie.

A pesar de que lo más común es insertar las diferentes perspectivas del plano en las vistas que les corresponda en el programa, se ha optado por copiar una sola imagen del plano en una única vista y después desplazar las líneas calcadas a su posición real. Se ha decidido hacerlo de este modo porque en caso de que los planos no se alinearan correctamente, cualquier error de pocos milímetros podría suponer que la malla que se pretende crear tenga discontinuidades.

Una vez posicionados los planos, deben calcarse las cuadernas y líneas de agua sobre cada una de las vistas con la mayor precisión posible. Para ello se generarán puntos por encima de las líneas del plano, que se denominarán “puntos de control”, por los cuales pasarán las líneas calcadas que se pretenden crear, generadas mediante la opción de *Curva de puntos de control* (Figura 9).

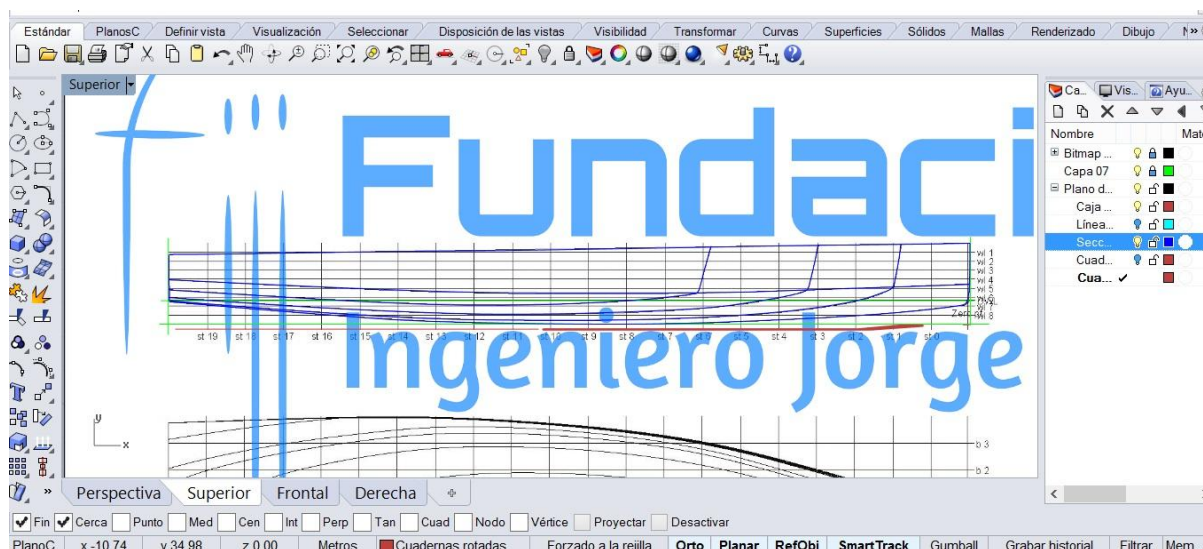


Figura 9. Ejemplo de calcado de las líneas de agua

Asimismo, como referencia para el posicionamiento de las cuadernas, se dibujarán líneas verticales en la vista superior a lo largo de la eslora total del barco que señalen la posición de las cuadernas y se dibujará la denominada “caja de cuadernas”, que marcará los límites de la embarcación en proa, popa y banda.

Una vez terminado el calcado, se deben posicionar las cuadernas. Para ello se utilizarán las marcas de posición y la caja de cuadernas como referencia. Primero se desplazarán de la vista de perfil a la frontal mediante el comando *Mover* para conseguir una disposición como la que se muestra en la Figura 10.

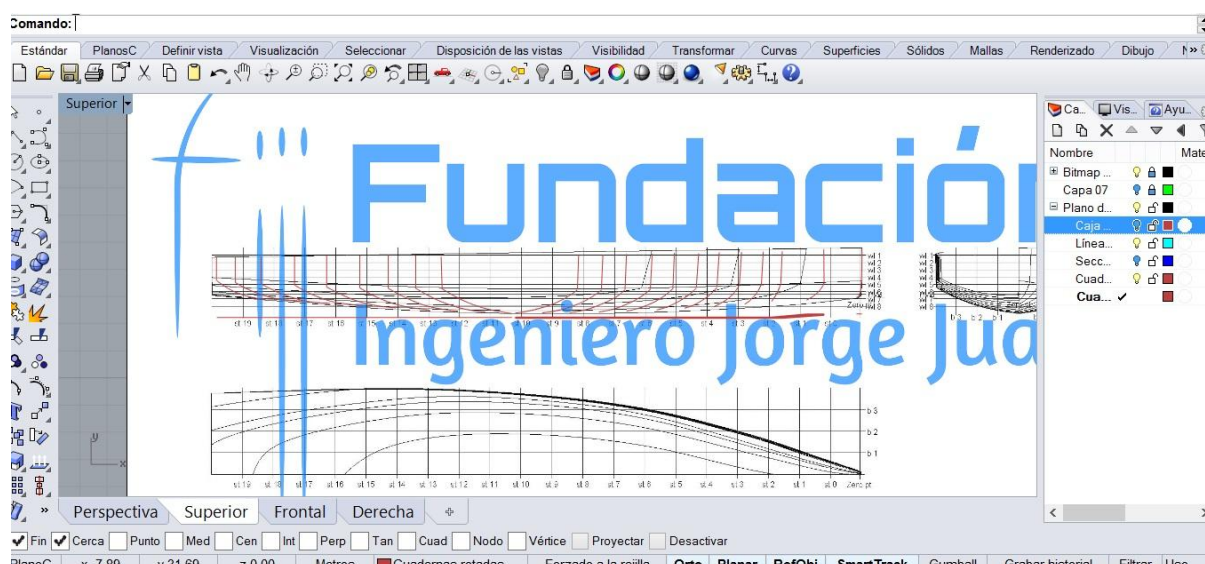


Figura 10. Cuadernas del perfil movidas a la vista frontal

Una vez desplazadas las cuadernas deben rotarse para posicionarlas. Para ello se utilizará el comando *Rotar* dos veces por cuaderna; la primera 90° respecto del eje x y la segunda 90° respecto del eje y.

El aspecto general de la estructura una vez rotadas las cuadernas es el que se muestra en la Figura 11.

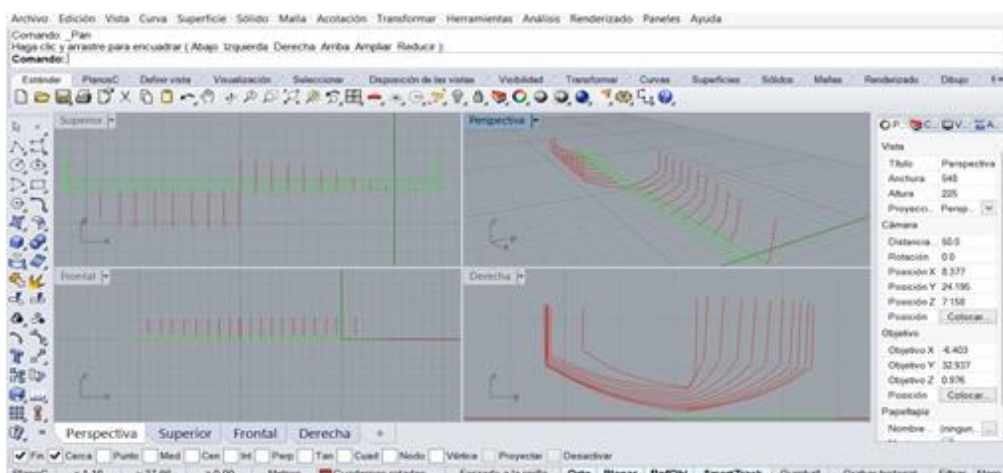


Figura 11. Cuadernas desplazadas y rotadas

Será necesario rotar de nuevo las cuadernas de la mitad de popa para conseguir todas las correspondientes a una de las bandas del barco.

A partir de la red de curvas (cuadernas) en 3D que definen el semicasco del velero se crea una superficie NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) utilizando el comando *Loft/Transición*. Se trata básicamente de un método matemático para definir curvas, superficies y sólidos muy utilizado para la representación de figuras geométricas en 3D.

Se creará en primer lugar la superficie del fondo (Figura 12) y después la del costado de modo que resulte más sencillo para el programa comprender la orden. Si se intentara obtener el semicasco completo a la vez el programa podría interpretar la orden de manera errónea y unir puntos que no debería.

Diseño en 3D, análisis hidrodinámico y cálculo del escantillonado de una embarcación de 24 metros de eslora fabricada con materiales compuestos

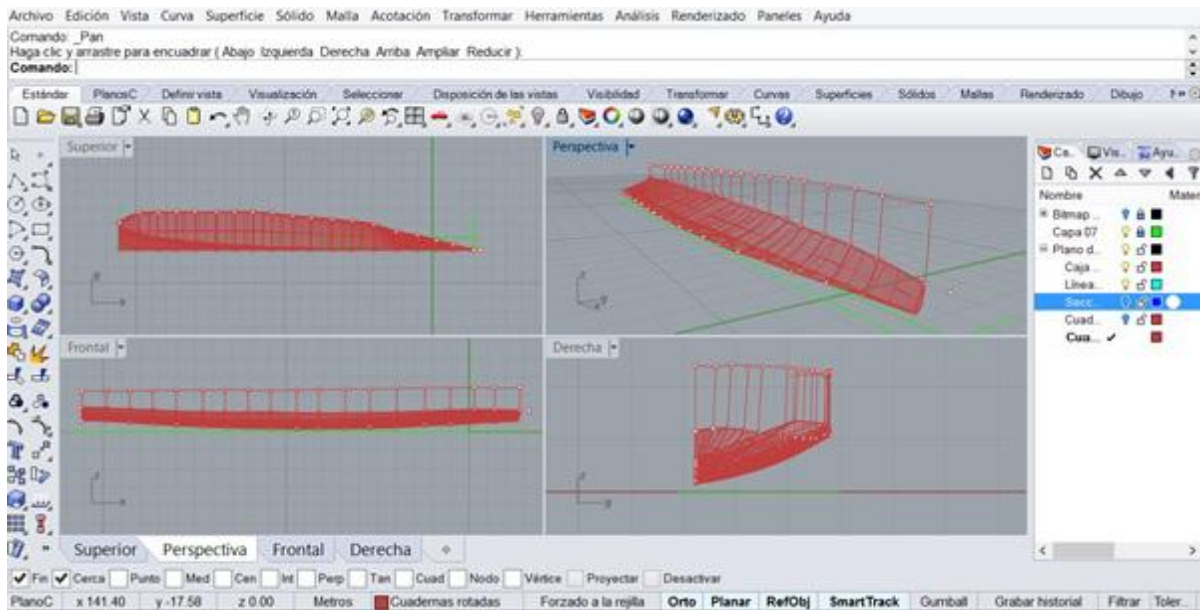


Figura 12.Red de curvas de fondo

Una vez generada la superficie del fondo, debe generarse la del costado del casco. El aspecto del semicasco entonces debería ser el que se muestra en la Figura 13.

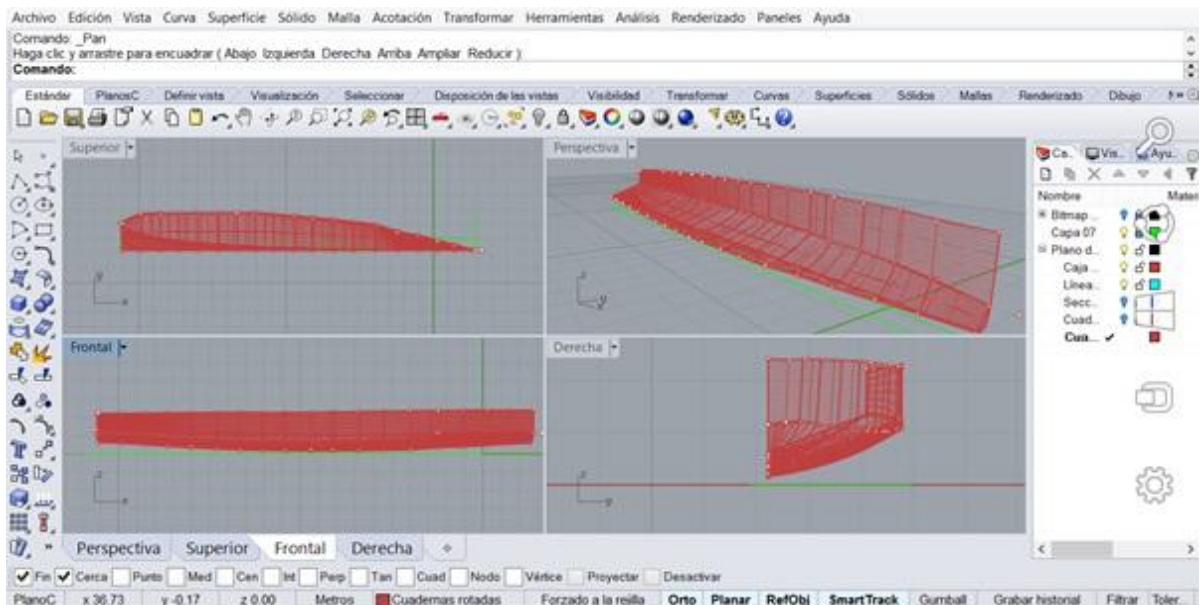


Figura 13.Red de curvas de la banda completa de babor.

