

Propuesta de un procedimiento alternativo para el forrado de embarcaciones de madera

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Margarita Llull Amer

Dirigido por:
Sergio Velásquez Correa

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, 10/06/2018

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica

ÍNDICE

	Pág.
Introducción	6
Agradecimientos	8
1. Construcción en madera	9
1.1. Técnicas de forrado tradicionales	9
1.2. Técnicas de forrado modernas	10
2. Dimensionamiento	14
3. Formas del casco	18
3.1. Ángulo de astilla muerta	18
3.2. Diseño	19
4. Selección del material	21
5. Estructura y refuerzos	24
5.1. Quilla	24
5.2. Roda	26
5.3. Refuerzos longitudinales	28
5.4. Cuadernas	29
6. Cálculos hidrodinámicos	33
6.1. Desplazamiento total	33
6.2. Coeficientes de formas	33
6.3. Resistencia y propulsión	38
6.3.1. Velocidad de diseño	38
6.3.2. Resistencia al avance	39
6.3.3. Selección del motor	41

7. Escantillonado	43
7.1. Espesor en paneles de fondo	44
7.2. Espesor en paneles de costado	48
8. Diseño del casco	51
8.1. Formas de las tablas	51
8.2. Sujeciones	52
8.2.1. Entre planchas	52
8.2.2. Con las cuadernas	54
8.3. Forrado	55
8.3.1. Forrado del costado de estribor	57
8.3.2. Forrado del costado de babor	61
9. Presión del mar sobre el casco	64
9.1. Planchas de estribor	66
9.2. Planchas de babor	66
10. Construcción de la embarcación	67
10.1. Herramientas necesarias	67
10.2. Proceso constructivo	71
10.3. Presupuesto	81
11. Pruebas de estanqueidad	83
12. Valoraciones	85
Conclusiones	86
ANEXOS	
1. Plano de formas	88
2. Vistas del diseño	89

3. Ficha técnica del material	90
Bibliografía	91
Listado de figuras	94
Listado de tablas	98

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la adquisición de ciertos bienes de origen industrial se producen bajo el concepto de hágalo Ud. mismo. Se trata de productos prefabricados que facilitan su transporte y abaratan su coste, trasladando el precio del montaje a la labor del cliente en su fase última de entrega y utilización. En el ámbito de la industria de las embarcaciones de recreo, este concepto podría aplicarse, ofreciendo productos semi-terminados de manera que puedan ser ensamblados cerca del lugar en los que serán usados. Se deberán por tanto resolver temas como la fabricación de piezas de la estructura y de piezas para el forrado. En este sentido, el disponer de una embarcación diseñada y pre construida en piezas numeradas y montadas siguiendo un esquema simple, aportaría además la posibilidad de reparar, en caso de daño localizado, sobre todo en el casco, sólo aquellas piezas o trozos que se vean comprometidos.

En este trabajo se estudia una técnica alternativa de forrado de embarcaciones de madera. A lo largo del tiempo se han llegado a desarrollar diferentes métodos de forrado de cascos con madera como por ejemplo el de contrachapado, tingladillo o a tope. Cada una de ellos pensadas para un objetivo distinto como la estanqueidad, la dureza o facilidad de producción, pero con una particularidad común: la madera del casco está fijada permanentemente a la estructura de la barca.

Se propone el estudio de un casco formado por planchas de madera basándose en la técnica de forrado con láminas de contrachapado marino: láminas que recorren la eslora de la embarcación abarcando la máxima superficie posible permitida por las dimensiones de la lámina, curvada y atornillada a la estructura del barco permanentemente. La variante que se ofrece es dividir la lámina en medidas estándar adaptadas a las dimensiones del barco colocadas en una distribución intercalada por motivos de resistencia a la rotura. Dichas planchas no constarán de uniones entre ellas, ni por clavos, ni tornillos, ni ningún otro sistema de sujeción, de manera que éstas puedan ser extraídas y reemplazadas pieza por pieza sin la necesidad de una reparación tediosa.

La sujeción de las planchas a la embarcación por lo tanto, tiene lugar en las cuadernas. Cada extremo de la plancha irá sujeto a las cuadernas mediante un sistema de sujeción extraíble que no dañe dicha plancha. La separación entre cuadernas, por este motivo, son las que

delimitarán las dimensiones de cada plancha.

Actualmente las reparaciones de casco en distintos materiales implica; en madera el reemplazamiento de todo el casco o el corte de la zona dañada para reemplazarla con una lámina nueva, en acero se implementa mediante soldadura la reparación de la zona dañada a modo de parche, y en fibra de vidrio se produce un nuevo laminado en dicha zona de rotura. En general las reparaciones del casco generan complicaciones y procesos complejos y a pesar de que el resultado de la reparación resulte satisfactorio, el casco no tendrá la misma funcionalidad de cuando era nuevo ya que el área de fractura podría convertirse en una zona crítica para futuras roturas por fatiga.

El sistema propuesto, al estar dividido en planchas de limitadas dimensiones se sustituyen con facilidad y el resultado es el mismo que el inicial es decir, que el de una embarcación nueva.

En este trabajo se propone la aplicación del forro en madera, y si el resultado concluye satisfactoriamente podría llegar a implementarse a diferentes materiales como la fibra de vidrio o el acero.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer la alta implicación en este proyecto del director del TFG, Sergio Velásquez sobre todo por todas las horas de trabajo que hemos invertido en la construcción de la barca, así como la ayuda en la realización del estudio.

En segundo lugar al profesor Jordi Mateu por facilitarnos el taller del NT2 y sus medios, además del apoyo y ayuda en la fase de la botadura.

A profesores de la Facultad de Náutica como Antoni Isalgú por mostrar interés y ayuda en algunos aspectos técnicos del proyecto. También agradecer, ya que ha sido de vital importancia, el apoyo del profesor Jordi Torralbo y el Sr. Joan Guerrero al facilitarnos el taller de mecánica de la FNB y el Astillero-Drassana del *Institut de Nàutica de Barcelona*, respectivamente.

Finalmente agradecer a mis padres Joan Lull y Francisca Amer por su especial apoyo, así como la financiación de mis estudios y a mis compañeros y amigos Marc Nicolau y Mónica Martínez por ayudarme y animarme en este proyecto y durante el transcurso de todo el grado.

1. CONSTRUCCIÓN EN MADERA

A lo largo de la historia naval han existido diversas técnicas de forrado de embarcaciones de madera. A continuación se explican brevemente los distintos métodos clasificados temporalmente en técnicas tradicionales y técnicas modernas.

1.1. Técnicas de forrado tradicionales:

- Forro a tope:

Técnica de forrado caracterizada por la distribución de tracas de madera a lo largo de todo el casco de la embarcación. Dichas tracas no van pegadas a las cuadernas, van pegadas entre sí canto con canto o a tope para conseguir una superficie lisa.

Para lograr la estanqueidad ente juntas, al tratarse de un método tradicional, se calafatean. El calafateo se efectúa rellenando las juntas de las tracas de fondo, costados y cubierta con fibras de algodón y estopa (material compuesto de fibras de cáñamo bañadas en resina de pino).



Figura 1. Forro a tope.

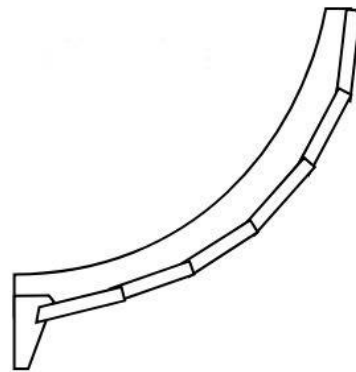


Figura 2. Forro a tope

- Forro tingladillo:

Las tracas en este método se disponen de tal manera que los bordes se montan ligeramente unos sobre otros. Este procedimiento es previo al montaje de la estructura del barco a diferencia del método de forrado a tope. Al encajarse y solaparse los bordes de cada traca no se hace necesaria la implementación del

calafateo porque este método de forrado ya dota la embarcación de estanqueidad.

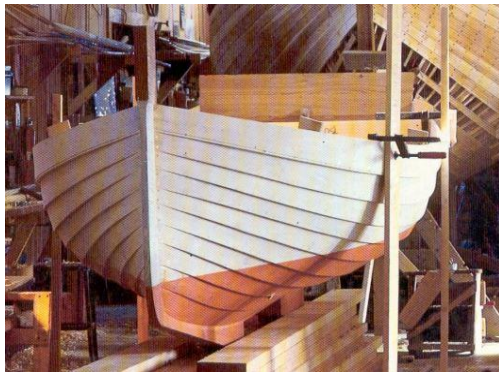


Figura 3. Forro tingladillo

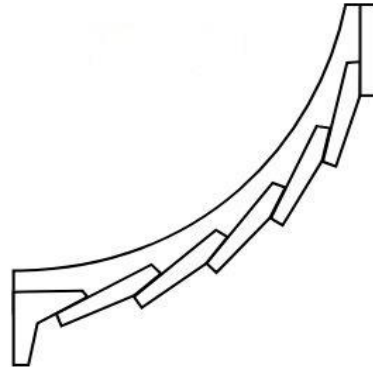


Figura 4. Forro tingladillo

- Doble forro:

Ésta técnica es de igual aplicación que la del forro a tope pero se le aplica una capa más encima del forrado inicial. La segunda capa, normalmente, se aplica en una dirección diferente de la primera capa para otorgar una homogénea resistencia al barco.

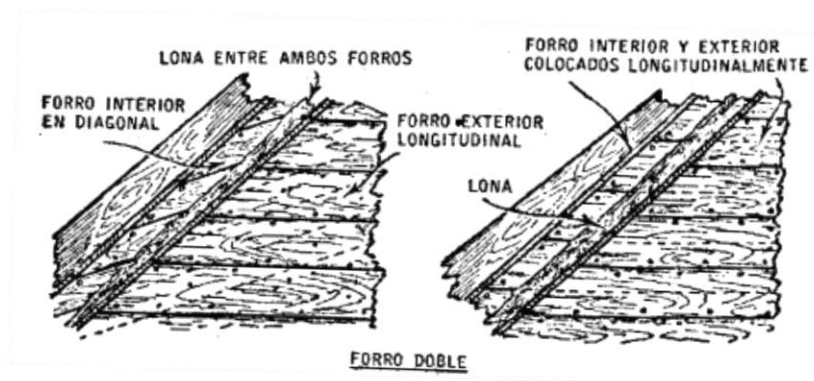


Figura 5. Doble forro

1.2. Técnicas de forrado modernas:

- Forro de listones o *strip plank*:

Está basada en la técnica del forro a tope pero en este caso en lugar de utilizar tracas se utilizan listones que presentan una anchura menor. Este forrado se implementa una vez se tiene construida la estructura interna para que éstas puedan acogerse a la forma de la embarcación.

Presenta mayor complejidad que el forrado a tope ya que el número de listones a colocar puede superar en más del doble de la cantidad de tracas que se necesitarían. Esta técnica dota a la embarcación de una alta resistencia.



Figura 6. Forro de listones

- Forro en contrachapado:

El contrachapado son capas delgadas de madera pegadas entre sí y orientadas en ángulos opuestos entre ellas para otorgar mayor resistencia y flexibilidad.

El material compuesto obtenido se utiliza mucho en la construcción naval en madera por su resistencia al agrietamiento, la contracción, deformación, y a la alta humedad.

Las láminas se distribuyen sobre el casco adaptándose sobre sus formas y abarcando la mayor cantidad de superficie posible con la misma lámina.



Figura 7. Forro de contrachapado

- Madera laminada:

El forro con madera laminada se construye de la misma manera que la técnica del doble forro, pero en lugar de tracas se colocan láminas de madera. Son de poco espesor lo que favorece a su adaptación a las curvas del barco.

Presenta cualidades físico-mecánicas y de durabilidad así como una excelente condición aislante debida a una conductividad térmica inferior a la de otros materiales.



Figura 8. Madera laminada

- Tingladillo contrachapado

La técnica de tingladillo contrachapado es la misma que la del tingladillo tradicional pero en lugar de tracas de madera se utiliza madera contrachapada.



Figura 9. Tingladillo contrachapado

- Cosido y estratificado:

La construcción de este forro consta de menos pasos al utilizarse menor cantidad de piezas y no requiere moldes de construcción.

Se colocan láminas de contrachapado cosidas entre sí con un material como el alambre y una vez montado todo el casco, se estratifica con una capa de resina.



Figura 10. Cosido y estratificado



Figura 11. Cosido y estratificado

2. DIMENSIONAMIENTO

Para determinar las dimensiones principales de la embarcación se ha recurrido a la recogida de datos de embarcaciones similares a partir de los cuales se determinarán las dimensiones adecuadas para el modelo. Dichas embarcaciones se han escogido mediante los siguientes criterios:

- Embarcaciones de madera sin distinción del método de construcción porque el forrado del modelo a construir consistirá en un método de construcción alternativo.
- Formas sencillas para facilitar el proceso y diseño del forrado.
- Superestructura escasa o inexistente.
- Esloras inferiores a 6 metros, rango limitado para obtener una tabla de datos más precisa.
- Categoría de diseño C, aguas costeras.
-

A continuación se presentan las dimensiones de las distintas embarcaciones:

Embarcación	Eslora entre perp. (m)	Manga (m)	Puntal (m)	Desplazamiento (kg)
Embarcación 1	3,67	1,55	0,78	112
Embarcación 2	3,68	1,4	0,57	58,96
Embarcación 3	4,46	1,68	0,68	350
Embarcación 4	5,2	1,8	1,2	600
Embarcación 5	4,3	1,48	0,85	220
Embarcación 6	4,44	1,7	0,86	300
Embarcación 7	5,5	2,1	1,35	830
Embarcación 8	5,99	2,22	1,24	690
Embarcación 9	3,78	1,34	N/A	68,038
Embarcación 10	3,66	1,452	0,55	N/A
Embarcación 11	5,53	1,9	0,7	N/A

Tabla 1. Datos de embarcaciones similares

Las columnas de datos: manga, puntal y desplazamiento se relacionan con la eslora individualmente para obtener una gráfica que indique una relación entre las medidas de todas estas embarcaciones. Mediante la obtención de la línea de tendencia de la gráfica, se introduce el valor de la eslora que se quiere para el modelo para determinar los valores de manga, puntal y desplazamiento más adecuados para la barca a diseñar.

Se escoge un valor de 4 metros para la eslora entre perpendiculares del modelo a diseñar ya que al tratarse de una propuesta para la posterior construcción se facilita todo el proceso al adjudicar una eslora pequeña.

A continuación se muestran las gráficas mencionadas:

- Manga (B) – Eslora (L):

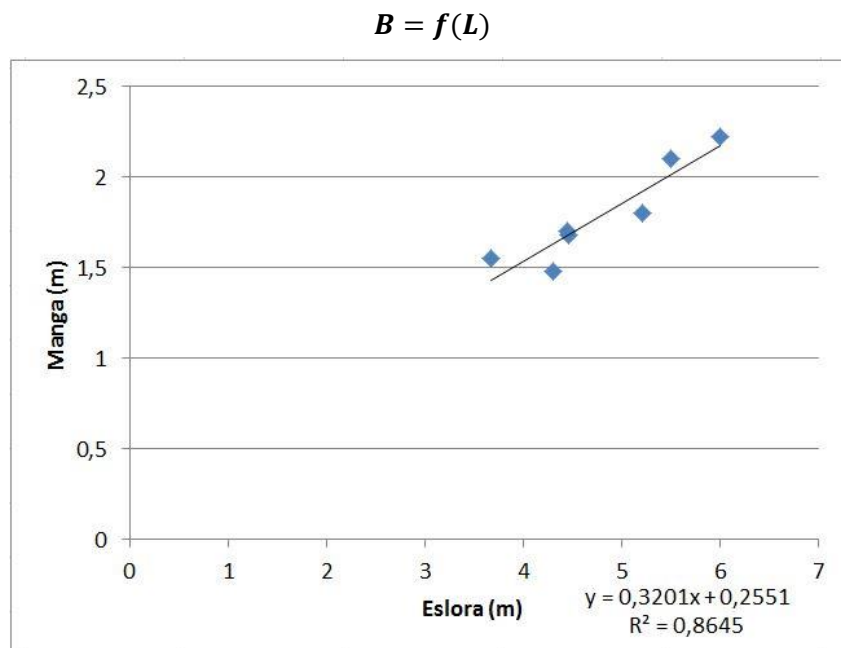


Figura 12. Gráfico manga-eslora

$$B = 0,3201 * L + 0,2551$$

$$B = 1,53m$$

- Puntal (D) – Eslora (L):

$$D = f(L)$$

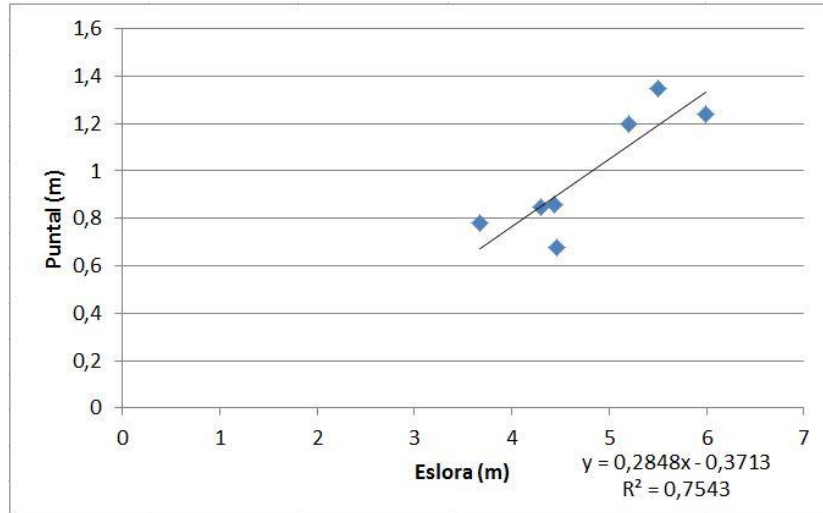


Figura 13. Gráfico puntal-eslora

$$D = 0,2848 * L - 0,3713$$

$$D = 0,76m$$

- Desplazamiento (Δ) – Eslora (L):

$$Desp. = f(L)$$

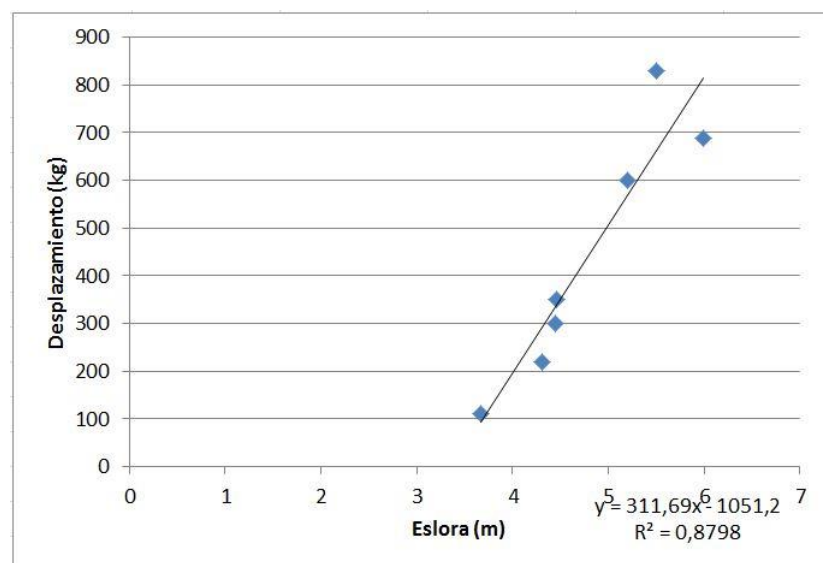


Figura 14. Gráfico desplazamiento-eslora

$$Desp. = 311,69 * L - 1051,2$$

$$Desp. = 195,56 \text{ kg}$$

Finalmente las medidas teóricas obtenidas para el modelo son:

Eslora	Manga	Puntal	Desplazamiento
4 m	1,53 m	0,76 m	195,56 m

Tabla 2. Medidas para la embarcación

3. FORMAS DEL CASCO

Al tratarse de un forrado a base de listones de madera, la superficie exterior del casco se ve limitada en cuanto a las formas.

Se delimitará la dimensión longitudinal de las tablas en relación al espaciado entre cuadernas así como su dimensión transversal en relación al espaciado entre refuerzos. Por consiguiente, la embarcación deberá constar de formas rectas y sencillas con ángulos pronunciados para la implementación de este tipo de forrado. El casco tendrá una configuración en forma de "V" a lo largo de toda la embarcación.

Este tipo de forma presenta ventajas hidrodinámicas al permitir a la embarcación un mejor deslizamiento y gobierno sobre la superficie del fluido y al reducir las aceleraciones verticales de las olas cuando la embarcación alcanza altas velocidades proporcionando mayor comodidad y estabilidad durante la navegación aunque esta embarcación no será diseñada para alcanzar altas velocidades.

El problema de una forma en "V" muy pronunciada es la poca estabilidad que ofrece la embarcación al estar parada y la facilidad de alcanzar un trimado positivo durante la navegación.

3.1. Ángulo de astilla muerta

Esta variación de formas se consigue mediante el ángulo de astilla muerta. Como no existe un valor óptimo en cuanto a condiciones favorables se debe encontrar un valor intermedio entre el máximo y el mínimo adaptando las ventajas e inconvenientes que más interesan en cuanto al tipo y finalidad de la embarcación. Según la normativa ISO 12215-5:2008 el máximo ángulo de astilla muerta aplicable es de 30°.

La finalidad del diseño de esta embarcación es el estudio del casco por lo que unas formas del casco beneficiosas para cierta velocidad no cobran tanta importancia como la estabilidad y maniobrabilidad de la embarcación. Por este motivo se escoge un ángulo de astilla muerta de 15°.

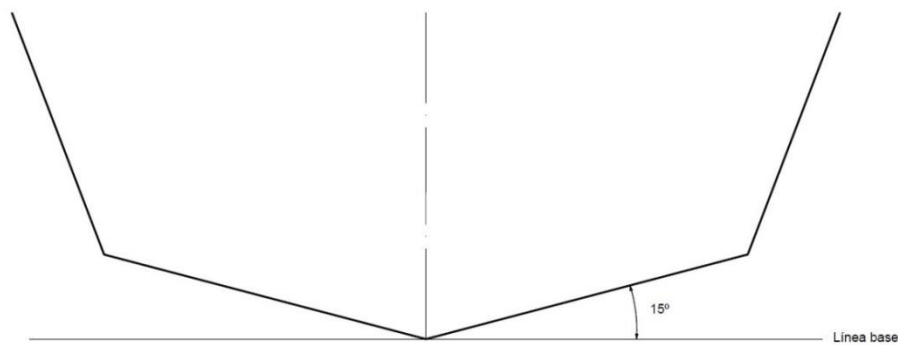


Figura 15. Ángulo de astilla muerta

3.2. Diseño:

Para la realización del diseño se ha utilizado la herramienta de diseño gráfico *Rhinoceros*.

