



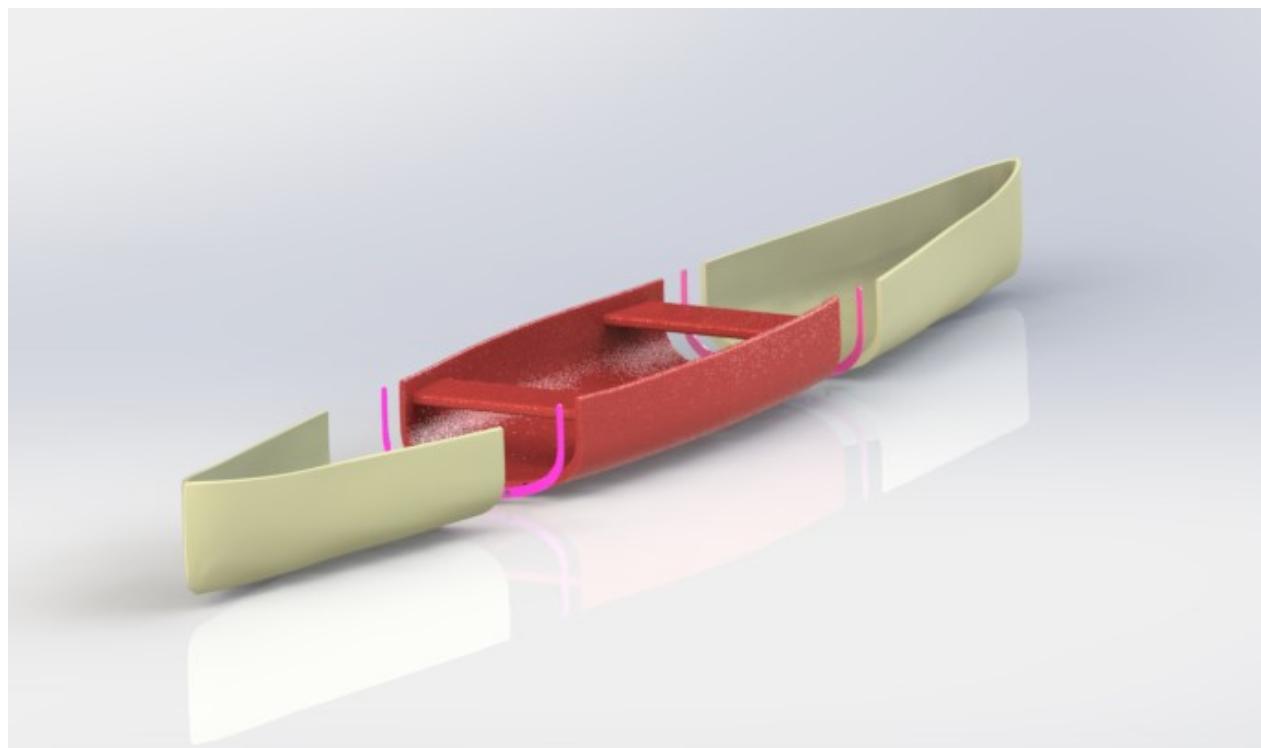
Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza

DISEÑO Y ANÁLISIS DE CANOA DESMONTABLE DE FÁCIL TRANSPORTE.

DESIGN AND ANALYSIS OF A DETACHABLE,
EASY TRANSPORTABLE CANOE.



Universidad Zaragoza

TRABAJO DE FIN DE GRADO

AUTOR: JOSÉ MIGUEL LAHOZ HORMIGOS

DIRECTOR: JESÚS CUARTERO SALAFRANCA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA: 24 DE JUNIO DE 2020. **CURSO:** 2019/2020

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
RESUMEN.....	3
DEFINICIONES Y CONCEPTOS CLAVE.....	4
1. DESARROLLO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES EN DISEÑO DE EMBARCACIONES TRANSPORTABLES.....	5
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA EMPLEADA.....	6
3. ELECCIÓN DE MATERIALES.....	9
4. DISEÑO CAD 3D.....	10
PLANOS Y VISTAS OBTENIDOS.....	16
5. DISEÑO DE UN MODELO PARA MADERA.....	19
PLANOS Y VISTAS OBTENIDOS.....	22
6. ANÁLISIS ESTÁTICO MEDIANTE FEM.....	25
RESULTADOS NUMÉRICOS.....	26
RESULTADOS VISUALIZADOS DE FORMA GRÁFICA.....	27
7. ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO.....	29
FUERZA DE RESISTENCIA HIDRODINÁMICA.....	30
REPRESENTACIÓN GRÁFICA E INTERPRETACIÓN DE LA SENSIBILIDAD A CAMBIOS DE CALADO.....	30
8. PROCESO DE FABRICACIÓN.....	32
COLADO DE ESPUMA DE POLIURETANO.....	32
APLICACIÓN DE CAPAS DE COMPOSITE.....	33
CORTE Y OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS.....	34
ENSAMBLAJE DE LA CANOA.....	35
ESTIMACIÓN DE COSTES.....	36
9. LIMITACIONES Y POSIBLE IMPLEMENTACIÓN.....	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
ANEXOS.....	40
ANEXO 1: PATENTES DE CANOAS DE FACIL TRANSPORTE	40
ANEXO 2: DISEÑO DE CANOA TIPO WOODSTRIP.....	43
ANEXO 3: CRITERIO DE FALLO PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	44

RESUMEN.

El presente trabajo recoge el proceso de diseño de una canoa desmontable para uso recreativo en material tipo sándwich. A través del análisis de distintos antecedentes en diseños de canoas y otras embarcaciones deportivas se diseñó un modelo compacto para uso en lagos y ríos de poca corriente. Los materiales por los que se apuesta para este diseño son polímeros compuestos utilizados ampliamente en la industria por su versatilidad y óptimas propiedades para material deportivo.

Este diseño tiene la particularidad de estar dividido en módulos ensamblables. Contemplando distintas patentes sobre uniones compactas en canoas desmontables se desarrolló un sistema por el que asegura la rigidez y estanquidad del producto.

El diseño de la canoa ha sido comprobado mediante análisis estructural por elementos finitos al someterlo a distintos hundimientos y un análisis fluidodinámico para conocer su comportamiento en uso.

Por último se presenta el proceso de fabricación de la canoa y sus limitaciones en el mercado actual.

ABSTRACT.

This paper resumes the design process of a detachable canoe for recreational use. Built on sandwich material. It was modeled based on different canoes and other sports boats. The canoe is designed as a compact model for lakes and low current rivers. Composite polymers are chose for this design because of the optimal properties for sports material.

Model is divided in three modules that can be assembled easily. Some patents are analyzed in order to choose the most effective fasteners. Tightness and stiffness are examined and guaranteed.

The structure of the canoe was analyzed with finite element method through simulations of different sinking scenarios. A fluid dynamic simulation reports about the canoe behavior in use.

Eventually, manufacturing processes for the canoe are described as well as the limitations of current market.

DEFINICIONES Y CONCEPTOS CLAVE.

Eslora: Longitud que tiene la nave sobre la primera o principal cubierta desde el codaste a la proa por la parte de adentro. (1)

Calado: Profundidad que alcanza en el agua la parte sumergida de un barco. (1)

Manga: Anchura mayor de un buque. (1)

Proa: Parte delantera de la embarcación. (2)

Popa: Parte trasera de la embarcación. (2)

Estribor: Perfil izquierdo de una embarcación visto de popa a proa. (2)

Babor: Perfil derecho de una embarcación visto de popa a proa. (2)

Casco: Superficie inferior de la embarcación que está en contacto con el agua. (2)

Material Sándwich: Material compuesto por placas en sus caras (superior e inferior), unidas a un corazón por medio de un adhesivo. Las placas inferior y superior soportan las tensiones de los esfuerzos de flexión mientras el corazón o núcleo queda como soporte y resistencia a esfuerzo cortante. (3)

Composite o material compuesto: Material muy resistente constituido por fibras de vidrio, de carbono, de boro o de cerámica que se emplea principalmente en la industria aeronáutica y espacial, en la fabricación de material deportivo, como raquetas y esquíes, y de prótesis dentales. (4)

Método de Elementos Finitos (FEM): Método numérico por el que se obtienen aproximaciones a ecuaciones diferenciales y sistemas lineales complejos. Habitualmente empleado para solucionar problemas térmicos, estructurales y dinámicos. (5)

Coeficiente de Seguridad: Factor por el que han de multiplicarse las cargas que afecta un cuerpo para que se produzca fallo en éste. (6)

Fuerza de resistencia hidrodinámica: Fuerza no conservativa que se opone al avance de un cuerpo en un fluido líquido. Es contrarrestada con el empuje para mantener la velocidad deseada.

1. DESARROLLO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES EN DISEÑO DE EMBARCACIONES TRANSPORTABLES.

El objetivo de cualquier diseño de un producto es dar respuesta a una necesidad demandada actualmente o que puede llegar a ser demandada en un futuro (7). En la presente investigación se plantea una canoa de uso recreativo que pueda ser transportada en un vehículo de turismo.

Las primeras canoas eran construidas tallando de un tronco de árbol con ayuda de fuego y herramientas o utilizando la corteza de árboles (8). A lo largo de los siglos se han desarrollado nuevas técnicas tanto en diseño, estudio y selección de materiales para la construcción de embarcaciones.

En los últimos años el uso de polímeros sintéticos se ha intensificado en todos los ámbitos de la industria debido a las prestaciones que otorgan y la cada vez mayor facilidad de obtención y uso. La construcción de embarcaciones de pequeña eslora no se ha quedado atrás en esta carrera en la innovación.

Este proyecto plantea una canoa de diseño simple siguiendo los diseños tradicionales de morfología y ergonomía incluyendo actualizaciones tanto en el uso de materiales compuestos como en innovaciones para la portabilidad de la embarcación y su almacenaje.

Existen varios antecedentes en diseño de estas embarcaciones, se destacan tres en este proyecto, ya que han servido para comparar la solución propuesta con distintas ideas en patentes encontradas. Los distintos croquis de dichas patentes se encuentran en el **Anexo 1**.

Kwang Suk Jin y Kyung Il Jung proponen una canoa plegable (Foldable Canoe) a partir de una placa de polímero (9). El diseño es ligero y fácil de transportar pero la forma final no posee la rigidez y forma aerodinámica de una canoa. Lo cual resulta poco ágil en la navegación y complica el ensamblaje.

Por otro lado, la Sectional Canoe de St-antoine Sud y Leonard Arcouette propone dividir una canoa de madera en tres partes que son estancas individualmente, solucionando de ese modo el problema de la estanqueidad (10). Su diseño exige que cada uno de los módulos ha de ser conformado en una sola pieza.

Pablo Prohens Coll propone una canoa en madera unida con pletinas atornilladas y dividida en tres partes (centro, popa y proa) (11) que es un diseño interesante pero sin las adecuadas especificaciones y a primera vista excesivamente aparatoso.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA EMPLEADA.

El diseño parte de la necesidad de una canoa de uso recreativo-deportivo que pueda ser transportada en un vehículo turismo. Así mismo, debe ser de fácil y rápido ensamblaje.

En primer lugar el diseño de un sistema para hacer posible el transporte y almacenamiento de una canoa para dos personas en un espacio reducido. Por otro lado se somete a un análisis estructural de dicha canoa para asegurar su resistencia a la presión del agua sometida al peso de dos personas de peso medio.

El diseño primitivo, desde el que surgió la motivación del presente trabajo, basado en un barco de papel y diseñado en 2019 en una asignatura de un programa de intercambio se presenta en la **Figura 1**.

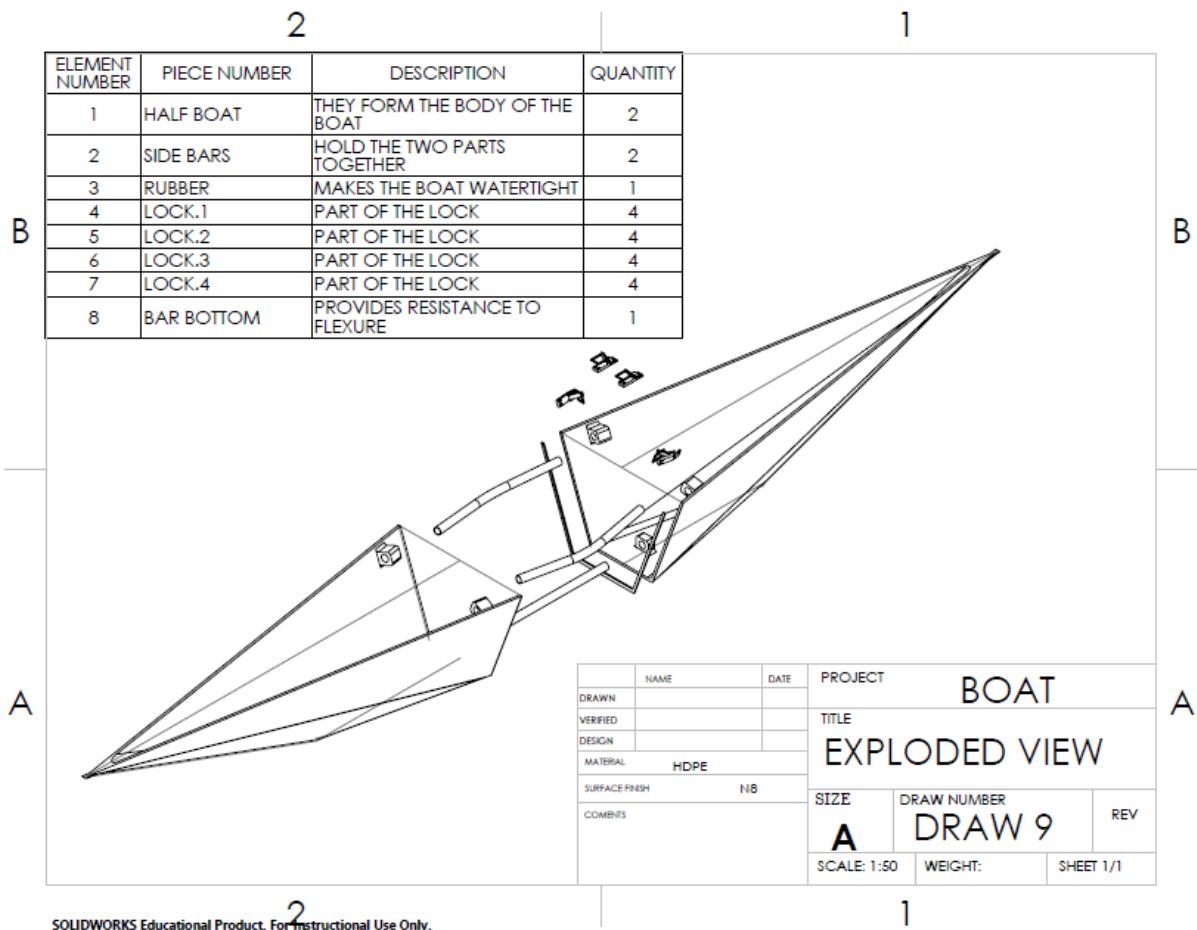


Figura 1: Vista de la canoa en la que se inspiró este proyecto. Fuente: Propia.

Para el perfil del casco de la barca se recurrió a diseños clásicos de canoa tipo WoodStrip (12) tal y como se puede ver en la **Figura 2**. Se trata de canoas con capacidad para dos personas y de uso recreativo tanto en lagos como en ríos de poca corriente.

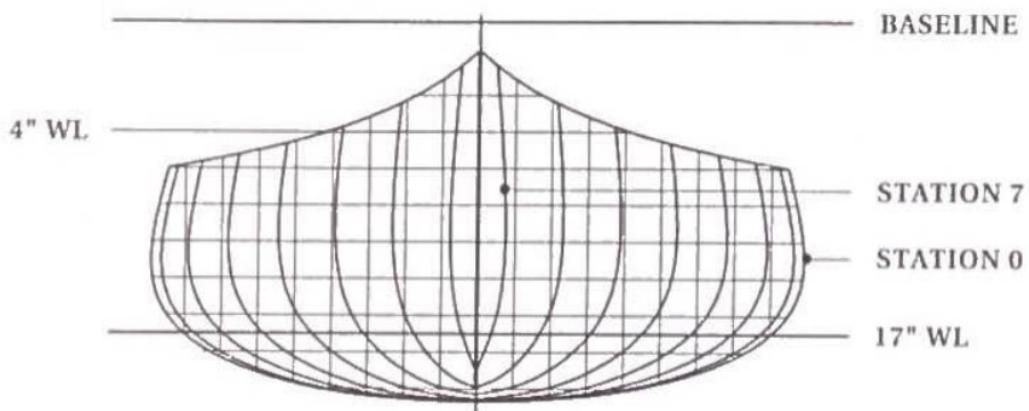


Figura 2: Perfiles de canoa tipo WoodStrip. Fuente: (12)

La canoa debe poderse desensamblar en distintas partes que ocupen un espacio determinado y la opción elegida es la división por tres planos perpendiculares a su eje longitudinal (de eslora) como propone Pablo Prohens Coll en su patente de Canoa Desmontable Perfeccionada (11), que se encuentra en el **Anexo 1**, junto a otras patentes comparadas. De este modo las divisiones correspondientes a la proa y la popa caben en el espacio interior de la sección central según la distribución señalada en la **Figura 3**. Los bancos son desmontables y pueden ser guardados dentro del centro de la canoa del mismo modo.