Ya que el casco es simétrico, para generar la estructura completa se debe copiar por simetría el semicasco mediante el comando *Mirror/Espejo* (Figura 14).

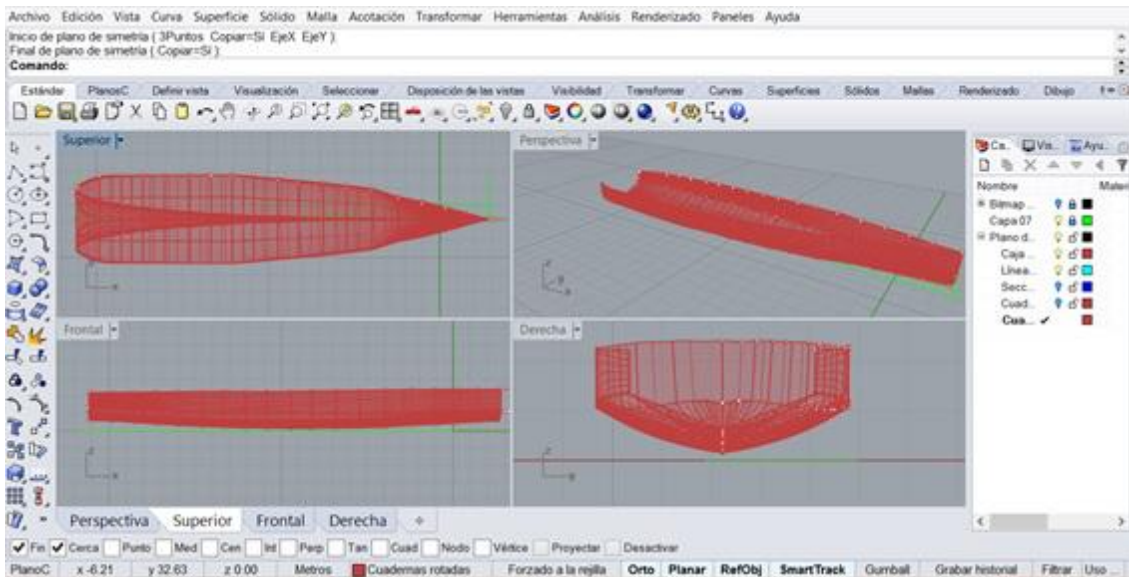


Figura 14. Bandas de babor y estribor completas

Asimismo para crear la popa del barco se ha utilizado de nuevo el comando de transición para generar una quinta superficie (Figura 15).

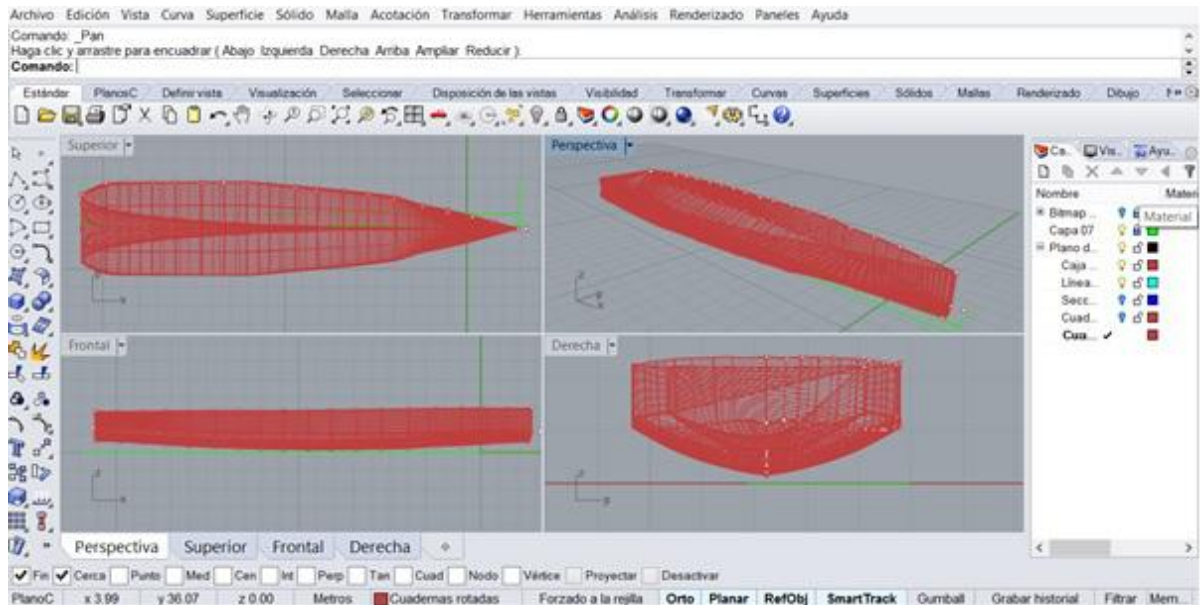


Figura 15. Popa cerrada del casco

Por último, dado que se han creado por separado, las diferentes secciones que conforman el casco deben unirse para que no quede ninguna discontinuidad que pudiera afectar a la hidrodinámica del buque. Para ello se utilizará el comando *Join/Unir*.

El aspecto del casco una vez finalizado es el que se muestra en la Figura 16.

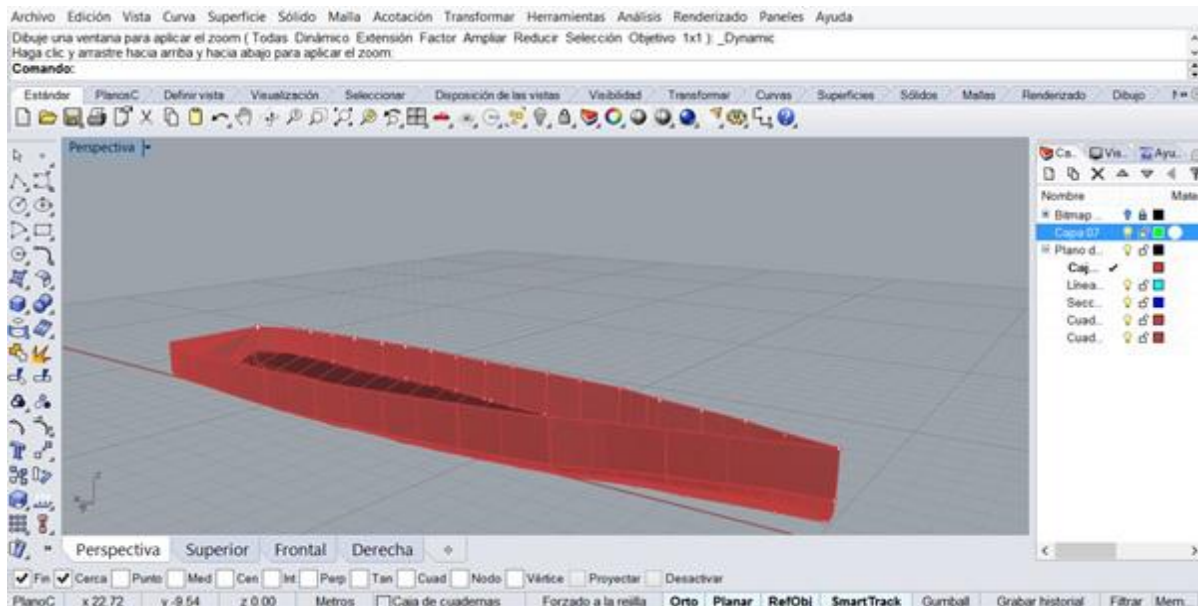


Figura 16. Casco completo del velero

5.1.2. Cálculo de datos hidrostáticos

Como ya se ha comentado, se ha utilizado el programa informático Maxsurf para obtener los datos necesarios para el posterior cálculo del escantillonado.

Más concretamente se ha utilizado el programa Maxsurf Modeller, el cual admite todo tipo de formatos de superficies NURBS y ofrece numerosas opciones para manipular y modificar estructuras navales y realizar análisis y obtener datos de éstas.

Se ha comenzado por importar al programa la estructura del velero modelada en Rhinoceros en un formato soportable para el programa mediante la opción *Import>IGES Surfaces*.

Se ha tenido que modificar la posición del casco dentro del plano de Rhinoceros y posicionar su proa encima del punto (0,0,0) del plano de modo que resultara más sencillo para el programa Maxsurf reconocer la estructura.

Una vez importado el modelo en el programa, se ha marcado la línea de flotación (Figura 17). Para ello se ha utilizado la opción *Data > Frame of Reference*. Primero se ha situado la línea “cero” del velero a la altura del punto más bajo del casco. Tomando esa línea como referencia se ha posicionado la línea de flotación a 0,7 metros de ésta, tal y como indican los planos del casco.

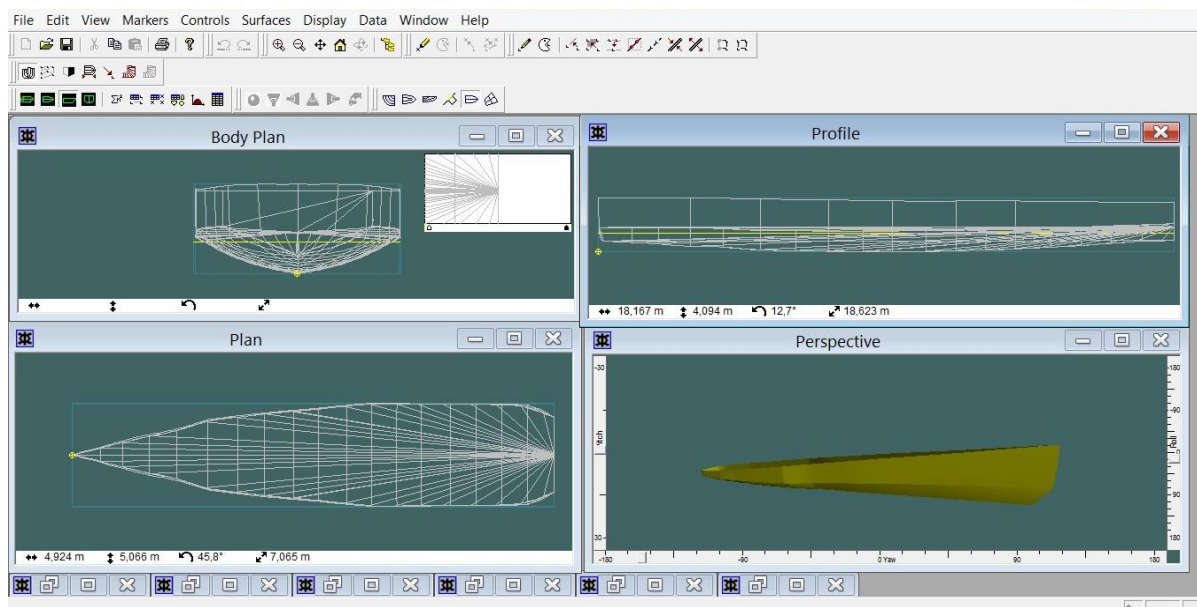


Figura 17. Casco en Maxsurf con la línea de flotación establecida

Posteriormente se ha utilizado la opción *Data > Calculate Hidrostatics* para obtener los datos relativos a la línea de flotación del velero. El programa ofrece en una ventana todos los resultados que es capaz de obtener (Tabla 4).

Tabla 4. Datos de la línea de flotación obtenidos con Maxsurf

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	13,232	tonne
2	Volume	12,909	m ³
3	Draft to Baseline	0,7	m
4	Immersed depth	0,699	m
5	Lwl	23,835	m
6	Beam wl	4,387	m
7	WSA	-1,810	m ²
8	Max cross sect a	1,835	m ²
9	Waterplane area	32,706	m ²
10	Cp	0,295	
11	Cb	0,182	
12	Cm	0,635	
13	Cwp	0,323	
14	LCB from zero pt	13,389	m
15	LCF from zero pt	13,396	m
16	KB	0,459	m
17	KG	0	m
18	BMt	3,033	m
19	BMI	97,32	m
20	GMt	3,491	m
21	GMI	97,779	m
22	KMt	3,491	m
23	KMI	97,779	m
24	Immersion (TPc)	0,335	tonne/c
25	MTc	0	tonne.m
26	RM at 1deg = G	0,806	tonne.m
27	Precision	Medium	50 statio

Mediante esta herramienta se han obtenido los datos básicos del velero que se aplicarán en las fórmulas necesarias para el cálculo de su escantillonado.