El primer paso es crear dos rectángulos cruzados que servirán como guía para todo el proceso: el que está apoyado en la base tendrá una anchura correspondiente a la manga de la embarcación y un largo correspondiente a la eslora mientras que el que se encuentra en posición vertical tendrá una altura correspondiente al puntal de la embarcación. Tiene la función de marcar las medidas máximas calculadas anteriormente.

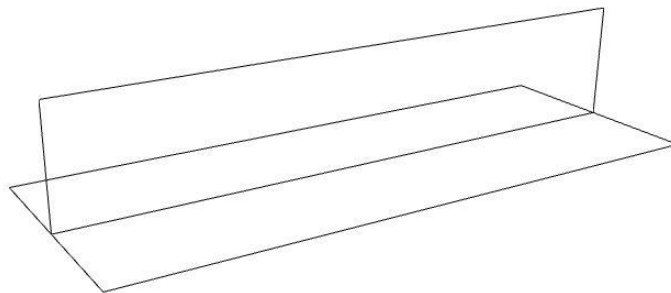


Figura 16. Primer paso del diseño

Encima de esta estructura se han añadido las líneas representativas y delimitantes del casco para el modelado inicial. Éstas han sido manipuladas mediante puntos de control hasta obtener las formas deseadas.

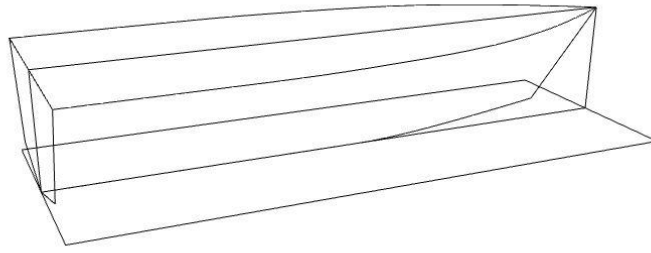


Figura 17. Líneas delimitantes de las formas

En esta imagen se puede observar la aplicación de la astilla muerta calculada así como unos costados y fondo con poca curvatura, de hecho, se ha intentado que sea la mínima posible por motivos del forrado anteriormente explicados.

Una vez que ya se tienen las líneas básicas representadas sobre el dibujo se añaden líneas transversales que delimitan el costado del barco, similar a las cuadernas, pero aquí no dejan de ser una guía para delimitar las formas. Para representarlas se ha cogido de referencia la geometría dibujada en el espejo de popa y se han copiado equidistantemente hasta llegar a la proa de la barca. A continuación, dichas líneas se han ajustado a los límites de los costados obteniendo el siguiente resultado:

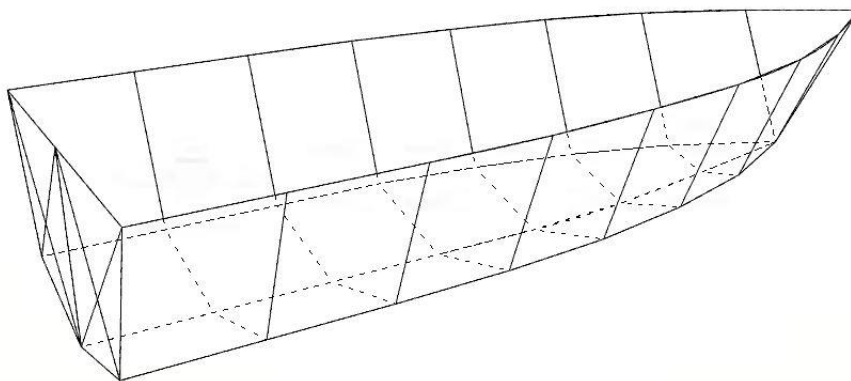


Figura 18. Formas de la embarcación

4. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para seleccionar el material más adecuado para esta embarcación se ha utilizado la herramienta *CES Edupack*. Ya se ha establecido que la embarcación es de madera, pero existen muchos tipos y composiciones diferentes. Para la construcción naval se utiliza sobretodo el contrachapado marino el cual es un material compuesto normalmente distribuidos en capas impares, donde cada capa distribuye las fibras de la manera en la dirección opuesta a la capa anterior proporcionando así mayor dureza y resistencia.

En el CES Edupack inicialmente se obtiene una gráfica de todos los grupos de materiales existentes representados según su densidad y resistencia a la rotura para poder ver en una visión amplia las propiedades y los límites de desempeño de cada material .Éste paso proporciona una comparativa de propiedades de todos los materiales y el lugar que ocupa el contrachapado marino entre ellos.

Los grupos representados son:

- Espumas
- Materiales naturales
- Materiales compuestos
- Fibras y partículas
- Metales y aleaciones
- Cerámicos
- Paneles

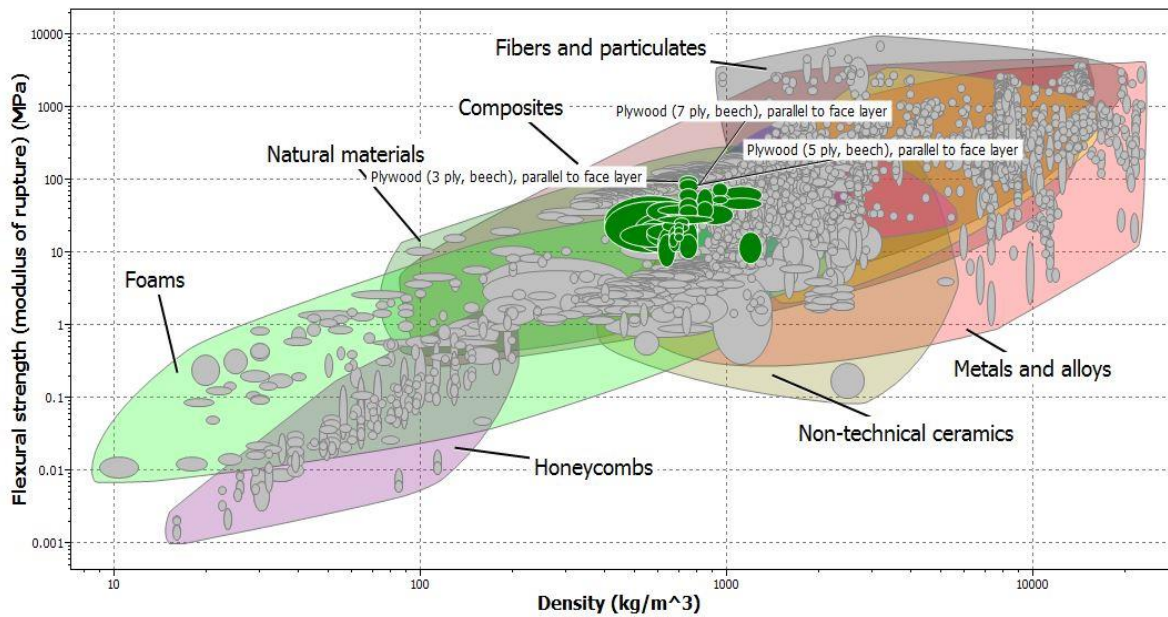


Figura 19. Gráfico de las propiedades de los materiales

Como se puede observar, el grupo de materiales compuestos presenta una buena relación densidad – resistencia. En concreto el contrachapado marino cumple con las condiciones mecánicas requeridas al tener una resistencia a la ruptura elevada con una densidad inferior a la del agua (1025 kg/m³) lo que resulta en una alta capacidad de flotabilidad y dureza.

En esta siguiente gráfica se muestran con más detalle las propiedades del contrachapado marino:

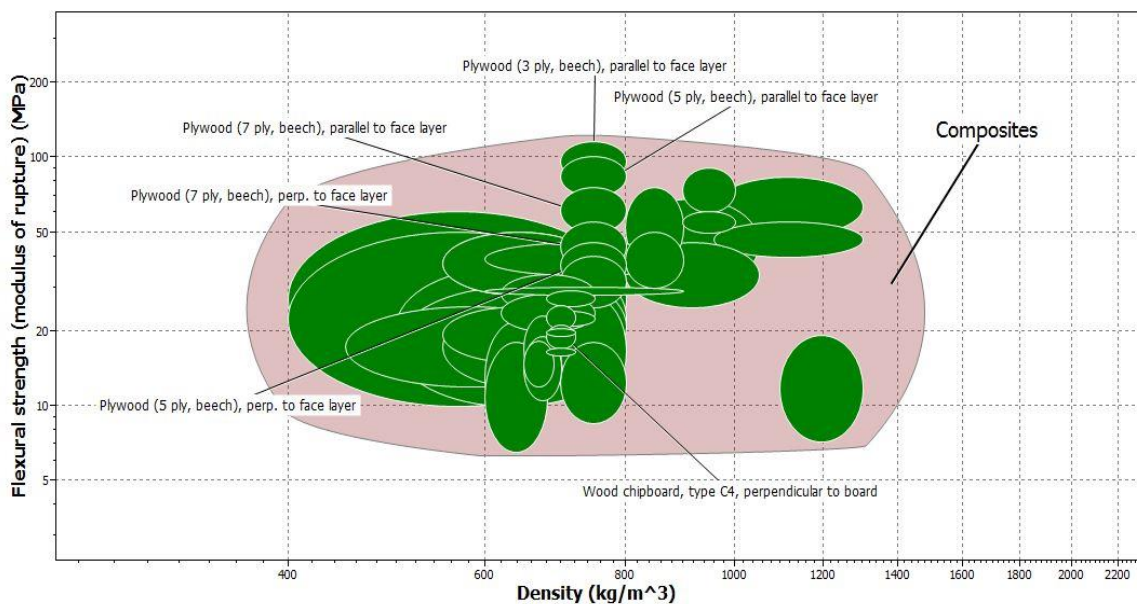


Figura 20. Gráfico de las propiedades del contrachapado

La orientación de las fibras del contrachapado pueden variar, pueden ser en dirección perpendicular a la primera capa de superficie o en dirección paralela a la capa de superficie.

Como se observa en la gráfica la mayoría de los contrachapados independientemente de sus direcciones y capas presentan la misma densidad pero el módulo de ruptura varía, siendo más elevado y por lo tanto más óptimo el contrachapado en dirección paralela a la superficie.

Otro factor que varía las propiedades del material es el número de capas. Al tratarse de capas impares el contrachapado más fino que se puede obtener es el de 3 capas. Cuantas menos presenta la lámina será más flexible, más maleable, y con mayor resistencia a la rotura pero el espesor obtenido con una lámina de 3 capas es demasiado fino para utilizarlo para el casco. Esto provoca una búsqueda de un punto intermedio, conseguir una buena resistencia, una buena manipulación y flexibilidad del material y un espesor adecuado.

Para el diseño de esta barca, finalmente, se escoge el contrachapado marino de 5 capas debido a que es flexible y maleable para adaptarla a las formas de la barca y a la vez presenta un módulo de ruptura entre 50-100 MPa, superior al valor mínimo que se obtendrá al calcular el escantillonado de la embarcación.

5. ESTRUCTURA Y REFUERZOS

Anteriormente se han diseñado las formas de la embarcación con las características más convenientes para este tipo de forrado a implementar. Una vez se tienen las líneas básicas y delimitantes de la embarcación, para que ésta cobre forma se procede a diseñar los refuerzos estructurales para proporcionar un cuerpo interno que de cierta estabilidad y rigidez a la embarcación ante la aparición de diversas fuerzas externas.

El proceso se ha llevado a cabo mediante el programa de diseño *Rhinoceros*. El orden de diseño establecido ha sido el siguiente:

5.1. Quilla:

El primer paso a diseñar ha sido una quilla central. A partir de la línea de simetría de las formas iniciales, se ha creado una tabla rectangular a lo largo la base plana del casco. Ésta no llega hasta proa porque el casco tiene una pequeña inclinación en esta zona por lo que crear una quilla a lo largo de toda la eslora de una única pieza puede llegar a generar tensiones en la pieza.

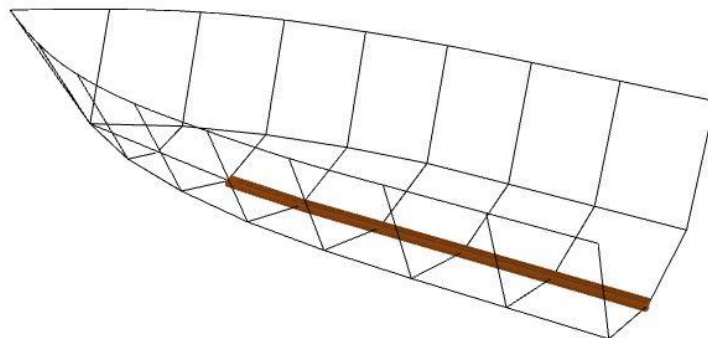


Figura 21. Diseño de la quilla

Se diseña una quilla central dividida en dos superficies generando una vista en alzado en forma de ``T`` y se le aplica el ángulo de astilla muerta de la embarcación (15°). Este modelamiento proporciona una buena adaptación del casco a la quilla e irá situado a la base de la superficie más ancha de la ``T``.

Al proporcionar este modelamiento a la quilla, no se ha considerado necesario el diseño de una sobrequilla.

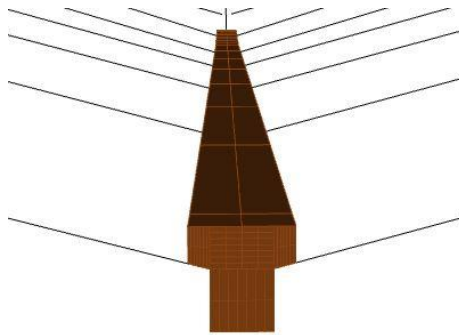


Figura 22. Forma "T" de la quilla

El borde de la quilla situado a proa irá unido a la roda. Esta unión deberá tener un encaje de piezas al ser una zona crítica por los esfuerzos que va a soportar, es decir, que no se deben dejar las esquinas de unión con un corte recto porque no garantiza una buena unión. El sistema diseñado es muy sencillo, se le ha puesto un corte escalonado.

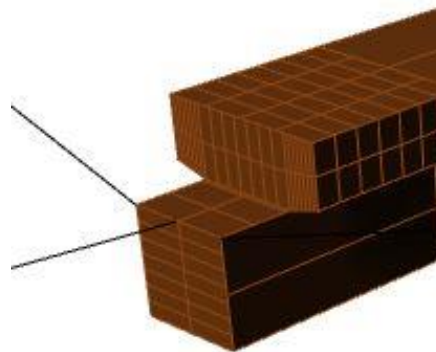


Figura 23. Unión entre quilla y roda

A continuación se pueden ver las medidas detalladas de toda la quilla en milímetros:

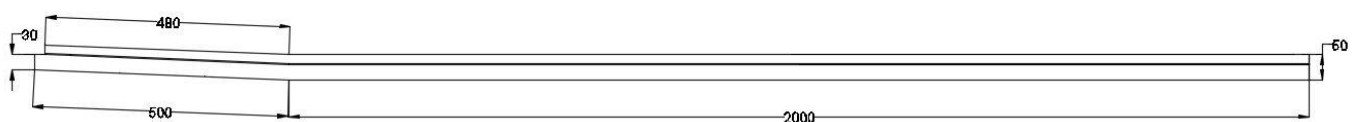


Figura 24. Medidas de la quilla

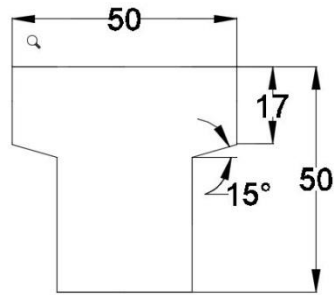


Figura 25. Medidas de la quilla

5.2. Roda:

La roda es una parte estructural del barco que consta de mucha curvatura y por lo tanto está expuesta a mayor tensión. Por eso, la roda ha sido dividida en tres partes para que la zona no se vea afectada. De esta manera, las fibras de la madera se pueden colocar longitudinalmente para que no haya puntos débiles.

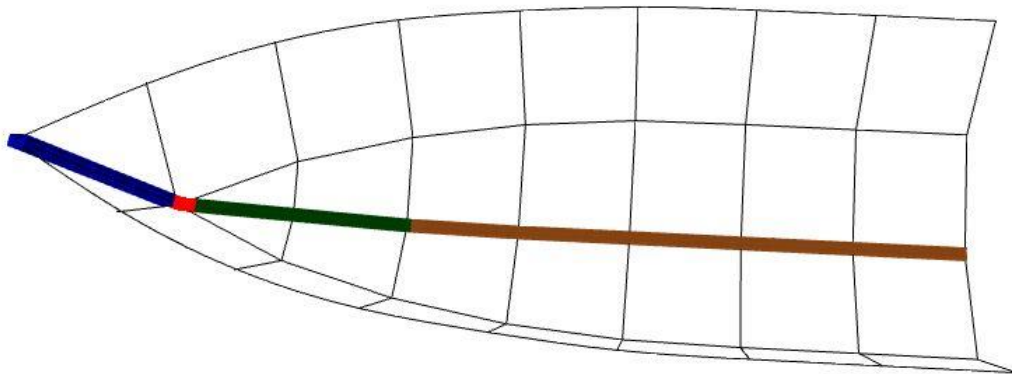


Figura 26. Diseño de la roda

La zona de la roda dispuesta longitudinalmente está modelada igual que la quilla para una correcta sujeción del casco así como el escalón marcado en las esquinas de unión entre cada pieza para conseguir una mejor sujeción entre ellas y una mejor resistencia a los esfuerzos producidos. La zona de la roda dispuesta transversalmente no está modelada en forma de "T" sino que es un tablón rectangular ya que aquí ya no tiene aplicación el ángulo de astilla muerta.

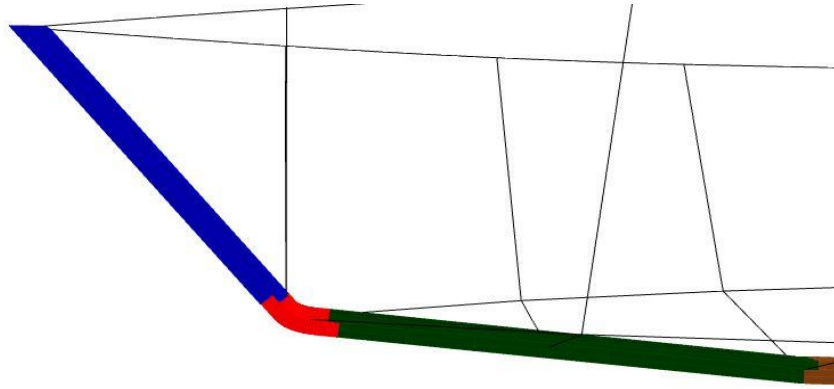


Figura 27. Diseño de la roda

A continuación se pueden ver las medidas detalladas de la roda en milímetros:

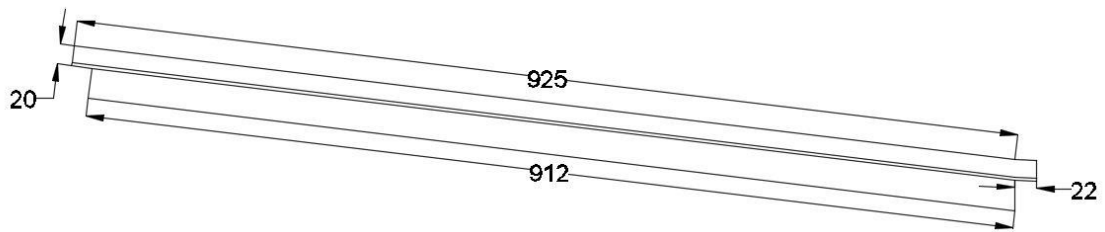


Figura 28. Medidas de la roda

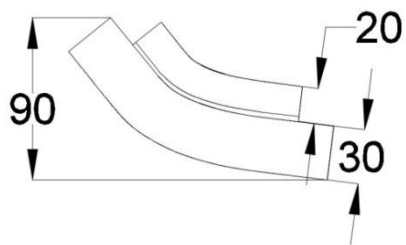


Figura 29. Medidas de la roda

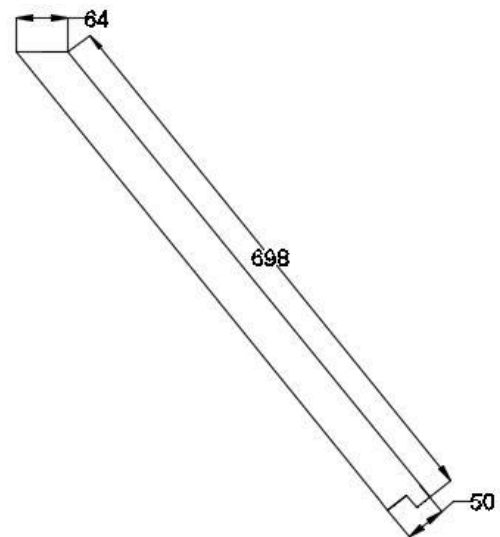


Figura 30. Medidas de la roda

5.3. Refuerzos longitudinales:

Se han colocado cuatro refuerzos longitudinales a cada lado de la embarcación. Éstos aportan rigidez a la estructura dándole la forma diseñada. Se han colocado de manera que queden lo más equidistantes posible pero adaptándose a las necesidades y formas de la embarcación, de esta manera, facilitará el posterior dimensionamiento de los trozos del casco para que sean similares entre ellos en cuanto a sus dimensiones.