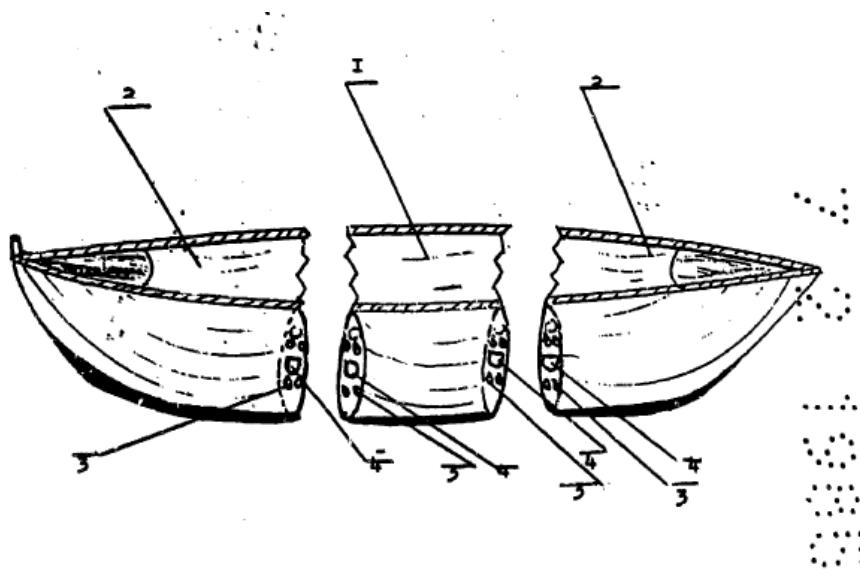


Figura 3: Diseño de Pablo Prohens Coll (11)

Para asegurar la estanqueidad del ensamblaje se recurre a una unión por juntas de goma entre los bordes de las secciones y éstas quedan comprimidas por la acción de unas abrazaderas de palanca como las de la **Figura 3**. Por otro lado, con el objetivo de evitar excesivas deformaciones en el estado tensional, se recurre a barras de refuerzo en los enlaces de la base del casco. De ese modo se evita una excesiva deflexión así como la separación de los módulos en las juntas (que produciría una pérdida de estanqueidad).

Mediante un análisis estático por elementos finitos obtendremos las tensiones, desplazamientos, reacciones y coeficiente de fallo de nuestro diseño. El criterio de fallo que se emplea para nuestro diseño es el de Tsai-Wu, que permite conocer el factor de seguridad de un material lámina, que será la fibra exterior del casco, ya que la fibra es el elemento más susceptible de fallar en el material sándwich debido a la acumulación de tensiones en ésta. El programa empleado para los análisis fue Abaqus CAE.

Con el conocimiento de las reacciones al hundimiento forzado se relaciona el calado de la canoa con el peso de ésta y su carga. De ese modo se relaciona el calado con la resistencia hidrodinámica mediante ensayos en el entorno SolidWorks Flow Simulation.

3. ELECCIÓN DE MATERIALES.

El casco de la canoa se elabora en un material compuesto de tipo Sándwich. Tanto en el exterior del casco como en el interior se recurre a un compuesto de fibra de poliamida (kévlar) en una matriz de resina epoxi.

Las propiedades de este material quedan expuestas en la **Tabla 1** y es recomendado para embarcaciones resistentes y de ligero peso con una densidad de **1400kg/m³**. (13)

E1	E2	E3	v 12	v 23	v 13	G1	G2	G3
17989 MPa	17989 MPa	1948 MPa	0,08	0,698	0,0756	1857,01 MPa	1857,01 MPa	1857,01 MPa

Tabla 1: Propiedades elásticas del composite kevlar/epoxi. Fuente: (6)

Los valores para el fallo del material se encuentran en la Tabla 2.

Tension Stress Fiber Direction	Compresion Stress Fiber Direction	Tension Stress Transverse Direction	Compresion Stress Transverse Direction	Shear Strength	Cross- Prod Term Coefficient
400 MPa	-250 MPa	400 MPa	-250 MPa	45 MPa	-0.5

Tabla 2: Valores de fallo del composite kevlar/epoxi. Fuente: (6)

El núcleo del casco está compuesto por espuma de poliuretano de alta densidad. De este modo la embarcación posee un bajo peso, flotabilidad y alta resistencia por el uso de material compuesto kévlar-epoxi en el exterior. La elección está basada en las propiedades y ventajas del uso del material sándwich, que concentran las tensiones en la fibra exterior mientras la función de la espuma interior es de soporte.

Para el núcleo de la canoa se emplea un material isótropo que simula la espuma de poliuretano de alta densidad **300kg/m³** (PUR HD-3)(14) de **módulo de Young 3 MPa** y **coeficiente de Poisson 0,35** (15). Las barras de refuerzo y las pletinas que simulan los anclajes son de un material isótropo que simula un acero al carbono de **módulo de Young 210 GPa** y **coeficiente de Poisson 0,3** (16).

Las juntas que unen los módulos han de ser de un material elástico y que consiga un ajuste impermeable. Para este diseño se proponen unas juntas de caucho del perfil adecuado, con un **módulo de Young de 27 MPa** y un **coeficiente de Poisson de 0.45** (17) podría realizarse una junta mediante la aplicación de una gruesa capa de silicona en ambos extremos de los módulos a unir. Con la presión de los cierres se consigue la estanqueidad.

4. DISEÑO CAD 3D.

El diseño comienza acudiendo a los perfiles de una canoa tradicional tipo WoodStrip. Estos perfiles se dibujan en planos equidistantes de 250 mm para conformar la que será la superficie exterior del casco.

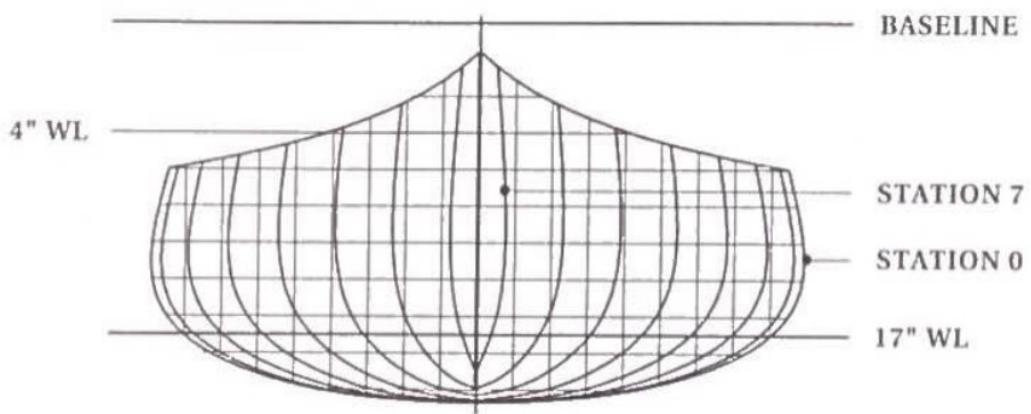


Figura 4: Diseño de Ted Moores y Steve Killing. Fuente: (12)

Este diseño se adaptó para que las medidas de la canoa fueran las mínimas para un uso recreativo y no profesional. 3.6 metros de eslora y 65 cm de manga.

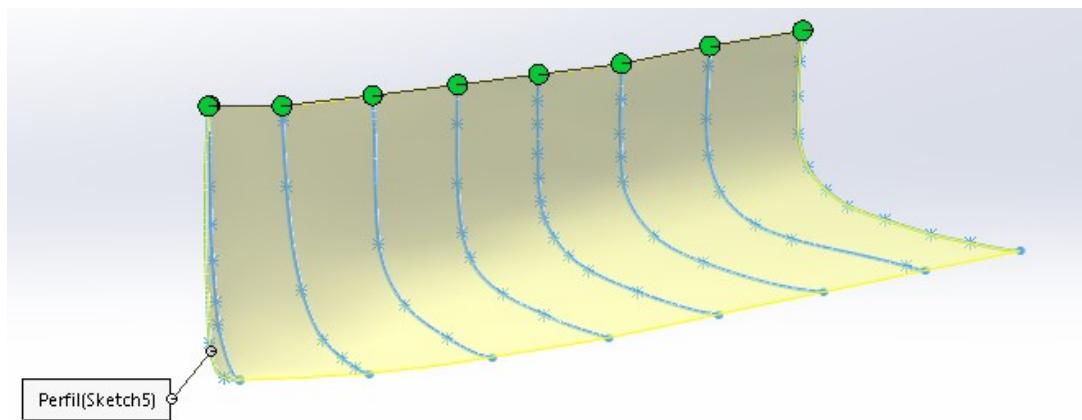


Figura 5: Unión de perfiles para formar la superficie exterior del casco. Fuente: Propia.

Del perfil se realiza un patrón y se reduce aplicando escala para obtener la piel interior del casco. De ese modo podemos crear un sólido que será un cuarto del cuerpo de nuestro casco de la embarcación.

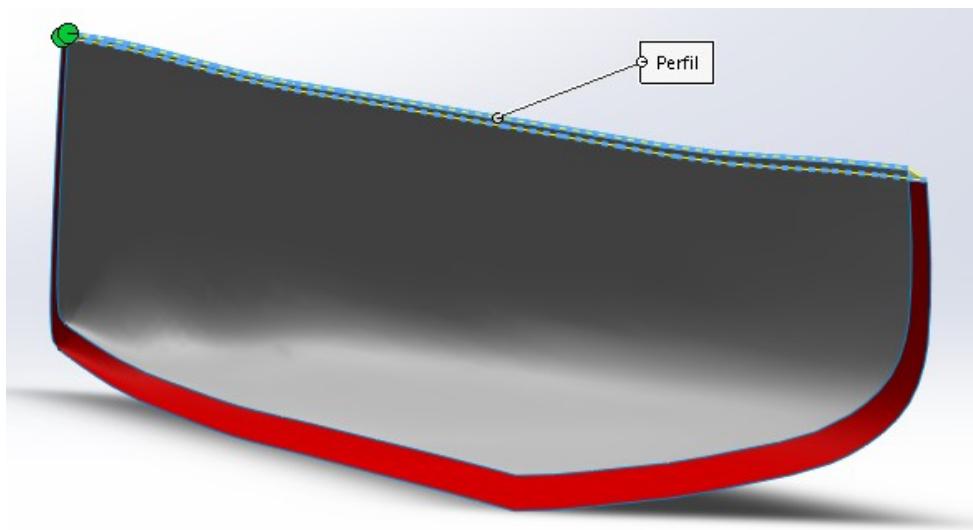


Figura 6: Superficies interior y exterior del casco. Fuente: Propia.

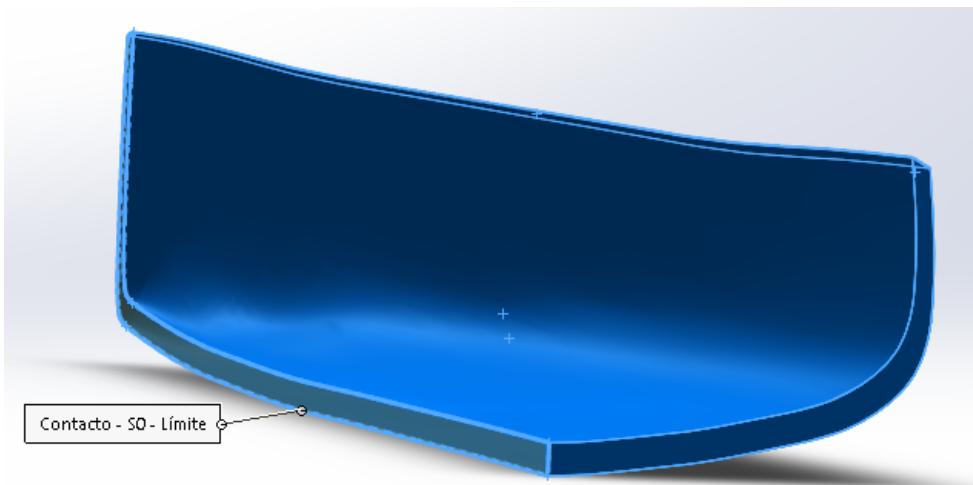


Figura 7: Sección de un cuarto del casco. Fuente: Propia

A este perfil le procuramos los redondeos de las aristas que no van a estar en contacto con el resto de partes del casco. De este modo obtenemos la forma final de los bordes.

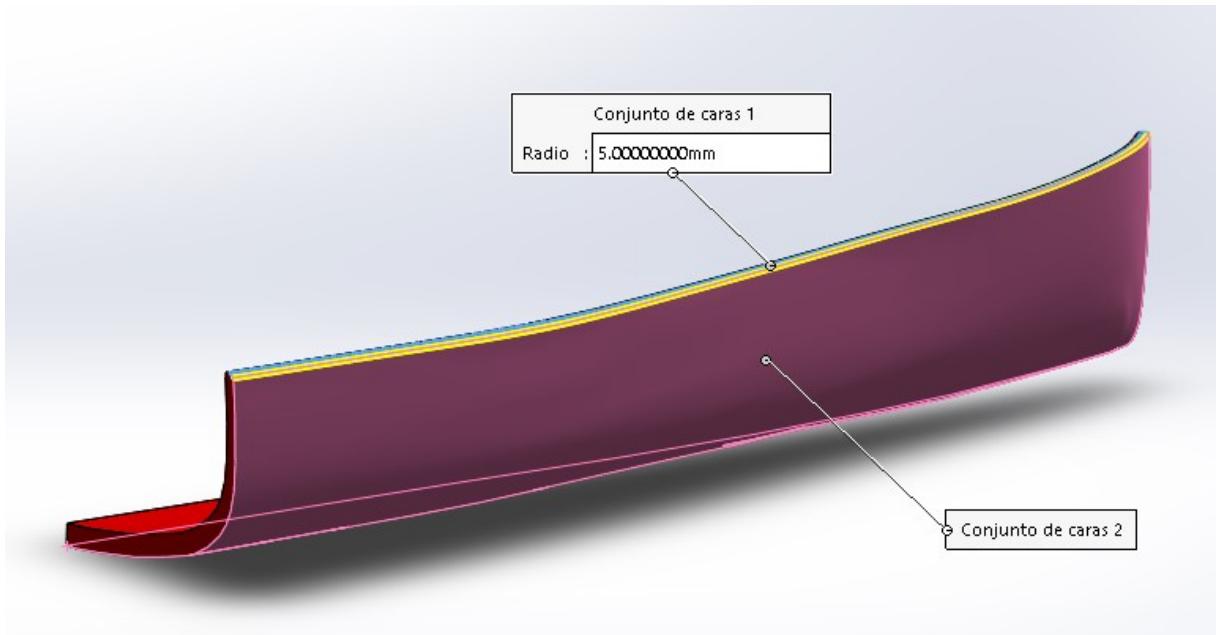


Figura 8: Vista de los redondeos en un cuarto del casco. Fuente: Propia.

Realizamos la simetría que formará medio casco aplicamos redondeos a la esquina interior como a la exterior (roda o codaste); ya que la canoa es simétrica en el plano frontal, la proa y la popa son iguales.

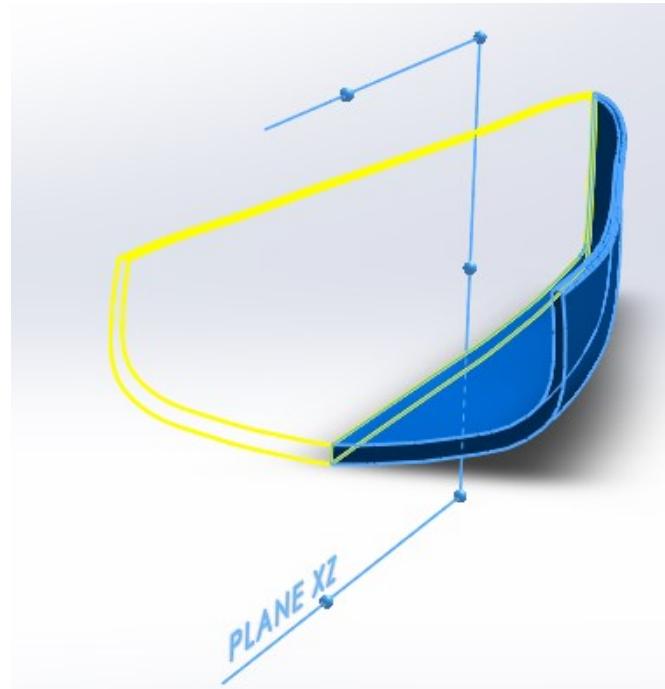


Figura 9

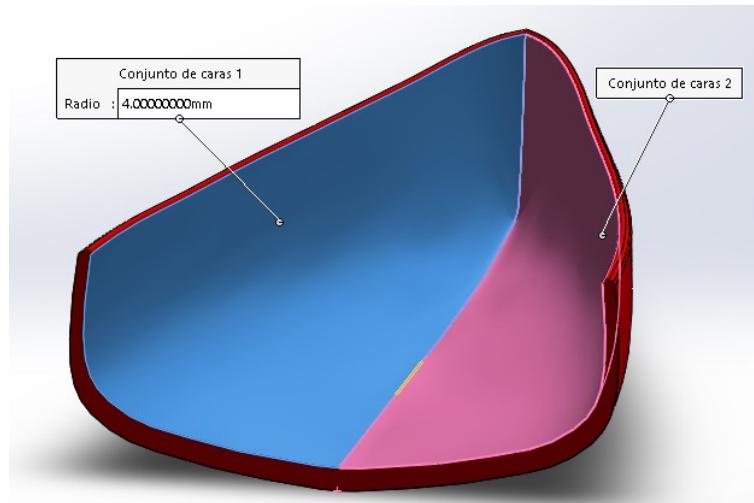


Figura 10

De este cuerpo se realizan simetrías tanto en el plano frontal (alzado) como en el lateral (perfil) para obtener la forma del casco. Obtenemos un casco de 3,58 metros de eslora y 63 cm de manga máxima. Lo suficiente para la anchura de una persona de tamaño medio. Pero sin ir sobrada de tamaño. Hay que tener en cuenta que es una canoa de fácil transporte y tampoco esperamos las prestaciones de una canoa profesional.

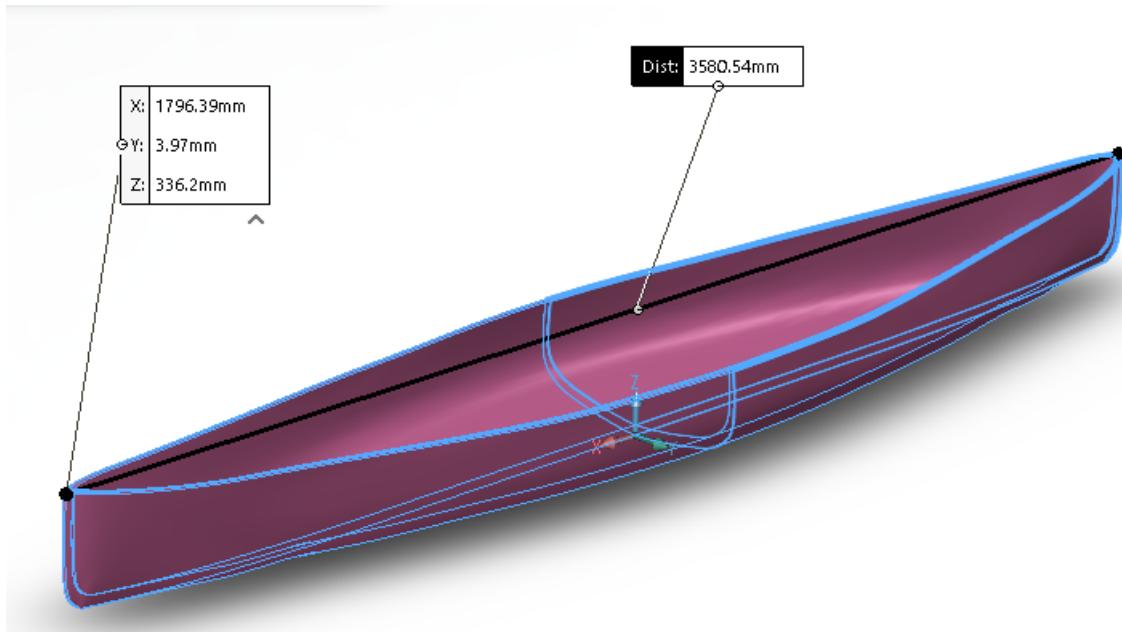


Figura 11

Una vez se obtuvo el casco diseñado, se procedió a diseñar los bancos. Es de tener en cuenta el hecho de que estos bancos fueron analizados como parte de la misma forma, pero en la realidad del diseño no forman parte de la misma pieza y no estarán hechos del mismo material, sino de madera. Irán encajados en su posición pero no serán de espuma y fibra como el casco.