5.2 Cálculo del escantillado según Norma ISO 12215-5

Como ya se ha mencionado, la norma aplicada para el cálculo del escantillado del velero es la ISO 12215-5.

Antes de comenzar con cualquier cálculo, es necesario comprobar que el velero sobre el que se está trabajando cumple los límites de aplicación que establece la norma, que se presentan a continuación:

- La eslora de la embarcación ha de estar comprendida entre 2,5 y 24 m.
- La embarcación debe ser monocasco y construida con plástico reforzado con fibras, madera encolada o de cualquier otro material conveniente para la construcción de embarcaciones de eslora de un casco.
- La velocidad de la embarcación no puede ser superior a 50 nudos.

El velero seleccionado cumple todos los límites establecidos por la norma, por lo tanto es aplicable a este caso.

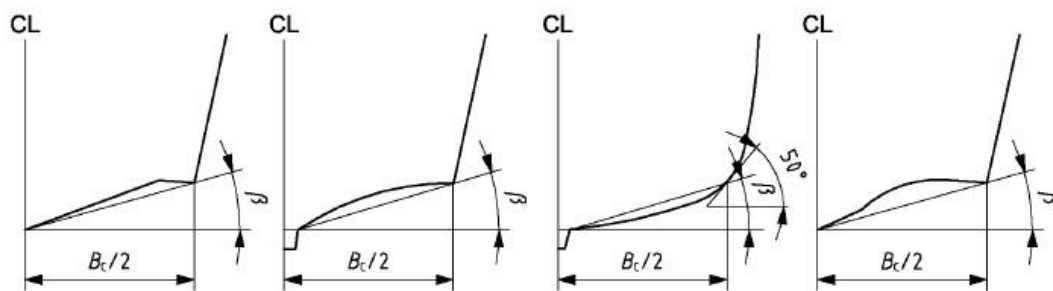
Las características principales de la embarcación se presentan a continuación:

- Eslora del casco $L_H = 24$ m
- Manga máxima del casco $B_H = 5,2$ m
- Calado $D = 0.7$ m
- Eslora en flotación $L_{WL} = 23.83$ m
- Masa del desplazamiento en plena carga de la embarcación $m_{LDC} = 13.23$ T

Los datos que no se han podido obtener en Maxsurf han tenido que ser calculados de acuerdo a la norma:

- Cálculo de $\beta_{0,4}$

$\beta_{0,4}$ es el semiángulo del diedro del fondo a $0.4 L_{WL}$ a proa de su extremo de popa y debe calcularse de acuerdo a la Figura 18, dependiendo de la estructura del casco, estando siempre entre 10° y 30° .



NOTA Para los cascos con formas, se considera que el límite exterior del casco es el punto de tangencia entre el costado y una línea recta inclinada 50° con respecto a la horizontal.

Figura 18. Esquema del pantoque del velero [1]

Cabe mencionar que debido a la forma del casco se ha tenido que trazar una línea tangente a éste que forme 50° con la línea horizontal de referencia para hallar el punto que indica el límite exterior del casco, tal y como dicta la norma.

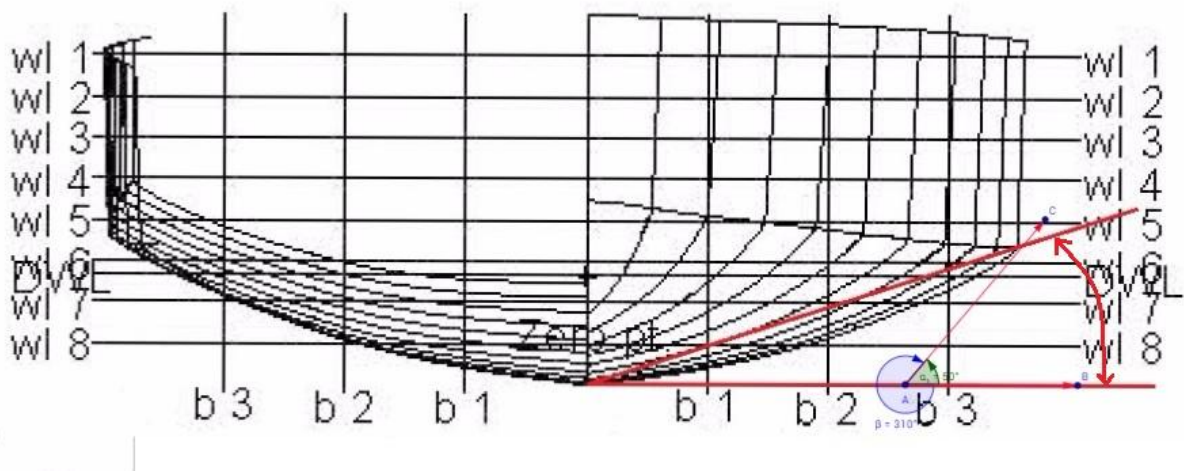


Figura 19. Obtención de $\beta_{0,4}$ [1]

La Figura 19 muestra el ángulo obtenido, cuyo valor ha sido $\beta_{0,4} = 18^\circ$.

- Cálculo de la manga en el pantoque, B_C ,

B_C es la manga en el pantoque a $0,4 L_{WL}$ a proa de su extremo de popa y se ha calculado de acuerdo a la Figura 18 y utilizando Rhinoceros, señalando la posición de $0,4 L_{WL}$ y calculando la manga mediante el comando *Distancia*.

El valor obtenido es $B_C = 4,36$ m.

5.2.1. Escantillonado de los paneles

El procedimiento a seguir para el **escantillonado de los paneles** de la embarcación en cuestión será el siguiente:

1º- Tal y como dicta la normativa, se dividirá el barco en diferentes secciones: cubierta, fondo y costado. Cada una de las tres secciones se dividirá en diferentes paneles que soportarán distintas presiones según factores como sus dimensiones o posición.

2º- Se calcularán las presiones que afectan a cada zona del barco para después, mediante las fórmulas facilitadas en la norma, poder obtener el espesor que corresponda a cada sección.

Para ese cálculo de presiones, se deben antes calcular los llamados “ajustes de la presión”. Son factores que varían el resultado dependiendo de las características de la embarcación.

3º- Para finalizar, se utilizarán los datos característicos de los dos tipos de fibras elegidos (fibra de vidrio y fibra natural de lino) para calcular mediante las fórmulas dadas por la normativa el espesor óptimo de los paneles.

5.2.1.1. División de paneles

La división entre cubierta, costado y fondo se muestra a continuación (Figuras 20 – 22):

En primer lugar, la mitad de la **cubierta** cuyas dimensiones se utilizarán para el cálculo de presiones es el que se resalta en color amarillo en la vista superior del casco en la Figura 20.

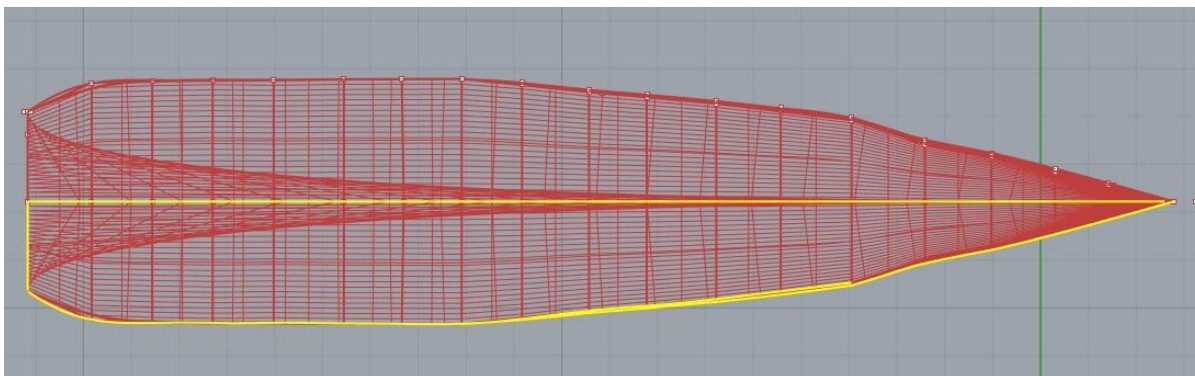


Figura 20. Mitad de la zona de cubierta

Por otro lado, la zona de **costado** se resalta en la Figura 21 de la vista frontal del casco del velero:

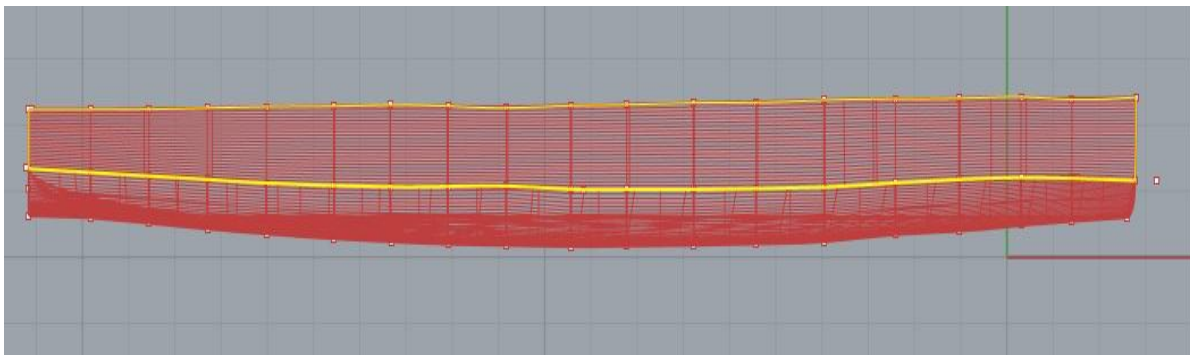


Figura 21. Zona de costado del casco

Por último, en la Figura 22 se resalta la zona del **fondo** del casco:

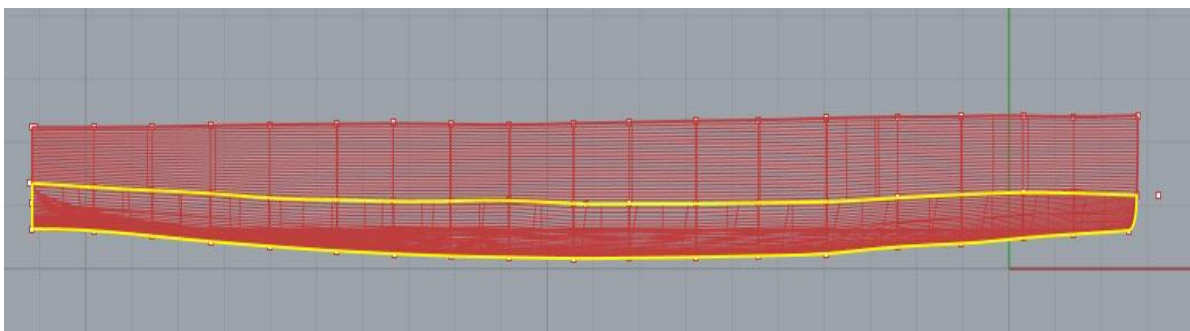


Figura 22. Zona del fondo del casco

Tal y como se ha comentado, una vez diferenciadas las tres zonas del casco, se ha dividido cada una en varios paneles para realizar posteriormente el cálculo de presiones.

Para que los cálculos sean más sencillos se ha optado por dividir la eslora de $L= 24\text{m}$ en cinco bloques de $x=4,8\text{ m}$ cada uno y de modo que dentro de cada división haya un panel de cubierta, uno de costado y uno de fondo.

Es necesario aclarar, que dada la forma del casco ninguno de los paneles será perfectamente rectangular, la norma establece que los paneles no rectangulares deben evaluarse con ayuda de paneles rectangulares equivalentes. Estos paneles equivalentes deben ser evaluados bajo el principio de que tienen una superficie igual a la del panel real. Algunos ejemplos de rectángulos equivalentes se presentan en la Figura 23.