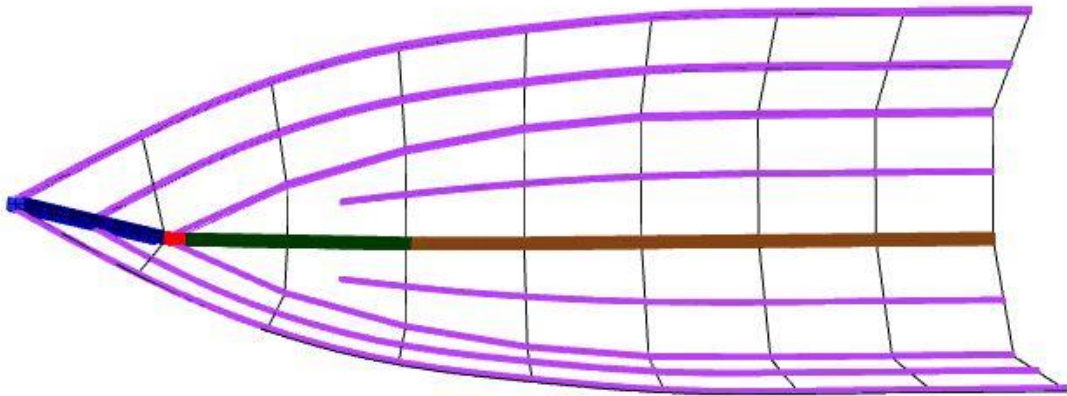


Figura 31. Diseño de los refuerzos longitudinales

Los refuerzos del fondo están separados entre ellos equidistantemente a 260 mm aproximadamente, mientras que los refuerzos del costado están separados equidistantemente a 320 mm aproximadamente. Asimismo, cada tablón de refuerzo tiene un grosor de 15x20 mm.

Los refuerzos, a diferencia de la quilla y la roda, para lograr su curvatura no están divididos en trozos. Al tratarse de un grosor más pequeño el material ofrece más flexibilidad y por lo tanto puede seguir las formas de la embarcación sin ser dividido en secciones.

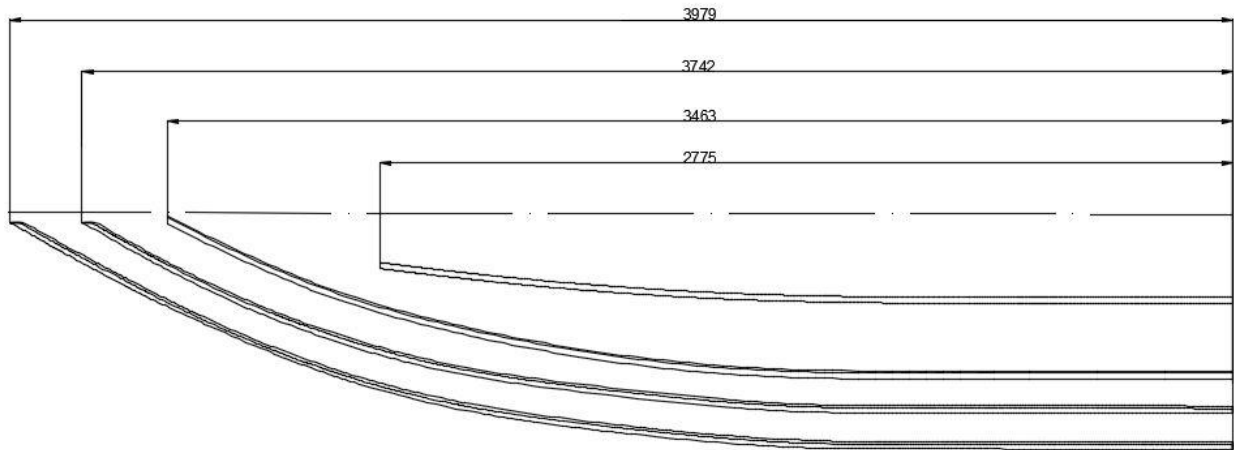


Figura 32. Medidas de los refuerzos longitudinales

5.4. Cuadernas:

Para esta embarcación se han diseñado 6 cuadernas distribuidas a lo largo de la eslora equidistantemente, a 55 mm de distancia entre cada una de ellas. El espesor de las cuadernas es mayor al de los refuerzos, 30 mm, ya que es la parte de la embarcación que deberá soportar más esfuerzos. Diseñadas al igual que los refuerzos de una sola pieza y se le han añadido muescas en la superficie que está en contacto con el casco, 4 a cada lado, para que los refuerzos puedan encajarse en su interior y no quede un espacio vacío entre cuadernas-refuerzos-casco. De esta manera el casco de la embarcación tiene más superficie sobre la que apoyarse.

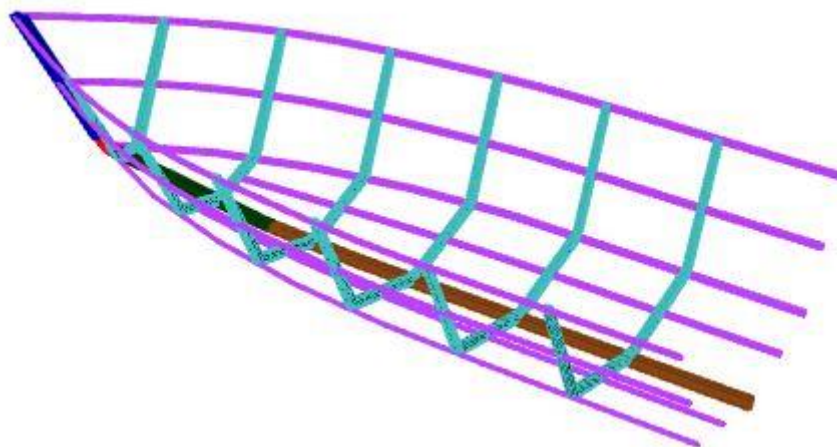


Figura 33. Diseño de las cuadernas

A continuación puede apreciarse con más detalle el dimensionado y diseño de cada cuaderna, ordenadas de proa a popa:

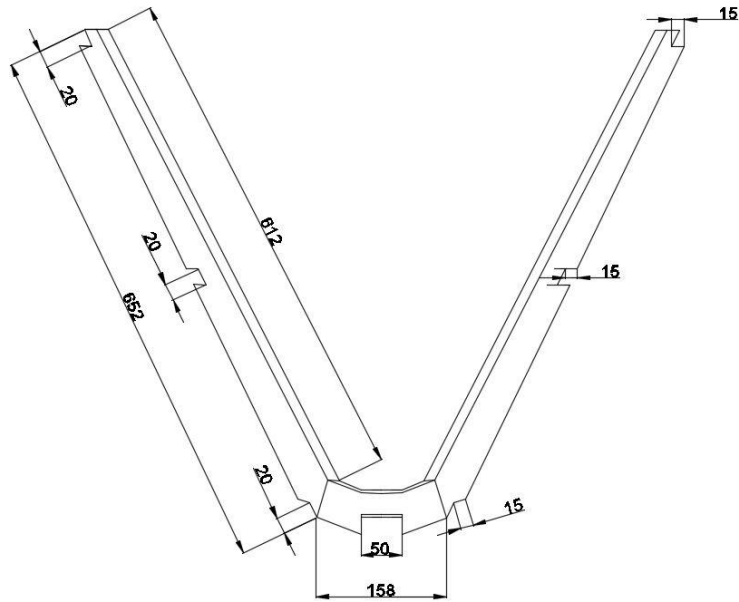


Figura 34. Medidas cuaderna 1

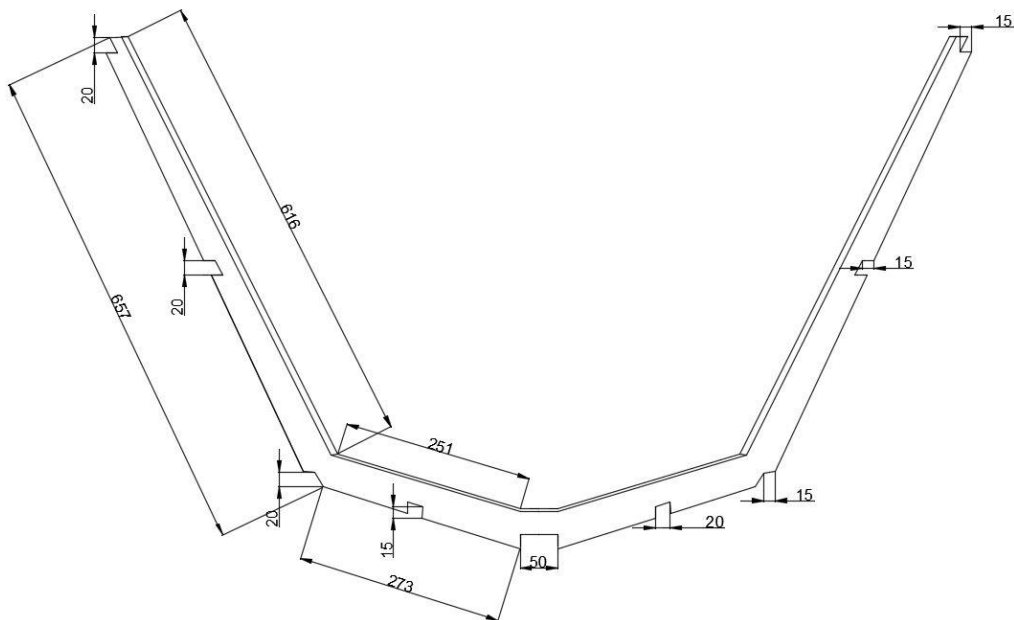


Figura 35. Medidas cuaderna 2

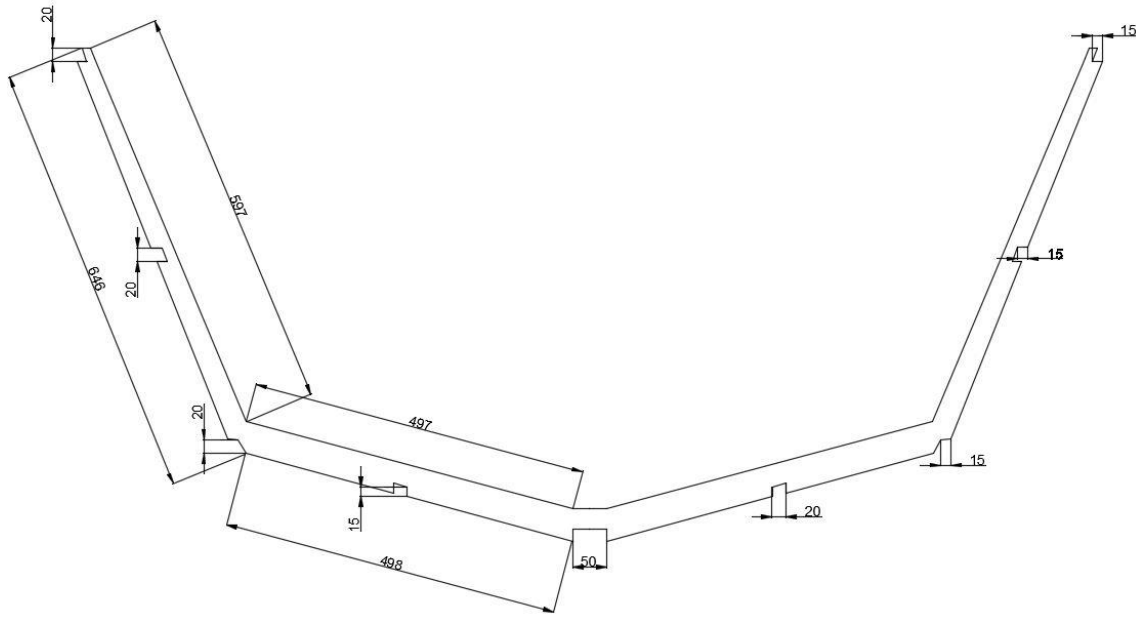


Figura 38. Medidas cuaderna 5

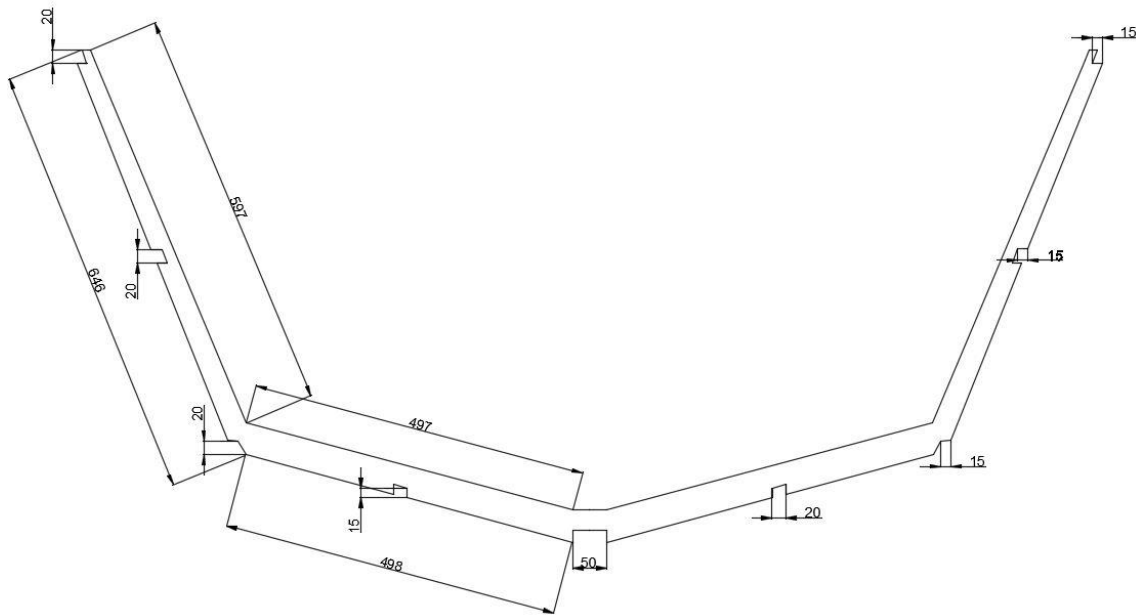


Figura 39. Medidas cuaderna 6

Como se puede observar, con estos elementos descritos se obtiene la estructura interna de la embarcación la cual proporciona las formas diseñadas, rigidez para la posterior implementación del casco y resistencia en cuanto a todos los factores externos, tensiones y presiones que pueda recibir la embarcación.

6. CÁLCULOS HIDRODINÁMICOS

6.1. Desplazamiento máximo

El desplazamiento o el peso del buque representa el agua desplazada por la propia embarcación. Se obtiene a partir de la suma del peso en rosca y el peso muerto de la embarcación:

$$\Delta = P_{rosca} + P_{muerto}$$

El peso muerto de la embarcación en este caso es el peso de la estructura, sin carga. Este peso ha sido calculado anteriormente mediante una base de datos obteniendo un valor de 195,56 kg.

El peso en rosca de la embarcación por otro lado será la carga que la barca lleve a bordo. Al tratarse de una embarcación pequeña de 4 metros de eslora, se limita a una máxima capacidad de 4 personas las cuales según la normativa Europea se cuantifican con 75 kg cada una. Se considerará el peso del motor con un máximo de 50 kg y cargas adicionales de hasta aproximadamente 30 kg por persona. De esta manera se obtiene una estimación del peso en rosca:

$$P_{rosca} = 4 * 75 + 50 + 4 * 30 = 470 \text{ kg}$$

Finalmente se obtiene un desplazamiento de:

$$\Delta = 470 + 195,56 = 665,56 \text{ kN}$$

6.2. Coeficientes de formas

Se procede a calcular teóricamente los coeficientes de formas más relevantes de la embarcación utilizando el desplazamiento y las dimensiones medidas en el diseño obtenido anteriormente con la herramienta *Rhinoceros*.

- Coeficiente de bloque:

$$Cb = \frac{\Delta}{1,025 * L_{pp} * B * T} = 0,545$$

Donde,

Δ = Desplazamiento (ton)

L_{pp} = Eslora entre perpendiculares (m)

B = Manga (m)

T = Calado (m)

- Coeficiente maestra:

$$Cm = \frac{A_m}{B * T} = 0,712$$

Donde,

A_m = Área sumergida de la sección maestra (m^2)

- Coeficiente prismático:

$Cp > Cb$

$$Cp = \frac{C_b}{C_m} = 0,760$$

- Coeficiente de flotación:

$$Cf = \frac{A_f}{B * L_{pp}} = 0,789$$

Donde,

A_f = Área de flotación (m^2)

- Posición central de la carena:

$$X_{cc} = \frac{(17,5 * C_p - 12,5) * L_{pp}}{100} = 0,032$$

$$X_{cc} \% = 32$$

Según el criterio: positivo (+) proa, negativo (-) popa, se concluye que el centro de abscisas de la carena está situada en proa generando un trimado positivo.

A continuación se introduce el diseño de la embarcación en la herramienta *Maxsurf Modeler* en la cual se le ajustan inicialmente los datos: eslora, manga, puntal y desplazamiento. Éste proporciona los datos hidrostáticos en la línea de flotación más característicos de la barca así como también su curva de áreas.

Datos del <i>Maxsurf</i>		
Desplazamiento	665,53	kg
Volumen desplazado	0,650	m ³
Calado	0,287	m
Línea de flotación	3,618	m
Manga máx. en línea flotación	1,169	m
Área sumergida	4,516	M2
Área sumergida secc. maestra	0,271	M2
Área de flotación	3,440	M2
Coeficiente prismático	0,759	
Coeficiente de bloque	0,536	
Coeficiente maestra	0,706	
Coeficiente flotación	0,794	
Longitud LCB	1,429	m
Longitud LCF	1,493	m
LCB %	39,506	

Datos calculados		
Desplazamiento	665,53	kg
Coeficiente bloque	0,545	
Coeficiente maestra	0,712	
Coeficiente prismático	0,760	
Coeficiente flotación	0,789	
Posición central de la carena	0,032	

Tabla 4. Datos calculados

LCF %	41,281	
KB	0,181	m
KG fluido	0	m
BMt	0,484	m
BML	4,282	m
GMt corregido	0,664	m
GML	4,462	m
KMt	0,664	m
KML	4,462	m

Tabla 3. Datos del Maxsurf

Al comparar los datos calculados y los datos obtenidos con el *Maxsurf* se puede observar que no son exactos pero sí muy similares. Esto se debe a errores de aproximación al medir las longitudes y áreas de la embarcación o a la cantidad de decimales utilizados.

La curva de áreas obtenida por el programa es la siguiente:

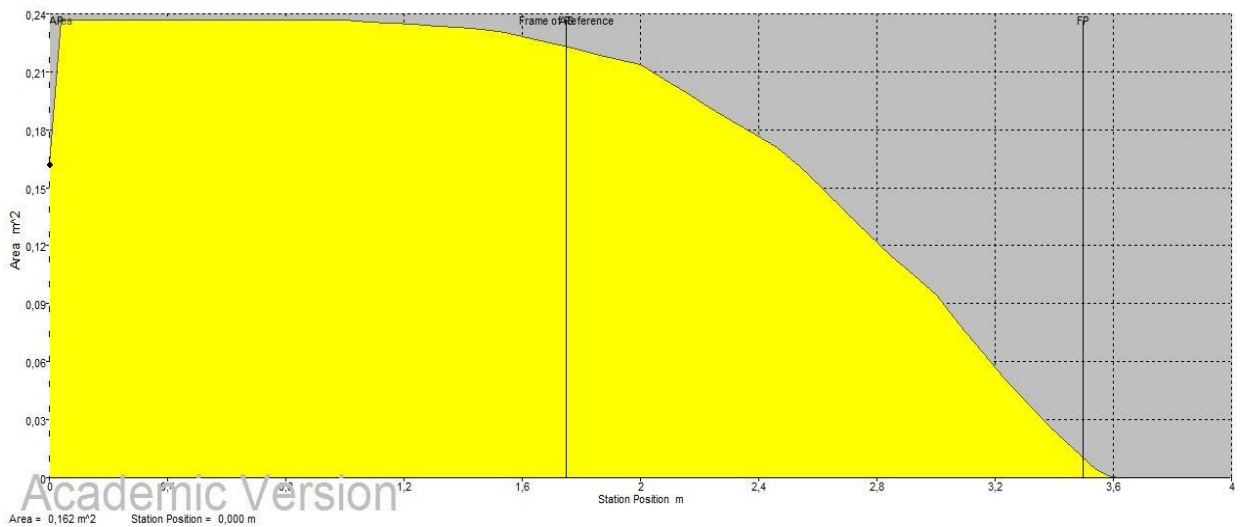


Figura 40. Curva de áreas

- Cálculo de áreas por encima de la línea de flotación:

	Surface	Above DWL 3D true surface area m ²	LC area m	TC area m	VC area m	I - roll m ⁴	I - pitch m ⁴	I - yaw m ⁴
1	Surface 1	0,183	3,674	0,101	0,573	0,004	0,005	0,003
2	Surface 2	0,281	3,251	0,292	0,523	0,008	0,011	0,008
3	Surface 3	0,266	2,751	0,475	0,524	0,006	0,010	0,007
4	Surface 4	0,259	2,250	0,583	0,524	0,006	0,010	0,006
5	Surface 5	0,253	1,749	0,644	0,524	0,005	0,010	0,006
6	Surface 6	0,760	0,750	0,673	0,524	0,016	0,157	0,145
7	Surface 7	0,183	3,674	-0,101	0,573	0,004	0,005	0,003
8	Surface 8	0,281	3,251	-0,292	0,523	0,008	0,011	0,008
9	Surface 9	0,266	2,751	-0,475	0,524	0,006	0,010	0,007
10	Surface 10	0,259	2,250	-0,583	0,524	0,006	0,010	0,006
11	Surface 11	0,253	1,749	-0,644	0,524	0,005	0,010	0,006
12	Surface 12	0,760	0,750	-0,673	0,524	0,016	0,157	0,145
13	Surface 13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	Surface 14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	Surface 15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	Surface 16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	Surface 17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	Surface 18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	Surface 19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	Surface 20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	Surface 21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	Surface 22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	Surface 23	0,096	0,000	-0,135	0,445	0,002	0,001	0,001
24	Surface 24	0,249	0,000	-0,281	0,559	0,012	0,004	0,008
25	Surface 25	0,224	0,000	-0,427	0,573	0,010	0,004	0,006
26	Surface 26	0,224	0,000	0,427	0,573	0,010	0,004	0,006
27	Surface 27	0,249	0,000	0,281	0,559	0,012	0,004	0,008
28	Surface 28	0,096	0,000	0,135	0,445	0,002	0,001	0,001
29	Total Above DWL 3D true surface area	5,141	1,521	0,000	0,532	1,513	8,444	9,766

Tabla 5. Áreas sobre DWL

- Cálculo de áreas por debajo de la línea de flotación:

	Surface	Below DWL 3D true surface area m ²	LC area m	TC area m	VC area m	I - roll m ⁴	I - pitch m ⁴	I - yaw m ⁴
1	Surface 1	0,011	3,539	0,023	0,239	0,000	0,000	0,000
2	Surface 2	0,087	3,250	0,152	0,214	0,001	0,002	0,002
3	Surface 3	0,082	2,751	0,343	0,214	0,000	0,002	0,002
4	Surface 4	0,080	2,249	0,459	0,214	0,000	0,002	0,002
5	Surface 5	0,077	1,750	0,526	0,215	0,000	0,002	0,002
6	Surface 6	0,233	0,748	0,555	0,215	0,000	0,044	0,044
7	Surface 7	0,011	3,539	-0,023	0,239	0,000	0,000	0,000
8	Surface 8	0,087	3,250	-0,152	0,214	0,001	0,002	0,002
9	Surface 9	0,082	2,751	-0,343	0,214	0,000	0,002	0,002
10	Surface 10	0,080	2,250	-0,459	0,214	0,000	0,002	0,002
11	Surface 11	0,077	1,750	-0,526	0,215	0,000	0,002	0,002
12	Surface 12	0,233	0,748	-0,555	0,215	0,000	0,044	0,044
13	Surface 13	0,062	3,167	0,079	0,119	0,000	0,001	0,001
14	Surface 14	0,164	2,730	0,159	0,093	0,002	0,003	0,005
15	Surface 15	0,225	2,241	0,216	0,076	0,004	0,005	0,008
16	Surface 16	0,258	1,746	0,250	0,072	0,006	0,006	0,011
17	Surface 17	0,819	0,749	0,264	0,071	0,020	0,155	0,172
18	Surface 18	0,062	3,167	-0,079	0,119	0,000	0,001	0,001
19	Surface 19	0,164	2,730	-0,159	0,093	0,002	0,003	0,005
20	Surface 20	0,225	2,241	-0,216	0,076	0,004	0,005	0,008
21	Surface 21	0,258	1,746	-0,250	0,072	0,006	0,006	0,011
22	Surface 22	0,819	0,749	-0,264	0,071	0,020	0,155	0,172
23	Surface 23	0,105	0,000	-0,214	0,170	0,002	0,000	0,002
24	Surface 24	0,041	0,000	-0,096	0,191	0,000	0,000	0,000
25	Surface 25	0,013	0,000	-0,506	0,239	0,000	0,000	0,000
26	Surface 26	0,013	0,000	0,506	0,239	0,000	0,000	0,000
27	Surface 27	0,041	0,000	0,096	0,191	0,000	0,000	0,000
28	Surface 28	0,105	0,000	0,214	0,170	0,002	0,000	0,002
29	Total Below DWL 3D true surface area	4,516	1,438	0,000	0,119	0,527	4,448	4,924

Tabla 6. Áreas bajo DWL

6.3. Resistencia y propulsión:

El método de propulsión escogido para esta barca es un motor fuera borda. Para conocer el tipo de motor que se puede utilizar para esta barca se utilizará la herramienta *Maxsurf Resistance* con el método *Holtrop* para conocer la resistencia al avance que se produce en el agua así como la predicción de potencia que deberá asumir el motor para propulsar la embarcación. Éste método subdivide la resistencia total del buque en componentes de distinto origen, cuya evaluación se hace aplicando análisis de regresión sobre datos experimentales del buque.