Para obtener los bancos se dibujó un perfil que posteriormente se extruyó bidireccionalmente hasta unirse con ambas bandas del casco.

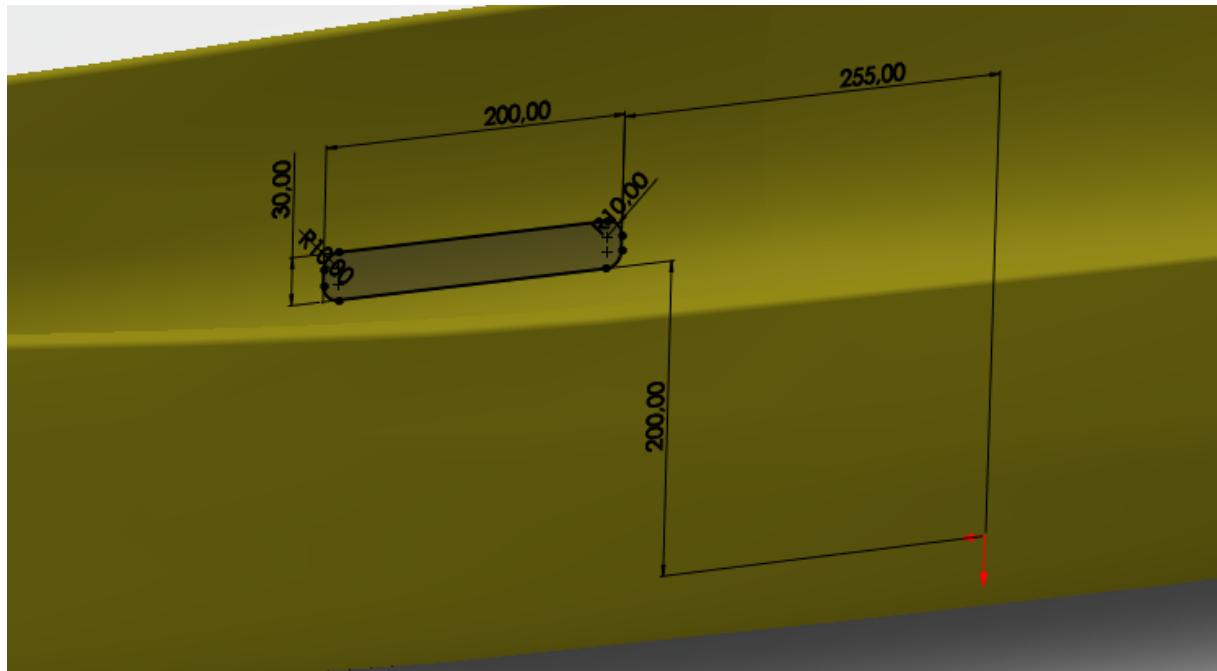


Figura 12:

Se extruyó el perfil y recortamos un soporte para anclar en el análisis por elementos finitos. Para posteriores diseños se puede plantear que la canoa solo posea un banco, desmontable igual que en éste diseño.

Finalmente se realizó una simetría respecto al plano frontal con el objetivo de tener dos bancos. Hay que tener en cuenta que el objetivo de este diseño es que sea apropiado para un análisis inicial y está sujeto a posteriores modificaciones.

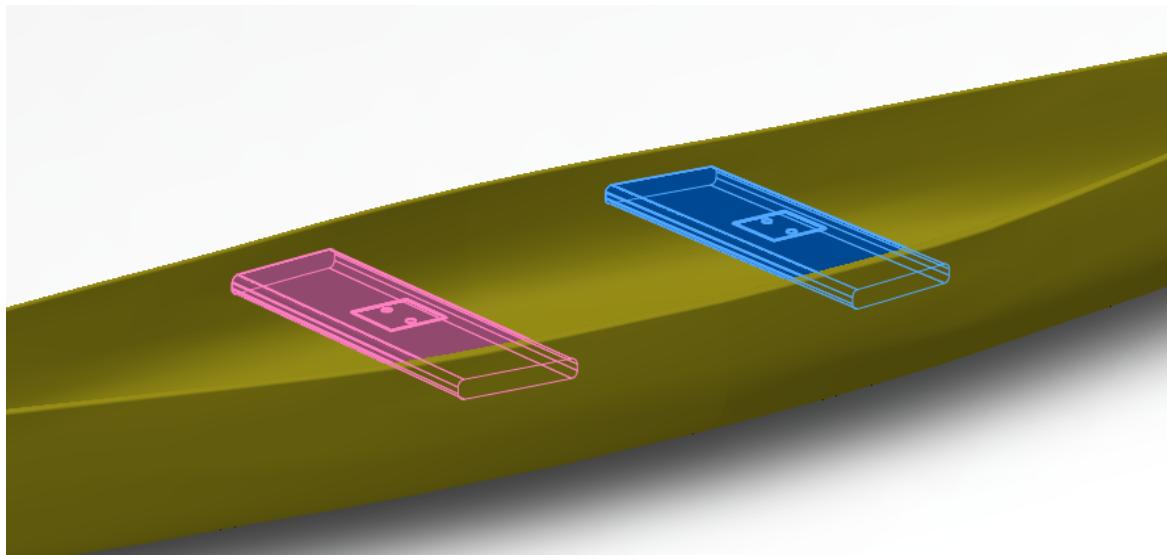


Figura 13

Ya obtenida la forma de la canoa, y es suficiente para nuestro análisis fluidodinámico.

Antes de proceder a partir la canoa se extruyeron distintos soportes para ensamblar unas pletinas de acero que simularán en el análisis nuestros cerrojos que mantendrán las partes unidas a presión para asegurar la estanqueidad.

Se realizan simetrías para tener esos soportes de los cerrojos en varios puntos de la unión entre secciones.

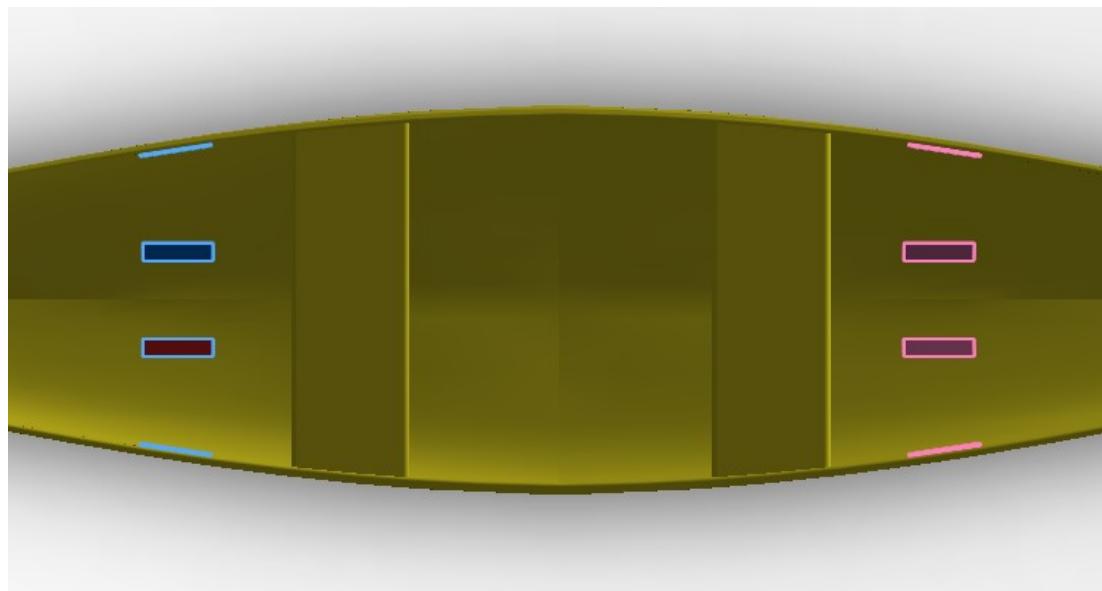


Figura 14

También realizamos los agujeros donde ensamblaremos las barras de acero que reducen los esfuerzos de flexión y cortante cuando la canoa es cargada y hundida en el agua.

Y del mismo modo simetrías para obtener todos los agujeros para las barras de refuerzo.

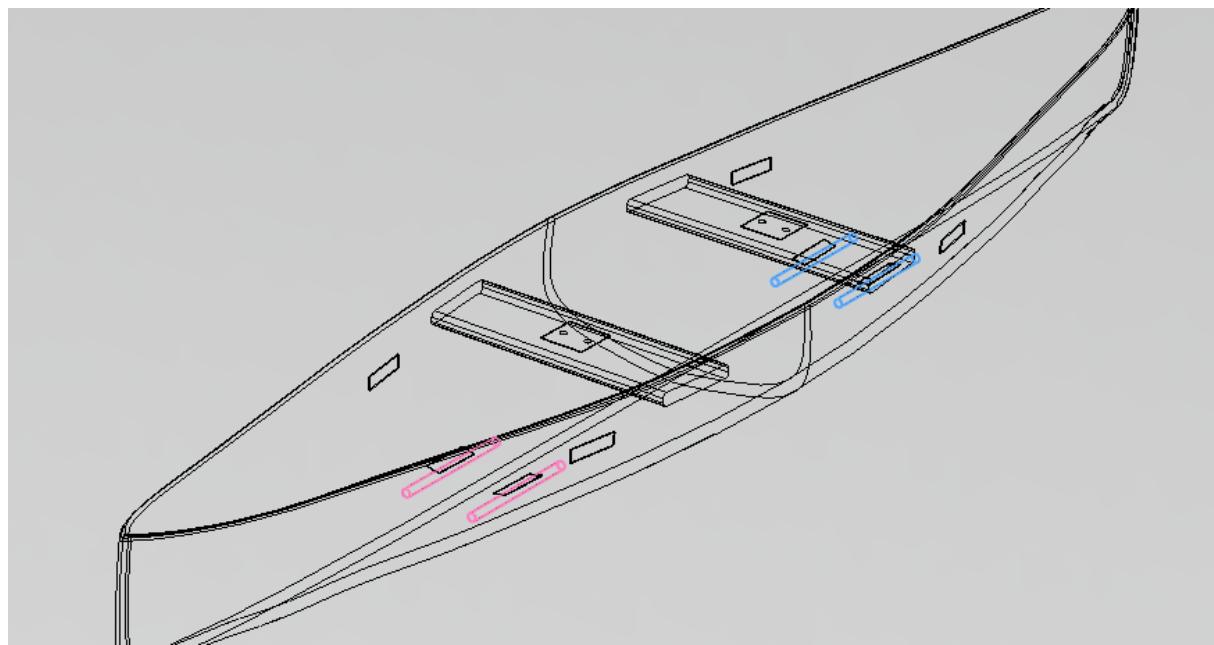


Figura 15

Como último paso en nuestro diseño se partió el sólido en 5 partes mediante planos paralelos al frontal a distancia de +655mm, +650mm, -650mm y -655 mm

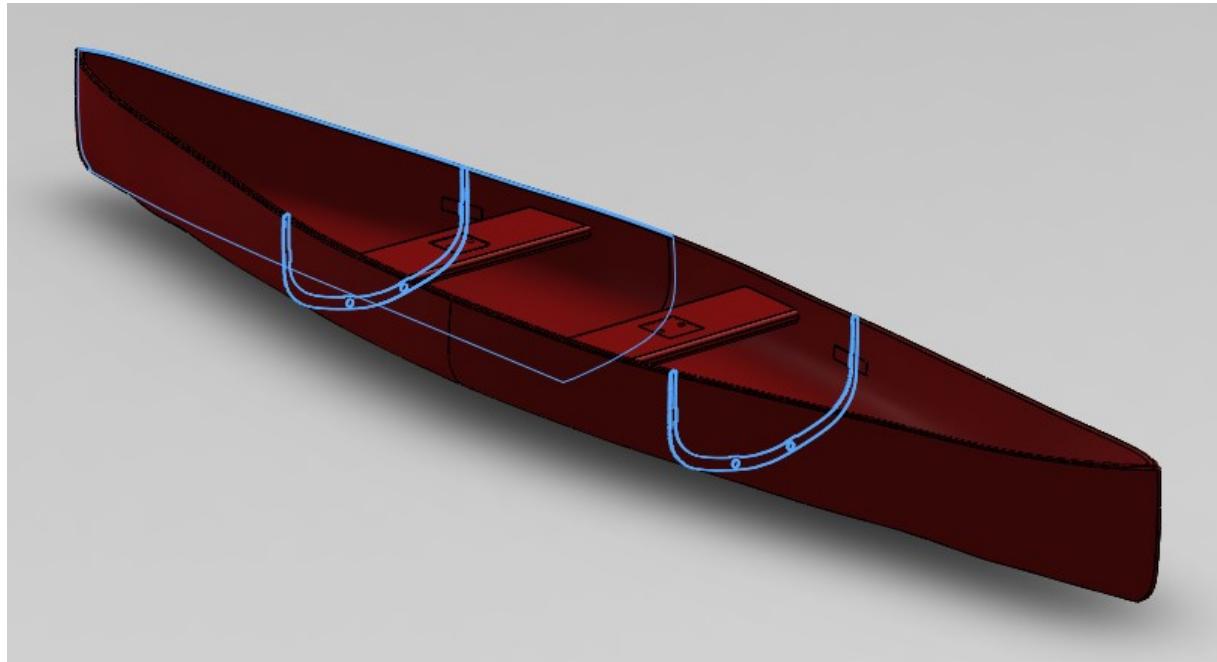


Figura 16

Obtenemos así los distintos módulos que conformarán nuestra canoa: la proa, la popa, el centro, la junta del centro con la proa y la junta del centro con la popa.

PLANOS Y VISTAS OBTENIDOS.