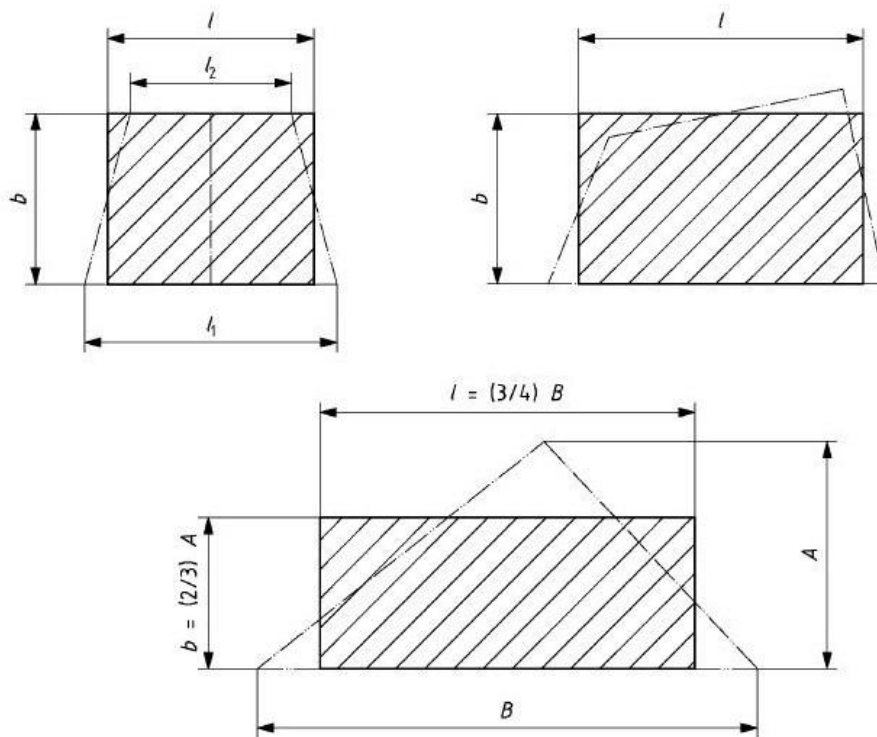


Figura 23. Ejemplo de paneles equivalentes [1]

5.2.1.2. Cálculo de ajustes de presión

En este apartado se calculan los denominados “ajustes de presión”. Se trata de un conjunto de factores que son función del diseño, tipo de embarcación o situación de ésta, etc. y que son utilizados para ajustar la presión de diseño final.

- Factor de categoría de diseño K_{DC}

Se define como las condiciones de viento y mar para las que la embarcación ha sido considerada apropiada, siempre que ésta sea correctamente manejada por una persona con experiencia marinera y una velocidad adecuada para el estado predominante de la mar.

Las diferentes categorías de diseño se definen en la norma de la siguiente manera:

Categoría de diseño A (“alta mar”):

Categoría de las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas por encima de 4 m y una velocidad del viento que puede superar la fuerza 8 de la escala Beaufort (Anexo 4) con excepción de las condiciones excepcionales como son los huracanes.

Categoría de diseño B (“aguas litorales”):

Categoría de las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 4 m y una velocidad del viento de una fuerza igual o superior a 8 en la escala Beaufort.

Categoría de diseño C (“en la proximidad de la costa”):

Categoría de las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 2 m y una velocidad característica estable del viento de una fuerza igual o inferior a 6 en la escala Beaufort.

Categoría de diseño D (“aguas abrigadas”):

Categoría de las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 0,3 m, con olas ocasionales de 0,5 m de altura, por ejemplo al paso de otras embarcaciones, y una velocidad característica estable de del viento de una fuerza igual o inferior a 4 en la escala Beaufort.

En el caso de la embarcación objeto de este proyecto, debido a su estructura y sobre todo a su eslora, se le ha asignado la Categoría de Diseño **A**, que considera las condiciones más desfavorables de navegación asegurando de este modo la resistencia de la embarcación en todos los casos.

En base a la categoría de diseño asignada, la norma establece un valor para su factor de categoría de diseño (Tabla 5). $K_{DC} = 1$

Tabla 5. Factor de categoría de diseño [1]

Categoría de diseño	A	B	C	D
Valor de k_{DC}	1	0,8	0,6	0,4

- Factor de carga dinámica n_{CG}

En el caso de los veleros y las embarcaciones en modalidad de desplazamiento, este factor se utiliza únicamente para el cálculo de k_L (factor de distribución de presión) y a este fin la norma indica que se debe tomar $n_{CG} = 3$

- Factor longitudinal de distribución de presión k_L

Este factor tiene en cuenta la variación de las cargas de presión debidas a la situación en la embarcación (ecuación 1).

$$k_L = \frac{1 - 0.167 \times n_{CG}}{0.6} \cdot \frac{x}{L_{WL}} + 0.167 \times n_{CG} \quad (1)$$

pero sin ser >1 para $\frac{x}{L_{WL}} \leq 0.6$

Donde $\frac{x}{L_{WL}}$ es la posición del centro del panel o del punto medio del refuerzo analizado a proa y popa de L_{WL} en metros.

Los resultados obtenidos para k_L se presentan en la Tabla 6

Tabla 6. Resultados de k_L para los paneles de costado (a), cubierta (b) y fondo (c)

PANELES DE COSTADO	
1C	0,584
2C	0,750
3C	0,916
4C	1,082
5C	1,248

(a)

PANELES DE CUBIERTA	
1CU	0,584
2CU	0,750
3CU	0,908
4CU	1,07
5CU	1,21

(b)

PANELES DE FONDO	
1F	0,584
2F	0,750
3F	0,908
4F	1,07
5F	1,21

(c)

- Factor de reducción de presión según la superficie, k_{AR}

Tiene en cuenta la variación de las cargas de presión según el tamaño del panel o del refuerzo y se define de acuerdo a la ecuación 2:

$$k_{AR} = \frac{k_R \times 0.1 \times m_{LDC}^{0.15}}{A_D^{0.3}} \quad (2)$$

Donde:

k_R : es el factor estructural del elemento y tipo de embarcación (ecuación 3)

$$k_R = 1,5 - 3 \times 10^{-4} \times b \quad (3)$$

b : es la dimensión menor del panel, en mm

A_D : es el área de diseño, en m^2

Para los paneles de costado, A_D no debe tomarse mayor de $2,5 \times b^2 \times 10^{-6}$

Existen unos valores mínimos para k_{AR} establecidos según el tipo de embarcación, categoría de diseño y tipo de paneles, los cuales se especifican en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores mínimos de k_{AR} [1]

Categoría de diseño	Paneles de una sola capa y refuerzos de fondo y costados Paneles de una sola capa o tipo sandwich y refuerzos de cubiertas y superestructuras	Paneles tipo sandwich de fondo y costados ^a		
		$\frac{x}{L_{WL}} \leq 0,4$	$0,4 < \frac{x}{L_{WL}} < 0,6$	$\frac{x}{L_{WL}} \geq 0,6$
A	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones	Interpolación entre los valores $\frac{x}{L_{WL}} = 0,4$ y $0,6$	0,5 fondo de veleros y costado 0,5 fondo embarcaciones a motor 0,4 costado embarcaciones a motor
B	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones		0,4 todas las embarcaciones
C y D	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones		

^a El valor mínimo de k_{AR} se aplica a los requisitos de resistencia a la flexión o cizalla y con la flecha máxima.

Atendiendo a la Tabla 4, el valor mínimo de k_{AR} para todos los paneles es de 0,25, por lo que los resultados obtenidos menores de 0,25 se han tomado igual a dicho valor.

Los valores de k_{AR} obtenidos para todos los paneles se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de k_{AR} para los paneles de costado (s), cubierta (b) y fondo (c)

PANELES DE COSTADO	
1C	0,313
2C	0,34
3C	0,25
4C	0,25
5C	0,25

(a)

PANELES DE CUBIERTA	
1CU	0,25
2CU	0,25
3CU	0,25
4CU	0,25
5CU	0,31

(b)

PANELES DE FONDO	
1F	0,25
2F	0,25
3F	0,25
4F	0,25
5F	0,37

(c)

- Factor de reducción de presión en el costado k_z

Interpola la presión del costado entre la presión (de los fondos) en la flotación y la presión de la cubierta en su borde superior, que se definen en la Figura 24. Este factor se representa como:

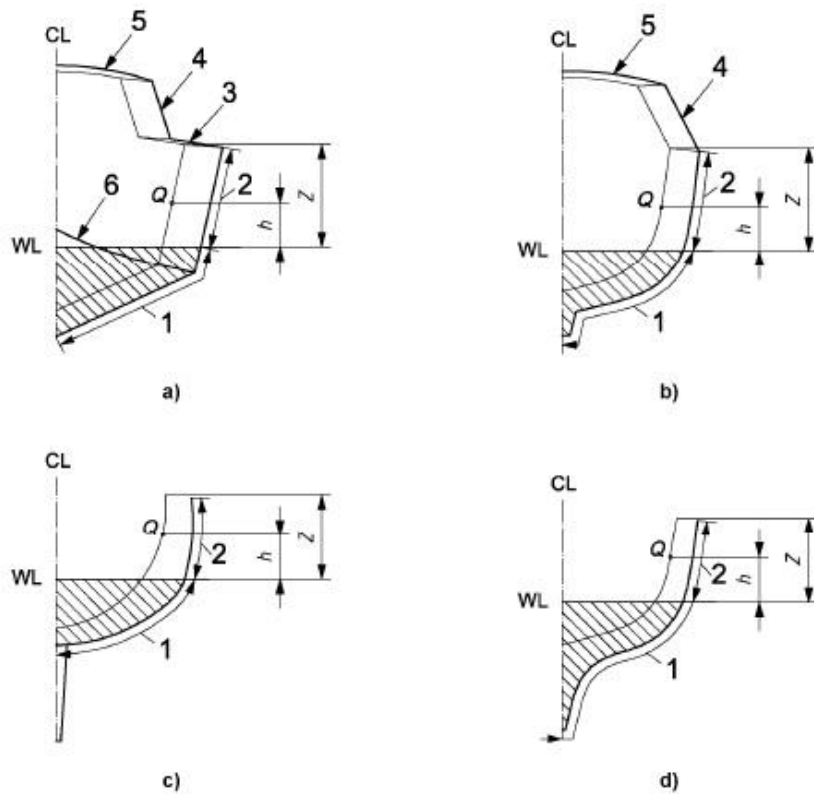
$$k_z = \frac{Z - h}{Z} \quad (4)$$

Donde:

Z : es la altura de la parte superior del casco o del límite casco / cubierta por encima de la línea de flotación, en metros. $Z= 1,52\text{m}$

h : es la altura del centro del panel o del punto medio del refuerzo por encima de la flotación a plena carga, en metros. $h= 0,69$

Debido a la escasa variación de h de milímetros entre los paneles, se ha tomado un valor genérico, de valor $k_z = 0,54$



- Leyenda
- 1 fondo (zona sombreada)
 - 2 costado
 - 3 cubierta
 - 4 superestructuras
 - 5 parte superior de la superestructura
 - 6 pantoque vivo

Figura 24. Definición de las zonas y altura de los paneles por encima de la flotación [1]

- **Factor de corrección de la presión por el efecto de “slamming”** para los veleros ligeros y estables k_{SLS}

Este factor tiene en cuenta las presiones más elevadas debidas al “slamming” que los veleros se pueden encontrar cuando navegan contra el viento, sin tener nunca un valor inferior a 1

En este caso, tal y como dicta la norma, se toma $k_{SLS} = 1$ debido a su categoría de diseño, y a que este factor está destinado al tipo de embarcaciones muy estables para su

desplazamiento, que cuentan con quilla orientable, quilla pesada y profunda, o lastre para su equilibrio.

5.2.1.3. Cálculo de espesores de los paneles

En este apartado se calcularán mediante las fórmulas facilitadas por la normativa, los espesores mínimos para cada panel.

En primer lugar se hallarán las diferentes presiones ejercidas sobre cada panel mediante sus correspondientes fórmulas, para después utilizar esos datos en la fórmula de espesores.

Se dividirán los cálculos en tres secciones, dependiendo de la zona: fondo, costado y cubierta.

En cuanto a los materiales compuestos a analizar, las especificaciones de las dos opciones propuestas se presentan a continuación.

Por un lado, el refuerzo de fibra de **vidrio** es un refuerzo tipo mat con un gramaje de $600\text{g}/\text{m}^2$ y una masa del contenido de fibra en el laminado (masa seca de fibra dividido por la masa de la fibra más la resina) $\psi = 0,62$.

Por otro lado, en cuanto al refuerzo de fibra **natural**, se trata de una fibra de lino de tejido bidireccional con un gramaje de $300\text{g}/\text{m}^2$ y una masa del contenido de fibra en el laminado $\psi = 0,35$.

Dentro de las ecuaciones de espesor, es necesario el dato sobre la tensión de diseño de cada refuerzo σ_d , la cual se obtiene de la resistencia mínima a la flexión σ_{uf} .

Dicha resistencia se obtiene de tablas contenidas en los anexos de la normativa, que en este proyecto se presenta en el Anexo 2, utilizando los datos del contenido en fibra de cada material.

Dado que en los anexos de la normativa solo se especifican los valores de las propiedades mecánicas para fibras de origen sintético y ninguna de origen natural, se ha optado por aplicar la misma fórmula para el cálculo de la resistencia de rotura por flexión (σ_{uf}) que se ofrece para la fibra de vidrio tipo E en ambas fibras.