La resistencia al avance, la cual está relacionada con la velocidad de la embarcación, el desplazamiento y las formas. Una correcta estimación de ésta implica una correcta estimación de la potencia que deberá dar el elemento propulsor ya que deberá aplicarle una fuerza proporcional a la resistencia al avance si se quiere mantener la embarcación a una velocidad constante.

6.3.1. Velocidad de diseño:

El primer paso será definir la velocidad. Para ello se hará un estudio de los nudos que puede llegar a alcanzar la embarcación en relación a su número de Froude. Se escogen valores de velocidad entre 1-12 kn:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g * Lwl}}$$

Donde,

V= velocidad (m/s)

g= gravedad (m/s²)

Lwl= eslora en la línea de flotación (m)

- Para valores de Froude < 0,27 se consideran embarcaciones lentas
- Para valores de Froude 0,27-0,50 se considera velocidad media
- Para valores de Froude > 0,50 se considera velocidad alta

kn	m/s	Froude	
1	0,5144	0,086	Velocidad lenta
2	1,0288	0,173	Velocidad lenta
3	1,5432	0,259	Velocidad lenta
4	2,0576	0,345	Velocidad media
5	2,5720	0,432	Velocidad media
6	3,0864	0,518	Velocidad rápida
7	3,6008	0,605	Velocidad rápida
8	4,1152	0,691	Velocidad rápida
9	4,6296	0,777	Velocidad rápida
10	5,1440	0,864	Velocidad rápida
11	5,6584	0,950	Velocidad rápida
12	6,1728	1,036	Velocidad rápida

Tabla 7. Valores de velocidad

Se define para este tipo de embarcación una velocidad máxima de 7 kn. Se escoge esta velocidad como la máxima al ser el mínimo de velocidad rápida porque se trata de una barca pequeña para navegar en aguas costeras y con un forro a implementar sometido a estudio, lo que hace que no sea conveniente llegar a velocidades muy altas.

6.3.2. Resistencia al avance:

Se ha abierto el diseño con la herramienta *Maxsurf Resistance*. Este programa ofrece variedad de métodos para el cálculo de la resistencia y potencia de la embarcación, pero en este caso, como hemos mencionado anteriormente, se estimarán los valores mediante el método *Holtrop-Menen*.

A continuación pueden observarse los valores de resistencia al avance obtenidos para cada velocidad a la que se puede encontrar la embarcación:

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Holtrop Resist. (kN)
1	0,000	0,000	--
2	0,500	0,043	0,0
3	1,000	0,086	0,0
4	1,500	0,130	0,0
5	2,000	0,173	0,0
6	2,500	0,216	0,0
7	3,000	0,259	0,1
8	3,500	0,302	0,1
9	4,000	0,345	0,1
10	4,500	0,389	0,1
11	5,000	0,432	0,2
12	5,500	0,475	0,4
13	6,000	0,518	0,5
14	6,500	0,561	0,6
15	7,000	0,605	0,7

Tabla 8. Resistencia al avance

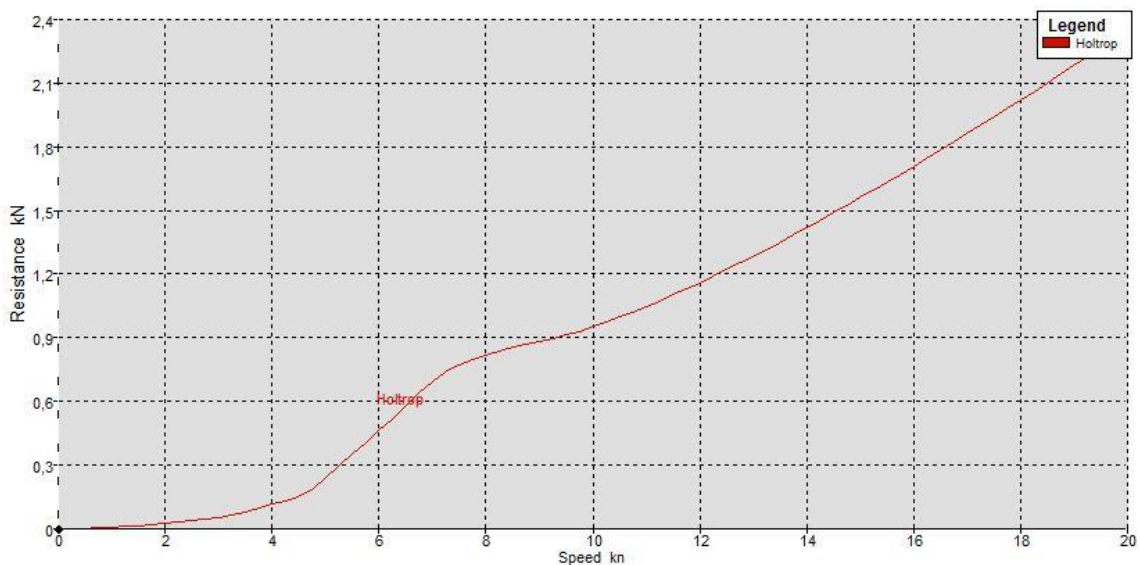


Figura 40. Gráfico de la resistencia al avance

Como se puede observar en la tabla anterior se obtiene una resistencia al avance total máxima de 700 N. Al haber escogido una velocidad de diseño moderada la resistencia resultante no es un valor alto, por lo que la potencia del motor propulsor necesaria tampoco será elevada al estar directamente relacionados.

Como conclusión de estos datos de resistencia se ve que no es una progresión gradual, la

resistencia empieza aumentar su valor a medida que aumenta la velocidad, sin ser un valor proporcional.

6.3.3. Selección del motor:

Para estimar la potencia propulsora se utilizarán las mismas herramientas (Maxsurf Resistance) y método (Holtrop-Menen) que los utilizados para la resistencia al avance. Mediante éste método se obtienen unos resultados bastante exactos y serán utilizados para el diseño del propulsor y para el dimensionamiento de la planta propulsora.

A continuación pueden observarse los valores de potencia de empuje obtenidos para cada velocidad a la que se puede encontrar la embarcación:

	Speed (kn)	Holtrop Power (kW)
1	0,000	–
2	0,500	0,001
3	1,000	0,004
4	1,500	0,012
5	2,000	0,026
6	2,500	0,049
7	3,000	0,085
8	3,500	0,141
9	4,000	0,240
10	4,500	0,345
11	5,000	0,620
12	5,500	0,993
13	6,000	1,423
14	6,500	1,937
15	7,000	2,502

Tabla 9. Potencia de empuje

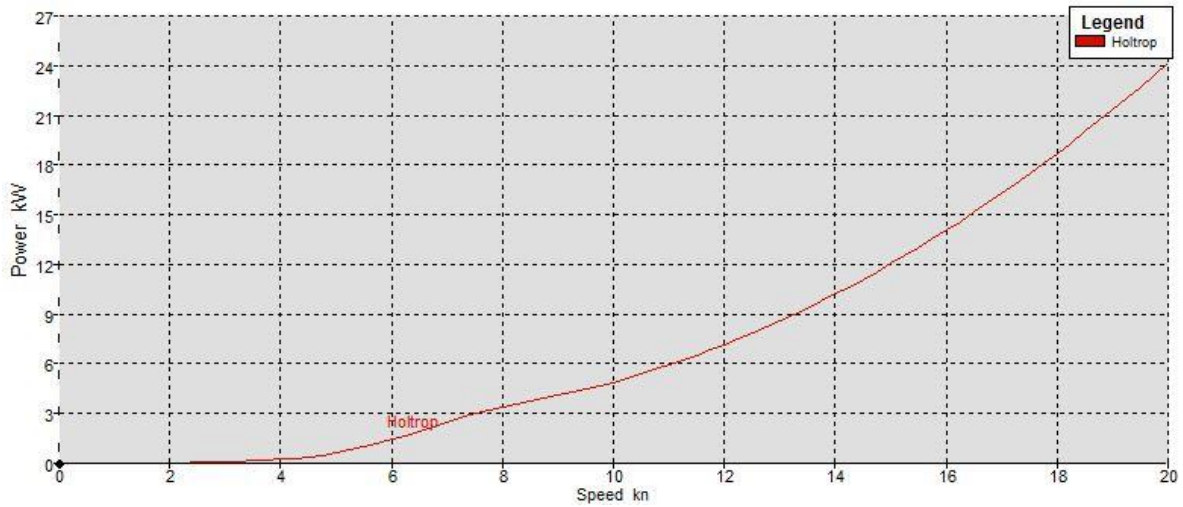


Figura 41. Gráfico de la potencia de empuje

Finalmente se obtiene que se necesitará un motor fueraborda cuya potencia de empuje proporcione 2,5 kW (3,35 CV). Ésta es la máxima velocidad que se ha determinado para la barca así que para que el motor no deba actuar a máxima potencia para entregar dicha velocidad y si las condiciones del mar no fueran propicias, un motor tan ajustado en cuanto a potencia no sería capaz de proporcionar la velocidad máxima.

Por estas condiciones se le otorgará: un margen de mar del 5%, un margen de motor del 5% y, para condiciones de sobrecarga otros 5% adicionales para determinar la potencia máxima que el motor pueda entregar incluso en las condiciones más desfavorables:

Potencia calculada	2,502	kW
Margen de mar (5%)	2,625	kW
Margen del motor (5%)	2,75	kW
Sobrecarga (5%)	2,875	kW
Potencia total	2,875	kW

Tabla 10. Márgenes de potencia

Finalmente el motor que deberá instalarse en la barca será de 2,88 kW (3,86 CV) como mínimo.

7. ESCANTILLONADO

El escantillonado de la embarcación deberá cumplir con los parámetros establecidos por la norma ISO los cuales garantizan la obtención de una adecuada resistencia local.

La norma a utilizar es *ISO 12215-5:2008 Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón*. Se aplica a aquellas embarcaciones comprendidas entre 2,5 y 24 metros de eslora y de velocidad menor a 50 kn.

Para calcular el espesor requerido para madera laminada o contrachapado excluyendo toda pequeña capa de protección se facilita la siguiente ecuación:

$$t = b * \sqrt{\frac{P * k_2}{1000 * \sigma_d}}$$

Donde:

t = espesor mínimo requerido (mm)

b = dimensión menor del panel (mm)

P = presión de diseño del panel (kN/m^2)

$k_2 = 0,5$, ya que la madera laminada es demasiado anisótropa para poder beneficiarse en este campo

σ_d = tensión de diseño para la madera

Se debe dividir la embarcación en paneles:

- Paneles de costado:

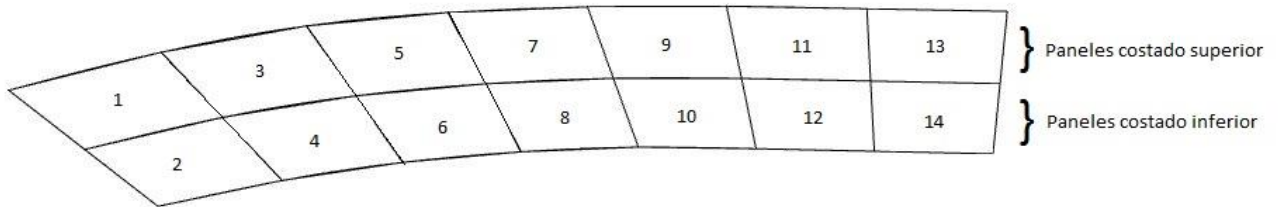


Figura 42. Paneles de costado

- Paneles de fondo :

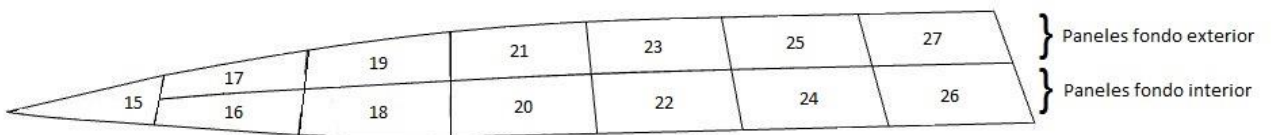


Figura 43. Paneles de fondo

7.1. Espesor en paneles de fondo:

- Presión en los paneles de fondo:

$$P_{BMD} = P_{BMD\ BASE} * k_{AR} * k_{DC} * k_L$$

Donde,

P_{BMD} = Presión del fondo de una embarcación a motor en la modalidad de desplazamiento (kN/m^2)

$P_{BMD\ BASE}$ = Presión base del fondo de una embarcación a motor en la modalidad de desplazamiento (kN/m^2)

$$P_{BMD\ BASE} = 2,4 * m_{LDC}^{0,33} + 20$$

Donde,

m_{LDC} = masa del desplazamiento en carga de la embarcación (kg)

k_{AR} = Factor de corrección de la presión en el área

$$k_{AR} = \frac{k_R * 0,1 * m_{LDC}^{0,15}}{A_D^{0,3}}$$

Donde,

$k_R = 1,5 - 3 \times 10^{-4} * b$ factor estructural para los paneles de fondo de las embarcaciones de desplazamiento a motor

$A_D = (l * b) \times 10^{-6}$ área de diseño. No se debe tomar mayor de $2,5 * b^2 \times 10^{-6}$ (m²)

Donde,

l = dimensión mayor del panel (mm)

k _{AR} paneles fondo exteriores						
Panel	b (mm)	l (mm)	A _D (m ²)	k _R	m _{LDC} (kg)	k _{AR}
15	227	512	0,1162	1,4319	765,56	0,7395
17	177	425	0,0752	1,4469	765,56	0,8514
19	223	508	0,1133	1,4331	765,56	0,7458
21	251	525	0,1318	1,4247	765,56	0,7085
23	252	511	0,1288	1,4244	765,56	0,7133
25	253	510	0,1290	1,4241	765,56	0,7127
27	252	510	0,1285	1,4244	765,56	0,7137

Tabla 11. Valores de k_{AR}

k _{AR} paneles fondo interiores						
Panel	b(mm)	l(mm)	A _D (m ²)	k _R	m _{LDC} (kg)	k _{AR}
16	186	423	0,0787	1,4442	765,56	0,8384
18	240	510	0,1224	1,4280	765,56	0,7261
20	263	526	0,1383	1,4211	765,56	0,6965
22	271	510	0,1382	1,4187	765,56	0,6955
24	272	510	0,1387	1,4184	765,56	0,6946
26	272	509	0,1384	1,4184	765,56	0,6950

Tabla 12. Valores de k_{AR}

$k_{DC} = 0,6$ Factor de categoría de diseño C

$k_L = 1$ Factor de distribución de presión longitudinal

Presión paneles fondo exteriores						
Panel	mLDC (kg)	kAR	kL	kDC	PBMD BASE (kN/m ²)	PBMD (kN/m ²)
15	765,56	0,7395	1	0,6	41,4746	18,4015
17	765,56	0,8514	1	0,6	41,4746	21,1865
19	765,56	0,7458	1	0,6	41,4746	18,5591
21	765,56	0,7085	1	0,6	41,4746	17,6321
23	765,56	0,7133	1	0,6	41,4746	17,7507
25	765,56	0,7127	1	0,6	41,4746	17,7363
27	765,56	0,7137	1	0,6	41,4746	17,7611

Tabla 13. Valores de presión

Presión paneles fondo interiores						
Panel	mLDC (kg)	kAR	kL	kDC	PBMD BASE (kN/m ²)	PBMD (kN/m ²)
16	765,56	0,8384	1	0,6	41,4746	18,4015
18	765,56	0,7261	1	0,6	41,4746	21,1865
20	765,56	0,6965	1	0,6	41,4746	18,5591
22	765,56	0,6955	1	0,6	41,4746	17,6321
24	765,56	0,6946	1	0,6	41,4746	17,7507
26	765,56	0,6950	1	0,6	41,4746	17,7363

Tabla 14. Valores de presión

- Tensión de diseño para la madera:

Para todos los elementos estructurales de madera laminada, la fatiga de diseño se calcula:

$$\sigma_u = 0,5 * \sigma_{uf} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Donde,

σ_{uf} = resistencia mínima a la flexión (tensión de rotura) paralela a la mínima dimensión del panel $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$

$$\sigma_{uf} = \left(\frac{\rho_{PW}}{1000} \right)^{0,5} * (68 - 2 * N_{ply} + 0,03 * N_{ply}^2)$$

Donde,

$\rho_{PW} = 400 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ densidad del contrachapado a utilizar

$N_{ply} = 5$ número de capas

Tensión de diseño			
$\rho_{PW} \text{ (kg/m}^3\text{/1000)}$	N_{ply}	$\sigma_{uf} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_u \text{ (N/mm}^2\text{)}$
0,4	5	16,6170	8,3085

Tabla 15. Tensión de diseño de la madera

- Espesor en los paneles de fondo:

Espesor paneles de fondo exteriores					
Panel	b(mm)	PBMD (kN/m ²)	k2	$\sigma_d \text{ (N/mm}^2\text{)}$	t (mm)
15	227	18,4015	0,5	8,3085	7,5540
17	177	21,1865	0,5	8,3085	6,3201
19	223	18,5591	0,5	8,3085	7,4526
21	251	17,6321	0,5	8,3085	8,1762
23	252	17,7507	0,5	8,3085	8,2363
25	253	17,7363	0,5	8,3085	8,2656
27	252	17,7611	0,5	8,3085	8,2387

Tabla 16. Valores de espesor

Espesor paneles de fondo interiores					
Panel	b(mm)	PBMD (kN/m ²)	k2	$\sigma_d \text{ (N/mm}^2\text{)}$	t (mm)
16	186	18,4015	0,5	8,3085	6,1896
18	240	21,1865	0,5	8,3085	8,5697
20	263	18,5591	0,5	8,3085	8,7894
22	271	17,6321	0,5	8,3085	8,8276
24	272	17,7507	0,5	8,3085	8,8900
26	272	17,7363	0,5	8,3085	8,8864

Tabla 17. Valores de espesor

Espesor máximo = 8,89 mm

7.2. Espesor en paneles de costado:

- Presión en los paneles de costado:

$$P_{SMD} = [P_{DM\,BASE} + k_z * (P_{BDM\,BASE} - P_{DM\,BASE})] * k_{AR} * k_{DC} * k_L \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

Donde,

$$P_{DM\,BASE} = 0,35 * L_{WL} + 14,6 \left(\frac{kN}{m^2} \right) \text{ Presión base de la cubierta de una embarcación a motor}$$

Donde,

$$L_{WL} = 3,641 \text{ m línea de flotación}$$

$$k_z = \frac{z-h}{z} \text{ factor de distribución vertical de la presión}$$

Donde,

Z = altura de la parte superior del casco o del límite casco/cubierta por encima de la línea de flotación (m)

h = altura del centro del panel o del punto medio del refuerzo por encima de la flotación a plena carga (m)

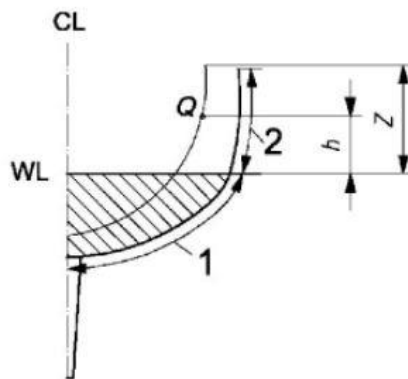


Figura 44. Figura 2 c) ISO 12215-5:2008

kAR paneles costado superiores						
Panel	b (mm)	l (mm)	AD (m ²)	kR	mLDC (kg)	kAR
1	321	547	0,1756	1,4037	765,56	0,6405
3	328	547	0,1794	1,4016	765,56	0,6354
5	317	548	0,1737	1,4049	765,56	0,6431
7	304	548	0,1666	1,4088	765,56	0,6531
9	296	548	0,1622	1,4112	765,56	0,6594
11	288	548	0,1578	1,4136	765,56	0,6660
13	287	548	0,1573	1,4139	765,56	0,6668