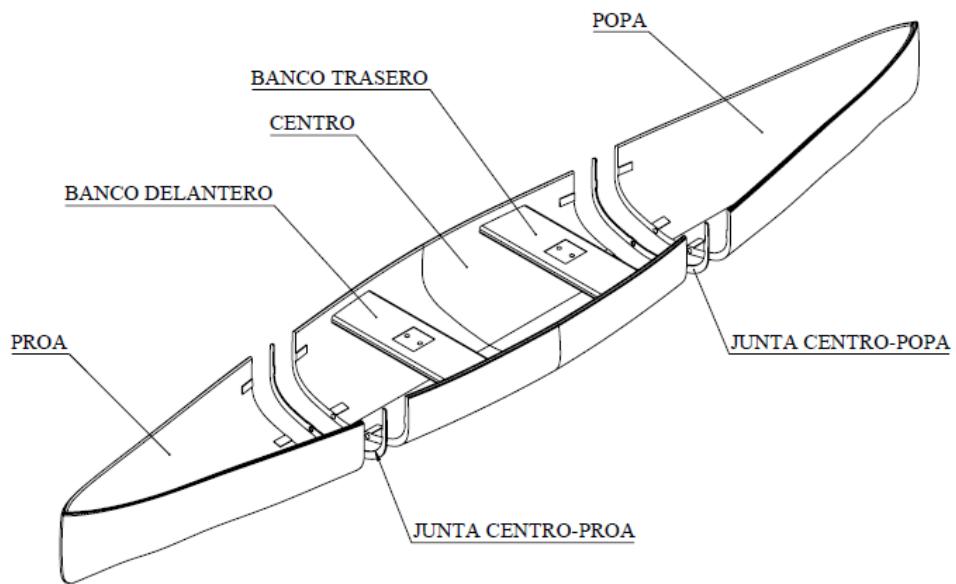


Figura 17

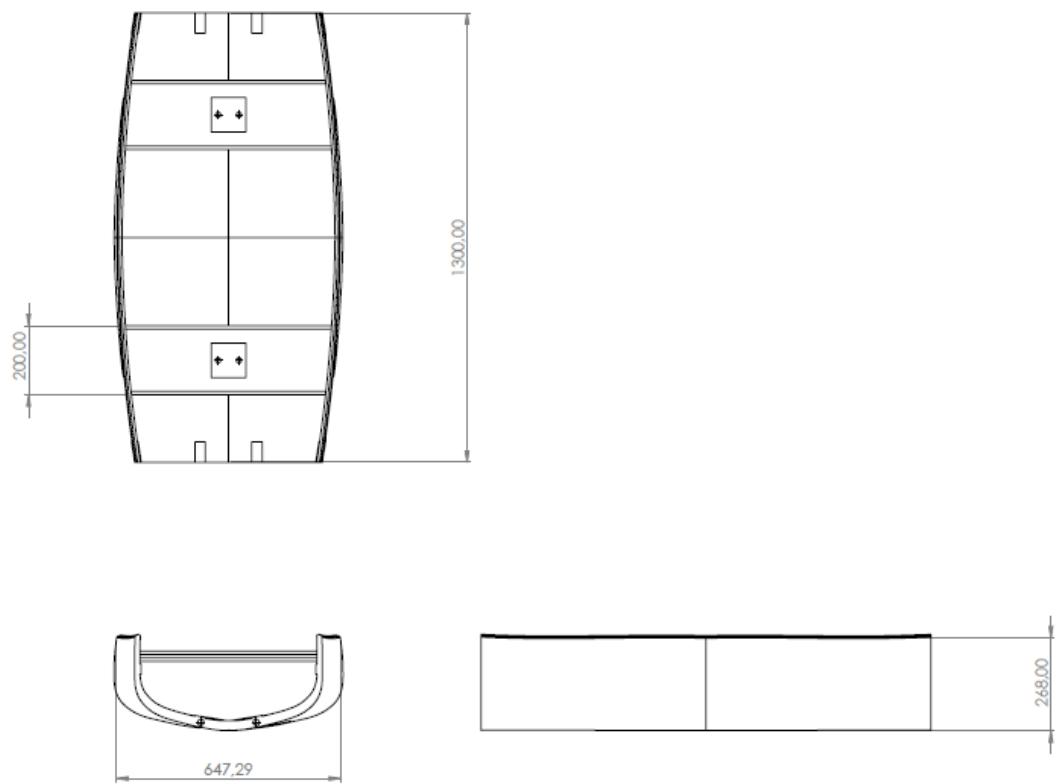


Figura 18

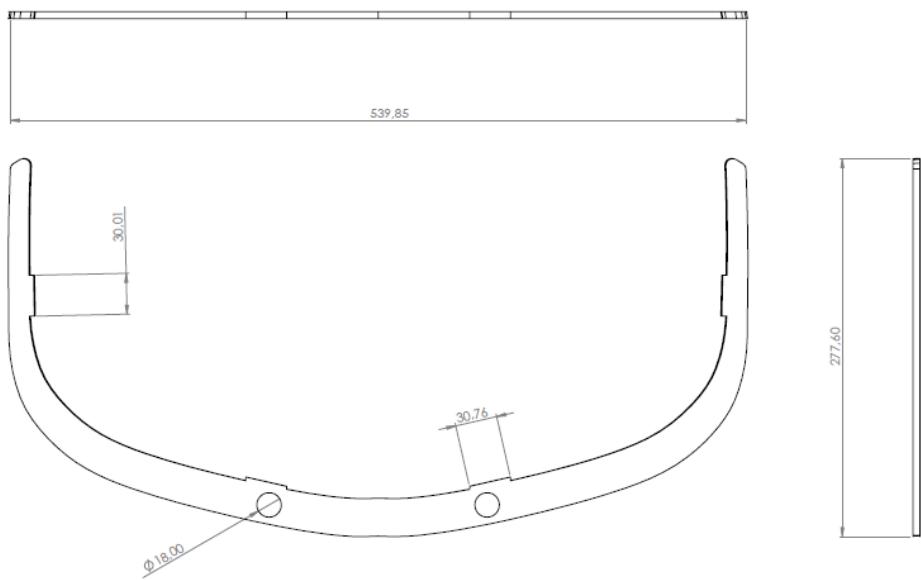


Figura 19

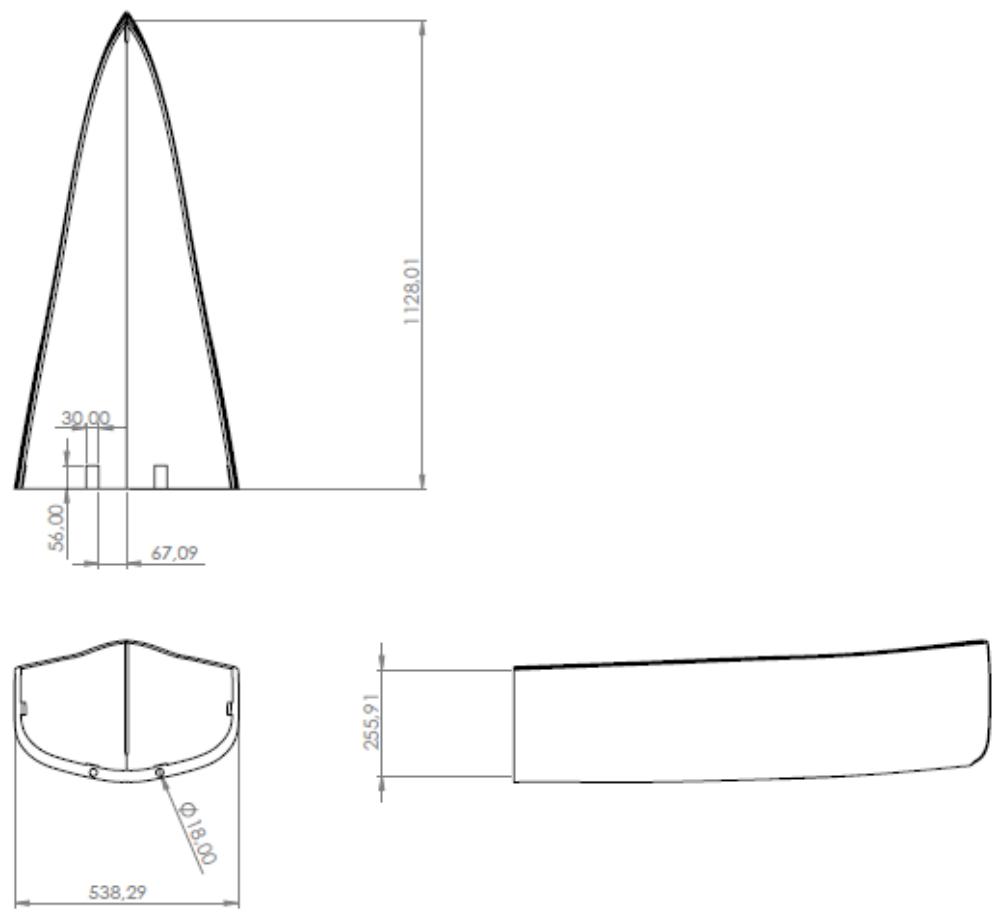


Figura 20

5. DISEÑO DE UN MODELO PARA MADERA.

El modelo alternativo constará de un espesor uniforme en el casco y estará reforzado con cuadernas para soportar la deformación producida por la presión del agua.

Partimos de la superficie obtenida a partir de los perfiles y le asignamos un espesor uniforme de 4.5mm.

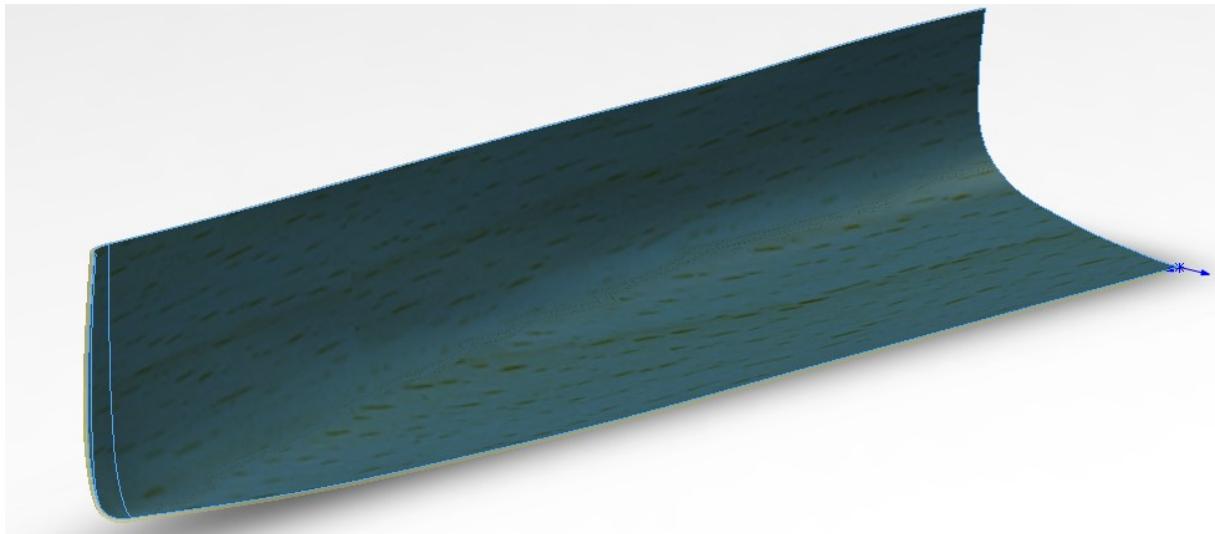


Figura 21: Aplicación de un espesor uniforme a la superficie del cuarto del casco. Fuente: Propia.

Para el modelo de madera es necesario proveer de cuadernas la estructura para soportar la presión del agua. Se realizaron cada 250mm las extrusiones para simular las cuadernas.

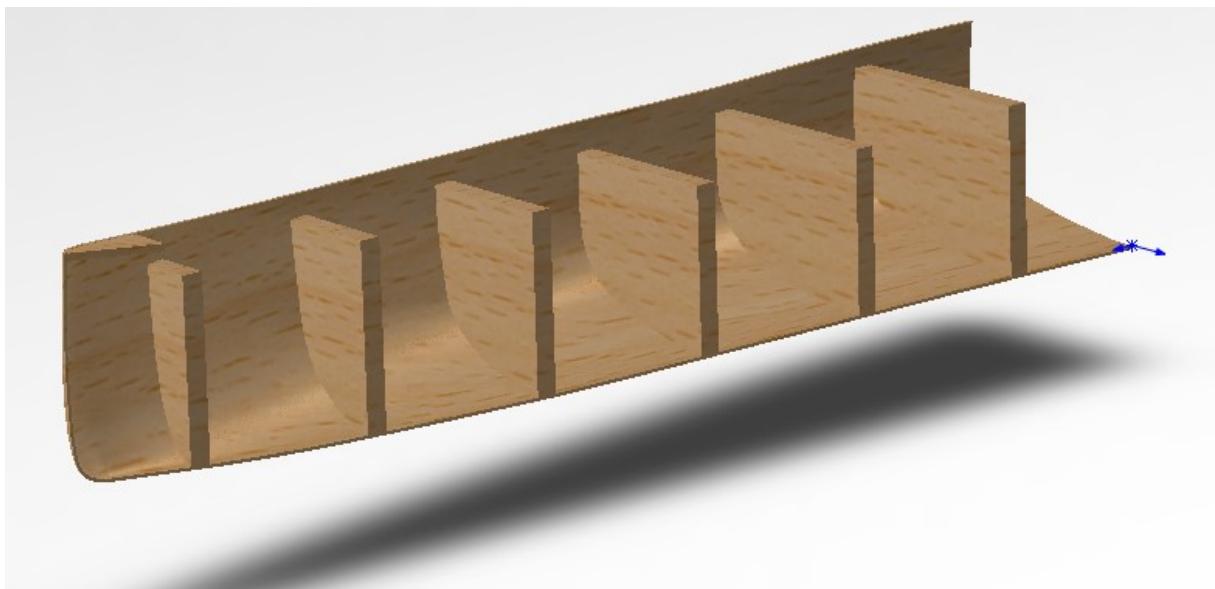


Figura 22: Extrusión de las cuadernas. Fuente: Propia.

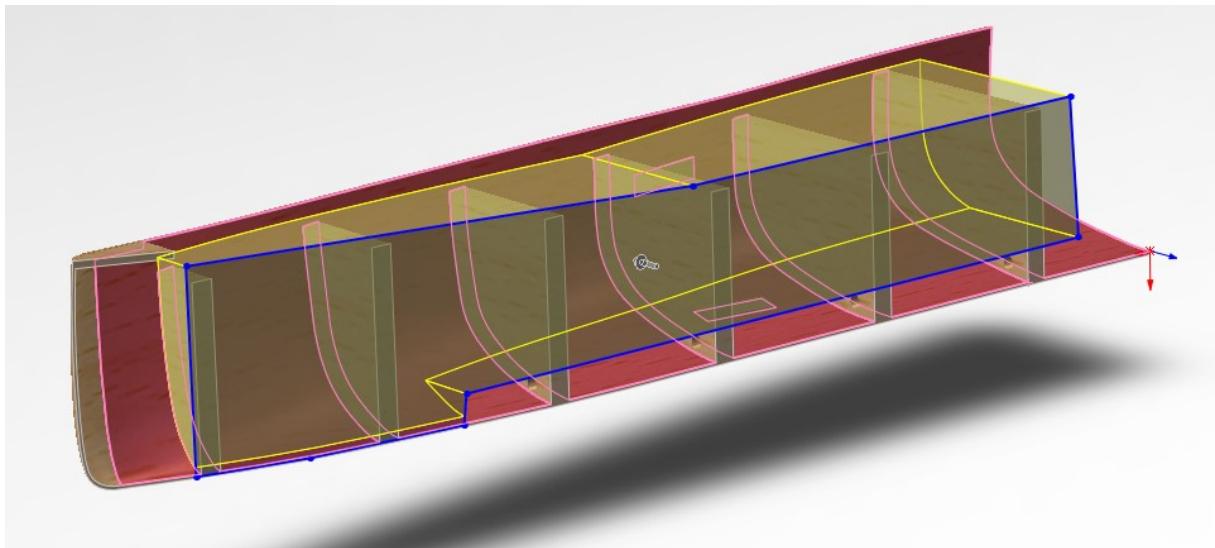


Figura 23: Recorte del material sólido sobrante de las cuadernas. Fuente: Propia.

Se realizó un recorte equidistante a la superficie casco para simular un espesor de las cuadernas. Las cuadernas quedaron con un espesor constante, simulando a las tablas de madera que se doblarían para conseguir esa forma.

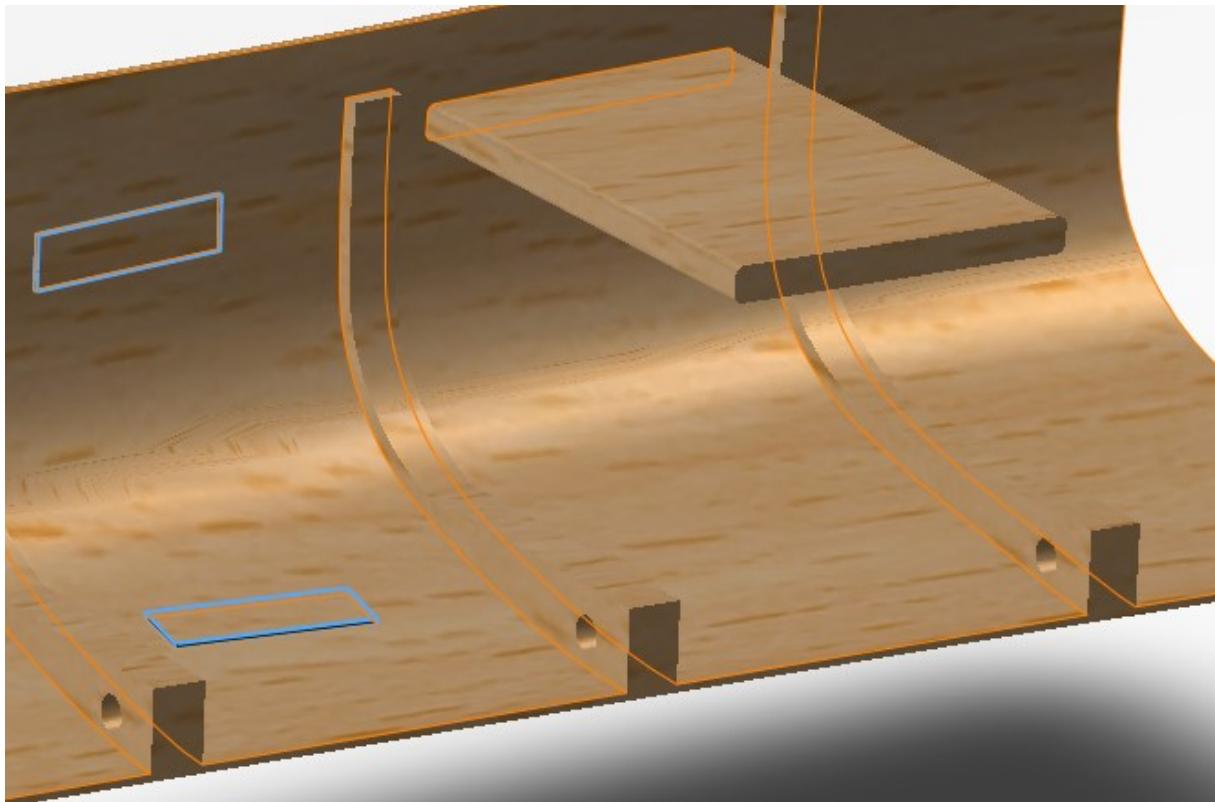


Figura 24: Formación de agujeros para barras de refuerzo, extrusión del banco y de los soportes para los cierres. Fuente: Propia.

Se extruyó el banco y los soportes para los cierres. También se recortaron los agujeros para las barras de refuerzo. Ya se pueden realizar las simetrías.

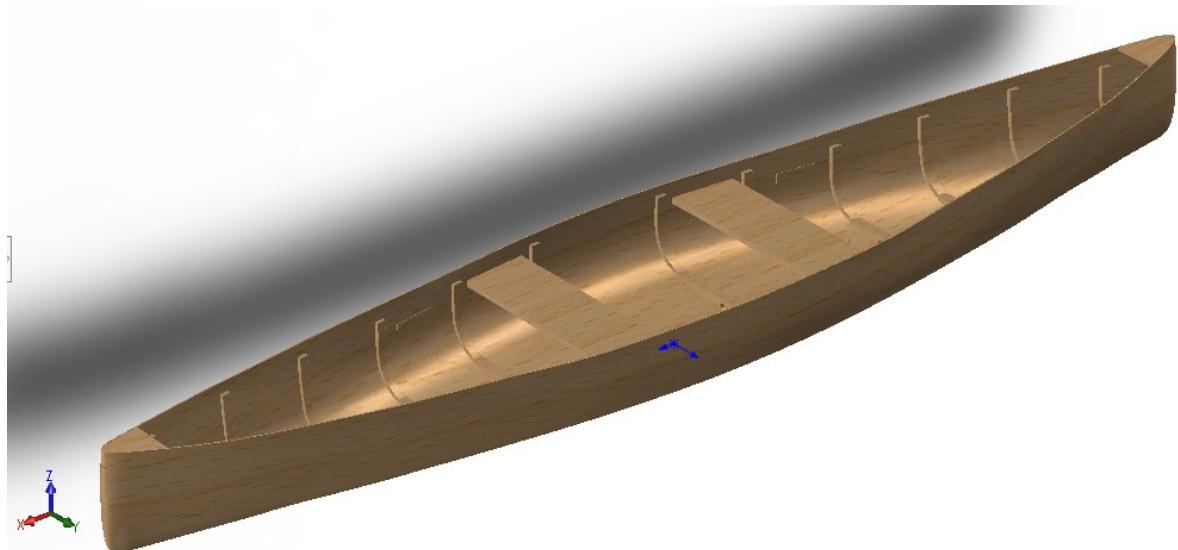


Figura 25: Vista completa de la canoa de madera sin cortar. Fuente: Propia.