Los resultados obtenidos para la resistencia mínima a la flexión de ambos materiales son los siguientes:

-Para la fibra de vidrio:

Resistencia de rotura por flexión:

$$\sigma_{uf} = 502 \psi^2 + 107 = 299,97 \text{ N/mm}^2$$

Tensión de diseño:

$$\sigma_d = \sigma_{uf} \times 0,5 = 149,98 \text{ N/mm}^2$$

-Para la fibra de lino:

Resistencia de rotura por flexión:

$$\sigma_{uf} = 502 \psi^2 + 107 = 168,50 \text{ N/mm}^2$$

Tensión de diseño:

$$\sigma_d = \sigma_{uf} \times 0,5 = 84,25 \text{ N/mm}^2$$

- Espesores de los paneles de FONDO:

La fórmula de la presión de diseño en los fondos de los veleros P_{BS} se define como el mayor valor de las ecuaciones 5 y 6:

$$P_{BS} = P_{BS\,BASE} \times k_{DC} \times k_{AR} \times k_L \quad [\text{kN/m}^2] \quad (5)$$

$$P_{BS\,MÍN} = 0,35 m_{LDC}^{0,33} + 1,4 L_{WL} \times K_{DC} [\text{kN/m}^2] \quad (6)$$

Donde:

$$P_{BS\,BASE} = 2 m_{LDC}^{0,33} + 18 \times K_{SLS} [\text{kN/m}^2] \quad (7)$$

Se ha aplicado la fórmula de la presión mínima $P_{BS\,MÍN}$ dado que mediante la ecuación principal (ecuación 5) los resultados obtenidos no alcanzaban el mínimo requerido por la norma. Por lo tanto, la presión de diseño en el fondo es la misma para todos los paneles de la zona, tal y como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de P_{BS} para los paneles de fondo

PANELES DE FONDO	P_{BS} [kN/m ²]
1F	41,38
2F	41,38
3F	41,38
4F	41,38
5F	41,38

El espesor mínimo de cada panel se obtiene de la siguiente fórmula:

$$t = b x k_c \frac{P_{BS} x k_2}{1000 x \sigma_d} \quad (8)$$

Donde:

P_{BS} : es la presión de diseño en el fondo

σ_d : es la tensión de diseño de cada refuerzo, definido anteriormente para cada tipo de fibra.

k_2 : es el factor de alargamiento del panel por resistencia a la flexión. En función de la relación entre las dimensiones del panel l/b , se ofrece una tabla que asigna un valor dependiendo del alargamiento del panel (Tabla 10).

Tabla 10. Valores de k_2 en función del alargamiento [1]

Alargamiento del panel l/b	Factor k_2 k_2 debe tomarse = 0,5 para un costado de madera laminada
> 2,0	0,500
2,0	0,497
1,9	0,493
1,8	0,487
1,7	0,479
1,6	0,468
1,5	0,454
1,4	0,436
1,3	0,412
1,2	0,383
1,1	0,349
1,0	0,308

k_c : es el factor de corrección por curvatura de los paneles, el cual mediante la Tabla 11 asigna un valor al factor dependiendo del abombamiento del panel, sin ser nunca inferior a 0,5 ni superior a 1.

Como curvatura se entiende la relación c/b , siendo c el abombamiento (curvatura) tal y como se define en la Figura 25.

Tabla 11. Factor de corrección de curvatura k_c [1]

c/b	k_c
0 a 0,03	1,0
0,03 a 0,18	$1,1 - \frac{3,33c}{b}$
> 0,18	0,5

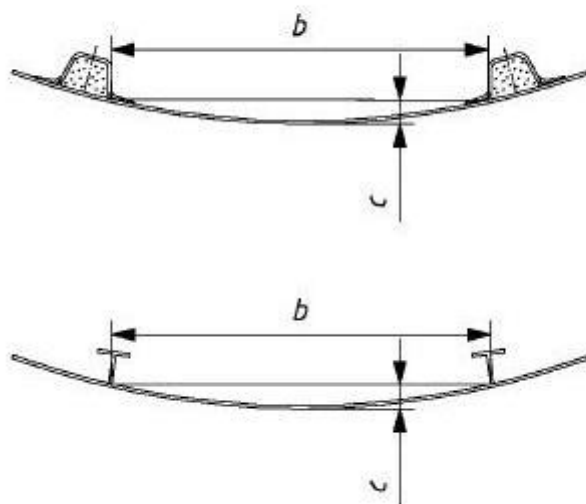


Figura 25. Medición de la curvatura de un panel [1]

Los espesores mínimos obtenidos para cada panel del fondo según el tipo de fibra se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Espesores en los paneles de fondo para fibra de vidrio y fibra natural

Paneles de fondo	Fibra de vidrio	Fibra de lino
1F	24,8mm	33,12mm
2F	26,7mm	35,65mm
3F	24,5mm	32,7mm
4F	14,39mm	19,2mm
5F	4,11mm	5,48mm

Una vez hallados los espesores mínimos para cada panel, se elegirá el más restrictivo y se establecerá dicho valor como espesor mínimo para toda la zona. En este caso los resultados obtenidos son los siguientes:

$t = 26,7$ mm para el refuerzo de fibra de vidrio

$t = 35,65$ mm para el refuerzo de fibra natural de lino

- Espesores de los paneles de COSTADO:

Se utilizará el mismo procedimiento que para el cálculo de los paneles de fondo.

La presión de diseño en el costado para los veleros P_{SS} es el mayor valor de las ecuaciones 9 y 10:

$$P_{SS} = P_{DS\ BASE} + k_Z \times (P_{BS\ BASE} - P_{DS\ BASE}) \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \quad [\text{kN/m}^2] \quad (9)$$

$$P_{SS\ MÍN} = 1,4L_{WL} \times k_{DC} \text{ pero nunca tomándose por un valor debajo de } 5 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

Donde :

$P_{BS\ BASE}$: es la presión de base de los fondos de los veleros

$P_{DS\ BASE}$: es la presión de base de la cubierta de los veleros

Dado que utilizando la fórmula principal (ecuación 9) no se alcanzaban los valores mínimos de presión estipulados por la fórmula $P_{SS\ MÍN}$, se ha aplicado el valor calculado mediante dicha fórmula.

Los valores de P_{SS} se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de P_{SS} para los paneles de costado

PANELES DE COSTADO	P_{SS} [kN/m ²]
1C	33,36
2C	33,36
3C	33,36
4C	33,36
5C	33,36

Para la determinación del espesor de los paneles se utilizará la misma fórmula que en el caso del fondo (ecuación 8)

Los resultados obtenidos son los que se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Espesores de los paneles de costado con fibra de vidrio y fibra natural

Paneles de costado	Espesores	
	Fibra de vidrio	Fibra de lino
1C	11,89mm	15,87mm
2C	15,24mm	20,34mm
3C	10,56mm	14,09mm
4C	17,84mm	23,8mm
5C	17,84mm	23,8mm

Teniendo en cuenta los resultados, se establecerán unos espesores mínimos para la zona de costado de:

$t = 17,84$ mm para el refuerzo con fibra de vidrio

$t = 23,8$ mm para el refuerzo de fibra natural de lino

- Espesores de los paneles de CUBIERTA:

Se procederá con el mismo método que en el fondo y costado.

La presión de diseño en las cubiertas expuestas a la intemperie de los veleros P_{DS} se define como el mayor valor de:

$$P_{DS} = P_{DS\,BASE} \times k_{AR} \times K_{DC} \times k_L \quad [\text{kN/m}^2] \quad (11)$$

$$P_{DS\,MÍN} = 5 \text{ kN/m}^2$$

donde la presión base de la cubierta

$$P_{DS\,BASE} = 0,5m_{LDC}^{0,33} + 12 \quad [\text{kN/m}^2] \quad (12)$$

Los resultados para la presión de diseño en cada panel de cubierta se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de P_{DS} para los paneles de cubierta

PANELES DE CUBIERTA	P_{DS} [kN/m ²]
1CU	5
2CU	5
3CU	5
4CU	5,5
5CU	8,79

En los paneles 1CU, 2CU y 3CU se ha obtenido una presión de diseño menor que la presión mínima de 5 kN/m^2 , por lo que se ha tomado dicho valor.

Para la determinación de los espesores se utilizará la misma fórmula que en los dos casos anteriores (ecuación 8).

Los resultados de los espesores mínimos obtenidos para la fibra de vidrio y la natural de lino en los paneles de cubierta se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. espesores de los paneles de cubierta para fibra de vidrio y fibra natural

Paneles de cubierta	Fibra de vidrio	Fibra de lino
1CU	11,49 mm	15,3mm
2CU	11,77 mm	15,7 mm
3CU	10,7 mm	14,3mm
4CU	6,5 mm	8,68 mm
5CU	7,47 mm	9,96 mm

Atendiendo a los resultados obtenidos, se establecerá un espesor mínimo para toda la zona de cubierta de:

$t = 11,77$ mm para el refuerzo de fibra de vidrio

$t = 15,7$ mm para el refuerzo de fibra natural de lino

A continuación se presenta una tabla (Tabla 17) resumen de los espesores mínimos finales obtenidos para los paneles de las tres diferentes zonas del casco de la embarcación.

Tabla 17. Espesores mínimos para fibra de vidrio y fibra de lino en los paneles

Zona	Espesor mínimo en fibra de vidrio [mm]	Espesor mínimo en fibra natural de lino [mm]
Cubierta	11,77	15,7
Costado	17,84	23,8
Fondo	26,7	35,65

5.2.2. Escantillonado de los refuerzos

El procedimiento del **escantillonado de los refuerzos** de la embarcación será el siguiente:

1º- Se dispondrán los refuerzos en el casco, en base a la división por paneles que haya sido establecida previamente y a la forma general del casco. Se diferenciarán dos tipos de refuerzos: transversales y longitudinales.

2º- Se calcularán las propiedades geométricas de los refuerzos que serán necesarias para determinar el tipo de refuerzo y sus dimensiones.

Para el cálculo de dichas propiedades será necesario el cálculo de factores de ajuste que variarán el resultado en función de las características de la embarcación.

3º- Atendiendo a las propiedades geométricas obtenidas, se elegirá un tipo de refuerzo y mediante las tablas correspondientes ofrecidas por la Norma se determinarán sus dimensiones y espesor.

Para comenzar, se han dividido los tipos de refuerzos en dos grupos: por un lado los refuerzos transversales (cuadernas) y por otro los refuerzos longitudinales.

Las cuadernas se han posicionado en todas las uniones de los paneles, formando un anillo alrededor de toda la sección de la embarcación.

Los refuerzos longitudinales se han situado en puntos significativos del casco: unión cubierta-costado, pantoque y quilla. También se han añadido refuerzos entre dichos puntos.

En la Figura 26 se presenta un croquis explicatorio de la disposición general de los refuerzos y sus dimensiones

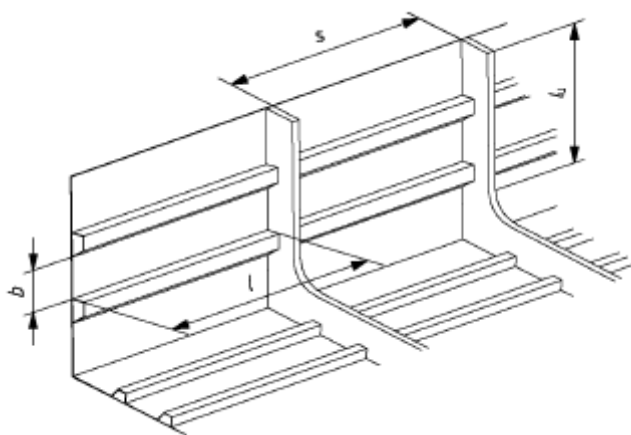


Figura 26. Disposición de los refuerzos de una embarcación [1]

5.2.2.1. Cálculo de factores de ajuste de los refuerzos

Al igual que para los paneles, es necesario el cálculo de varios factores de ajuste que variarán dependiendo de las características de los refuerzos y serán aplicables en las ecuaciones de escantillonado finales.

- Factor de ajuste por curvatura K_{CS}

Se debe tomar de la Tabla 18.