Tabla 18. Valores de k_{AR}

kAR paneles costado inferiores						
Panel	b (mm)	l (mm)	AD (m ²)	kR	mLDC (kg)	kAR
2	287	510	0,1756	1,4139	765,56	0,6452
4	285	509	0,1794	1,4145	765,56	0,6413
6	258	509	0,1737	1,4226	765,56	0,6512
8	251	509	0,1666	1,4247	765,56	0,6604
10	246	511	0,1622	1,4262	765,56	0,6664
12	249	510	0,1578	1,4253	765,56	0,6715
14	247	510	0,1573	1,4259	765,56	0,6725

Tabla 19. Valores de k_{AR}

Presión paneles costado inferiores										
Panel	mLDC (kg)	kAR	kL	kDC	PDM BASE (kN/m ²)	PBMD BASE (kN/m ²)	Z (mm)	h (mm)	kz	PSMD (kN/m ²)
2	765,56	0,6452	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	15,9873
4	765,56	0,6413	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	15,8909
6	765,56	0,6512	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	16,1374
8	765,56	0,6604	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	16,3655
10	765,56	0,6664	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	16,5144
12	765,56	0,6715	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	16,6402
14	765,56	0,6725	1	0,6	15,7060	41,4746	0,444	0,003	0,9932	16,6645

Tabla 20. Valores de presión

Presión paneles costado superiores										
Panel	mLDC (kg)	kAR	kL	kDC	PDM BASE (kN/m ²)	PBMD BASE (kN/m ²)	Z (m)	h (m)	kz	PSMD (kN/m ²)
1	765,56	0,6405	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,3578
3	765,56	0,6354	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,2836
5	765,56	0,6431	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,3960
7	765,56	0,6531	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,5412
9	765,56	0,6594	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,6342
11	765,56	0,6660	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,7302
13	765,56	0,6668	1	0,6	15,8744	41,4746	0,444	0,297	0,3311	9,7425

Tabla 21. Valores de presión

- Tensión de diseño para la madera:

Tensión de diseño			
ρ_{PW} (kg/m ³ /1000)	N_{ply}	σ_{uf} (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)
0,4	5	16,6170	8,3085

Tabla 22. Tensión de diseño para la madera

- Espesor en los paneles de costado:

Espesor paneles de costado superiores					
Panel	b (mm)	P_{SMD} (kN/m ²)	k_2	σ_d (N/mm ²)	t (mm)
1	321	9,3578	0,5	8,3085	7,6176
3	328	9,2836	0,5	8,3085	7,7527
5	317	9,3960	0,5	8,3085	7,5380
7	304	9,5412	0,5	8,3085	7,2845
9	296	9,6342	0,5	8,3085	7,1273
11	288	9,7302	0,5	8,3085	6,9691
13	287	9,7425	0,5	8,3085	6,9493

Tabla 23. Valores de espesor

Espesor paneles de costado superiores					
Panel	b (mm)	P_{SMD} (kN/m ²)	k_2	σ_d (N/mm ²)	t (mm)
2	287	15,9873	0,5	8,3085	8,9021
4	285	15,8909	0,5	8,3085	8,8134
6	258	16,1374	0,5	8,3085	8,0401
8	251	16,3655	0,5	8,3085	7,8770
10	246	16,5144	0,5	8,3085	7,7551
12	249	16,6402	0,5	8,3085	7,8796
14	247	16,6645	0,5	8,3085	7,8220

Tabla 24. Valores de espesor

Espesor máximo = 8,9021 mm

8. DISEÑO DEL CASCO

8.1. Formas de las planchas:

El diseño del forrado de esta embarcación se basa en el método de forrado alternativo a base de planchas de contrachapado marino explicado anteriormente. La variación que se quiere llevar a cabo es que, en lugar de ser una sola plancha fija que recorra toda la eslora de la embarcación o parte de ella, según la longitud del material, dicha plancha va a ser móvil mediante un sistema de sujeción que se explicará a continuación, aplicado a las cuadernas y por tanto las planchas que recorren toda la eslora van a ser divididas en trozos rectangulares.

La embarcación está dividida en cuadernas distribuidas equidistantemente, por lo que las tablas en la medida de lo posible, serán de un tamaño estándar, sujetadas a las cuadernas en sus extremos y en el centro, por lo tanto, cada tabla tendrá una longitud igual a la distancia entre dos cuadernas e irá sujeta a tres de ellas.

En la siguiente ilustración puede apreciarse la colocación y distribución de una plancha vista en planta:

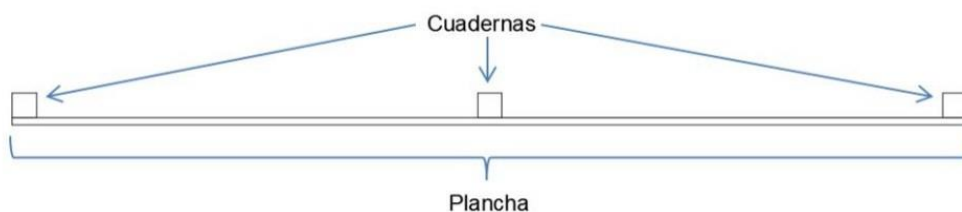


Figura 45. Vista en planta de una plancha

Vista en alzado:

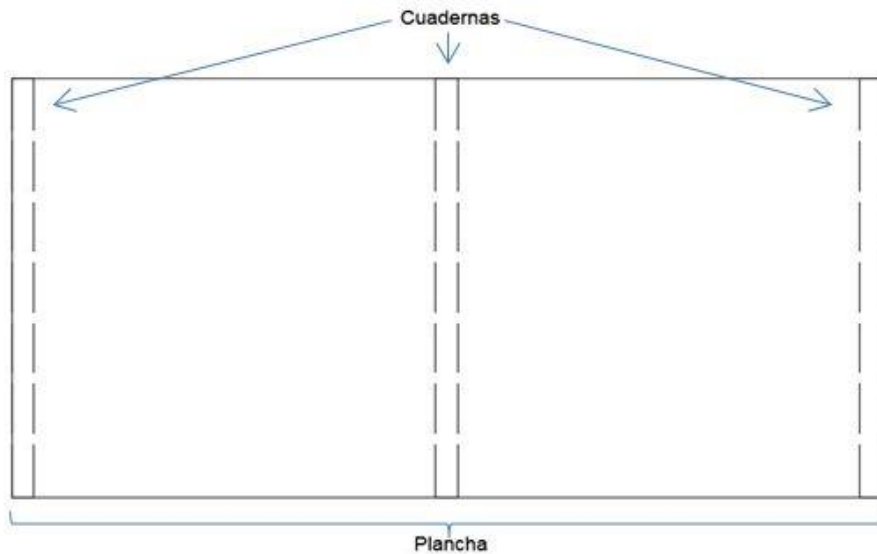


Figura 46. Vista en alzado de una plancha

Éste sistema será implementado en las planchas de costado de la embarcación, dejando el fondo fijo y de una sola pieza como el método de forrado con contrachapado tradicional. No se implementa el sistema en el fondo porque se trata de una zona más crítica en cuanto a la estanqueidad y debe ir bien ajustada a la quilla.

Las planchas que estén en contacto con la roda irán fijas igual que el fondo ya que en ese punto no hay cuadernas a las que sujetar el casco. Las que están en contacto con el espejo de popa serán móviles porque aunque un extremo de la plancha no tenga cuaderna a la que agarrarse se utiliza dicho espejo de popa como cuaderna insertando el cubo de agarre en ella. De esta manera todas las planchas pueden ser móviles y por lo tanto extraíbles a excepción de aquellas que estén en contacto con la roda.

8.2. Sujeciones:

8.2.1. Entre planchas:

Las planchas de contrachapado en el método de forrado tradicional van selladas entre ellas para que no entre agua en el interior de la embarcación, ya sea con clavos, tornillos o algún producto de adhesión como la Sikaflex®. El nuevo forrado, al ser móvil no podrá llevar ningún

sellado permanente de este tipo porque sino la plancha no podría extraerse, es por eso que se ha escogido un método de solape entre tablas tipo amachimbre en el interior de las placas, aplicando una tira de un material como el caucho o la Sikaflex® que al secarse en su interior debe proporcionar estanqueidad entre ellas, y los tornillos que aseguran la sujeción a la estructuras garantizarán que las planchas no se desplacen por lo que se espera no entre el agua.

La Sikaflex® es un material que proporciona estanqueidad en las juntas de la embarcación. A la hora de aplicarlo tiene textura de cola pero al secarse adopta una textura como la de la silicona. Por ese motivo se colocará una tira del material en la junta interior de las planchas y se dejará secar. Se obtiene la adhesión permanente del material sobre un costado del ensamble y mediante la presión producida por la unión de dos planchas proporcionará estanqueidad sin que el material quede adherido al costado opuesto del ensamble.

En la siguiente ilustración se ven tres planchas en planta y cómo se juntan entre ellas:



Figura 47. Unión entre planchas

Medidas detalladas del sistema de encaje en milímetros:



Figura 48. Medidas del ensamble

El recuadro sombreado del interior de los escalones son las tiras de Sikaflex® o que ayudan a impermeabilizar el sistema. El grosor que viene representado previo al encaje se verá prensado por la otra pieza creando el encaje. Al juntarse, quedan dos barreras que protegen a la embarcación para garantizar la estanqueidad.

Se aplicará el mismo material para la estanqueidad de la embarcación en la unión entre las planchas superiores e inferiores pero sin escalón. Dicho material se colocará en el grueso de la superficie.

8.2.2. Con las cuadernas

A parte del sistema de unión entre planchas también hay que considerar la unión de cada una de ellas con las cuadernas. Ésta unión se consigue con un tornillo combinado: en un extremo es un tornillo de rosca ancha el cual irá clavado al casco y atravesará la cuaderna y el otro extremo es una varilla de rosca más estrecha donde posteriormente irá enroscada una tuerca para hacer tope y para conseguir que los materiales queden unidos. Se utilizarán dos medidas porque las cuadernas van disminuyendo: Para las planchas de costado superiores se pondrán tornillos de x mm de diámetro y para las planchas de costado inferiores se pondrán tornillos de xmm de diámetro.



Figura 49. Tornillos de unión

La idea inicial era atornillar las planchas a las cuadernas atravesándolas, pero finalmente para que la cuaderna no sufra tanto, ya que es una de las partes estructurales más importantes de la embarcación y no es conveniente, se ha creado un cubo de 6x6 mm que va encajado en la

cuaderna. Se distribuye uno en cada esquina así como en el centro de cada plancha y el tornillo de unión no atravesará la cuaderna, sino que atravesará en cubo.

A continuación se puede observar una sección transversal vista en perfil con los detalles del sistema de montaje:

(Sección transversal)

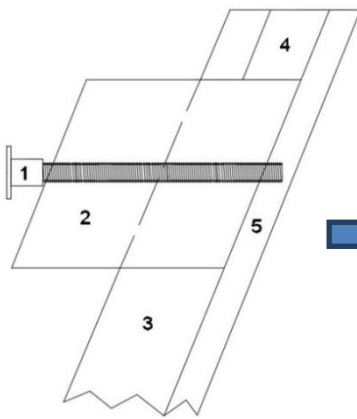


Figura 50. Sistema montado

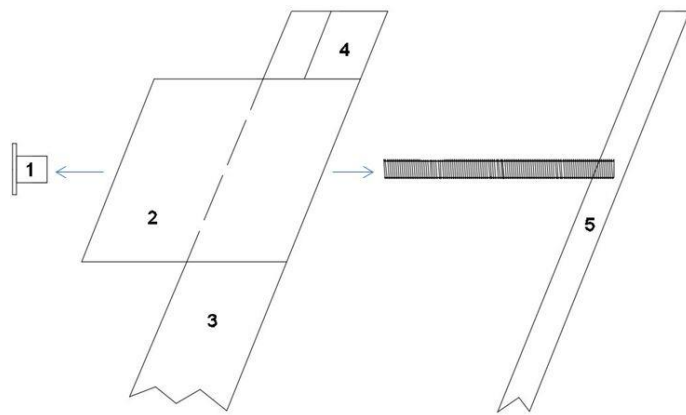


Figura 51. Sistema desmontado

- | | |
|-------------|--------------------------|
| 1. Tornillo | 4. Refuerzo longitudinal |
| 2. Dado | 5. Plancha del casco |
| 3. Cuaderna | |

8.3. Forrado:

El diseño de las planchas se ha llevado a cabo con la herramienta *Rhinoceros*, la misma que se ha utilizado para el diseño de la estructura.

El forrado de la embarcación se divide en tres zonas: el fondo, el costado y el espejo de popa. Como se ha mencionado anteriormente, las planchas del fondo y del espejo de popa son zonas críticas por lo que se tratarán como una sola pieza.

El espejo de popa se ha diseñado con un espesor de 30 mm (el mismo que se ha utilizado en las cuadernas), de una sola pieza y fijo a la embarcación. Ésta pieza no se ha dispuesto con el método de movilidad propuesto ya que no tiene cuadernas a las que apoyarse y no se hace posible su implementación.

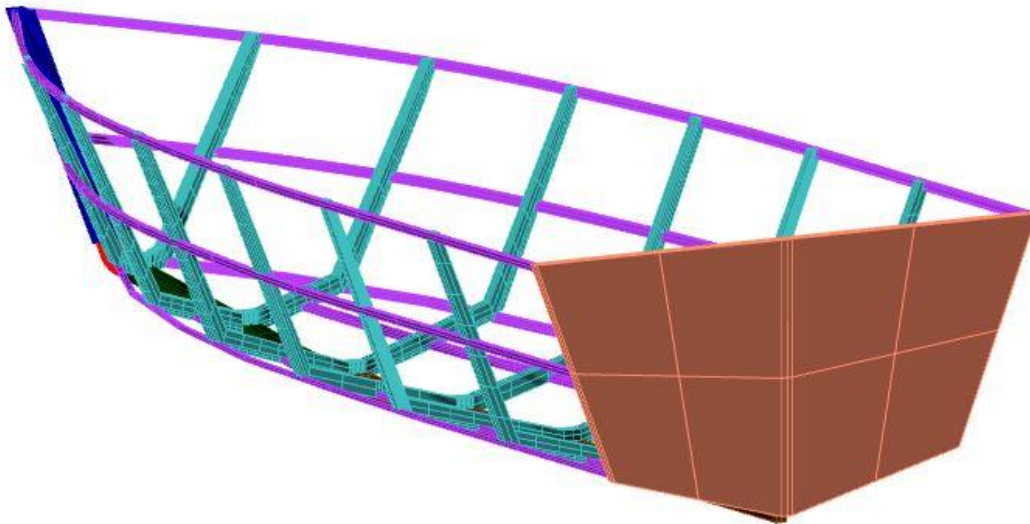


Figura 52. Diseño del espejo de popa

Éstas son las medidas detalladas del espejo de popa en milímetros:

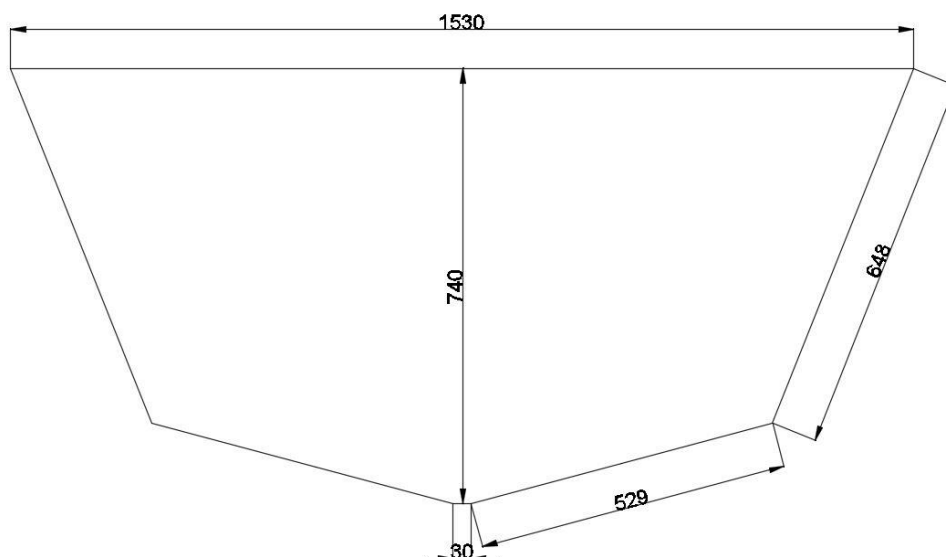


Figura 53. Medidas del espejo de popa

El forrado del fondo también ha sido tratado como una pieza entera y fija a la estructura de la embarcación. Ésta zona sí que consta de cuadernas a diferencia del espejo de popa pero lo que impide la aplicación del sistema móvil es la unión con la quilla y también es la zona más crítica en cuanto a la estanqueidad. Éste forrado no permite el paso del agua ya que sino no tendría ninguna funcionalidad, pero al estar sometido a estudio no se sabe cómo el paso del tiempo y los agentes externos pueden afectar al sistema estudiado. El espesor de las planchas del fondo tienen un espesor de 9mm (el mínimo escantillonado aplicable calculado anteriormente).

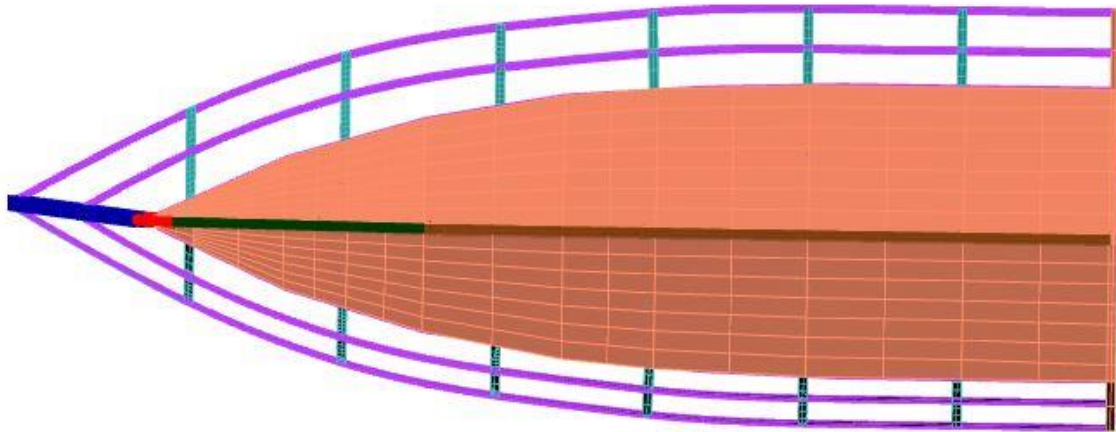


Figura 54. Diseño de las planchas de fondo

Especificación de las medidas de las planchas del fondo en milímetros:

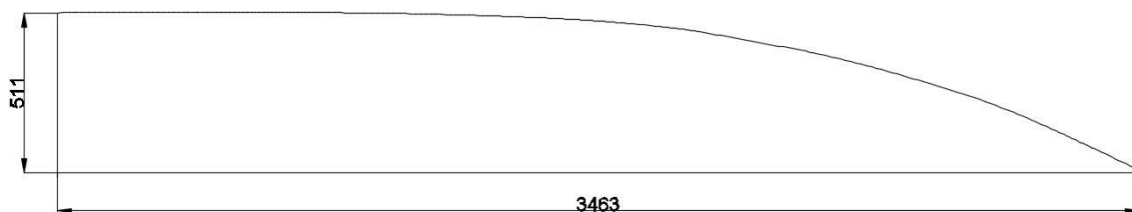


Figura 55. Medidas de las planchas de fondo

8.3.1. Forrado del costado de estribor:

El forrado del costado de estribor consta de 7 planchas. Éstas han sido diseñadas de manera que los extremos verticales de las planchas superiores y las inferiores no coincidan, siguiendo la misma disposición que un muro de ladrillos. Ésta disposición se lleva a cabo para que no existan zonas débiles más expuestas a rotura por un punto de inflexión común, al repartirlo, se minimiza el riesgo de rotura.

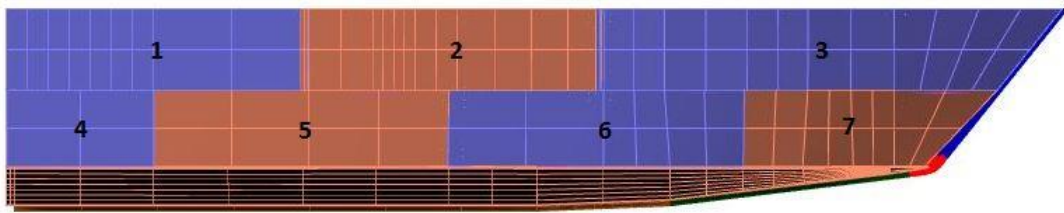


Figura 56. Diseño de las planchas de estribor

- Plancha 1: Ésta plancha tiene un extremo sujetado en la cuaderna y el otro extremo sujetado en el espejo de popa. La plancha podrá ser móvil.

Dimensiones de la plancha en milímetros:

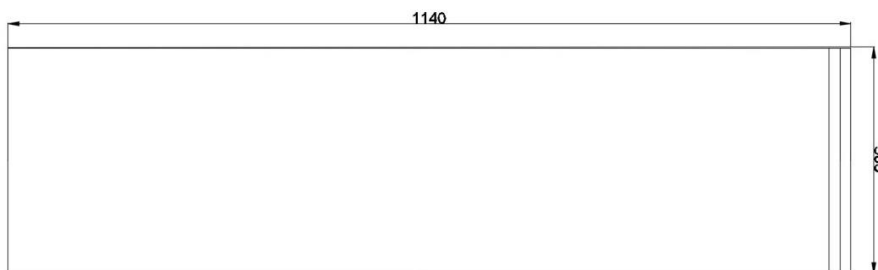


Figura 57. Medidas de la plancha 1

- Plancha 2: Plancha móvil. Sus dos extremos van sujetos a las cuadernas, haciendo posible la implementación del sistema.