Una vez obtenido el diseño de la canoa de diseño tradicional. Se recortó por los planos de $+655$, $+650$, -650 , -655 para obtener los tres módulos y las juntas.

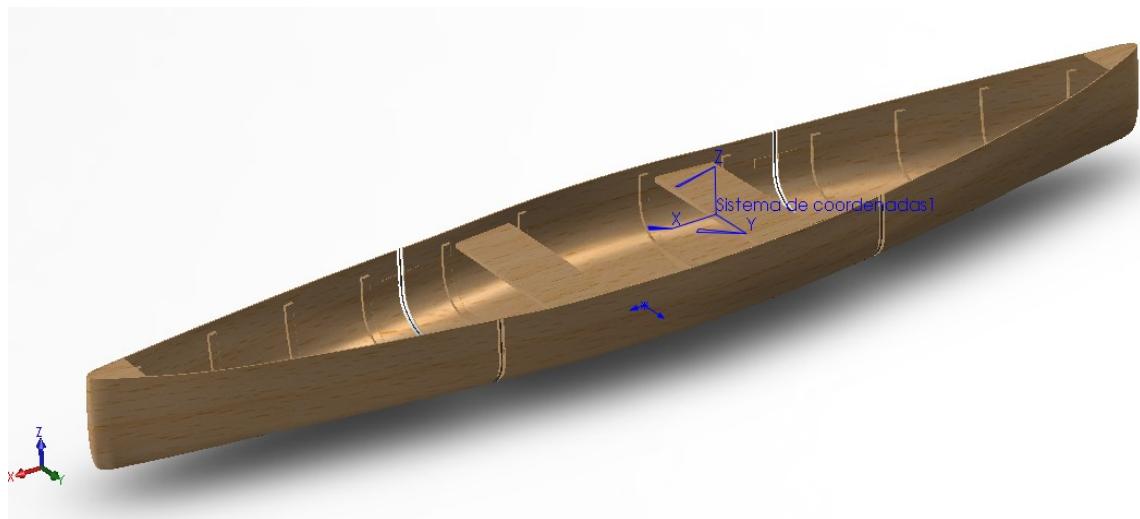


Figura 26: Vista completa de los módulos separados y las juntas. Fuente: Propia.

PLANOS Y VISTAS OBTENIDOS.

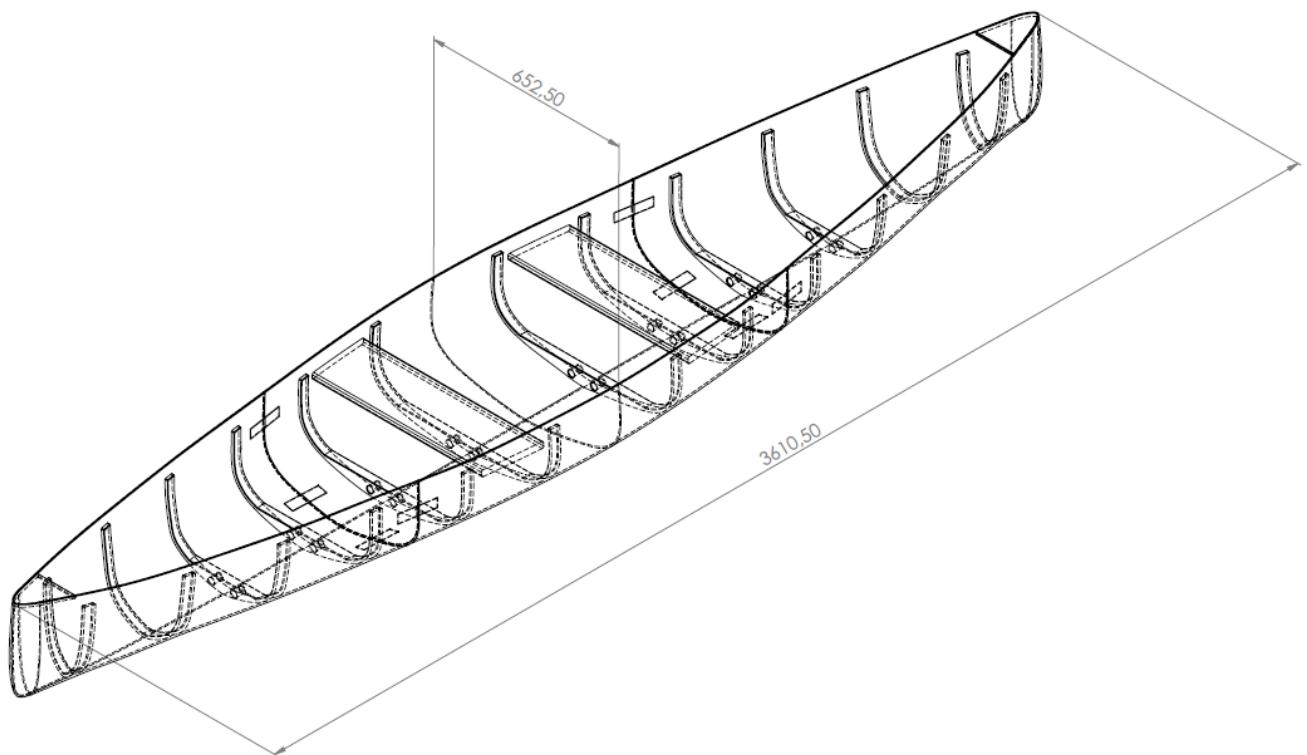


Figura 27: Vista completa de la canoa de madera. Fuente: Propia.

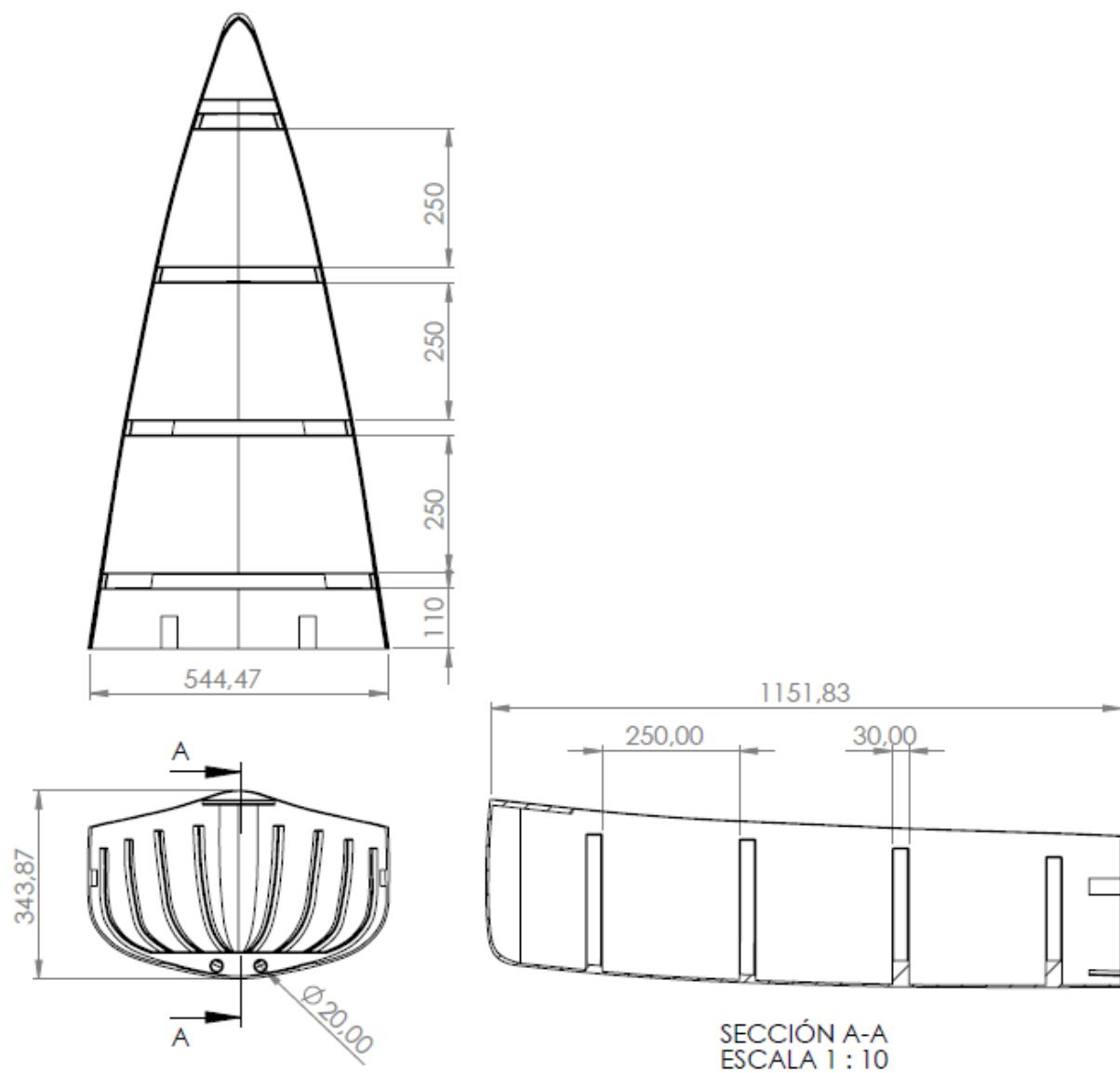


Figura 28: Vista de la proa/ popa en madera. Fuente: Propia

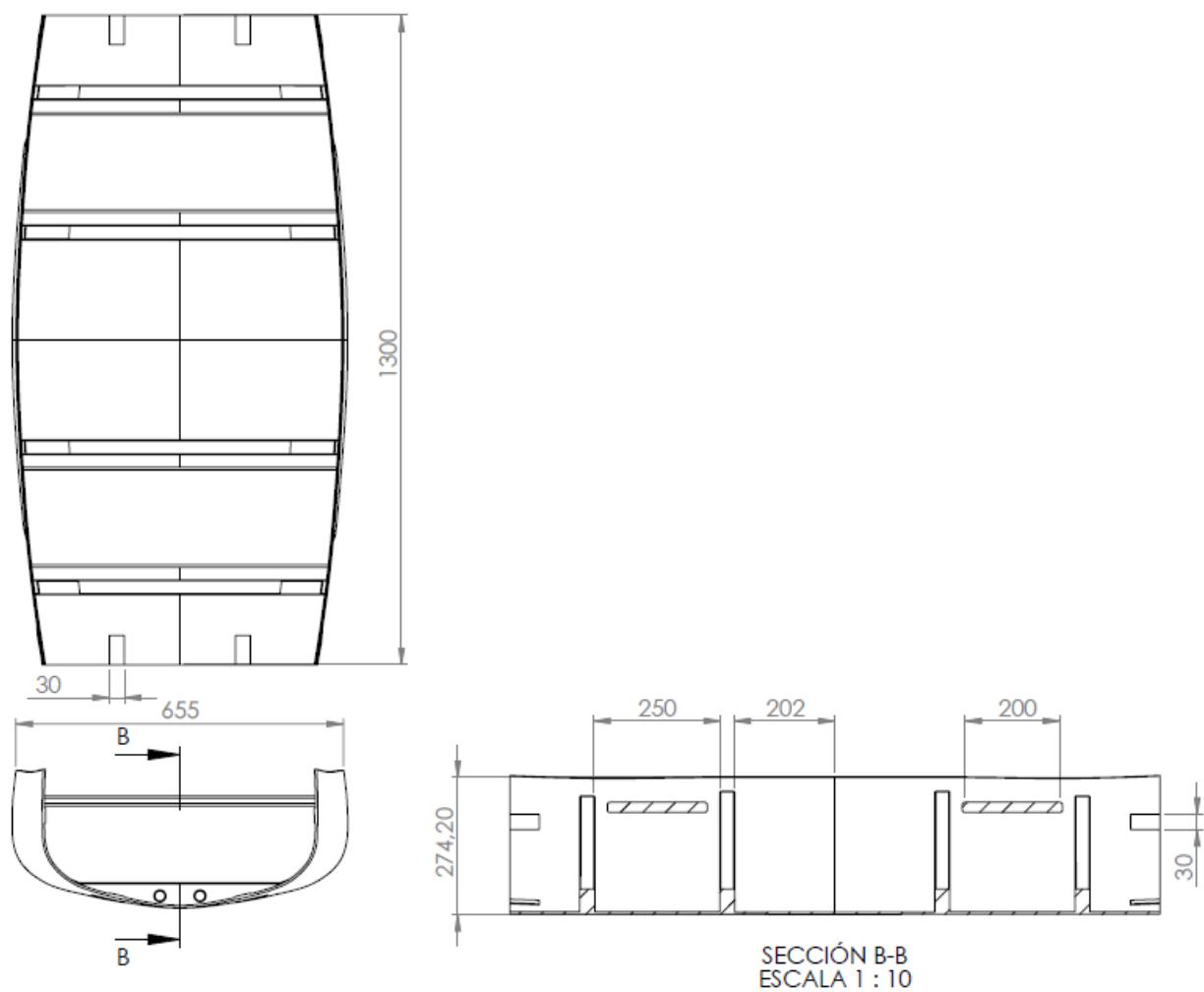


Figura 29: Vistas del módulo casco. Fuente: Propia.

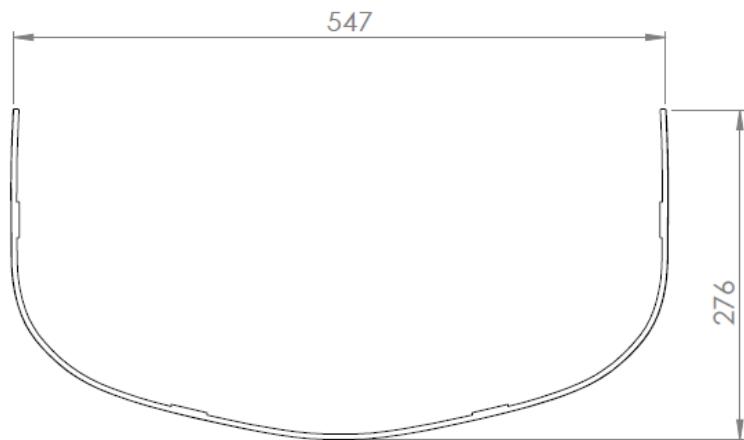


Figura 30: Vista de la junta entre módulo central y proa/popa, espesor de 2 mm. Fuente: Propia.

6. ANÁLISIS ESTÁTICO MEDIANTE FEM.

El programa empleado para realizar un análisis de tensiones y deformaciones en la estructura de la barca mediante elementos finitos es Abaqus CAE. También obtendremos el criterio de fallo del material compuesto fibra-epoxi del casco mediante el criterio de Tsai-Wu (18).

Las propiedades del material fibra de aramida (kévlar)/epoxi fueron introducidas en el entorno Abaqus. Estas propiedades son ortotrópicas y la capa de composite tipo *Shell* (lámina) tiene sus direcciones principales tangentes a la superficie. De ese modo se simula el material sándwich formado por composite de tela de kévlar y resina epoxi dispuesto sobre el núcleo de espuma. Las propiedades direccionalas del kévlar no son excesivamente importantes al tratarse de un tejido. Además se colocaron dos capas en direcciones opuestas para igualar estas propiedades.

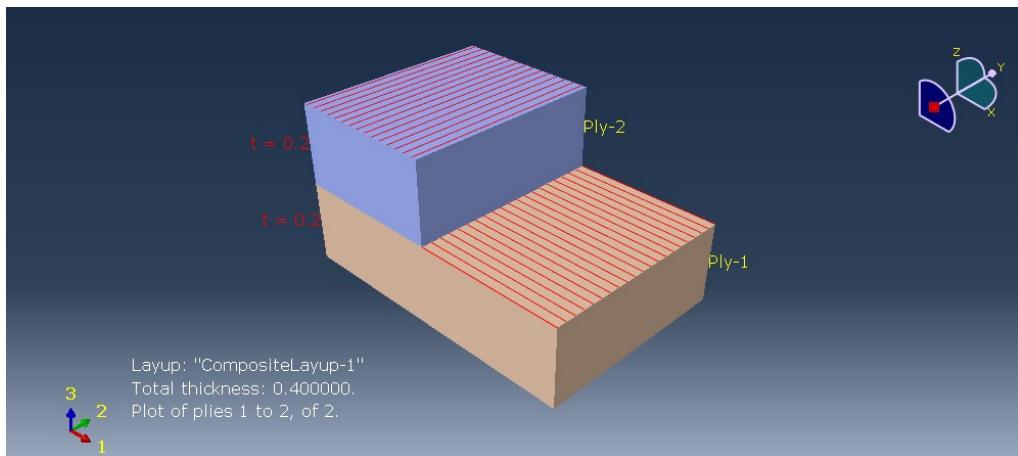


Figura 31: Representación de las capa de composite utilizadas en la simulación por FEM. Fuente: Propia

Las secciones de las juntas de goma y el núcleo de espuma son isótropas, su comportamiento elástico es el mismo en todas las direcciones. También son introducidas en el entorno Abaqus.

Para simular los cierres de acero se ensambló una pletina de acero de espesor 1cm con el objetivo de simular el esfuerzo que soportará un cierre.

La superficie de composite está compuesta por dos capas de 0.2mm de espesor del material ortotropo kevlar-epoxi. Estas propiedades son asignadas a un cuerpo tipo superficie y éste se adhiere a la sección de cuerpo sólido de la espuma mediante un contacto tipo TIE, lo que significa que no existe desplazamiento entre ambas superficies (exterior del sólido e interior de la capa de composite). Es un equivalente a anexionar partes.

El modelo fue sometido a un hundimiento impuesto de 200 mm, teniendo una presión máxima de 0.002 MPa para ser coherente en sistema de unidades (mm, N, MPa). Se coloca una restricción de movimiento en cualquier dirección en los soportes de los bancos. Estas condiciones serán varían para las distintas simulaciones.

Posteriormente se aplicaron otras condiciones de contorno para obtener los resultados de peso que soporta, distancia que se hunde o calado, máximas deformaciones y tensiones así como. Hay que tener en cuenta que las entradas del modelo es el hundimiento y la presión del agua y las salidas la fuerza que está actuando sobre él, de modo que partimos del resultado y obtenemos el origen. A esta fuerza le restaremos el peso, de 32 kg.

RESULTADOS NUMÉRICOS.