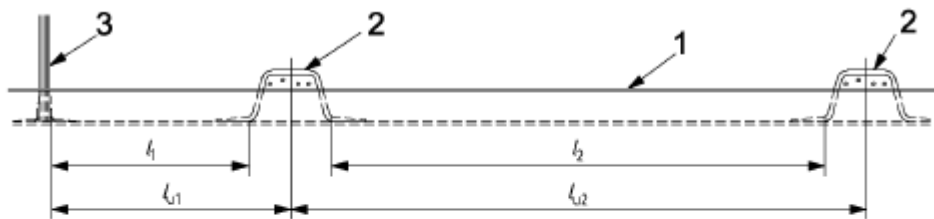
Tabla 18. Valores del factor de ajuste de curvatura de los refuerzos K_{CS} [1]

$\frac{c_u}{l_u}$	k_{CS}
0 a 0,03	1
0,03 a 0,18	1,1 - 3,33 (c_u/l_u)
> 0,18	0,5

Donde:

c_u : es el abombamiento (flecha) del refuerzo curvado, en milímetros.

l_u : es la luz entre apoyos de un refuerzo (longitud sin soportar). Se define como la mayor dimensión, en milímetros, de un panel entre dos refuerzos adyacentes. Para los refuerzos de sombrero de copa es la distancia entre los ejes de los sombreros de copa (Figura 27)



c) Palmejares continuos entre cuadernas en sombrero de copa y el mamparo. l_1 y l_2 son las longitudes sin soportar de los paneles entre palmejares. l_{a1} y l_{a2} son las longitudes del palmejar

Leyenda

- 1 palmejar
- 2 cuaderna en sombrero de copa
- 3 mamparo

Figura 27. Definición de las dimensiones entre refuerzos de sombrero de copa [1]

- Factor de superficie de cizalla K_{SA}

Debe tomarse de la relación de la Tabla 19.

Tabla 19. Valores del factor de superficie de cizalla K_{SA} [1]

Disposición del refuerzo	k_{SA}
Unido al costado	5
Otras disposiciones (flotante)	7,5

En este caso todos los refuerzos seleccionados están unidos al costado, por lo que $K_{SA} = 5$.

- Tensiones de diseño de los refuerzos σ_d y τ_d

Deben calcularse en base a la Tabla 20.

Tabla 20. Tensiones de diseño de los refuerzos [1]

Material	Tensión de diseño en tracción y compresión σ_d N/mm ²	Tensión de diseño a la cizalla τ_d N/mm ²
Laminado FRP	$0,5 \sigma_{ut}$ y $0,5 \sigma_{uc}$ ^a	$0,5 \tau_u$
Aleaciones de aluminio	$0,7 \sigma_{yw}$ ^b	$0,4 \sigma_{yw}$ ^b
Acero	$0,8 \sigma_y$	$0,45 \sigma_y$
Cuadernas de madera laminada	$0,45 \sigma_{ut}$ ^c	$0,45 \tau_u$
Cuadernas de madera maciza	$0,4 \sigma_{ut}$ ^c	$0,4 \tau_u$
Cuadernas de contrachapado sobre los bordes	$0,45 \sigma_{ut}$ ^c	$0,45 \tau_u$

NOTA Estas tensiones de diseño se aplican también al costado asociado a los refuerzos, en función del material.

Cabe mencionar que en la normativa no se establecen este tipo de tablas para el cálculo de propiedades mecánicas para fibras naturales como la de lino, por lo que se ha optado por aplicar para ambas fibras la fórmula establecida para la fibra de vidrio E.

Por lo tanto, $\sigma_d = 0,5\sigma_{ut}$ donde σ_{uc} es la tensión por compresión del material de refuerzo.

Se obtiene que para la fibra de vidrio: $\sigma_d = 1725 \text{ N/mm}^2$

Y para la fibra natural de lino: $\sigma_d = 575 \text{ N/mm}^2$

Por otro lado, $\tau_d = 0,5\tau_u$ donde τ_u es la resistencia mínima (tensión de rotura) por cizalla del material del refuerzo, en N/mm^2 .

Para el cálculo de τ_u es necesario acudir a una tabla contenida en los anexos de la Norma, que en este proyecto se presenta en el Anexo 2, en la cual se define que la resistencia de rotura por cizalla en el plano mediante la Ecuación 13:

$$\tau_u = 80 \psi + 38 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (13)$$

Se obtiene que para la fibra de vidrio:

$$\tau_u = 87,6 \text{ N/mm}^2 \text{ y } \tau_d = 43,8 \text{ N/mm}^2$$

Y para la fibra natural de lino:

$$\tau_u = 66 \text{ N/mm}^2 \text{ y } \tau_d = 33 \text{ N/mm}^2$$

Una vez calculados todos los factores de ajuste, se procede a calcular tres parámetros (superficie de cizalla, módulo de inercia mínimo y el segundo momento de área) que determinarán los valores mínimos de las **propiedades geométricas** que deben cumplir los refuerzos en cuestión.

- Valor mínimo del segundo momento de área para los refuerzos de FRP

$$I = \frac{26 \times k_{CS}^{1,5} \times P \times s \times l_u^3}{k_{lS} \times E_{tc}} 10^{-11} [cm^4] \quad (14)$$

Donde:

P: es la presión de diseño del panel, en kN/m^2

S: es la separación entre los ejes de los refuerzos, en mm

$k_{lS} = 0,05$ es el factor de deflexión para los refuerzos

E_{tc} : es la media de los módulos de elasticidad en tracción/compresión del material, definido por la Ecuación 15 en N/mm^2 de acuerdo con la Tabla contenida en el Anexo 2.

$$E_{tc} = 38000 \psi - 5000 [N/mm^2] \quad (15)$$

Los resultados para E_{tc} son los siguientes:

$E_{tc} = 18560 N/mm^2$ para la fibra de vidrio

$E_{tc} = 8300 N/mm^2$ para la fibra natural de lino

- Superficie del alma A_w :

Representa el área que queda sometida a cizalla y se define por la ecuación 16.

$$A_w = \frac{k_{SA} \times P \times s \times l_u}{\tau_d} 10^{-6} [cm^2] \quad (16)$$

- Módulo de inercia mínimo del refuerzo SM :

Se define por la ecuación 17.

$$SM = \frac{83,33 \times k_{CS} \times P \times s \times l_u^2}{\sigma_d} 10^{-9} [cm^3] \quad (17)$$

A continuación se presentan los resultados de las propiedades geométricas generales obtenidos para los diferentes grupos de refuerzos.

Cabe mencionar que en el caso de los refuerzos transversales (cuadernas) se han tenido en cuenta los datos más desfavorables; se ha tomado como presión la Presión de diseño de fondo calculada para los paneles y como l_u se ha tomado el mayor valor posible de ésta. En cuanto a los resultados, se han escogido los más altos de modo que se asegure que las propiedades mínimas geométricas y mecánicas de todas las cuadernas se satisfacen.

En cuanto a los refuerzos transversales, se han dividido en tres grupos. Por un lado, para la quilla y los refuerzos posicionados en el fondo se ha tomado la presión de diseño de fondo así como los datos de curvatura y distancias entre refuerzos propios de la zona de fondo.

Se ha procedido del mismo modo para las zonas de costado y sus refuerzos y para el refuerzo de cubierta.

Los resultados obtenidos para las propiedades geométricas son los que se muestran en las Tabla 21 y 22, para fibra de vidrio y fibra natural, respectivamente.

Tabla 21. Resultados de las propiedades geométricas de los refuerzos para fibra de vidrio

Refuerzos	$SM[cm^3]$	$A_w [cm^2]$	$I[cm^4]$
Cuadernas	58,75	30,60	842,31
Longitudinales de fondo	28,78	14,17	560,94
Longitudinales de costado	13,92	6,85	271,33
Longitudinales de cubierta	14,23	7	277,39

Tabla 22. Resultados de las propiedades geométricas de los refuerzos para fibra de lino

Refuerzos	$SM[cm^3]$	$A_w [cm^2]$	$I[cm^4]$
Cuadernas	176,26	40,62	1883,53
Longitudinales de fondo	86,35	18,8	1254,34
Longitudinales de costado	41,77	9,09	606,74
Longitudinales de cubierta	42,70	9,3	620,29

5.2.2.2. Cálculo de dimensiones de los refuerzos

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, debe accederse a una de las tablas contenidas en el anexo G de la Norma. Dentro de este anexo se ofrecen tablas que, en base a las propiedades geométricas calculadas establecen dimensiones para los refuerzos y ayudan a

calcular su espesor. En este caso se ha utilizado la Tabla G.3 (Anexo 3) para refuerzos de sombreros de copa altos (Figura 28). Se han elegido este tipo de refuerzos en base a los valores obtenidos para SM , A_w y I .

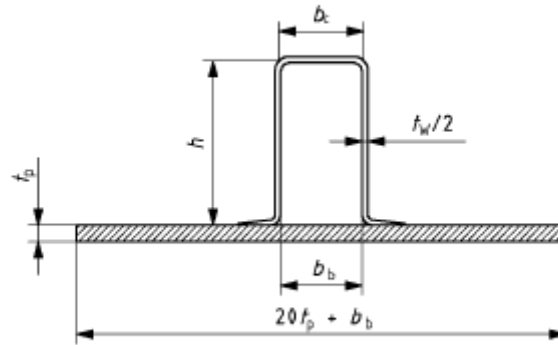


Figura 28. Esquema de un refuerzo de sombrero de copa alto [1]

La norma establece la Ecuación 18 para el cálculo del espesor para los refuerzos de sombreros de copa.

$$t_w = \frac{t}{w} w_f \text{ [mm]} \tag{18}$$

Donde

w_f es el peso del refuerzo obtenido en la tabla correspondiente (Anexo 3)

El valor de $\frac{t}{w}$ se obtiene en función del contenido de fibra en masa de cada material tal y como establece la Tabla 23.

Tabla 23. Valores calculados de $\frac{t}{w}$ en función del contenido de fibra en masa ψ [1]

ψ	0,25	0,30	0,36	0,38	0,41	0,50	0,55	0,58	0,60	0,66
t/w^a	2,89	2,34	1,87	1,75	1,59	1,22	1,07	0,99	0,95	0,82

^a Relación entre el espesor, en milímetros, y la masa de fibra seca, en kilogramos por metro cuadrado.

Las dimensiones obtenidas para cada grupo de refuerzos, así como sus espesores se presentan en las Tablas 24y 25, para fibra de vidrio y fibra natural, respectivamente.

Tabla 24. Resultados de las dimensiones de los refuerzos para fibra de vidrio

Refuerzos	h [mm]	b_b [mm]	b_c [mm]	t_w 2 [mm]
Cuadernas	200	75	75	3,42
Longitudinales de fondo	125	50	50	1,995
Longitudinales de costado	100	50	50	1,71
Longitudinales de cubierta	100	50	50	1,71

Tabla 25. Resultados de las dimensiones de los refuerzos para fibra natural de lino

Refuerzos	h [mm]	b_b [mm]	b_c [mm]	t_w 2 [mm]
Cuadernas	250	100	100	7,85
Longitudinales de fondo	150	50	50	5,049
Longitudinales de costado	125	50	50	3,927
Longitudinales de cubierta	125	50	50	3,927

5.3. Resistencia al avance

En este apartado se expone el cálculo de la resistencia al avance y la potencia efectiva de la embarcación mediante el programa Maxsurf Resistance.

Se ha importado a Maxsurf Resistance el archivo previamente guardado del velero del Maxsurf Modeller.

Para realizar el análisis de resistencia al avance, el programa ofrece diferentes métodos de análisis (comando: *Analysis > Methods*) dependiendo del tipo de embarcación del que se trate: modalidad de desplazamiento, planeadora o yates (Figura 29).

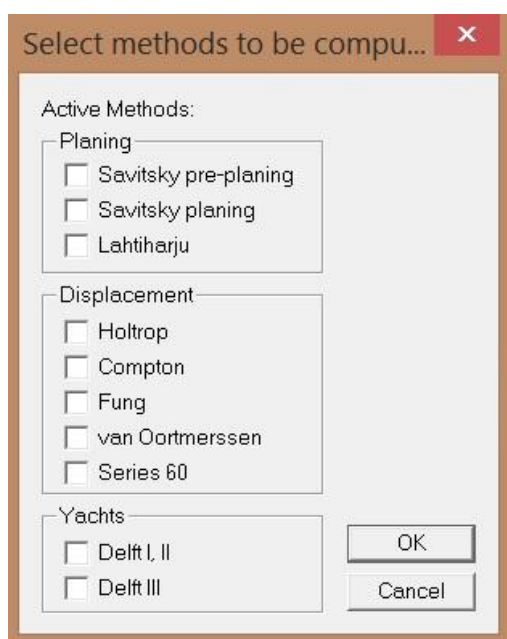


Figura 29. Métodos de análisis posibles

Atendiendo a las características del velero que se estudia, se ha decidido que el método de análisis que le corresponde es el de desplazamiento.

Después de comprobar todos los métodos de análisis de la modalidad de desplazamiento, el método que ha resultado más aceptable para las características de la embarcación ha sido *Fung*. En la Tabla 26 se muestra la comparativa de la viabilidad del análisis para el método *Fung* con otro método, *Holtrop*.