Dimensiones de la plancha en milímetros:

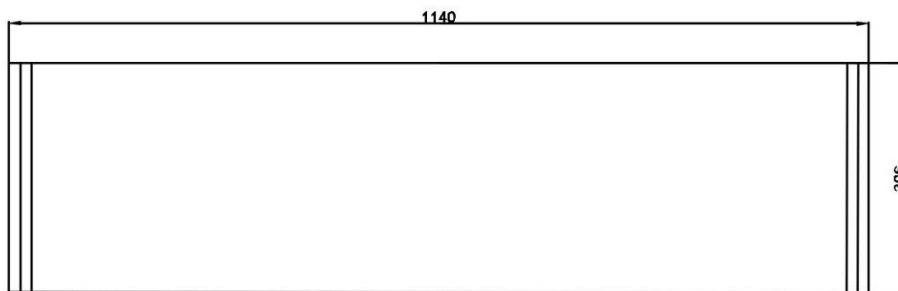


Figura 58. Medidas de la plancha 2

- Plancha 3: Plancha fija porque está unida con la roda. Esta plancha tiene más longitud que las anteriores porque abarca el espaciado entre 3 cuadernas en vez de 2, alargamiento producido porque al dimensionar la tabla con la medida estándar queda un trozo a cubrir en proa muy pequeño como para tratarlo como una sola plancha porque la madera al encontrarse en la zona de curva más pronunciada tendría poca superficie lo que se traduce como poca flexibilidad para adaptarse a las formas. Por este motivo, la plancha número tres unifica estos espaciados.

Dimensiones de la plancha en milímetros:

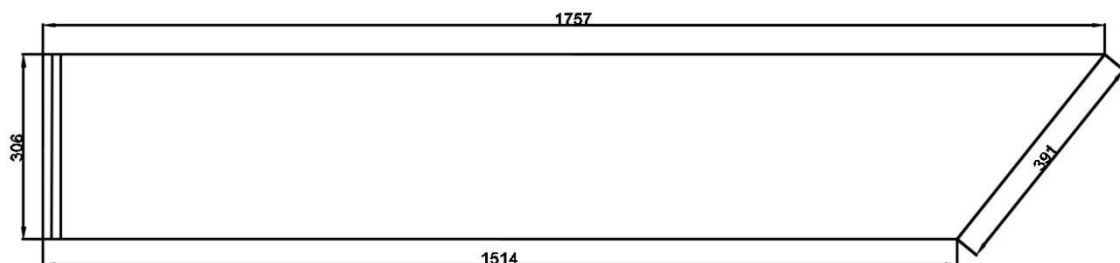


Figura 59. Medidas de la plancha 3

- Plancha 4: Plancha móvil. Es la plancha con menor longitud de todas porque la secuencia de distribución no puede acabar con un corte transversal nivelado.

Dimensiones de la plancha en milímetros:

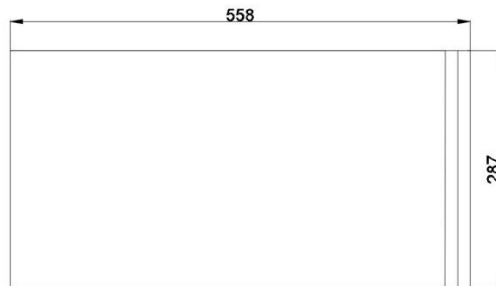


Figura 60. Medidas de la plancha 4

- Plancha 5: Plancha móvil porque está sujeta entre cuadernas

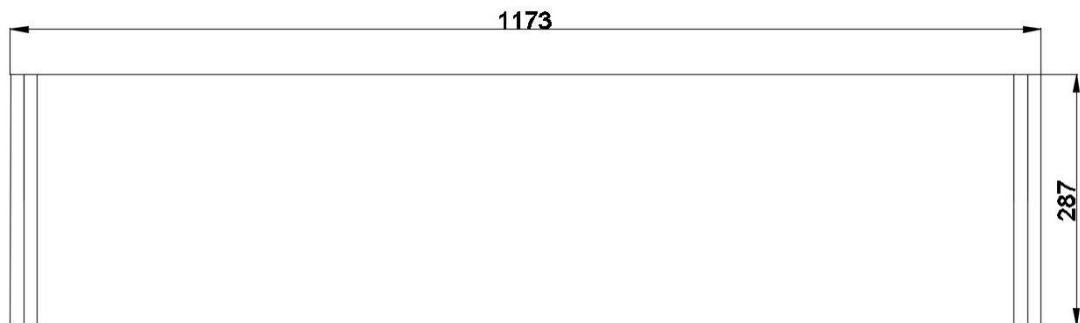


Figura 61. Medidas de la plancha 5

- Plancha 6: Plancha móvil.

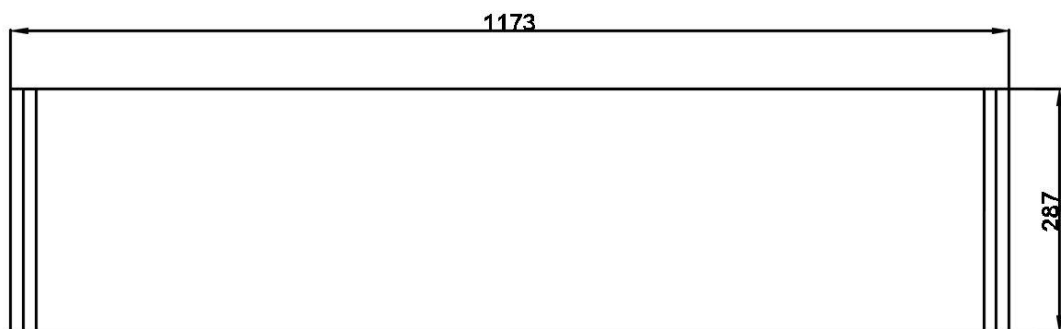


Figura 62. Medidas de la plancha 6

- Plancha 7: plancha fija porque está en contacto con la roda.

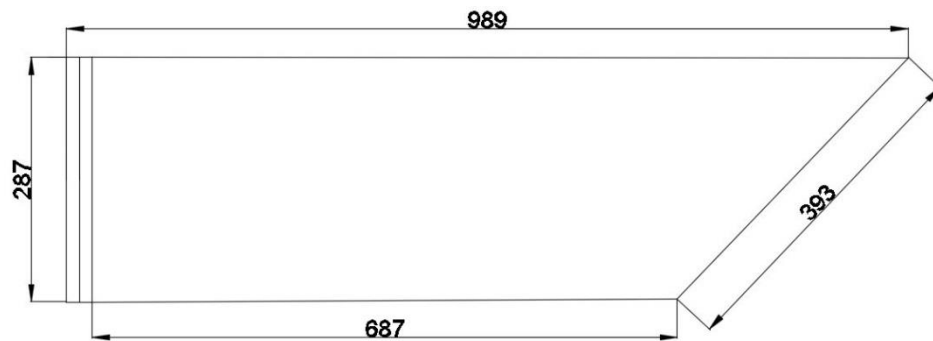


Figura 63. Medidas de la plancha 7

8.3.2. Forrado del costado de babor:

Como se ha mencionado anteriormente no se han distribuido igual las planchas de estribor que las de babor, simplemente se ha invertido. La distribución de las planchas de costado inferiores de estribor en babor son las superiores y viceversa.

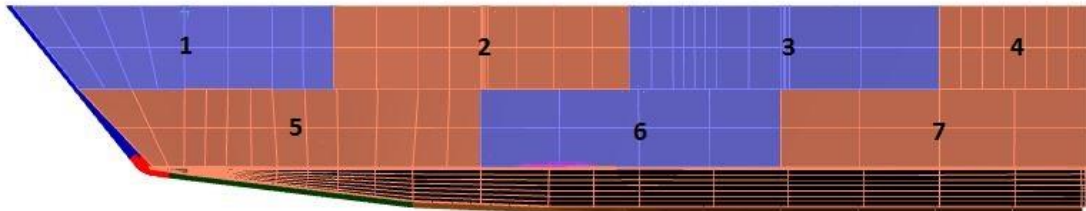


Figura 64. Diseño de las planchas de babor

- Plancha 1: Plancha fija

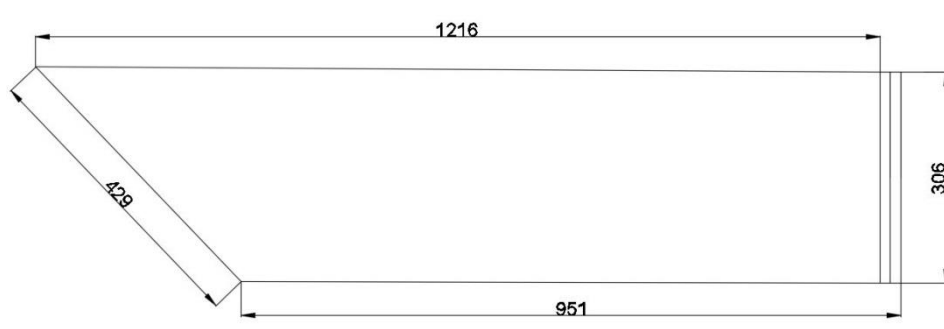


Figura 65. Medidas de la plancha 1

- Plancha 2: Plancha móvil.

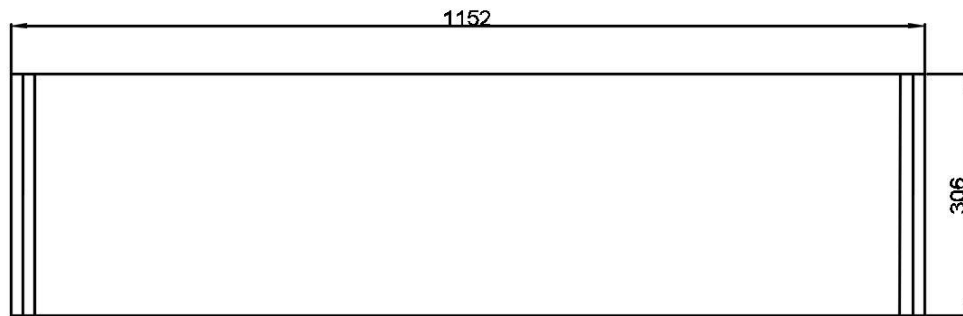


Figura 66. Medidas de la plancha 2

- Plancha 3: Plancha móvil

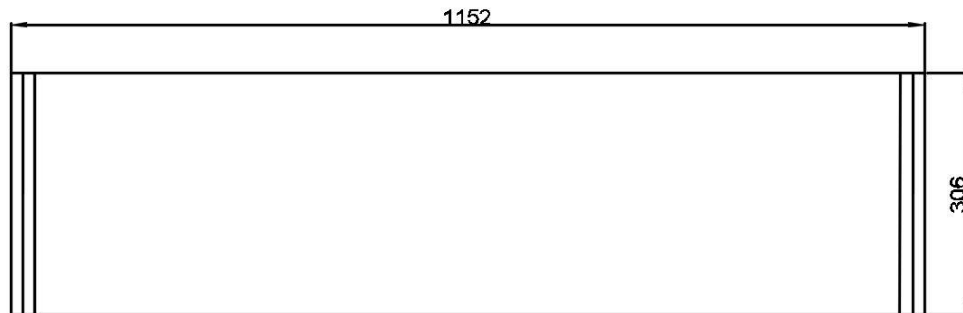


Figura 67. Medidas de la plancha 3

- Plancha 4: Plancha móvil:

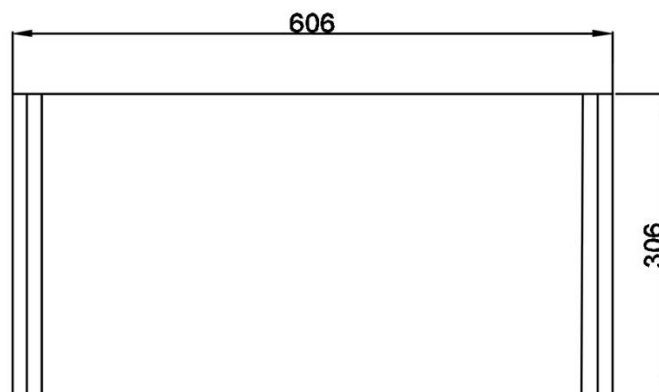


Figura 68. Medidas de la plancha 4

- Plancha 5: Plancha fija

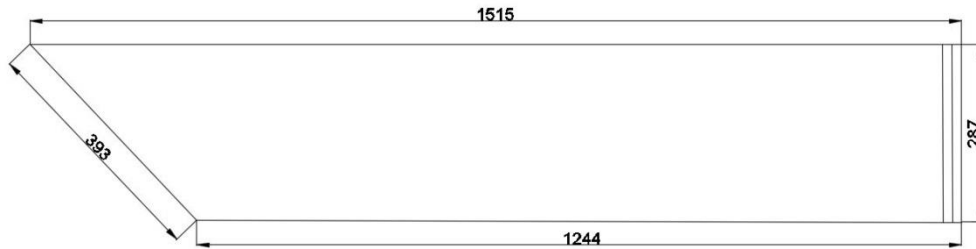


Figura 69. Medidas de la plancha 5

- Plancha 6: Plancha móvil

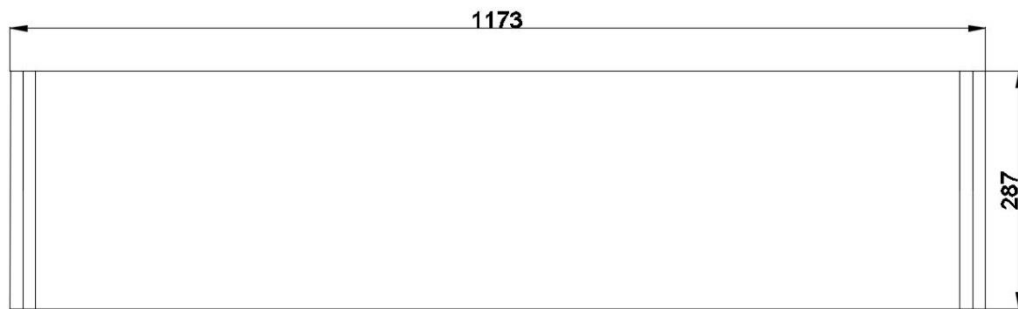


Figura 70. Medidas de la plancha 6

- Plancha 7: Plancha móvil

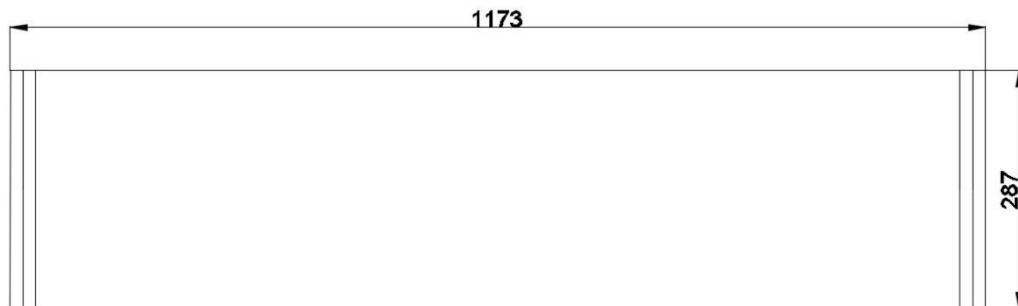


Figura 71. Medidas de la plancha 7

Una vez finalizado el diseño del casco ya se tiene terminado todo el proceso de creación de la embarcación con un sistema de forrado alternativo de madera. A continuación se puede observar el resultado del diseño de la barca completado.

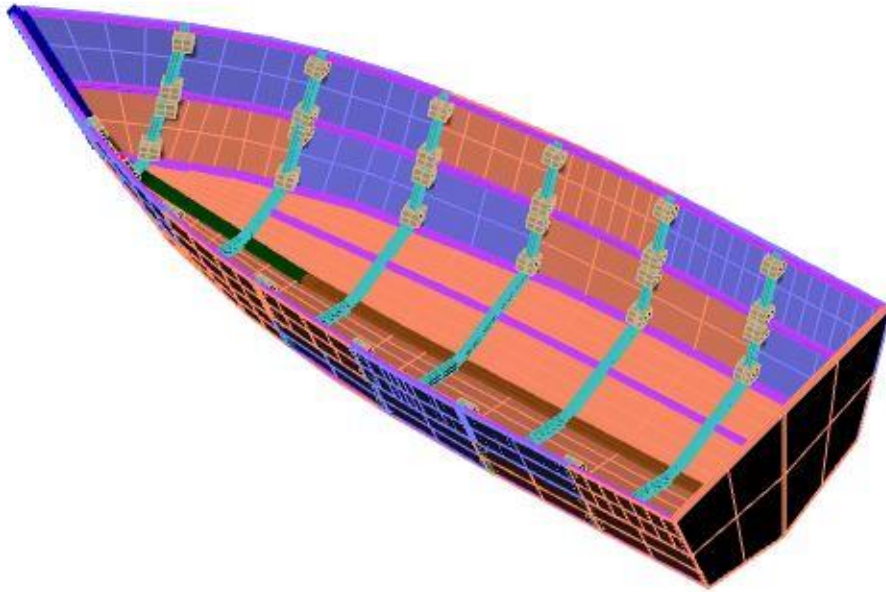


Figura 72. Diseño de la embarcación

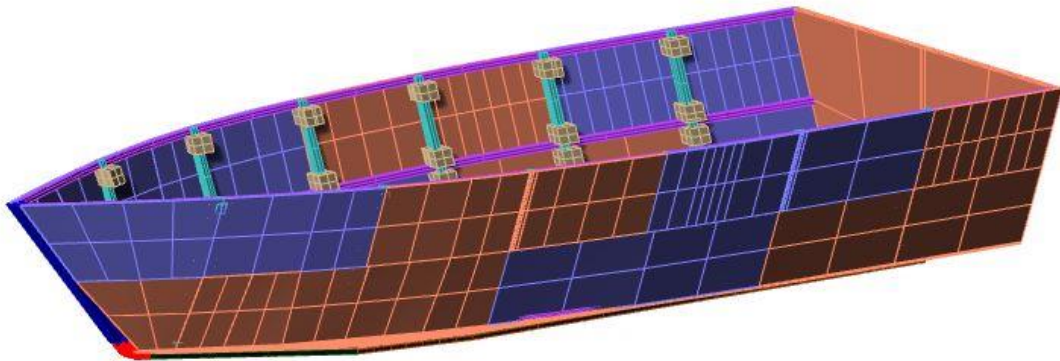


Figura 73. Diseño de la embarcación

9. PRESIÓN DEL MAR SOBRE EL CASCO

Para este forrado se han disminuido las dimensiones de las planchas del contrachapado, por eso es necesario conocer la presión que ejercerá el mar sobre las planchas del costado de la embarcación. Para ello se aplican los principios de mecánica de fluidos para calcular la presión debida a la profundidad del agua y su centro de presiones sobre la plancha. El calado de la embarcación a máxima carga es de 0,287 m. El agua no entra en contacto con las planchas de costado superiores, por este motivo, sólo se estudian las planchas de costado inferiores.

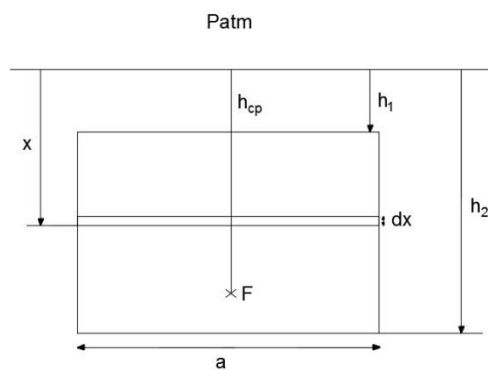


Figura 74. Cálculo de presiones

- Presión resultante sobre la plancha rectangular:

$$F = \rho * g * S * h_{media}$$

Donde,

F = presión resultante (Pa)

ρ = densidad del agua (kg/m³)

g = gravedad (m/s²)

S = superficie sumergida (m²)

h_{media} = altura media (m)

- Altura del centro de presiones:

$$h_{cp} = \frac{2}{3} * \frac{h_2^3 - h_1^3}{h_2^2 - h_1^2}$$

Donde,

h_{cp} = altura del centro de presiones (m)

h_2 = altura sumergida desde lo alto de la plancha (m)

h_1 = altura sumergida desde la base de la plancha (m)

9.1. Presión en las planchas de estribor:

Presión en las planchas de estribor										
	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	a (m)	b (m)	S (m ²)	h_{media} (m)	h_2 (m)	h_1 (m)	F (MPa)	h_{cp} (m)
Plancha 4	1025	9,81	0,558	0,127	0,071	0,064	0,127	0	45,249	0,085
Plancha 5	1025	9,81	1,173	0,127	0,149	0,064	0,127	0	95,119	0,085
Plancha 6	1025	9,81	1,173	0,127	0,149	0,064	0,127	0	95,119	0,085
Plancha 7	1025	9,81	0,687	0,127	0,087	0,064	0,127	0	55,709	0,085

Tabla 25. Presión en las planchas de estribor

9.2. Presión en las planchas de babor:

Presión en las planchas de babor										
	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	a (m)	b (m)	S (m ²)	h_{media} (m)	h_2 (m)	h_1 (m)	F (MPa)	h_{cp} (m)
Plancha 5	1025	9,81	1,244	0,127	0,158	0,064	0,127	0	100,877	0,085
Plancha 6	1025	9,81	1,173	0,127	0,149	0,064	0,127	0	95,119	0,085
Plancha 7	1025	9,81	1,173	0,127	0,149	0,064	0,127	0	95,119	0,085

Tabla 26. Presión en las planchas de babor

La presión que genera el mar contra las planchas ejercerá una fuerza externa que reforzará la acción de los tornillos desde el interior disminuyendo las posibilidades de ruptura de la sujeción del tornillo en la plancha desde el interior por la tendencia natural del material a recuperar su forma original. Estas tensiones críticas provocadas del interior hacia el exterior quedarían compensadas por la fuerza hidrostática exterior que se induce hacia el interior de forma perpendicular.

La fuerza resultante podrá ser levemente mayor desde el interior hacia el exterior, manteniendo este tipo de unión sin que se produzcan esfuerzos de rotura prematuros.