PESO SOPORTADO (Kg)	CALADO (mm)	MÁXIMA PRESIÓN (MPa)	MÁXIMA TENSIÓN EN LA FIBRA (MPa)	MÁXIMO DESPLAZAMIENTO EN LOS EXTREMOS (PROA/POPA) (mm)	CRITERIO DE FALLO DE TSAI-WU
213	200	0.002	55.96	9.2	0.2975
138.5	150	0.0015	42.97	6.4	0.2011
65.7	100	0.001	27.61	3.6	0.1103
0.83	50	0.0005	10.90	1.14	0.04282

Tabla 3: Resultados del análisis estructural. Fuente: Propia

El coeficiente de fallo de Tsai-Wu debe mantenerse por debajo de 1 para encontrarnos en zona segura(18). Su inverso es el coeficiente de seguridad, que vemos que se encuentra por encima de 3 en el caso menos favorable. Un resultado aceptable para nuestro diseño.

Los resultados para desplazamientos y las concentraciones de tensiones no son despreciables pero no influyen en las prestaciones de la canoa. Una posible implementación a futuro es analizar el comportamiento en aguas abiertas de distintos prototipos de similares dimensiones y distintos espesores de la capa para conocer de primera mano el comportamiento al someterse a diferentes esfuerzos variables.

RESULTADOS VISUALIZADOS DE FORMA GRÁFICA.

Las siguientes figuras representan de forma gráfica el resultado de los análisis en la situación de calado de 200mm.

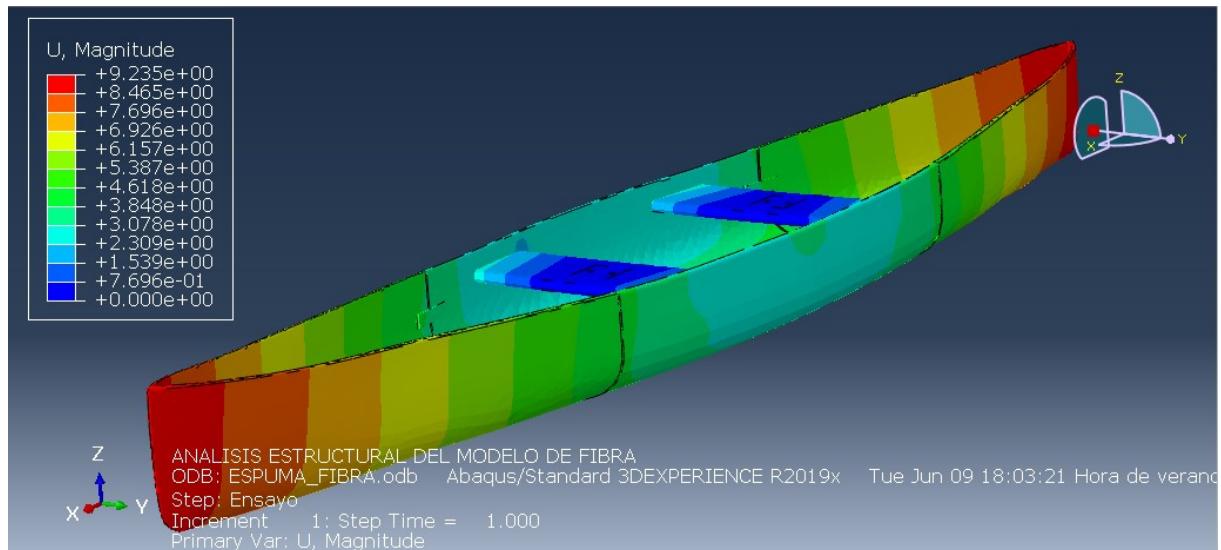


Figura 32: Visualización de los desplazamientos con un encastre en los bancos. Fuente: Propia.

Un desplazamiento máximo de 1 cm en los extremos es un resultado más que satisfactorio. De todos modos el uso de un exterior de kevlar-epoxi más grueso, aunque supusiera un aumento del coste y peso, nos daría una canoa más rígida.

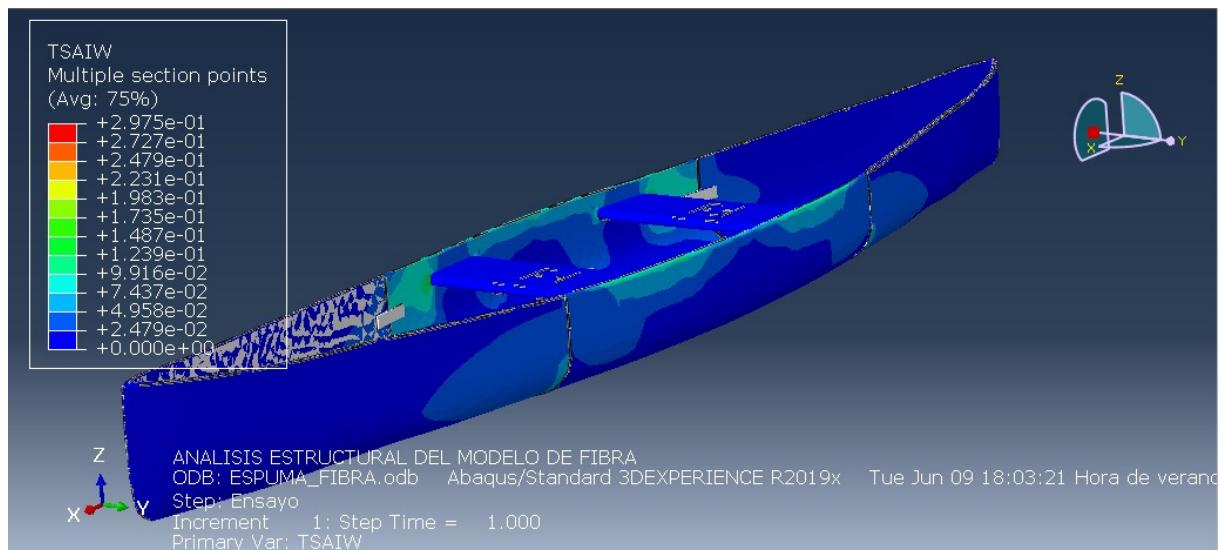


Figura 33: Visualización del criterio de fallo de Tsai Wu. Fuente: Propia

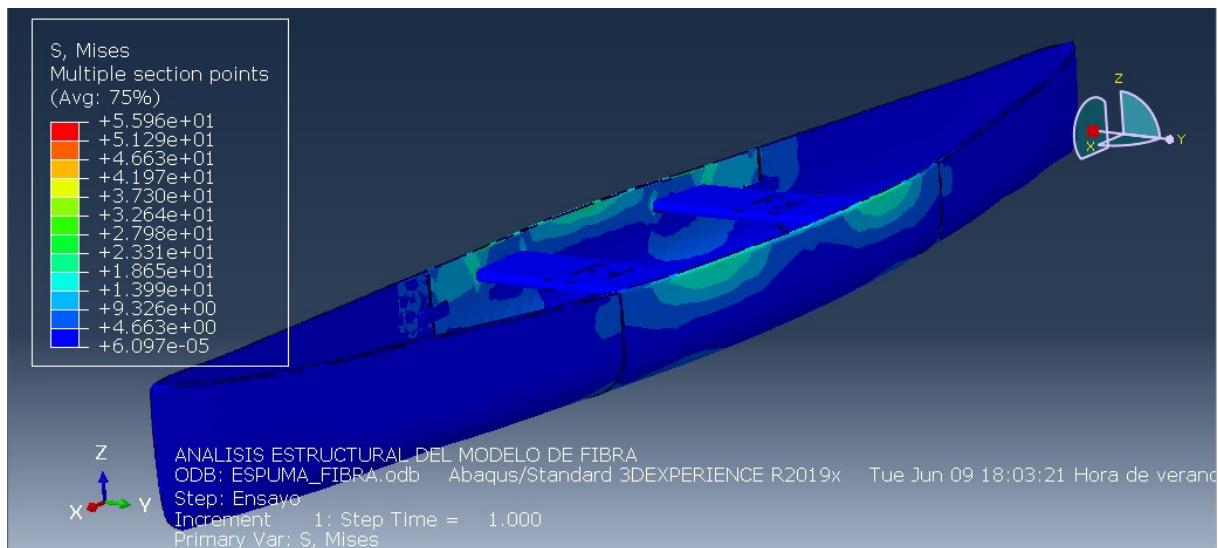


Figura 34: Visualización de las tensiones. Fuente: Propia

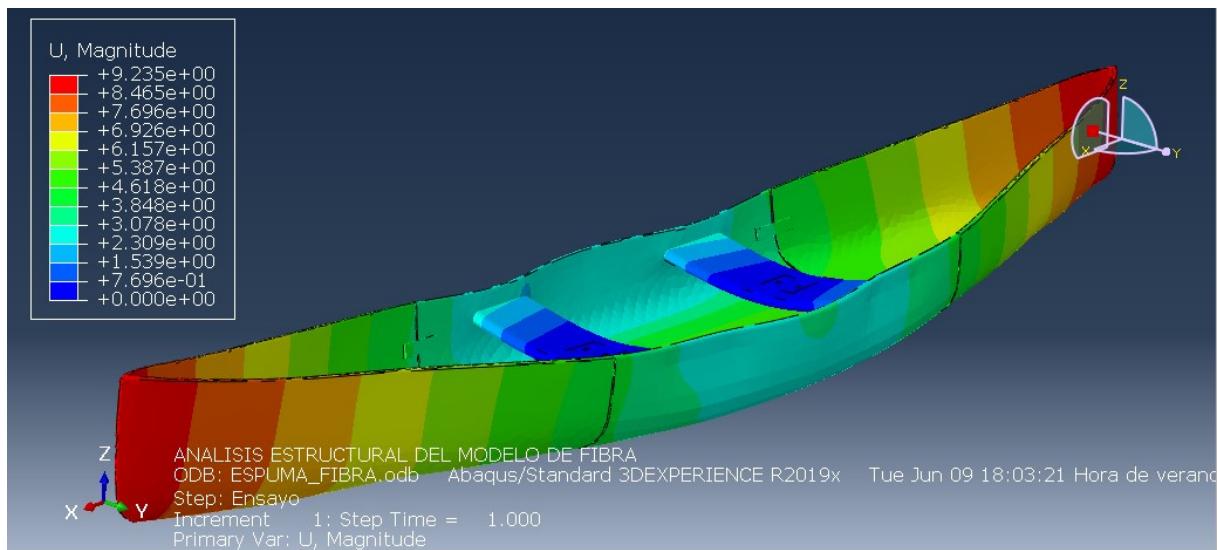


Figura 35: Visión exagerada multiplicando los desplazamientos por 20. Fuente: Propia.

Los mayores desplazamientos se acumulan en la proa y la popa. No afectan notablemente a las prestaciones en navegación. La menor rigidez de la canoa podría resultar ventajosa en caso de impacto o cargas laterales. Queda como posible estudio a futuro.

7. ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO.

Con el objetivo de conocer las prestaciones de la canoa en términos de resistencia hidrodinámica realizamos análisis con el complemento *SolidWorks Flow Simulation*. Obtendremos una estimación a priori de la fuerza de resistencia al avance en el eje x (de la eslora) a distintas velocidades y calados.

El volumen de control declarado sobresale del entorno cercano de la canoa hasta una distancia mayor a aquella en la que el efecto viscoso desaparece. Cambia según el calado impuesto de modo que el límite superior del volumen de control es la superficie del agua.

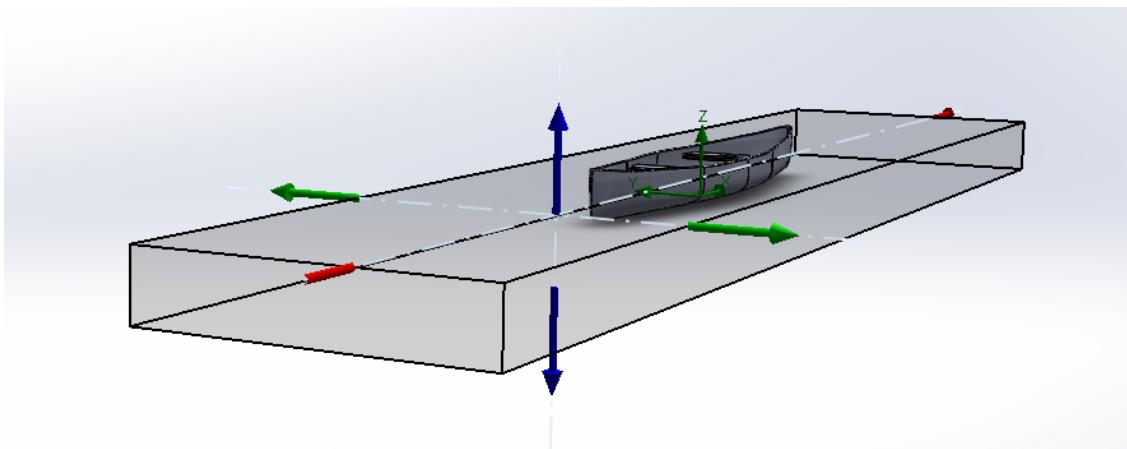


Figura 36: Volumen de control para el estudio hidrodinámico. Fuente: Propia

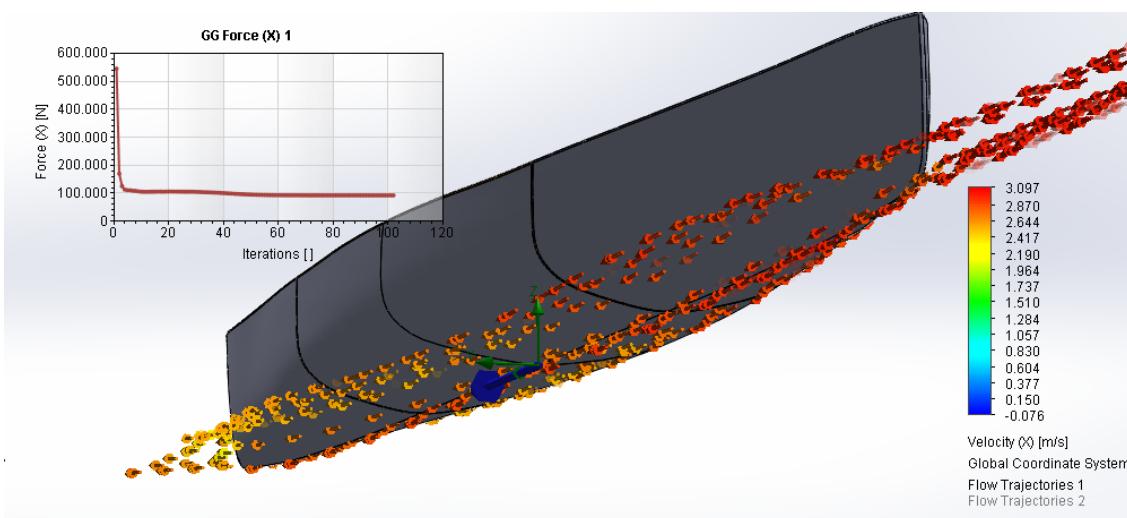


Figura 37: Líneas de corriente y fuerza de resistencia con un calado de 150mm y una velocidad de 3 m/s. Fuente: Propia.

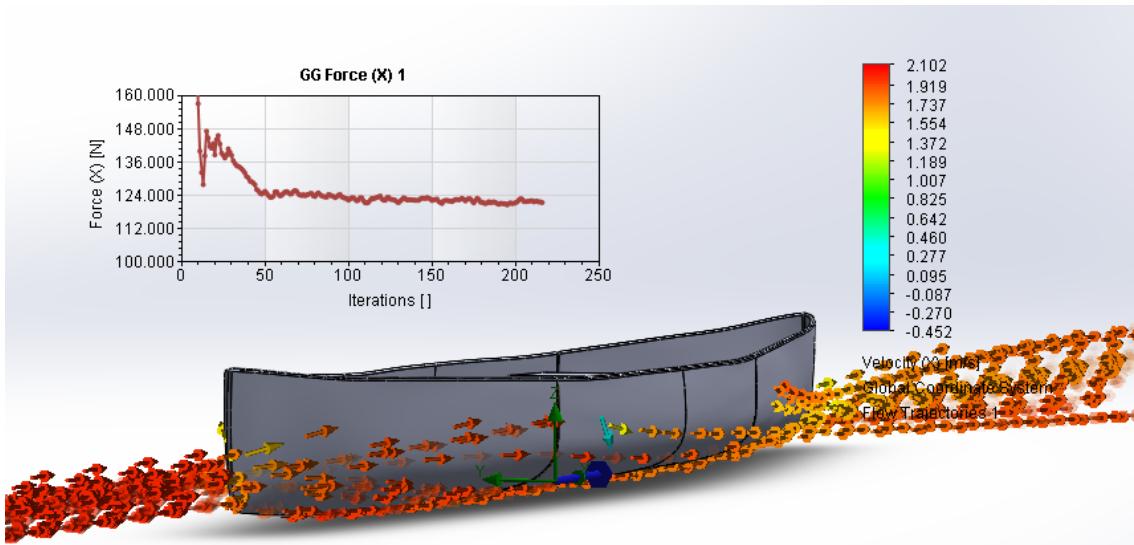


Figura 38: Lineas de corriente y fuerza de resistencia con un calado de 200 mm y una velocidad de 2 m/s.
Fuente: Propia.

FUERZA DE RESISTENCIA HIDRODINÁMICA.

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 4**.

CALADO	PESO SOPORTADO	VELOCIDAD			
		0.5m/s	1m/s	2m/s	3m/s
50mm	0.8 kg	1.1N (0.11kg)	4N (0.4kg)	13.5N (1.35kg)	31N (3.1kg)
100mm	65.7 kg	1.6N (0.16kg)	6N (0.6kg)	24N (2.4kg)	60N (6kg)
150mm	138.5 kg	2.5N (0.25kg)	10N (1kg)	40N (4kg)	92.5N (9.25kg)
200mm	213 kg	9N (0.9 kg)	30N (3 kg)	124N (12.4 kg)	280N (28kg)

Tabla 4: Resultados de la estimación de fuerza de resistencia hidrodinámica en distintas condiciones.
Fuente: Propia.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA E INTERPRETACIÓN DE LA SENSIBILIDAD A CAMBIOS DE CALADO.