Tabla 26. Comparativa de viabilidad entre métodos *Fung* y *Holtrop*

	Item	Value	Units	Holtrop	Fung
1	LWL	23,907	m	23,907	23,907
2	Beam	4,379	m	4,379 (high)	4,379
3	Draft	0,699	m	0,699 (low)	0,699
4	Displaced volume	13,524	m ³	13,524	13,524
5	Wetted area	152,447	m ²	152,447	152,447
6	Prismatic coeff. (Cp)	0,31		0,31 (low)	0,31 (low)
7	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,276		0,276	--
8	1/2 angle of entrance	8,5	deg.	8,5	8,5 (low)
9	LCG from midships(+ve for'd)	13,536	m	13,536	--
10	Transom area	0	m ²	0	0
11	Transom w/ beam	0	m	--	0
12	Transom draft	0	m	--	0
13	Max sectional area	1,826	m ²	--	1,826
14	Bulb transverse area	0	m ²	0	0
15	Bulb height from keel	0	m	0	--
16	Draft at FP	0,7	m	0,7	--
17	Deadrise at 50% LWL	14,8	deg.	--	--
18	Hard chine or Round bilge	Hard chine		--	--
19					

Una vez seleccionado y realizado el método de análisis, el programa ofrece los resultados en una gráfica que relaciona la velocidad de la embarcación con la resistencia al avance (Figura 30) y la potencia necesaria (Figura 31).

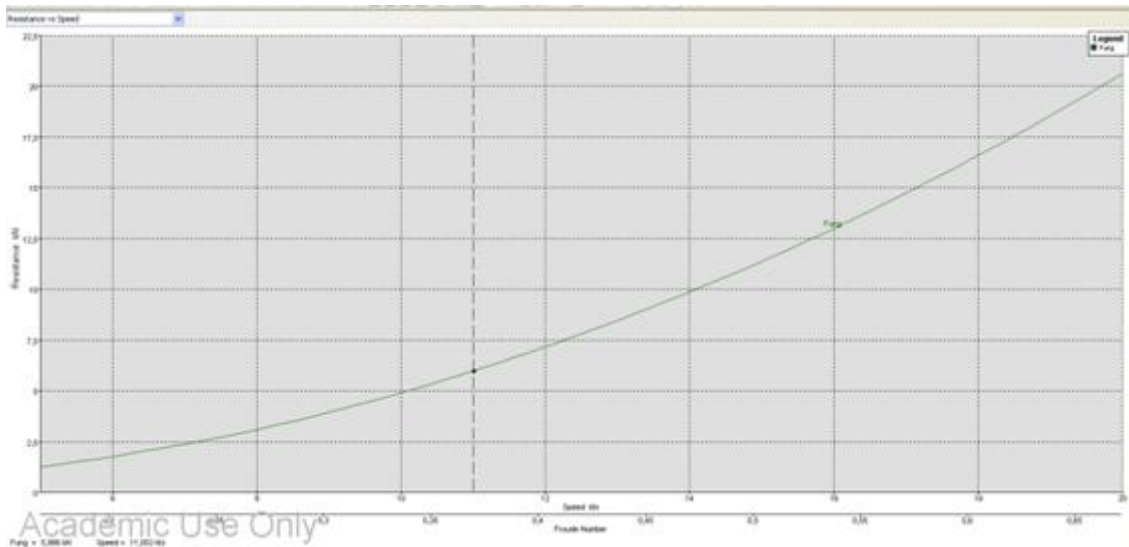


Figura 30. Gráfica Resistencia al avance – Velocidad.

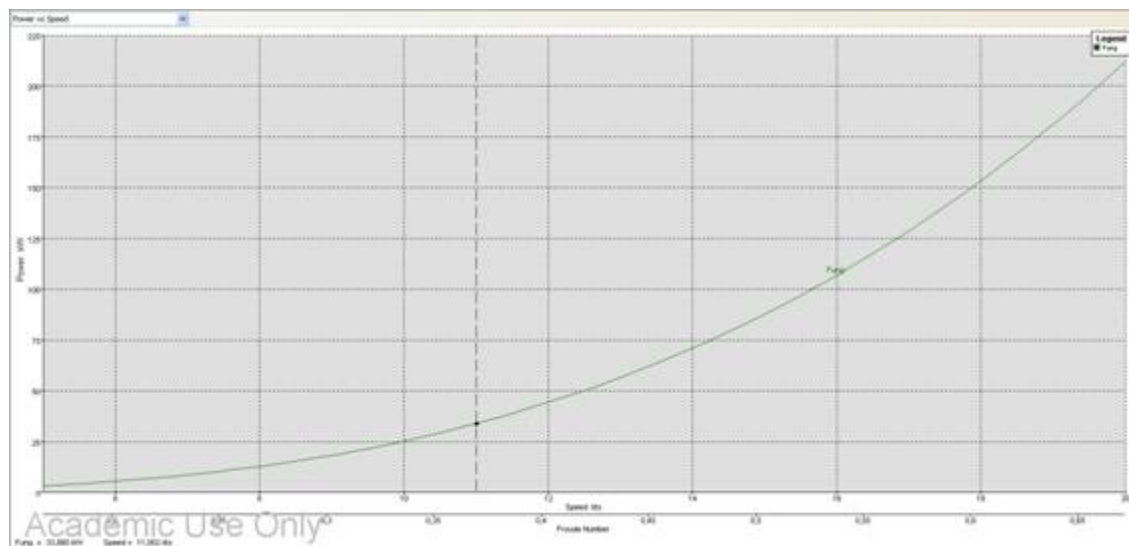


Figura 31. Gráfica Potencia – Velocidad.

Además ofrece una tabla donde resume los datos de la gráfica obtenida (Tabla 27), ofreciendo los resultados tanto de velocidad como de resistencia al avance y potencia necesaria.

Tabla 27. Resultados del análisis de resistencia al avance y potencia efectiva

	Speed (kts)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Fung Resist. (kN)	Fung Power (kW)
1	5	0,168	0,546	1,2	3,199
2	5,375	0,181	0,587	1,4	3,946
3	5,75	0,193	0,628	1,6	4,805
4	6,125	0,206	0,668	1,8	5,78
5	6,5	0,218	0,709	2,1	6,881
6	6,875	0,231	0,75	2,3	8,115
7	7,25	0,244	0,791	2,5	9,494
8	7,625	0,256	0,832	2,8	11,028
9	8	0,269	0,873	3,1	12,733
10	8,375	0,281	0,914	3,4	14,62
11	8,75	0,294	0,955	3,7	16,705
12	9,125	0,307	0,996	4	18,990
13	9,5	0,319	1,037	4,4	21,500
14	9,875	0,332	1,078	4,8	24,244
15	10,25	0,344	1,119	5,2	27,211
16	10,625	0,357	1,16	5,6	30,415
17	11	0,37	1,201	6	33,861
18	11,375	0,382	1,241	6,4	37,555
19	11,75	0,395	1,282	6,9	41,503
20	12,125	0,407	1,323	7,3	45,715
21	12,5	0,42	1,364	7,8	50,199
22	12,875	0,433	1,405	8,3	54,963
23	13,25	0,445	1,446	8,8	60,019
24	13,625	0,458	1,487	9,3	65,377
25	14	0,47	1,528	9,9	71,048
26	14,375	0,483	1,569	10,4	77,041
27	14,75	0,496	1,61	11	83,368
28	15,125	0,508	1,651	11,6	90,038
29	15,5	0,521	1,692	12,2	97,062
30	15,875	0,533	1,733	12,8	104,448
31	16,25	0,546	1,774	13,4	112,207
32	16,625	0,559	1,814	14,1	120,347
33	17	0,571	1,855	14,7	128,876
34	17,375	0,584	1,896	15,4	137,804
35	17,75	0,596	1,937	16,1	147,138
36	18,125	0,609	1,978	16,8	156,887
37	18,5	0,622	2,019	17,6	167,056
38	18,875	0,634	2,06	18,3	177,655
39	19,25	0,647	2,101	19,1	188,69
40	19,625	0,659	2,142	19,8	200,167
41	20	0,672	2,183	20,6	212,095

Teniendo en cuenta el tipo de embarcación y sus dimensiones y habiendo estudiado casos similares, se ha establecido una velocidad máxima de diseño de **11 nudos**. Atendiendo a los resultados del análisis se obtiene que:

Resistencia al avance: 6 kN

Potencia efectiva: 33,86 kW

El programa Maxsurf Resistance también permite calcular la estela de la embarcación a la velocidad deseada. Mediante el comando Analysis > Calculate free surface e introduciendo la velocidad de 11 nudos se ha obtenido el siguiente perfil de la estela (Figura 32).

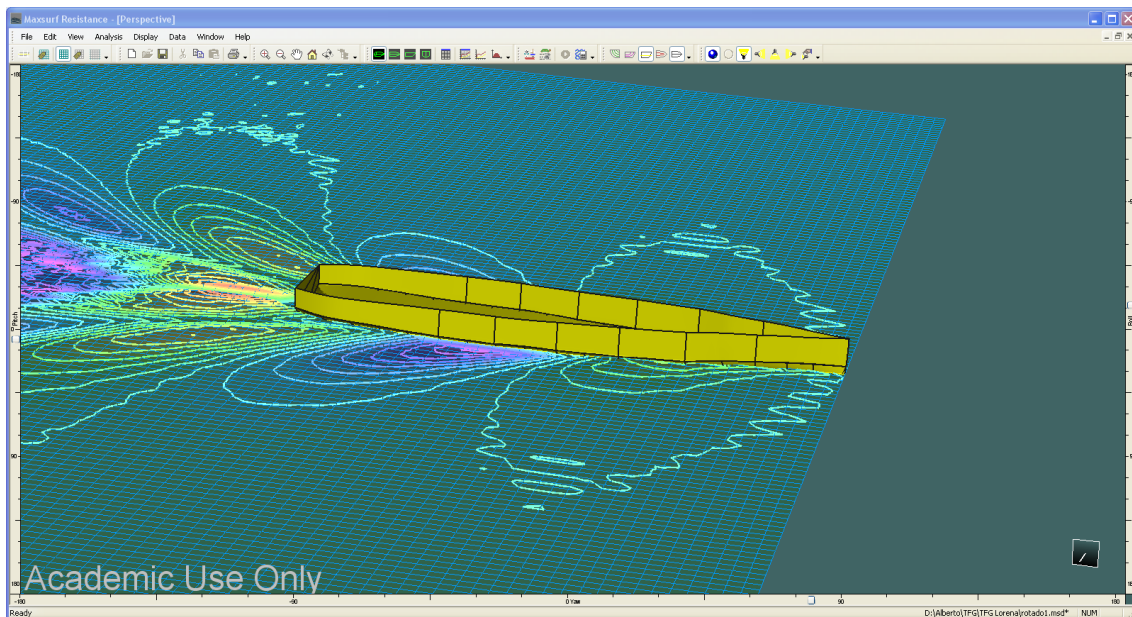


Figura 32. Perfil de olas de la embarcación.

Una vez obtenida la potencia efectiva y considerando el rendimiento total de la propulsión $\eta_t=0,7$ se ha calculado la potencia de freno teórica:

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_{bt}} \quad (19)$$

Donde:

η_t : Rendimiento total de la propulsión

P_e : Potencia efectiva, en kW

P_{bt} : Potencia de freno teórica, en kW

$$P_{bt} = \frac{33,86}{0,7} = 48,37 \text{ kW} \quad (20)$$

Una vez conocida la potencia de freno teórica se ha calculado la potencia de freno real. Para ello se utiliza la ecuación 21:

$$P_{motor} = \frac{P_{bt} \cdot 1,15}{0,85} \quad (21)$$

Donde:

P_{motor} = Potencia de freno real.

P_{bt} = Potencia de freno teórica.

1,15 corresponde al margen de mar

0,85 corresponde al margen del motor.

Por tanto, la potencia de freno del motor necesaria será:

$$P_{motor} = \frac{48,37 \cdot 1,15}{0,85} = 65,44 \text{ kW} \quad (22)$$

6. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado en primer lugar el modelado en 3D partiendo del plano en 2D de un velero y su posterior cálculo del escantillonado en base a las directrices de la Norma ISO 12215-5 (versión de 2008), utilizando dos tipos de materiales compuestos: fibra de vidrio y fibra natural y se puede concluir:

- Para el escantillonado de una misma embarcación, es necesario un mayor espesor del laminado reforzado con fibra natural de lino que utilizando fibra de vidrio tipo mat, para conseguir unas propiedades estructurales similares.
- Por otro lado, teniendo en cuenta el factor medioambiental, la fibra natural resulta mucho más respetuosa con el entorno al proceder de fuentes naturales renovables y ser reciclable al 100%.
- A pesar de que el espesor de laminado requerido es menor con fibra de vidrio que con fibra natural, la menor densidad de los materiales sostenibles suponen un ahorro en el peso final de la embarcación, lo cual hace posible añadir más peso al barco del que se trate, que dependiendo del tipo de embarcación se traduciría en más toneladas de carga, más pasajeros, etc.