10. CONSTRUCCIÓN DE LA EMBARCACIÓN

Una vez planteado todo el proceso teóricamente se hace una primera prueba práctica para comprobar si el proyecto es concluyente. Para ello, se han construido la mitad de la embarcación, 2 m desde proa, a escala real. Se construye toda la estructura interna de la embarcación y se le introduce el forrado de casco estudiado para conocer los obstáculos o facilidades constructivas que éste conlleva.

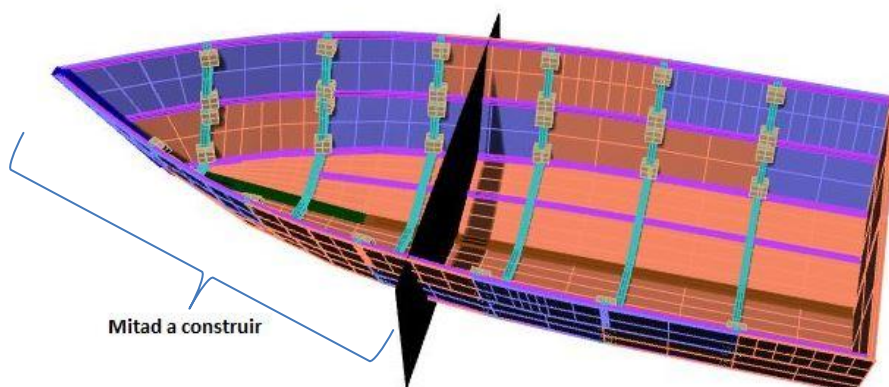


Figura 75. Construcción de la embarcación

10.1. Herramientas necesarias:

- Herramientas de medición:



Figura 76. Regla



Figura 77. Escuadra

- Herramientas para golpear:



Figura 78. Martillo

- Herramientas de corte:



Figura 79. Formón



Figura 80. Sierra de línea



Figura 81. Sierra de mano



Figura 82. Fresadora



Figura 83. Caladora de mano

- Herramientas para pulir:



Figura 84. Lima



Figura 85. Cepillo



Figura 86. Pulidora

- Herramientas de sujeción:

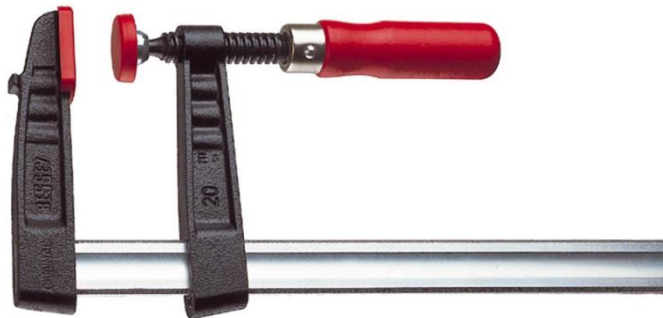


Figura 87. Sargento

- Herramientas de perforación:



Figura 88. Taladradora



Figura 89. Destornillador

10.2. Proceso constructivo:

Se ha llevado a cabo el diseño de esta embarcación para demostrar la funcionalidad del casco. El primer paso ha sido imprimir en tamaño real los planos de las cuadernas, quilla y roda en papel para posteriormente recortarlas y utilizarlas como plantilla sobre la madera.



Figura 90. Trazado de las piezas

Para la construcción de la quilla, roda y refuerzos longitudinales se ha utilizado un tablón de madera de pino de 50x400 centímetros. Dicho tablón se ha cortado transversalmente en dos trozos iguales. El primero se ha utilizado para la construcción de la quilla y la roda y el segundo trozo se ha cortado longitudinalmente en listones de 2 metros de longitud y 2 cm de ancho x 1,5 cm de espesor, los cuales serán usados como refuerzos longitudinales de la embarcación. Todas las piezas mencionadas han sido cortadas con una sierra de cinta.



Figura 91. Proceso de corte de la quilla y roda



Figura 92. Quilla y roda



Figura 93. Refuerzos longitudinales

Por otro lado, se han trazado las cuadernas en unas planchas de contrachapado de 3 cm de espesor, material seleccionado por su facilidad para recortarlas en una sola pieza. El número de cuadernas resultante es de 3 dado que sólo se construyen los 2 metros hacia proa de la embarcación. Para generar las piezas se ha seguido el mismo procedimiento anterior: mediante las plantillas se han trazado las cuadernas sobre el contrachapado y posteriormente se han cortado con una sierra de cinta. En la cuaderna situada más a proa se le ha dejado una línea de unión que soporta sus esquinas en la parte superior ya que posteriormente en la construcción del casco, éste deberá ser sometido a un proceso de curvado en la zona de proa, sometiendo a la cuaderna a sobre esfuerzos y tensiones que se generan en este tipo de procesos. Seguidamente, con la ayuda de una pulidora, se han limado todas las superficies de las piezas estructurales recortadas para que queden y encajen lo mejor posible entre ellas.

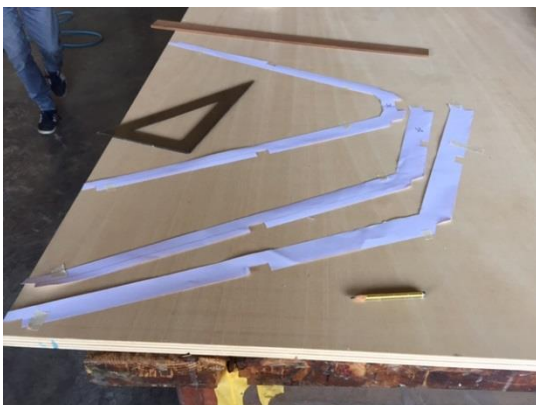


Figura 94. Trazado de las cuadernas



Figura 95. Cuadernas

Una vez obtenidas todas las piezas de la embarcación se ha procedido a montar la quilla y la roda, porque como se ha explicado en el diseño, éstas están divididas en partes debido a que no es posible sacarlas de una sola pieza de madera y además el curvado en este tipo de elemento, no es posible. Otro punto a favor es que las fibras de dicho material puedan estar orientadas todas en el mismo sentido y por lo tanto, tendrán todas la misma respuesta ante los esfuerzos que puedan generarse en el agua y con la propia construcción de la embarcación. Para la unión entre estas piezas se han utilizado tornillos pasantes entre las dos piezas a unir y posteriormente sujetos por tuercas en sus dos extremos para que no se muevan y queden fijas.



Figura 96. Tornillos de unión de la quilla



Figura 97. Unión de la roda



Figura 98. Quilla y roda unida

Al tener ya todas las piezas de la embarcación cortadas, atornilladas y pulidas por separado, se ha procedido a montar la estructura. Para este proceso se ha empezado midiendo sobre la distancia entre cada cuaderna y dónde deben ir situadas para posteriormente atornillarlas a la quilla.



Figura 99. Disposición de las cuadernas

El segundo paso ha sido la colocación de los refuerzos longitudinales encajándolos en las secciones de encaje recortadas en las cuadernas, clavando con clavos cada refuerzo sobre las cuadernas para conseguir la estructura interna de la embarcación completa. Se observa como una vez finalizado este proceso, la embarcación va ganando rigidez y forma.



Figura 100. Colocación de los refuerzos



Figura 101. Estructura interna de la embarcación

Una vez montada la estructura se recorta el espejo de popa con la misma madera contrachapada que se ha utilizado anteriormente para las cuadernas ya que éste cumple la misma función que ellas al encajar los refuerzos longitudinales y ganar rigidez en la estructura, aportando, en consecuencia, más peso al tratarse de una superficie continua. Siguiendo el mismo proceso empleado en las otras piezas, el espejo de popa ha sido pulido y cepillado para conseguir un buen encaje y se han atornillado en él la quilla y los refuerzos longitudinales con la variante esta vez de colocar una capa de Sikaflex® en las uniones para proporcionar estanqueidad, ya que el espejo de popa ya es un elemento externo expuesto al contacto con el agua.



Figura 102. Espejo de popa

Para la posterior colocación del casco, los costados de la quilla se han perfilado con la ayuda de un formón para conseguir el ángulo de astilla muerta diseñado, para que la superficie del fondo del casco esté en contacto con todos los puntos de la estructura y no queden huecos entre la unión de la quilla con el fondo del casco. Esto ayudará a la estanqueidad del fondo de la embarcación.



Figura 103. Ángulo en quilla

El siguiente paso es la implementación del casco. Se ha empezado por el fondo, que como se ha explicado anteriormente es una parte del casco que va fija a la estructura, no se le implementa el sistema móvil propuesto. Se han medido las dimensiones de éste simétricamente sobre la estructura y se ha trazado y recortado con una caladora de mano sobre una lámina de contrachapado fenólico de 9 milímetros de espesor (como el calculado en el diseño). Éste ha sido pulido para que encaje perfectamente con la quilla y el límite de las cuadernas y se ha atornillado con la ayuda de un taladro. Como en el espejo de popa, además del atornillado de la superficie de contrachapado con la quilla, para garantizar la estanqueidad, se ha cubierto la unión con una capa de Sikaflex®.

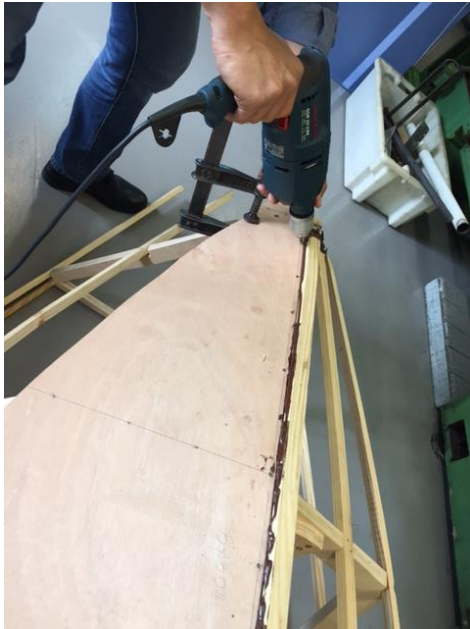


Figura 104. Colocación del fondo

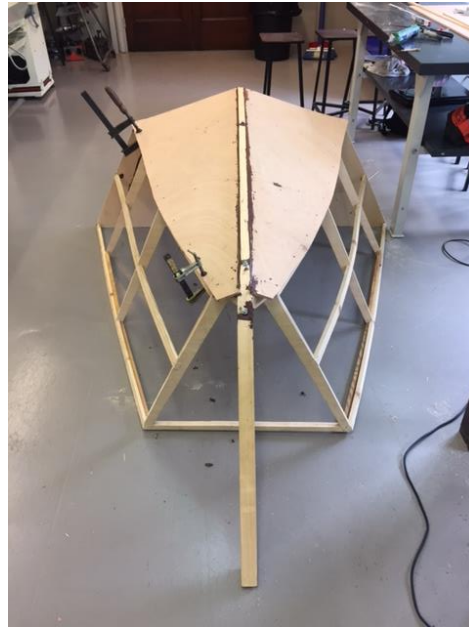


Figura 105. Fondo fijo del casco

Seguidamente se han recortado, pulido y encajado los dados que unirán los trozos de casco móvil del costado con las cuadernas atornillándolos sobre ellas en cada punto de sujeción con cada plancha de costado.

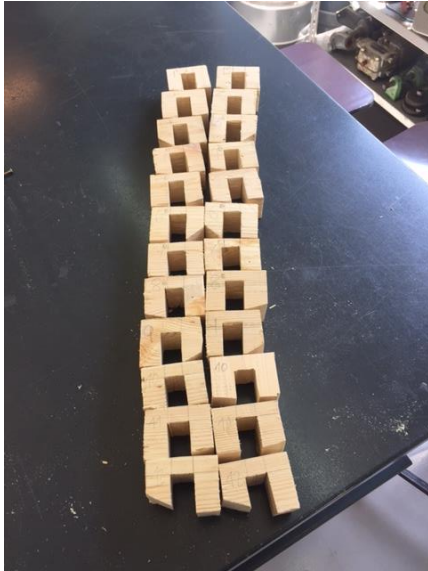


Figura 106. Dados de unión



Figura 107. Atornillado de los dados a las cuadernas

Una vez conseguido todo este proceso se procede a la implementación objeto del estudio de éste trabajo, las planchas de costado. Como sólo se han construido 2 metros de embarcación se han obtenido cuatro planchas (utilizando el mismo contrachapado que el usado para construir el fondo) en cada costado de la embarcación. Siendo las dos primeras planchas fijas, que están en contacto con la roda y las dos planchas restantes que están en contacto con la popa, móviles.

Las planchas de contrachapado situadas en la roda deben crear una curvatura para adaptarse a las formas del barco. Ésta se ha conseguido mediante un proceso de aplicación de calor y humedad, el cual se inicia con la sujeción de las planchas ya recortadas de proa colocadas y sujetadas sobre la estructura con la ayuda de sargentos. Se ha empapado con agua caliente la superficie a curvar con una tela y posteriormente se ha colocado dicha tela mojada sobre la zona a curvar. Sobre la tela mojada se ha colocado un papel de aluminio y se ha procedido a aplicarle calor con una pistola térmica durante unos minutos a temperatura constante sobre toda la superficie que se quiere someter a curvatura. Una vez que la madera ha absorbido el calor y el vapor de agua generado por la tela empapada se observa que la madera empieza a ceder, perdiendo rigidez y generando elasticidad. Ésta ha sido forzada a curvar hasta encajar con la roda sobre la que, sin dejar de aplicar calor, se le ha atornillado la plancha de contrachapado. Se ha seguido el mismo procedimiento para las tres planchas de proa restantes.



Figura 108. Proceso de curvatura



Figura 109. Planchas curvadas de proa

Finalmente sólo queda la construcción de las planchas móviles del costado. Se han medido y recortado cada una de ellas y se han pulido para que encajen adecuadamente. Se ha prestado especial atención al pulimento de éstas zonas ya que al no poder fijarlas sobre la estructura, el encaje de dichas planchas con las situadas en el fondo y en la proa deben acoplarse lo más preciso posible ya que se generarían vías de agua. En las planchas móviles se ha modelado en sus extremos verticales el encaje diseñado entre ellas con la ayuda de una fresadora, recortando un desnivel de dos capas y media en cada plancha para un óptimo encaje.



Figura 110. Proceso de creación del ensamblado



Figura 111. Plancha con ensamblado

Una vez cortadas todas las planchas se le ha puesto Sikaflex® (dejada secar) en el interior de los ensamblajes para generar estanqueidad en la zona transversal de unión entre plancha y una tira de caucho colocada en los refuerzos para generar estanqueidad en la zona longitudinal entre plancha y plancha.



Figura 112. Tira de Sikaflex® en la unión transversal



Figura 113. Tira de caucho en la unión longitudinal

Se han atornillado los tornillos en las planchas del casco y posteriormente se han fijado las planchas móviles a la estructura finalizando todo el proceso de construcción.



Figura 114. Atornillaje en la plancha



Figura 115. Plancha móvil colocada previo al ajuste de la tuerca

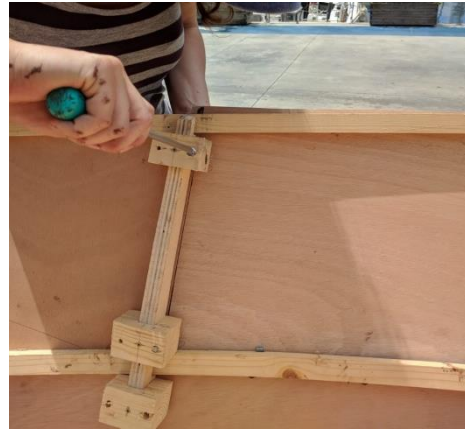


Figura 116. Fijación de la plancha con la tuerca

Este último paso ha generado dificultades. Se ha observado que para este tipo de sistema se necesita un escantillado mayor que 9 mm, ya que al atornillar el tornillo a las planchas, al no permitirse que éste las atraviese, tiene poca longitud de agarre, lo que ha generado una débil fijación de los tornillos con el casco a la hora de apretar las tuercas. Para arreglar este inconveniente que ha surgido en algunos puntos de unión, se han aplicado unos tornillos desde fuera del casco a la estructura para poder así concluir con las pruebas de agua y comprobar si, en los puntos donde la unión sí ha sido posible, se consigue que la embarcación sea estanca con la implementación de planchas móviles.

Después de terminar la embarcación se ha procedido a pulir toda la superficie externa para conseguir un tacto liso y uniforme.

10.3. Presupuesto:

Se ha creado un presupuesto en base al coste de la construcción de ésta embarcación. Como la construcción es la mitad del diseño, es decir, 2 metros, se presenta el presupuesto resultante para la construcción de 2 metros de la embarcación y un presupuesto estimado para la construcción del diseño completo (4 metros):

Presupuesto para 2 metros		
Material	Cantidad	Precio (€)
Contrachapado fenólico de Okume (5 capas) 150x122	2	87,44
Tablero contrachapado 250x122 (3 capas)	1	15,00
Tablón de Pino 200x50	1	20,79
Tablero contrachapado 250x122 (7 capas)	1	62,32
Massilla epoxi 375 ml	1	13,41
Varilla 11 cm	1	0,79
Recambios para rodillo	3	2,16
Brocha 5cm	1	1,40
Barniz poliuretano acrílico 750 ml	1	19,98
Tinte Teca 250 ml	2	14,63
Hoja de sierra para caladora	1	7,20
Tornillos 3,5x35	177	12,56
Papel de lija	6	4,29
Sikaflex marrón	3	44,85
Burlete caucho	1	5,95
Hembrilla zincada	24	24,00
Tornillo doble rosca	24	6,00
TOTAL		342,77

Tabla 27. Presupuesto resultante

Presupuesto para 4 metros		
Material	Cantidad	Precio (€)
Contrachapado fenólico de Okume (5 capas) 150x122	5	218,60
Tablero contrachapado 250x122 (3 capas)	1	15,00
Tablón de Pino 200x50	2	41,58
Tablero contrachapado 250x122 (7 capas)	3	186,96
Massilla epoxi 375 ml	1	13,41
Barniz poliuretano acrílico 750 ml	2	39,96
Tinte Teca 250 ml	4	29,26
Tornillos 3,5x35	400	28,38
Sikaflex marrón	5	74,75
Burlete caucho	3	17,85
Hembrilla zincada	48	48,00
Tornillo doble rosca	48	12,00
TOTAL		725,75

Tabla 28. Presupuesto estimado

11. PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD

La embarcación, una vez finalizada la construcción ha sido trasladada al puerto para llevar a cabo su botadura y validar su comportamiento práctico en comparación al estimado y calculado teóricamente.

En la siguiente imagen se puede observar la embarcación en sus primeros instantes en contacto con la mar:

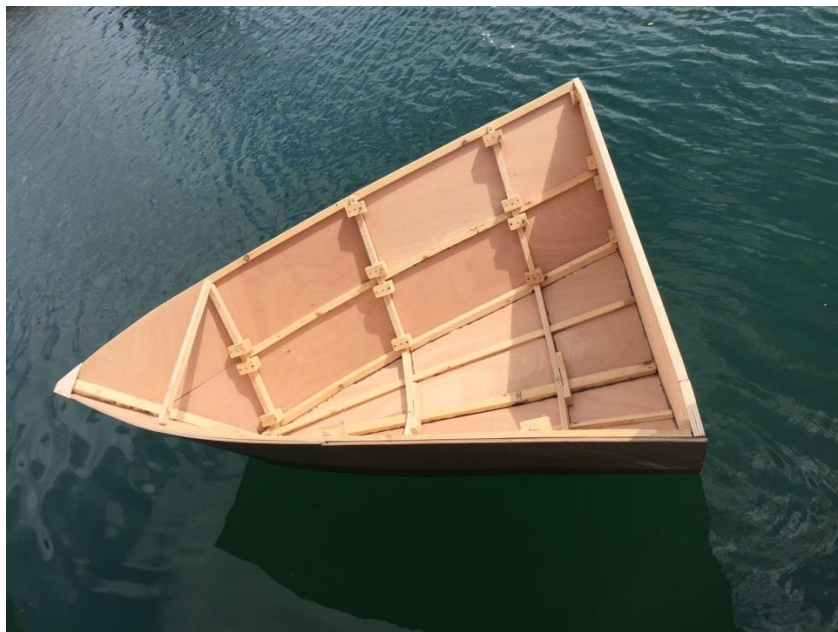


Figura 117. Botadura de la embarcación

La embarcación en los primeros instantes, sin carga presenta una buena estanqueidad, no se filtra agua por ningún costado. La altura del calado que se observa en la embarcación sin carga, sólo con el peso de la estructura es muy bajo, mojando una cuarta parte aproximadamente de las planchas de costado inferiores, lo que corrobora la estimación teórica obtenida con la herramienta *Maxsurf Modeler*.

A pesar de tratarse de la mitad del diseño presenta una buena estabilidad tanto transversal como longitudinal al estar construida con formas rectas y bastante planas.

Un tripulante se ha subido a bordo de la embarcación para añadirle el factor de carga y comprobar su comportamiento. En este proceso se visto que la estanquidad ha fallado por algunos puntos, filtrando agua en el interior de la barca.

Como se ha comentado anteriormente en el proceso de construcción de la embarcación, el encaje de las piezas móviles se ha visto dificultado al trabajar con herramientas muy manuales y métodos de corte menos precisos. Por ese motivo el encaje no ha llegado a ser tan exacto como este sistema requiere. Por este motivo, cuando el calado sube al añadirle carga a la embarcación, los ensambles de las planchas móviles filtran agua al no poder acoplarse perfectamente.



Figura 118. Comportamiento al añadir carga

Cabe añadir que las uniones inferiores de las planchas móviles situadas en el costado inferior de la embarcación, es decir el sistema de sujeción estudiado situado encima del forro del fondo, no ha filtrado agua. Unión válida ya que los tornillos situados desde fuera hacia adentro de la embarcación por motivos de fallo de unión con el casco (explicados en el proceso constructivo), están situados fuera del calado, por lo que no influyen en el sistema planteado y puesto a prueba.

12. VALORACIONES

Una vez se ha llevado a cabo un primer ensayo de este sistema de forrado tanto en el proceso de diseño como en el constructivo se pueden realizar una serie de valoraciones ventajosas y desventajosas de la aplicación del forrado móvil.

Ventajas:

- Un mantenimiento eficaz al presentar una posibilidad de restitución de la plancha dañada sin afectar a las propiedades del casco de la embarcación.
- Facilidad para reparar puntos de rotura localizados
- Evita romper todo el casco para ser reparado.
- La construcción del forrado es económica en comparación con otros forrados de madera.
- Permitiría fabricar modelos y moldes para la fabricación de cascos con otros materiales.
- Permite la aplicación directa del sistema con otros materiales en construcciones modulares.
- Contribuiría a la fabricación de embarcaciones pre-fabricadas y despiezables.

Desventajas:

- Para aplicar éste sistema de forrado, las formas de la embarcación se ven limitadas sobre todo en la zona de proa.
- Es sólo aplicable a embarcaciones pequeñas.
- Trabajo de construcción inicial laborioso.
- Elementos de sujeción específicos que dificultan su disponibilidad.
- Los tornillos fijos en las piezas del casco requieren de una fijación adicional a la de la simple rosca.

CONCLUSIONES

El sistema de forrado planteado ha podido llevarse a la práctica en una primera prueba de estudio donde el número de fallos debería ser mínimo. Después de toda la información obtenida y verificada durante el diseño y la fabricación del modelo, se concluye que el estudio teórico debe llevarse a la práctica para validarlo ya que siempre surgen inconvenientes o imprevistos en la producción del modelo final. Este hecho se ha visto demostrado en este proyecto al comprobar que algunas ideas teóricas son aplicables pero otras necesitan un planteamiento de mejora o de más de una prueba, para conseguir el objetivo del forrado mediante esta técnica.

Las mejoras que deben ser aplicables son: la definición de un mayor espesor mínimo del casco de la embarcación para una mejor penetración y por lo tanto sujeción del tornillo y la aplicación de un material cementoso o de soldado, que endurezca la unión entre el tornillo de doble rosca y el casco.

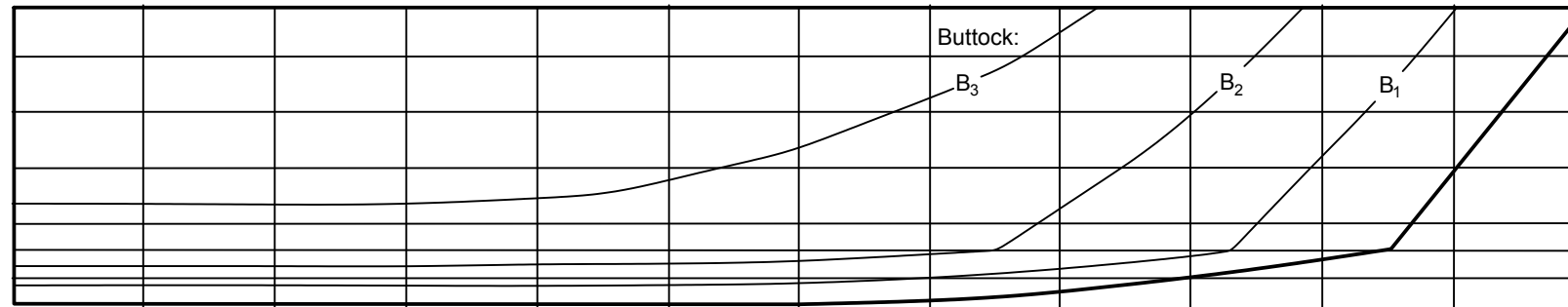
Mediante el planteamiento de estas mejoras sobre todo el sistema diseñado, se generaría una mejor y más estrecha sujeción del casco con la estructura y por lo tanto una buena estanqueidad.

Por otro lado, para hacer este tipo de estructuras tan precisas en cuanto a encajes, las herramientas a utilizar juegan un papel importante, ya que cuanto más precisas sean éstas, más preciso será el encaje. Se recomienda utilizar plantillas obtenidas con la herramienta *Rhinoceros* y recortarlas con máquinas de control numérico, disponibles en el mercado.

Finalmente hemos obtenido un sistema de forrado de embarcaciones de madera con el cual se han conseguido buenos resultados para su implementación, pero con la recomendación de mejoras para garantizar la estanqueidad.

ANEXOS

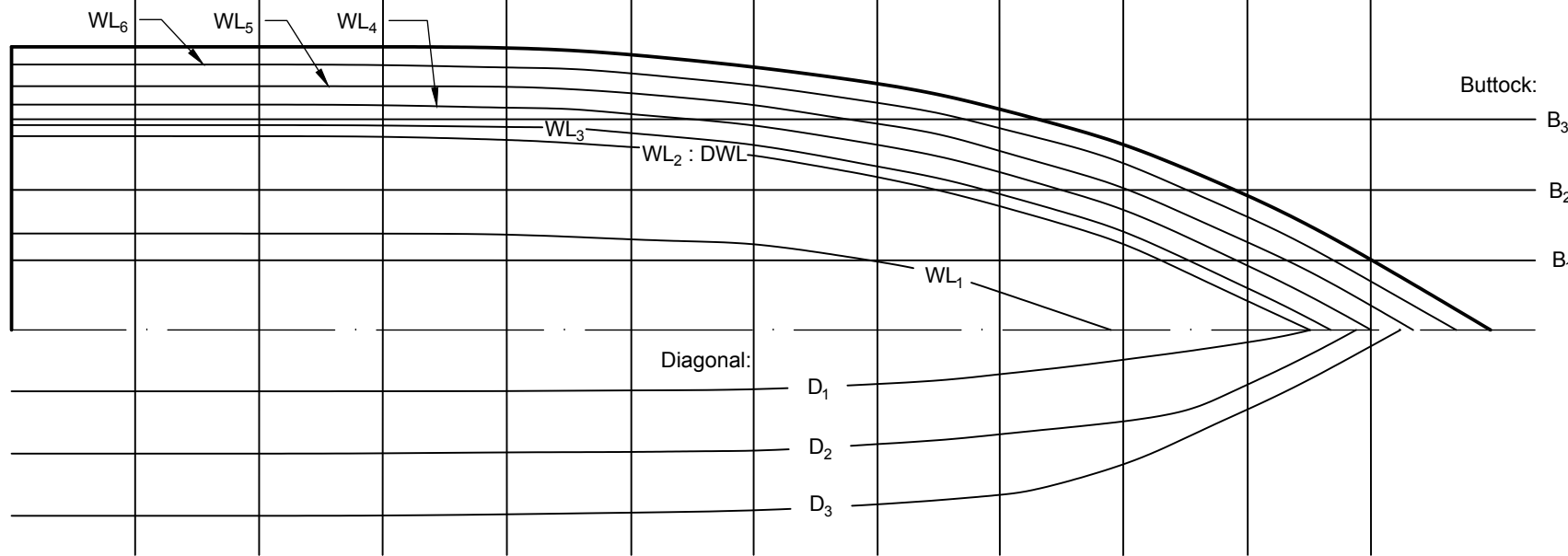
Profile plan



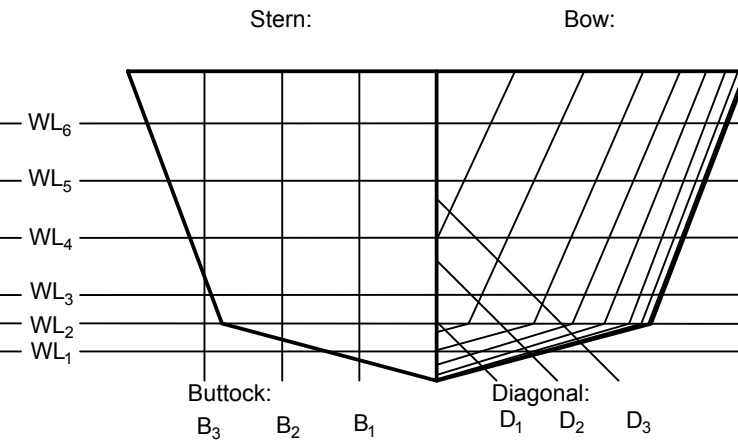
Section number:

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

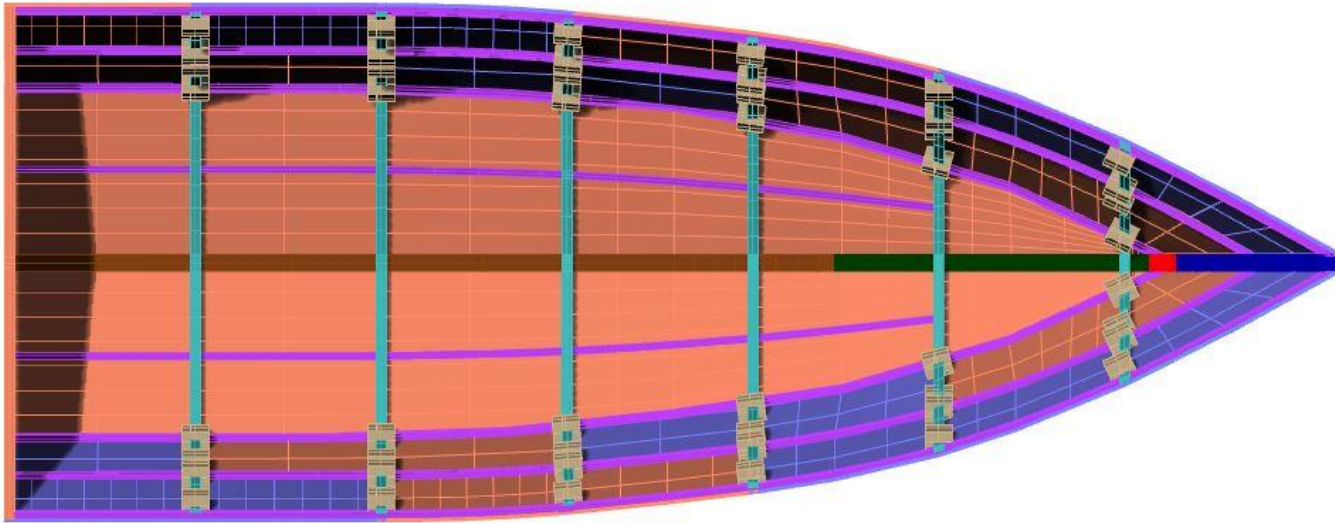
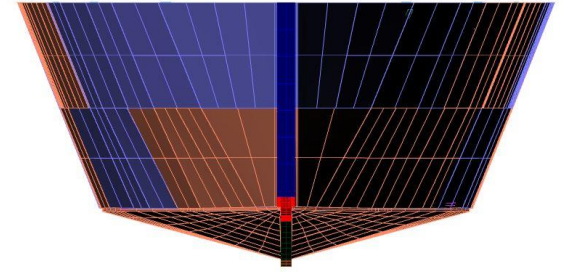
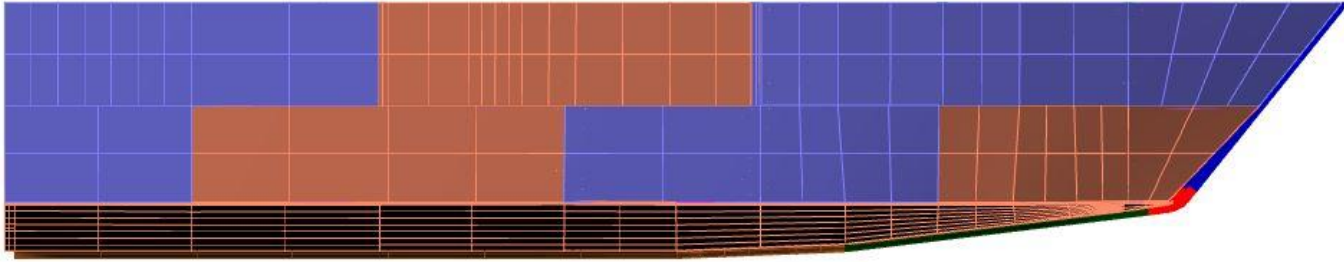
Half breadth plan



Body plan



Designación	Detalles de revisión		Fecha	Firma
Departamento responsable Facultat de Nàutica de Barcelona	Referencia técnica -	Tipo de documento Plano de formas	Estado del documento Editado	
Propietario legal	Creado por Margarita Lull	Título. Título suplementario Embarcación con casco móvil	-	
	Aprobado por Facultat de Nàutica de Barcelona		Rev.	Fecha de edición
	A	16/03/2018	Es	1/1





EXTERIOR



INTERIOR



GarniPLY Okoumé

Descripción

Definición: GarniPLY Okoumé es un tablero contrachapado compuesto de caras de Okoumé y con el interior de chopo. Puede ser utilizado tanto para interior seco como para exterior.

Clase de encolado: Clase 1 o Clase 3 (EN 314-2).

Clase de emisión: E1, según la norma EN 717-2. Este producto se puede fabricar bajo pedido según los estándares del ARB (baja emisión de formaldehído).

Acabado: Caras II/III (EN 635-2). Tolerancias dimensionales según EN 315-5.

Cualidades

Ligereza.
Facilidad de mecanizado.
Estabilidad dimensional.

Aplicaciones/Usos

Revestimientos decorativos de paredes, techos, fachadas, divisiones interiores, tabiques...

Usos semiestructurales en tableros de cubiertas, paneles sandwich.

Industria del mueble.
Marquetería, bricolaje...

Formatos y espesores

Formatos	2500x1220; 2500x1530; 2500x1700	3100x1530; 3100x1830
Grueso mm.	3 4 5 6 8 9 10 12 15 18 20 22 25 30 35 40	4 5 6 8 9 10 12 15 18 20 22 25 30 35 40
Nº Chapas	3 3 3 3/5 5 5 5 7 7 9 9 9 11 13 15 15	3 3 5 5 5 5 7 7 9 9 11 15 15 17 17

Otras medidas y espesores, a consultar.

Características físicas

	Valores	Norma
Densidad (Kg/m ³)	430	UNE EN 323
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	4200	UNE EN 310
Resistencia a la flexión (N/mm ²)	37	UNE EN 310

Nota: Los datos mostrados en esta ficha técnica son puramente indicativos sin valor contractual. Las características técnicas pueden variarse sin notificación previa en función de nuevos desarrollos y avances tecnológicos. Es responsabilidad del adquirente determinar si el producto Garnica es el idóneo para la aplicación deseada, y deberá asegurarse de que el lugar y forma de empleo sean los adecuados conforme a las prescripciones y sugerencias del productor, y de acuerdo con la normativa vigente.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

Título: *Construcción de Madera. Las Técnicas Modernas*

Autor: François Vivier

Edición: 2001

Título: *Construction classique contreplaqué*

Autor: Villenave

Edición: 2001

Título: *Manual de construcción amateur de barcos*

Autor: Michael Verney

Edición: 1997

Apuntes:

Asignatura: *Construcción de embarcaciones de recreo*

Profesor: Alejandro Besendjack

Código: 280691

Asignatura: *Proyecto del buque y artefactos navales*

Profesor: Julio García

Código: 280676

TFG:

Título: *Proceso de diseño, cálculo y construcción de una embarcación menor*

Autor: José Antonio Sánchez

Título: *Diseño de una embarcación de 7 metros de LOA*

Autor: Pablo Sánchez

Título: *Propuesta de diseño de una barca para la comunidad de Azizakpe*

Autor: Joan Guasch

ISO:

Título: *Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón.*

Código: ISO 12215-5:2008/A1:2014

Páginas web:

Nombre: *Casiopea*

Fecha de visita: 05/06/2018

[https://wiki.ead.pucv.cl/Estudio de la construcci%C3%B3n de embarcaciones#Forro a tope o carabela](https://wiki.ead.pucv.cl/Estudio_de_la_construcci%C3%B3n_de_embarcaciones#Forro_a_tope_o_carabela)

Nombre: *François Vivier, naval architect*

Fecha de visita: 20/03/2018

<http://www.vivierboats.com/en/product/morbic-12/>

Nombre: *Ship shape*

Fecha de visita: 21/03/2018

<https://shipshape.com.es/portfolio/dinghy-12-pies/>

Nombre: *Wooden boat*

Fecha de visita: 21/03/2018

<https://www.woodenboat.com/boat-plans-kits/12-10-pooduck-skiff>

Revistas:

Título: *Chasse-marée*

No. 291

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Forro a tope	9
Figura 2. Forro a tope	9
Figura 3. Forro tingladillo	10
Figura 4. Forro tingladillo	10
Figura 5. Doble forro	10
Figura 6. Forro de listones	11
Figura 7. Forro de contrachapado	11
Figura 8. Madera laminada	12
Figura 9. Tingladillo contrachapado	12
Figura 10. Cosido y estratificado	13
Figura 11. Cosido y estratificado	13
Figura 12. Gráfico manga-eslora	15
Figura 13. Gráfico puntal-eslora	16
Figura 14. Gráfico desplazamiento-eslora	16
Figura 15. Ángulo de astilla muerta	19
Figura 16. Primer paso del diseño	19
Figura 17. Líneas delimitantes de las formas	20
Figura 18. Formas de la embarcación	20
Figura 19. Gráfico de las propiedades de los materiales	22
Figura 20. Gráfico de las propiedades del contrachapado	22
Figura 21. Diseño de la quilla	24
Figura 22. Forma ``T`` de la quilla	25
Figura 23. Unión entre quilla y roda	25
Figura 24. Medidas de la quilla	25
Figura 25. Medidas de la quilla	26
Figura 26. Diseño de la roda	26
Figura 27. Diseño de la roda	27
Figura 28. Medidas de la roda	27
Figura 29. Medidas de la roda	27
Figura 30. Medidas de la roda	27
Figura 31. Diseño de los refuerzos longitudinales	28
Figura 32. Medidas de los refuerzos longitudinales	29
Figura 33. Diseño de las cuadernas	29
Figura 34. Medidas cuaderna 1	30
Figura 35. Medidas cuaderna 2	30

Figura 36. Medidas cuaderna 3	31
Figura 37. Medidas cuaderna 4	31
Figura 38. Medidas cuaderna 5	32
Figura 39. Medidas cuaderna 6	32
Figura 40. Gráfico de la resistencia al avance	40
Figura 41. Gráfico de la potencia de empuje	42
Figura 42. Paneles de costado	44
Figura 43. Paneles de fondo	44
Figura 44. Figura 2 c) <i>ISO 12215-5:2008</i>	48
Figura 45. Vista en planta de una plancha	51
Figura 46. Vista en alzado de una plancha	52
Figura 47. Unión entre planchas	53
Figura 48. Medidas del ensamble	53
Figura 49. Tornillos de unión	54
Figura 50. Sistema montado	55
Figura 51. Sistema desmontado	55
Figura 52. Diseño del espejo de popa	56
Figura 53. Medidas del espejo de popa	56
Figura 54. Diseño de las planchas de fondo	57
Figura 55. Medidas de las planchas de fondo	57
Figura 56. Diseño de las planchas de estribor	58
Figura 57. Medidas de la plancha 1	58
Figura 58. Medidas de la plancha 2	59
Figura 59. Medidas de la plancha 3	59
Figura 60. Medidas de la plancha 4	60
Figura 61. Medidas de la plancha 5	60
Figura 62. Medidas de la plancha 6	60
Figura 63. Medidas de la plancha 7	61
Figura 64. Diseño de las planchas de babor	61
Figura 65. Medidas de la plancha 1	61
Figura 66. Medidas de la plancha 2	62
Figura 67. Medidas de la plancha 3	62
Figura 68. Medidas de la plancha 4	62
Figura 69. Medidas de la plancha 5	63
Figura 70. Medidas de la plancha 6	63
Figura 71. Medidas de la plancha 7	63
Figura 72. Diseño de la embarcación	64
Figura 73. Diseño de la embarcación	64

Figura 74. Cálculo de presiones	65
Figura 75. Construcción de la embarcación	67
Figura 76. Regla	67
Figura 77. Escuadra	67
Figura 78. Martillo	68
Figura 79. Formón	68
Figura 80. Sierra de línea	68
Figura 81. Sierra de mano	68
Figura 82. Fresadora	68
Figura 83. Caladora de mano	69
Figura 84. Lima	69
Figura 85. Cepillo	69
Figura 86. Pulidora	69
Figura 87. Sargento	70
Figura 88. Taladradora	70
Figura 89. Destornillador	70
Figura 90. Trazado de las piezas	71
Figura 91. Proceso de corte de la quilla y roda	71
Figura 92. Quilla y roda	72
Figura 93. Refuerzos longitudinales	72
Figura 94. Trazado de las cuadernas	72
Figura 95. Cuadernas	72
Figura 96. Tornillos de unión de la quilla	73
Figura 97. Unión de la roda	73
Figura 98. Quilla y roda unida	73
Figura 99. Disposición de las cuadernas	74
Figura 100. Colocación de los refuerzos	74
Figura 101. Estructura interna de la embarcación	74
Figura 102. Espejo de popa	75
Figura 103. Ángulo en quilla	75
Figura 104. Colocación del fondo	76
Figura 105. Fondo fijo del casco	76
Figura 106. Dados de unión	77
Figura 107. Atornillado de los dados a las cuadernas	77
Figura 108. Proceso de curvatura	78
Figura 109. Planchas curvadas de proa	78
Figura 110. Proceso de creación del ensamble	78
Figura 111. Plancha con ensamblado	78

Figura 112. Tira de Sikaflex® en la unión transversal	79
Figura 113. Tira de caucho en la unión longitudinal	79
Figura 114. Atornillaje en el casco	79
Figura 115. Plancha móvil colocada previo al ajuste de la tuerca	80
Figura 116. Fijación de la plancha con la tuerca	80
Figura 117. Botadura de la embarcación	83
Figura 118. Comportamiento al añadir carga	84

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos de embarcaciones similares	14
Tabla 2. Medidas para la embarcación	17
Tabla 3. Datos del Maxsurf	35
Tabla 4. Datos calculados	35
Tabla 5. Área sobre DWL	37
Tabla 6. Área bajo DWL	37
Tabla 7. Valores de velocidad	39
Tabla 8. Resistencia al avance	40
Tabla 9. Potencia de empuje	41
Tabla 10. Márgenes de potencia	42
Tabla 11. Valores de k_{AR}	45
Tabla 12. Valores de k_{AR}	45
Tabla 13. Valores de presión	46
Tabla 14. Valores de presión	46
Tabla 15. Tensión de diseño de la madera	47
Tabla 16. Valores de espesor	47
Tabla 17. Valores de espesor	47
Tabla 18. Valores de k_{AR}	49
Tabla 19. Valores de k_{AR}	49
Tabla 20. Valores de presión	49
Tabla 21. Valores de presión	49
Tabla 22. Tensión de diseño de la madera	50
Tabla 23. Valores de espesor	50
Tabla 24. Valores de espesor	50
Tabla 25. Presión en las planchas de estribor	66
Tabla 26. Presión en las planchas de babor	66
Tabla 27. Presupuesto resultante	81
Tabla 28. Presupuesto estimado	82