Tal y como se representa en la **Figura 39**, la fuerza de resistencia hidrodinámica aumenta exponencialmente tanto al aumentar el calado como la velocidad de flujo. Da una idea de que la canoa va a ofrecer un rendimiento y prestaciones mejores cuando ésta es menos cargada. A pesar de estructuralmente poderse cargar con un peso considerable, empeora su hidrodinámica. Aspecto a tener en cuenta por el usuario.

**FUERZA DE RESISTENCIA HIDRODINÁMICA (kg) RESPECTO A
LA VELOCIDAD (m/s). Seraiado por calado.**

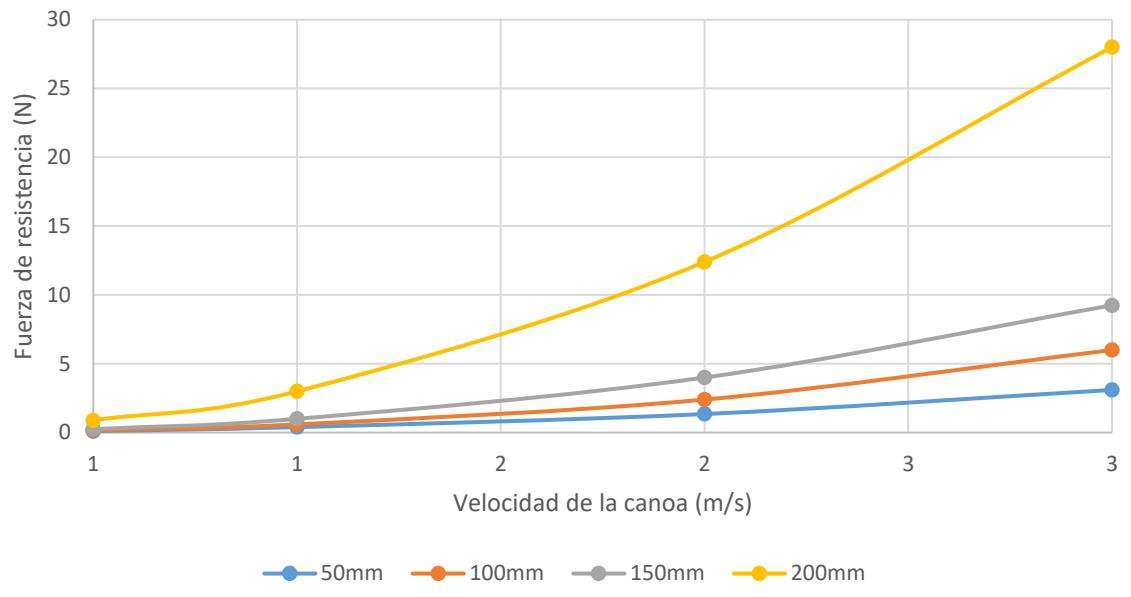


Figura 39: Representación gráfica de la fuerza de resistencia hidrodinámica.

Las prestaciones de la canoa empeoran cuando la carga supera los 200kg y es por esto que su uso es recomendable para un máximo de dos personas de peso medio. No es un modelo que permita una carga excesiva. Es necesario tener en cuenta que es de uso recreativo para aguas calmadas y poca carga.

8. PROCESO DE FABRICACIÓN.

El proceso de fabricación de las canoas de uso recreativo suele estar poco automatizado. Es por ello que suelen hacerse a demanda o ser fabricadas de manera semiartesanal, inclusive grandes producciones. No es así el caso de los kayaks de polietileno, que son fabricados en serie mediante moldes de inyección (2) o rotativos (19).

El proceso decidido está basado en el de la fabricación de las tablas de surf. Un molde en el que se inyecta la mezcla de los componentes isocianato y poliol que reaccionan para obtener la espuma de poliuretano (20). Esto se realiza en el interior de un molde para obtener la forma del casco.

COLADO DE ESPUMA DE POLIURETANO.

Se cuela la espuma por los orificios del molde superior y se dejan salidas para el aire que la espuma empuja al llenar cavidades y expandirse. En la siguiente imagen se muestra el diseño del molde donde se introduciría la espuma para obtener el núcleo del casco. Estos moldes pueden tener un precio de 1500-3000 € y supondremos que tienen una vida útil de 200 usos, 100 canoas.

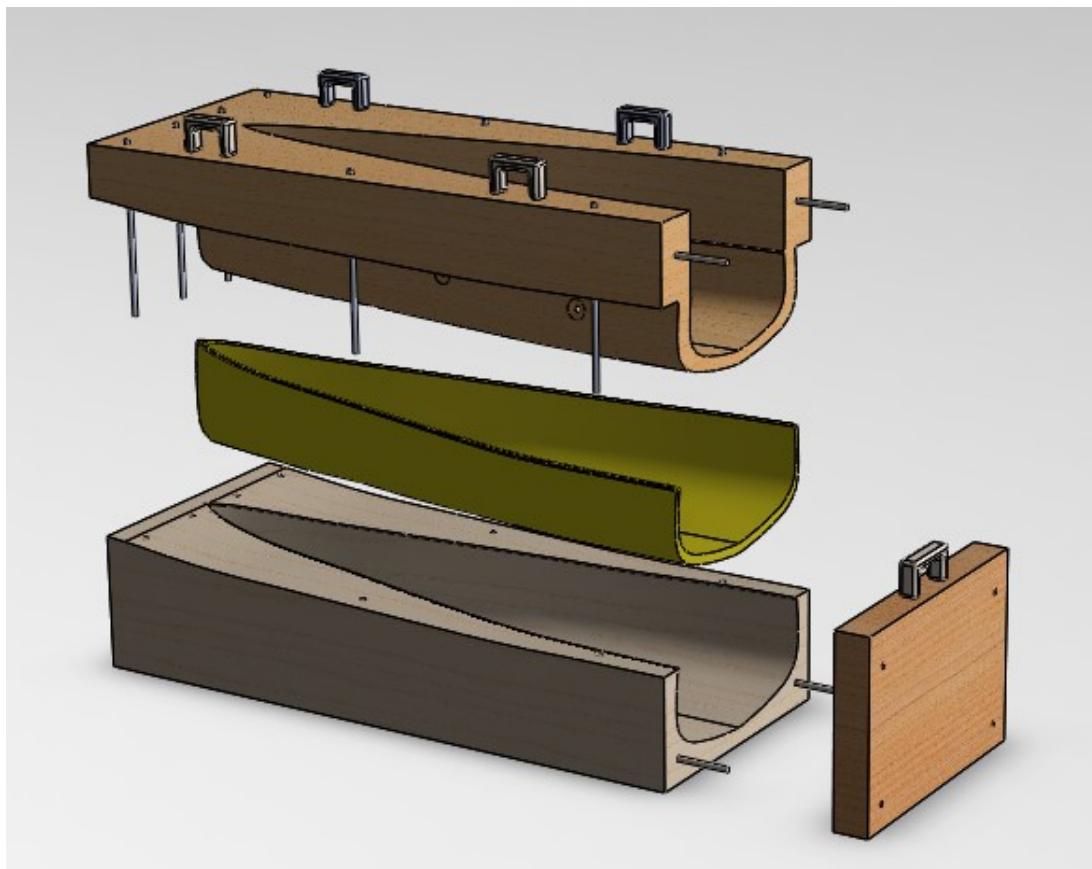


Figura 40: Moldes para la inyección del poliuretano. Diseño propio.

El material del molde no es exigente y estará estar formado por un bloque de madera de pino tallado. Este molde es recubierto por una capa de barniz para ser impermeable. Antes de inyectar la espuma será lubricado para retirar correctamente el núcleo de espuma.

Se realiza el proceso dos veces. Las dos preformas obtenidas han de ser trabajadas manualmente para eliminar restos. Posteriormente dos partes se unen con adhesivo epoxi para formar el casco.

APLICACIÓN DE CAPAS DE COMPOSITE.

Se aplican dos capas de fibra de kevlar /epoxi de 0.2mm de espesor cada una. El proceso es realizado manualmente. La siguiente imagen muestra a un artesano aplicando una capa de resina sobre la fibra de kevlar en una canoa de madera tipo WoodStrip.

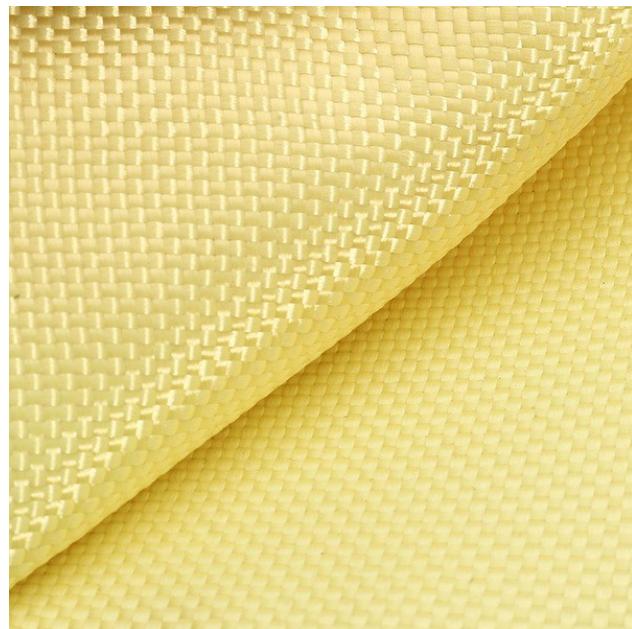


Figura 41: Fibra de aramida (kevlar).



Figura 42: Aplicación de fibra de kevlar y resina epoxi sobre una canoa, Fuente (21).

Tras la aplicación de las capas de fibra y resina, capa debe reposar durante 24 horas.

CORTE Y OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS.

Posteriormente se corta con una radial la canoa por los planos +650 y -650 mm respecto al punto medio. Obteniendo las tres partes que forman el modelo desmontable.

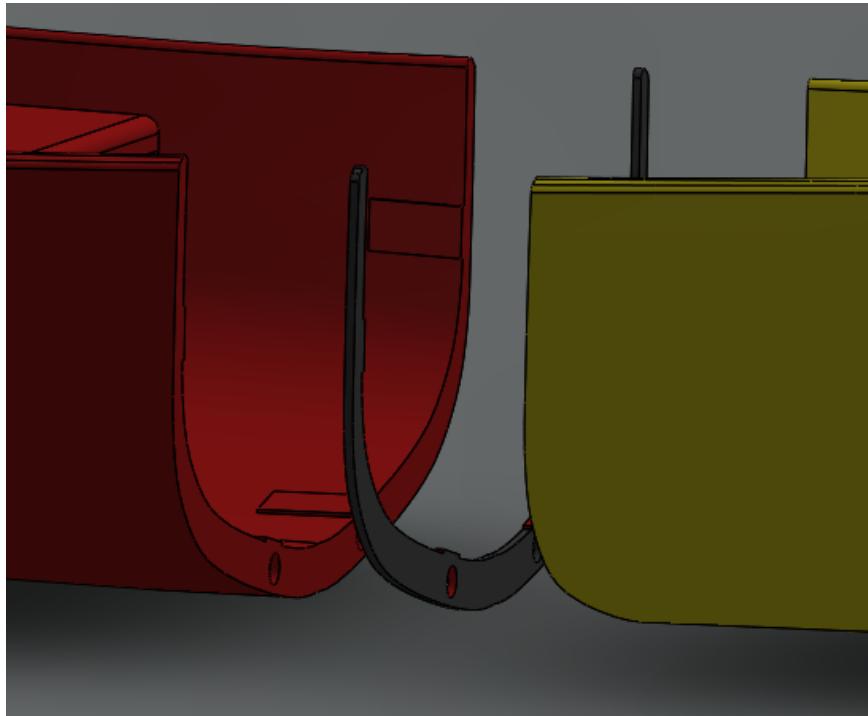


Figura 43: Vista de la unión entre módulos. Fuente: Propia.

Se ensamblan los amarres mediante adhesivo epoxi y se atornillan en las posiciones marcadas en el diseño (Anexo __, planos).

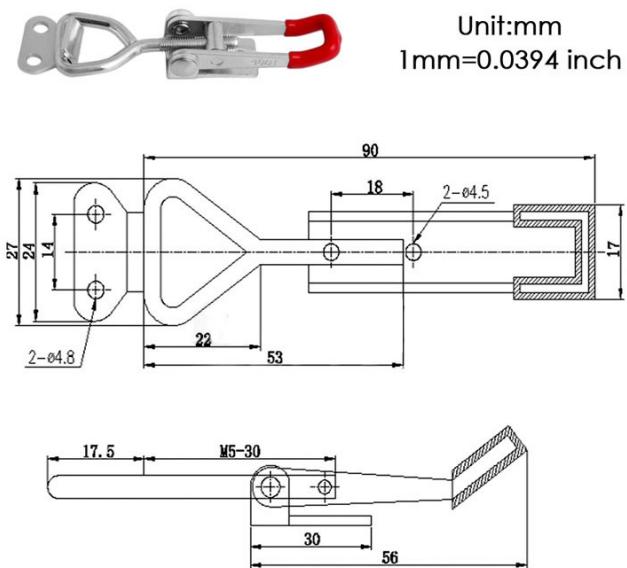


Figura 44: Cierres para el ensamblaje de los módulos. Fuente: (22)

ENSAMBLAJE DE LA CANOA.

Una vez tenemos los módulos preparados se taladran los agujeros para las barras de refuerzo (Ver planos). Por otro lado se recorta el espacio donde irá encajado el banco o los dos bancos, según el diseño que se desee realizar (individual o doble).

Se pegan las juntas de goma en las uniones necesarias mediante adhesivo de silicona. Para asegurar la estanqueidad de la canoa será necesario regular la el ajuste del cerrojo. Las barras de refuerzo son insertadas y los cierres amarrados mediante adhesivo atornillados. Se colocan los módulos en posición y se cierran los cerrojos. Finalmente se colocan los bancos en los soportes. El modelo admite otro tipo de bancos como los sujetos en los bordes laterales.

Se realiza una prueba de estanqueidad en una piscina y se procede a los acabados decorativos. En caso de que existieran infiltraciones se reajustarán los cierres para conseguir una presión adecuada en la junta.

ESTIMACIÓN DE COSTES.

Se realizó una estimación de los precios de los materiales y su utilización para obtener los costes variables de la producción de una canoa.

Cada capa de fibra-epoxi precisará 1.5 metros de ancho por 4 metros de largo. Contando con las dos capas exteriores y las dos interiores son 16 metros de tela de 1.5 metros de ancho y 0.2mm de espesor.

La resina empleada se aproxima a 1 kg/m^2 para un espesor de 1mm (23), el área total de la superficie del casco, obtenida del modelo en SolidWorks es de 6.04 m^2 . Teniendo en cuenta que el espesor total será de 0.5mm al aplicar dos capas y considerando un exceso de material empleado, un aproximación de 3 a 4 kg por barca podría considerarse razonable. Aunque estas medidas están sujetas a ensayo de laboratorio.

Espuma 79 litros alta densidad 300kg/m³ (PUR HD-3) (14) obtenidos del cálculo de sólidos de SolidWorks.

En la Tabla 5 se recogen datos de precio unitario, material empleado y coste del material empleado.

	Fibra de kevlar	Resina epoxi	Barras de acero inoxidable	Amarres de acero	Espuma de poliuretano de alta densidad	Juntas de caucho	Horas de trabajo	Amortización de moldes
Precio unitario	16 €/m ² (24)	8€ / kg (23)	2 € / m (25)	2.5 € / cierre (22)	2 € / kg	3 € / junta.	25€ / hora.	2500 € por molde.
Material empleado	16 m	4 kg	4 barras de 300mm	8 cierres	21 kg	2 juntas.	6 horas.	100 canoas por molde.
Coste	256 €	32 €	2.4 €	20	42	6€	150€	25€

Tabla 5: Estimación de costes variables de una canoa. Fuente: Propia.

El peso aproximado de una canoa acabada será de 32 kg. Pudiendo variar según la elección de materiales. Diseños posteriores permitirán reducir esta cifra. El coste de la unidad asciende a 533,4 €.

9. LIMITACIONES Y POSIBLE IMPLEMENTACIÓN.

En este capítulo se exponen algunas de las limitaciones que se han encontrado en el presente diseño y posibles formas de resolverlas. Es un primer diseño y ha de ser tratado como tal. La idea debe ser analizada y juzgada y en caso de que no sea una idea con proyección a futuro, no será implementada. En la siguiente tabla se analizan una serie de limitaciones.

LIMITACIÓN	EFFECTO EN EL PRODUCTO	POSIBLE SOLUCIÓN
Tamaño reducido y baja capacidad.	Debido a su necesidad de ser transportable y compacta, las dimensiones no permiten más de dos personas.	Aumento de las dimensiones del modelo. Limitando la forma de transporte de éste.
Falta de un sistema de propulsión.	La canoa solo se puede usar con remos	Implementación de propulsión con motor o sistema de aletas de pingüino(2).
Asientos sin respaldo.	La canoa no es idónea para la práctica de remo constante.	Diseño de asientos ergonómicos para la canoa.
Falta de quilla y timón.	Inestabilidad ante corrientes laterales.	Implementación de un timón y quilla para estabilizar.
Precio excesivo.	Por el precio de la canoa en espuma-fibra es fácil conseguir en el mercado una canoa no desmontable con mayores prestaciones.	Uso de materiales que reduzcan el precio de la canoa (madera y fibra de vidrio). El objetivo es que además de cómoda y transportable, sea asequible.
Possible separación en la junta	Ante impactos o excesiva carga se puede producir entrada de agua en algún punto de las juntas. Se pierde la estanqueidad.	Uso de más cerrojos o distintos para asegurar la presión de cierre en la junta. Diseño de un perfil de la junta que disminuya este riesgo.
Falta de soportes de cañas de pescar o de los remos.	No permite la práctica de la pesca y piragismo.	Diseño de portacañas y chumacera adaptado a la forma de la canoa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Real Academia Española [Internet]. [cited 2020 Jun 21]. Available from: <https://www.rae.es/>
2. Acosta MT. Diseño del casco de embarcación ligera tipo canoa-kayak para uso deportivo y recreativo. [España]: Universidad Politecnica de Valencia; 2017.
3. Ramírez R, Orozco L, Venegas C, Camarena A. ANÁLISIS MODAL DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO SÁNDWICH CON MEF. 2011.
4. The Oxford English Dictionary | Oxford Languages [Internet]. [cited 2020 Jun 21]. Available from: <https://languages.oup.com/research/oxford-english-dictionary/>
5. Finite Element Procedures Second Edition Bathe Finite Element Procedures Klaus-Jürgen Bathe Second Edition. 2006. 1–2 p.
6. Ullman D. The mechanical design process [Internet]. 1992 [cited 2020 Jun 22]. Available from: http://www.academia.edu/download/36821548/The_Mechanical_Design_Process.pdf
7. Abdú Salame H. La planeación y el desarrollo de productos [Internet]. Bogotá, Colombia. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia; 2013 [cited 2020 Jun 15]. 40–41 p. Available from: <http://biblio.uptc.edu.co:2060/a/39192/la-planeacion-y-el-desarrollo-de-productos>
8. Miranda FM. La navegación primitiva y las canoas monoxilas. Rev Mus La Plata, 33. 1932;65–65.
9. Jung KSJK II. Foldable Canoe. Vol. 2, UNITED STATES PATENT. 2017. p. 2.
10. Sud S, Arcouette L. Sectional Canoe. UNITED STATES PATENT. 1975.
11. Coll DPP. Barca Desmontable Perfeccionada. REGISTRO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL. SPAIN; 284449, 1985. p. 6.
12. Moores T, Simonds M. Canoecraft : an illustrated guide to fine woodstrip construction. Firefly Books; 2000.
13. Parga Landa B, Hernández F. Materiales compuestos para embarcaciones deportivas. Dyna. 1999;74(6):28–40.
14. Poliuretanos. Alta densidad [Internet]. [cited 2020 Jun 24]. Available from: <http://www.poliuretanos.com/productos/especialidades/alta-densidad.html>
15. Patel PSD, Shepherd DET, Hukins DWL. Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone. BMC Musculoskelet Disord. 2008;9:3,4.

16. Groover MP. Fundamentals of Modern Manufacturing Material, Processes, and System. Fifth Edition. 2012. 199–200 p.
17. Ortíz Berrocal L. Elasticidad. Madrid: McGraw-Hill; 1998. 122 p.
18. Syst D. Criterio de error Tsai-Wu. 2020. p. 1–2.
19. William E. Masters. Thermoplastic mold for rotational molding. 1990. p. 8–10.
20. Origen y obtención del poliuretano | IPUR [Internet]. [cited 2020 Jun 15]. Available from: <https://aislaconpoliuretano.com/origen-obtencion-poliuretano.htm>
21. How to refinish a Kevlar canoe [Internet]. [cited 2020 Jun 16]. Available from: http://www.killarneyoutfitters.com/refinish_kevlar_canoes.php
22. YOTINO. Cierre de metal GH-4001 bloqueo de palanca de 4 piezas bloqueo de tensión abrazadera de palanca pequeña ajustable capacidad de retención Botón de cierre Cierre de palanca [Internet]. Amazon.es: Bricolaje y herramientas. [cited 2020 Jun 16]. Available from: <https://www.amazon.es/YOTINO-abrazadera-ajustable-capacidad-retencion/dp/B07V55F6NK>
23. Resina epoxi transparente para manualidades [Internet]. [cited 2020 Jun 17]. Available from: https://www.nazza.es/resinas/117-resina-epoxi-oclusiones-encapsulaciones-nazza.html?bt_product_attribute=353&gclid=CjwKCAjw_qb3BRAVEiwAvwq6VmK8pzK4LlpE7pHuHdS4wP7Bg0_YgZf3HgAGhf65TFWm9uIS42xtJRoCsdoQAvD_BwE#/20-formato-5_kg
24. Tejido de fibra de Kevlar 3K Biaxial peso 320g/m² ancho 1200 mm. [Internet]. [cited 2020 Jun 17]. Available from: <https://www.clipcarbono.com/es/comprar-telas-y-refuerzos-para-resinas-composite/59-tejido-de-fibra-de-kevlar-3k-biaxial-peso-320gm2-ancho-1200-mm.html>
25. Tubo redondo 18x2 mm. [Internet]. [cited 2020 Jun 17]. Available from: <https://www.incafe2000.com/Esp/p/Tubo-redondo-18x2-mm>

ANEXOS.

ANEXO 1: PATENTES DE CANOAS DE FACIL TRANSPORTE.

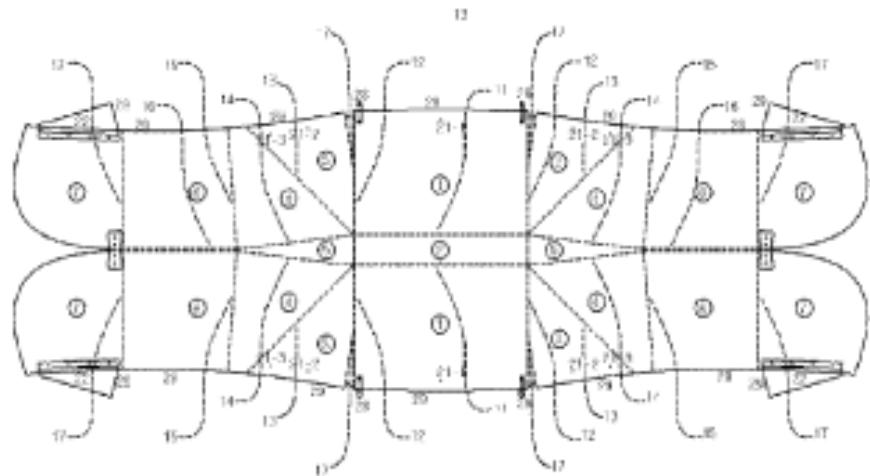
U.S. Patent

Nov. 14, 2017

Sheet 1 of 24

US 9,815,523 B2

[Fig. 1]



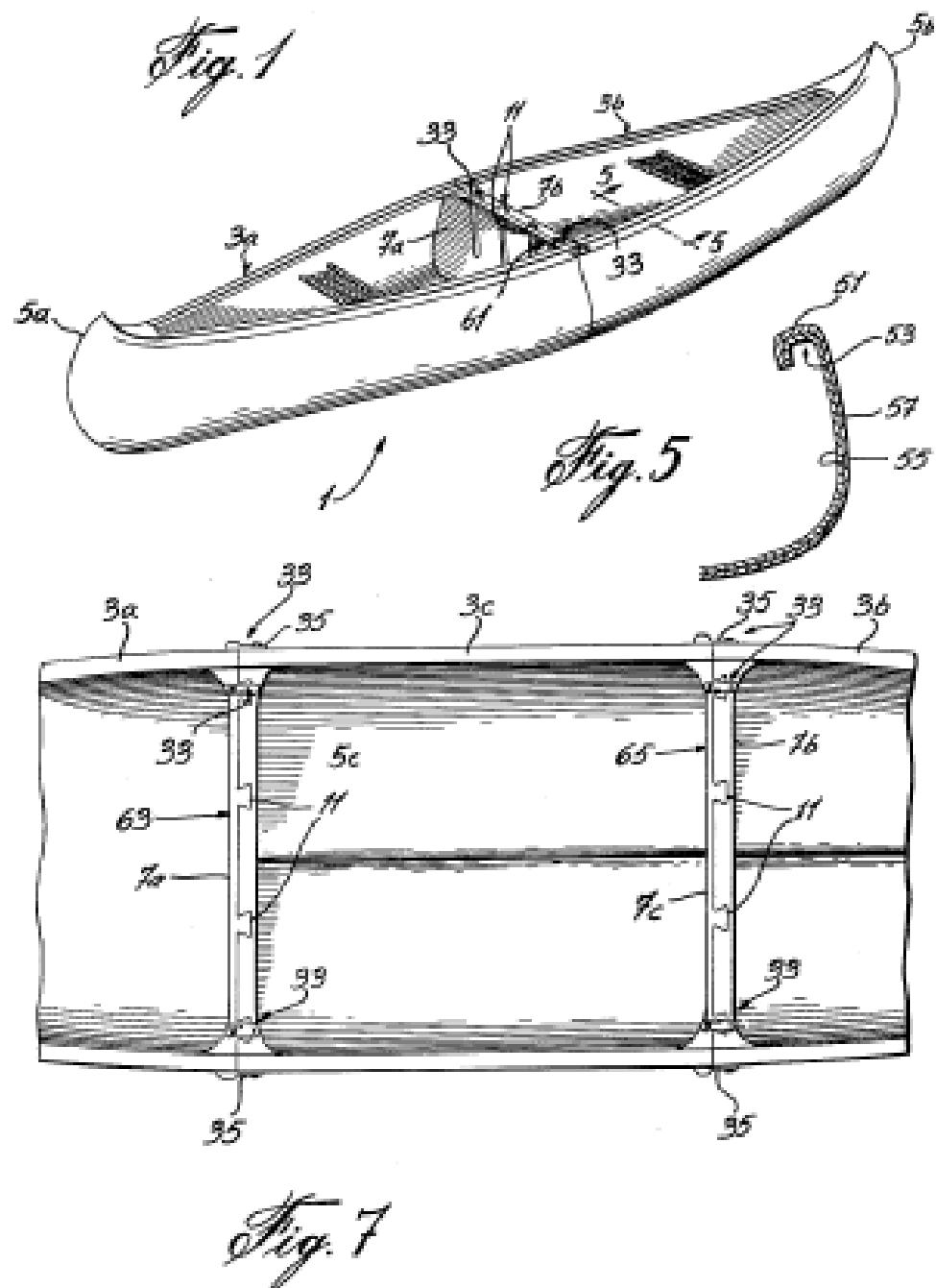


Figura 46: Diseño de St-antoine Sud y Leonard Arcouette

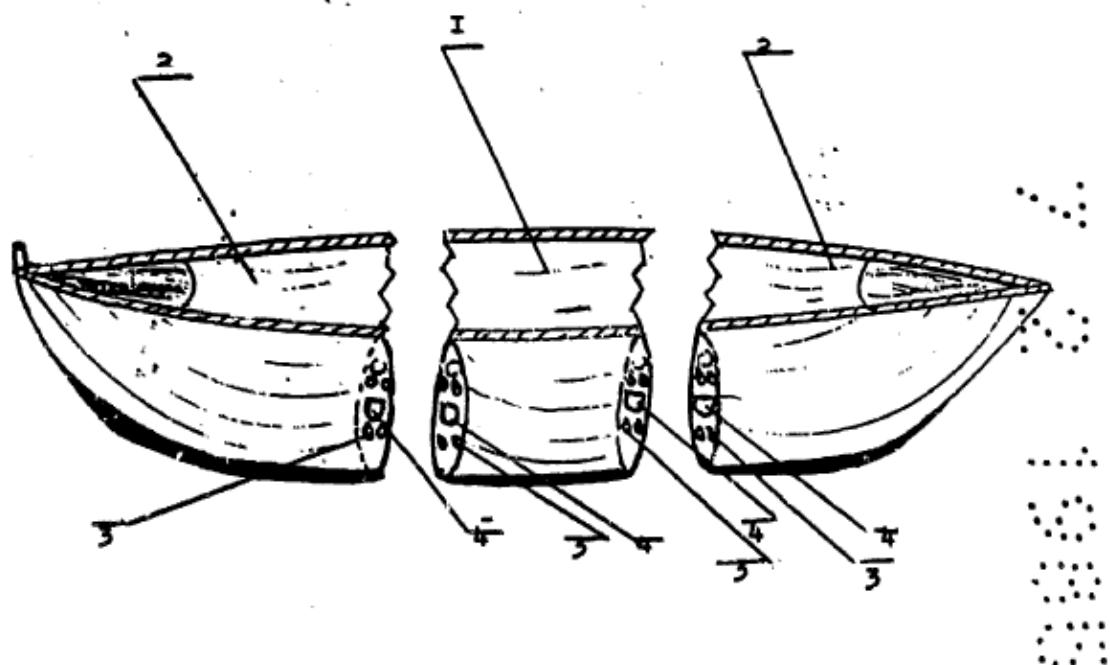


Figura 47: Diseño de Pablo Prohens Coll

ANEXO 2: DISEÑO DE CANOA TIPO WOODSTRIP.

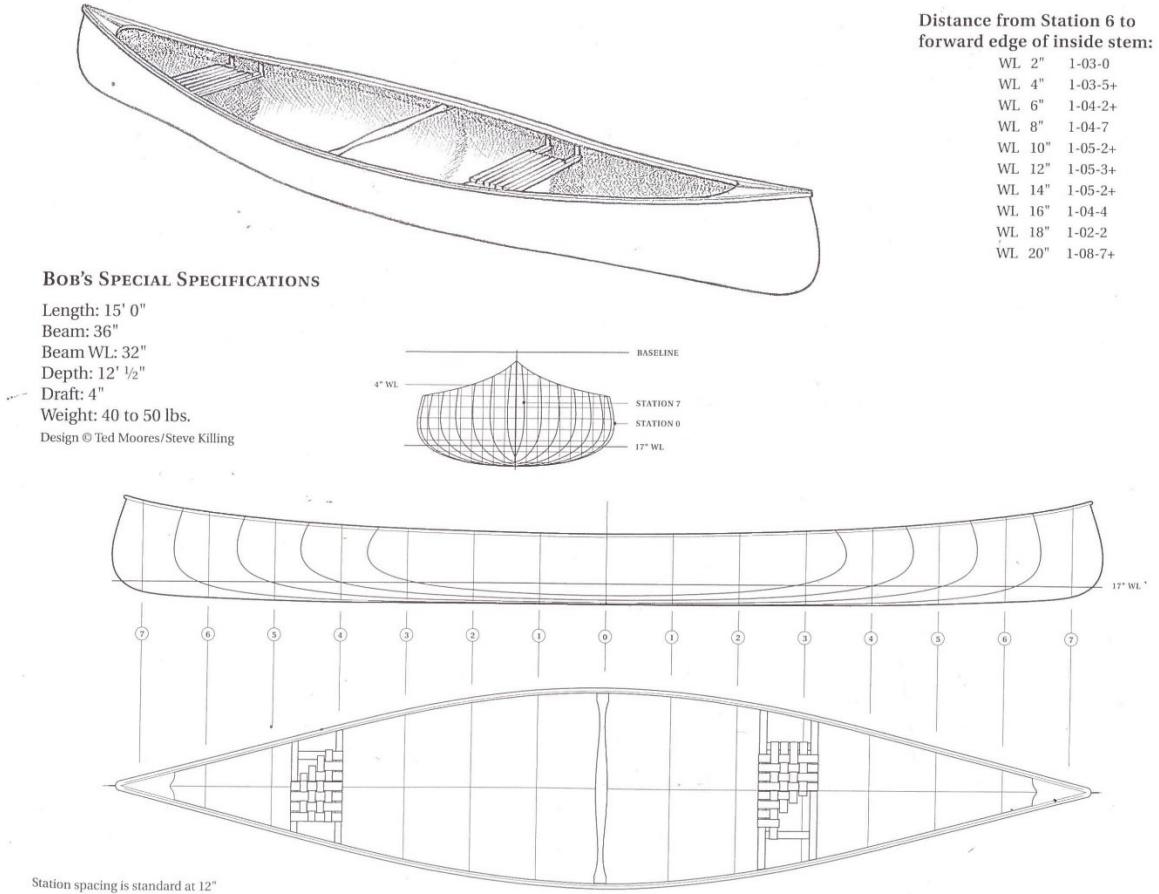


Figura 48: Diseño tipo WoodStrip de Ted Moores.

ANEXO 3: CRITERIO DE FALLO PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Criterio de error Tsai-Wu (1)

El criterio Tsai-Wu sirve para determinar el factor de seguridad de los materiales lamina (plano de espesor) ortotrópicos compuestos (fibra y matriz).

Este criterio tiene en cuenta la energía de deformación total (la energía distorsión y la energía de dilatación) para predecir errores. Es más general que el criterio de error Tsai-Hill porque distingue entre las fuerzas de error de compresión y tracción.

Para un estado 2D de tensión del plano ($\sigma_3 = 0$, $\tau_{13} = 0$, $\tau_{23} = 0$), el criterio de error Tsai-Wu se expresa como:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_6\tau_{12} + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$

Los coeficientes F_{ij} del criterio de error Tsai-Wu ortotrópico se relacionan con los parámetros de resistencia del material de la lámina y son determinados por experimentos. Se calculan a partir de estas fórmulas:

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \right), F_2 = \left(\frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \right), F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T * X_1^C} * \frac{1}{X_2^T * X_2^C}},$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C}, F_{22} = \frac{1}{X_2^T X_2^C}, F_6 = \frac{1}{X_{12}^T - X_{12}^C}, F_{66} = \frac{1}{X_{12}^T * X_{12}^C}$$

X_1^T límite de tensión material del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

X_1^C límite de compresión material del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

X_2^T límite de tensión material del laminado transversal a la dirección de la fibra

X_2^C límite de compresión material del laminado transversal a la dirección de la fibra

X_{12}^T límite cortante positivo del laminado

X^C_{12} límite cortante negativo de laminado (el solver lo considera igual al límite de cortante positivo)

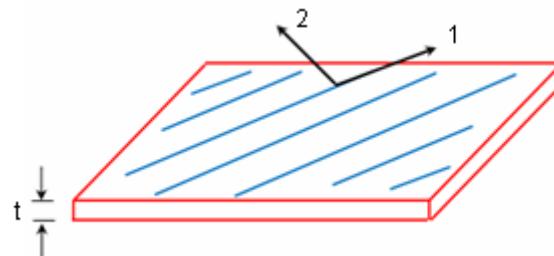
El estado de las tensiones de la lámina calculado por el programa se describe por los componentes: σ_1 , σ_2 y τ_{12}

σ_1 tensión del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

σ_2 tensión de laminado transversal a la dirección de la fibra

τ_{12} tensión de cortadura del laminado

Direcciones de materiales de pliegues compuestos



La dirección 1 hace referencia a la dirección de orientación de la fibra del pliegue.

La dirección 2 hace referencia a la dirección transversal de fibra del plano del pliegue.

Factor de seguridad

El programa comunica el factor de seguridad (FOS), que es el coeficiente por el cual todos los componentes de la tensión del laminado deberían ser multiplicados para alcanzar el error de laminado de acuerdo con el criterio Tsai-Wu arriba establecido. El FOS para el error de laminado se calcula a partir de:

$$FOS = \frac{-C_1 + R}{2C_2}, \text{ en donde los coeficientes vienen dados por:}$$

$$C_1 = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12}, \quad C_2 = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2, \quad R = \sqrt{|C_1^2 + 4C_2|}$$

Un factor de seguridad mayor que 1,0 indica que el laminado está a salvo de errores.

El criterio de error Tsai-Wu no puede predecir distintos modos de error, incluido el error de fibra, el error de matriz y el error de conexión fibra-matriz.