En relación con las herramientas informáticas utilizadas, se puede concluir que:

- Rhinoceros supone una herramienta muy útil para la creación de superficies 3D partiendo de planos en 2D, como es el caso de cascos de embarcaciones
- Maxsurf presenta múltiples opciones para la obtención de datos hidrostáticos e hidrodinámicos, como la resistencia al avance y el comportamiento en la mar.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Norma UNE-EN 12215:2008

[2] www.lr.org/en/RulesandRegulations/special-service-craft.aspx

[3] www.exchange.dnv.com/publishing/RulesHSLC/2013-01

[4] A. B. Dietrich. *Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona. Edicions UPC (2005)

[5] T.C. Gillmer, B. Johnson. *Introduction to Naval Architecture*. 2ª Edición, Naval Architecture Press, Gran Bretaña (1982).

[6] www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf

[7] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakooop, M. Trada. *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*. *Composites: Part B* 42,856–873 (2011).

[8] www.arquitecturacarbono.wordpress.com

[9] www.carbonconcrete.es

[10] H.B. de Moraes, P.A. Wilson. *Study of different types of materials for use in passenger vessels for the amazon region*. *Proceedings del Congreso Internacional IDS Iquitos, Perú*; pág 19-5 a 19-8 (2007).

- [11] N.Coackley, Y. Bryn. *Construcción de embarcaciones pesqueras 2: Construcción de embarcaciones pesqueras en fibra de vidrio*. Departamento de pesca de la FAO; pág 9-15 (1994)
- [12] N. Montes. "Marco computacional para el diseño, optimización y control de procesos de moldeo con resinas líquidas". Tesis Doctoral, CEU Universidad Cardenal Herrera, Valencia; pag 5 (2009)
- [13] www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/12/fibra-de-vidrio.html
- [14] A. Miravete. *Materiales Compuestos I*. Editorial Reverté S.A, Barcelona (2007).
- [15] S. Neves, V. Calado, R. J. S. Rodriguez, F. M. Margem. *Thermogravimetric Stability of Polymer Composites Reinforced with Less Common Lignocellulosic Fibers – an Overview*. Journal of Materials Research and Technology; 1(2):117-126 (2012)
- [16] S. Thomas, L.A. Pothan. *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: from macro to nano scale*. Old City Publishing (2008).
- [17] M. Jacob, R.D. Anandjiwala. *Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites*. Polymer Composites, 29, 187-207 (2008).
- [18] www.biologia.edu.ar/botanica/tema12/12-5uso.htm
- [19] www.rhino3d.com/gallery/3
- [20] www.bentley.com/es-ES/Products/Maxsurf

[21] www.feroca.com/es/fibras-de-vidrio-y-tejidos-de-refuerzo/179-fibra-de-vidrio-mat-de-refuerzo-450-grm.html

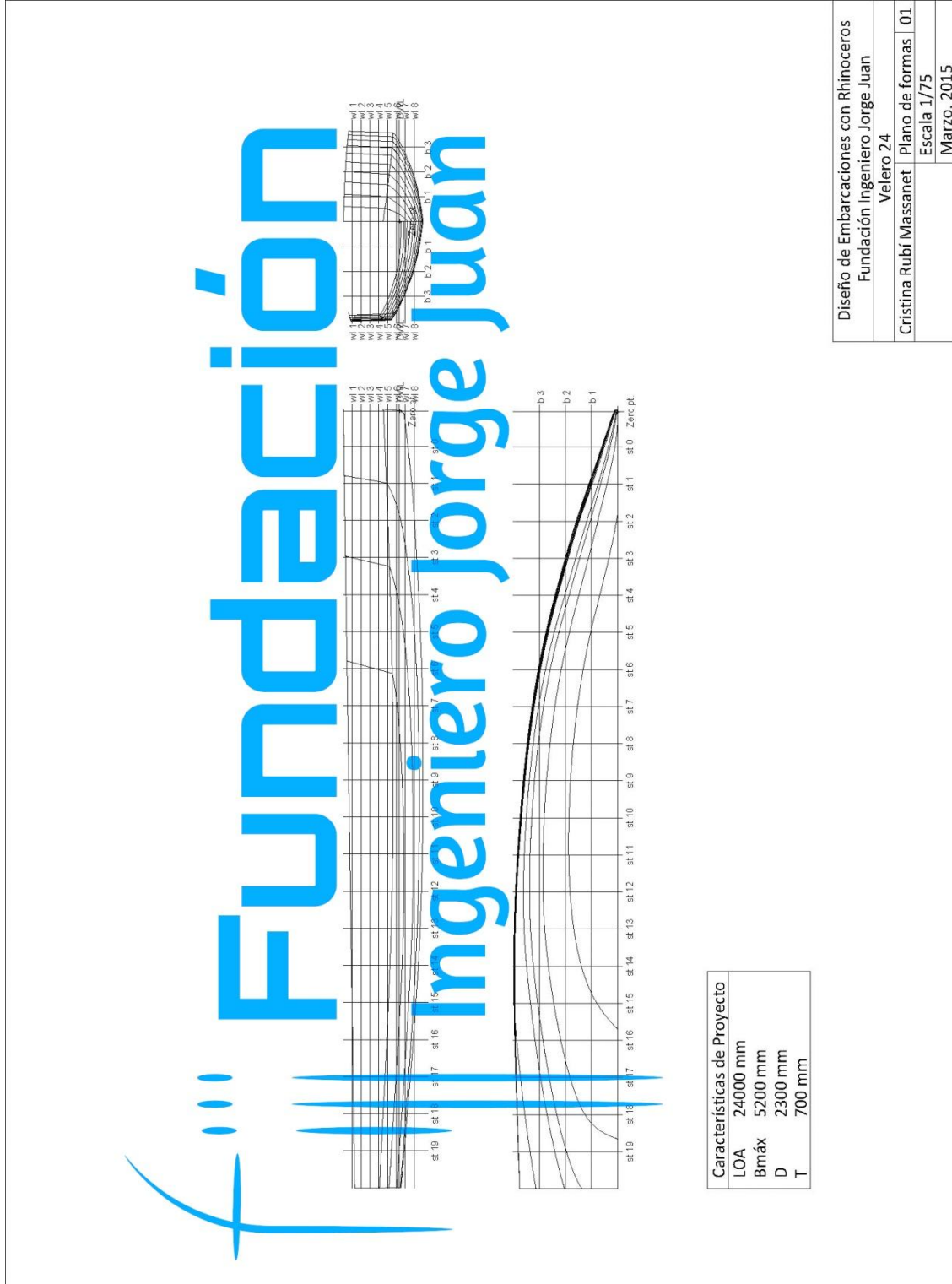
[22] A. López. Tesis doctoral “*Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas*”. Universitat de Girona (2004) pag 57

[23] www.entropyresins.com

[24] www.maxsurf.net/resistance.html

8. ANEXOS

ANEXO 1. PLANOS DE LA EMBARCACIÓN



ANEXO 2. Tabla de propiedades mecánicas del laminado de fibra de vidrio E

Propiedad	Valores N/mm ²	
Mat laminado a mano (CSM), combinado roving/mat, tejido roving (WR) y refuerzos alternados (CP) – 0/90^a		
Resistencia de rotura por tracción, σ_{ut}	$800 \psi^2 - 80 \psi + 37$	
Resistencia de rotura por compresión, σ_{uc}	$150 \psi + 72$	
Resistencia de rotura por flexión, σ_{uf}	$502 \psi^2 + 107$	
Resistencia de rotura por cizalla en el plano (intralaminar), τ_u	$80 \psi + 38$	
Módulo elástico en el plano, E	$38\,000 \psi - 5\,000$	
Módulo de cizalla en el plano, G	$1\,700 \psi + 2\,240$	
Resistencia de cizalla interlaminar (fuera del plano), $\tau_{u\ Inter}$	$22,5 - 17,5 \psi$	
Mat proyectado		
Resistencia de rotura por tracción, σ_{ut}	$150 \psi + 25$	
Resistencia de rotura por flexión, σ_{uf}	$300 \psi^2 + 107$	
Las otras propiedades para el mat proyectado deben obtenerse de las ecuaciones anteriores para el mat		
Reforzado uni-direccional (UD)		
Propiedad	Paralelo a las fibras	Perpendicular a las fibras
Resistencia de rotura por tracción, σ_{ut}	$880 \psi^2 + 140 \psi + 140$	42
Resistencia de rotura por compresión, σ_{uc}	$250 \psi + 190$	105
Módulo elástico en el plano, E	$46\,600 \psi^2 + 7\,200 \psi + 7\,250$	$48\,600 \psi^2 - 39\,000 \psi + 12\,500$
Módulo de cizalla en el plano, G	$14\,380 \psi^2 - 10\,560 \psi + 3\,840$	
Resistencia de cizalla en el plano, τ_u	50	
Coefficiente de Poisson principal, ν_{12}	0,3	
^a Para una combinación de mat y roving, ψ puede ser el valor global. Véase el ejemplo del apartado C.3.2.		

ANEXO 3. Tabla de propiedades de los sombreros de copa “altos”

1	2		3	4	5	6	7		
	Dimensiones de las formas						Espesor del costado	Chapa asociada	Peso del vidrio de refuerzo
h	b_b	b_c	t_p	$20 t_p + b_b$	w_f	SM_{min}	A_w	I_{NA}	
mm	mm	mm	mm	mm	kg/m ²	cm ³	cm ²	cm ⁴	
100	50	50	5	150	1,800	41,3	8,4	289	
			10	250	1,800	48,4	8,4	434	
			15	350	1,800	52,7	8,4	529	
125	50	50	5	150	2,100	64,7	12,3	532	
			10	250	2,100	77,1	12,3	816	
			15	350	2,100	84,1	12,3	1 006	
150	50	50	5	150	2,700	103,6	18,9	960	
			10	250	2,700	126,2	18,9	1 496	
			15	350	2,700	139,1	18,9	1 893	
150	75	75	5	175	2,700	125,5	18,9	1 140	
			10	275	2,700	149,5	18,9	1 751	
			15	375	2,700	163,2	18,9	2 199	
175	75	65	5	175	3,000	160,5	24,5	1 675	
			10	275	3,000	193,5	24,5	2 557	
			15	375	3,000	213,0	24,5	3 243	
200	75	75	5	175	3,600	239,4	33,6	2 713	
			10	275	3,600	289,9	33,6	4 102	
			15	375	3,600	322,1	33,6	5 296	
200	100	100	5	200	3,600	276,9	33,6	3 081	
			10	300	3,600	330,5	33,6	4 626	
			15	400	3,600	364,0	33,6	5 934	
250	100	100	5	200	4,200	432,8	49,0	5 836	
			10	300	4,200	517,5	49,0	8 506	
			15	400	4,200	576,2	49,0	11 005	
300	100	100	5	200	5,100	667,6	71,5	10 571	
			10	300	5,100	792,2	71,5	14 779	
			15	400	5,100	890,3	71,5	19 131	

ANEXO 4. ESCALA DE BEAUFORT

ESCALA DE VIENTO BEAUFORT			
ESCALA BEAUFORT	VELOCIDAD DEL VIENTO	DESCRIPCION	SIMBOLO
1	1 - 3 Nudos	Ventolina	
2	4 - 6 Nudos	Flojito	
3	7 - 10 Nudos	Flojo	
4	11 - 16 Nudos	Bonancible	
5	17 - 21 Nudos	Fresquito	
6	22 - 27 Nudos	Fresco	
7	28 - 33 Nudos	Frescachón	
8	34 - 40 Nudos	Temporal	
9	41 - 47 Nudos	Temporal fuerte	
10	48 - 55 Nudos	Temporal duro	
11	56 - 63 Nudos	Temporal muy duro	
12	64 + Nudos	Temporal huracanado	

CONDICION DE MAR	
1	Se riza la mar, sin crestas de espuma.
2	Olas pequeñas que no rompen.
3	Olas algo mayores con algunos borregos dispersos.
4	Olas pequeñas. Borregos bastante frecuentes.
5	Olas moderadas, abundancia de borregos.
6	Empiezan a formarse olas grandes, crestas de espuma blanca, probablemente rocío.
7	La mar se vuelve gruesa. La espuma es arrastrada en dirección del viento.
8	Olas de altura moderada. De la parte alta de las crestas empiezan a desprenderse rociaciones en forma de remolinos.
9	Olas muy grandes. Espuma densa arrastrada en la dirección del viento. El rocío puede afectar la visibilidad.
10	Olas muy altas con grandes crestas. La superficie del mar aparece blanca. El movimiento de la mar es pesado. Visibilidad afectada.
11	Olas excepcionalmente altas. La mar está completamente cubierta de largas manchas de espuma blanca en dirección del viento.
12	El aire está lleno de espuma y de rocío. La mar está completamente blanca y con espuma. Visibilidad muy seriamente afectada.

ANEXO 5. NORMA EN ISO 12215-5:2008. Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón.