



Universidad
Politécnica
de Cartagena



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA**
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL,
MEDIANTE EL M.E.F.
DEL R-BOAT PIRATE**

Titulación: *Ingeniero Naval y Oceánico*

Alumna: *Sandra Boo Tarazona*

Director: *Dr. Pascual Martí Montrull*

Cartagena, Septiembre de 2017

Dedicatoria

A mis hermanos.

Agradecimientos

A mis padres, por vosotros me he convertido en lo que soy hoy. Gracias por haberme apoyado siempre sin dudar a través de este pedregoso camino.

A esos amigos incondicionales. Gracias por haberos convertido en familia.

A Miguel, para ti no tengo suficientes palabras para describirlo. Siempre estaré agradecida de que te hayas cruzado en mi camino.

Resumen

Boo Tarazona, Sandra. *ANÁLISIS ESTRUCTURAL GLOBAL, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, DEL R-BOAT PIRATE*. Proyecto final de Carrera, Ingeniería Naval y Oceánica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 29/09/2017

En este trabajo final de carrera se recoge un estudio del comportamiento de la estructura de un barco de madera, R-Boat Pirate, bajo diferentes modelos de carga, mediante el método de elementos finitos.

Se trata de una aplicación práctica a un nivel no muy común, como lo es un velero de madera, de las técnicas de análisis estructural actuales mediante ANSYS.

Para ello, este proyecto se sumerge en una investigación del estado del arte de la madera, y en el entendimiento de la aplicación de las fuerzas externas e internas a las que está sometido un velero.

Durante décadas la construcción de embarcaciones de vela y su cálculo estructural se ha regido por reglas e hipótesis basadas en la experiencia. Hoy en día, gracias a las nuevas herramientas y conocimientos de lo que se disponen, es posible precisar en mayor medida los esfuerzos a los que será sometida la estructura.

Palabras clave: M.E.F.; Elementos finitos; Velero; Barco de madera; Modelización; RhinoCeros; Quilla; Proyecto final de carrera; UPCT; ANSYS; Material; Ingeniería Naval; Arquitectura Naval; Estructuras.

Abstract

Boo Tarazona, Sandra. *GLOBAL STRUCTURAL ANALYSIS, USING THE FINITE ELEMENTS METHOD OF R-BOAT PIRATE*. Dissertation, Naval and Oceanic Engineering, High Technique School of Naval and Oceanic Engineering, Polytechnic University of Cartagena, Cartagena, 29/09/2017

This dissertation summarizes a study of the structural behavior of a wooden boat, R-Boat Pirate, under different loading models, is carried out using the finite element method.

It is a practical application to a not very common level, as it is a wooden sailboat, of the techniques of structural analysis current through ANSYS.

For make it possible, this project is diving into an investigation of the state of the art of wood, besides the understanding of the application of external and internal forces to which a sailboat is subjected.

During decades, the construction of sailboats and their structural calculation has been governed by rules and hypotheses based on experience. Nowadays, thanks to new tools and knowledge what is available, it is possible to further define the efforts to which the structure will be subjected.

Keywords: F.E.M.; Finite Elements Method; Sailboat; Wooden Boat; Modeling, RhinoCeros, Keel; Dissertation; UPCT; ANSYS; Materials; Naval Engineering; Naval Architecture; Structures.

Lista de imágenes

<i>Ilustración 1. Pirate 1930.....</i>	<i>2-19</i>
<i>Ilustración 2. Pirate navegando (Seattle)</i>	<i>2-20</i>
<i>Ilustración 3. Comparacion modos de vibración entre tapas de guitarra acústica entre cipres y abeto</i>	<i>2-23</i>
<i>Ilustración 4. Idealización de las características de los anillos de los especímenes.....</i>	<i>2-25</i>
<i>Ilustración 5. Comparación de las gráficas Carga-Desplazamiento determinadas numéricamente y experimentalmente</i>	<i>2-26</i>
<i>Ilustración 6. Incorporación de la madera en contacto con el clavo, al bloque de unión.</i>	<i>2-27</i>
<i>Ilustración 7. Compresión paralela al grano y compresión perpendicular al grano</i>	<i>2-28</i>
<i>Ilustración 8. Compresión perpendicular al grano por simulación en 3D de Elementos Finitos</i>	<i>2-28</i>
<i>Ilustración 9. Curva Carga-Incrustación a 45º respecto a la fibra.</i>	<i>2-29</i>
<i>Ilustración 10. Situaciones de Quebranto y Arrufo.</i>	<i>2-30</i>
<i>Ilustración 11. Sección transversal del mástil.....</i>	<i>2-31</i>
<i>Ilustración 12. Presión hidrostática</i>	<i>2-32</i>
<i>Ilustración 13. Sumario de cargas vistas desde barlovento.....</i>	<i>2-33</i>
<i>Ilustración 14. Secciones de Trazado, Caja de Cuadernas</i>	<i>3-38</i>
<i>Ilustración 15. Ilustración: Líneas de Agua.</i>	<i>3-38</i>
<i>Ilustración 16. Líneas de Agua.....</i>	<i>3-38</i>
<i>Ilustración 17. Plano de formas</i>	<i>3-39</i>
<i>Ilustración 18. Poli-líneas definidas desde el plano de formas.</i>	<i>3-40</i>
<i>Ilustración 19. Primera superficie generada.....</i>	<i>3-41</i>
<i>Ilustración 20. Alisado de la segunda derivada de la curva.....</i>	<i>3-42</i>
<i>Ilustración 21. Superficie abollada del casco</i>	<i>3-43</i>
<i>Ilustración 22. Planos cortantes</i>	<i>3-43</i>
<i>Ilustración 23. Separación del casco resistente y quilla.....</i>	<i>3-44</i>
<i>Ilustración 24. Casco alisado.</i>	<i>3-45</i>

<i>Ilustración 25. Plano estructural del R-Boat Pirate.....</i>	<i>3-46</i>
<i>Ilustración 26. Zona de quilla y popa abollada.....</i>	<i>3-47</i>
<i>Ilustración 27. Quilla y Timón.....</i>	<i>3-48</i>
<i>Ilustración 28. Quilla extrusionada.....</i>	<i>3-48</i>
<i>Ilustración 29. Diferentes elementos que conforman la quilla.....</i>	<i>3-49</i>
<i>Ilustración 30. Cubierta principal.....</i>	<i>3-50</i>
<i>Ilustración 31. Cubierta de la superestructura y la bañera.....</i>	<i>3-51</i>
<i>Ilustración 32. Superestructura y bañera.....</i>	<i>3-51</i>
<i>Ilustración 33. Cuadernas simples y dobles.....</i>	<i>3-52</i>
<i>Ilustración 34. Baos.....</i>	<i>3-53</i>
<i>Ilustración 35. Varengas.....</i>	<i>3-54</i>
<i>Ilustración 36. Anillo estructural.....</i>	<i>3-55</i>
<i>Ilustración 37. Estructura del mástil.....</i>	<i>3-56</i>
<i>Ilustración 38. Modelo R-Boat Pirate.....</i>	<i>3-57</i>
<i>Ilustración 39. Orientación de las fibras de la madera.....</i>	<i>4-61</i>
<i>Ilustración 40. Corte de las maderas.....</i>	<i>4-61</i>
<i>Ilustración 41. Distorsión en las maderas.....</i>	<i>4-62</i>
<i>Ilustración 42. Coeficientes de Poisson madera 12% de humedad.....</i>	<i>4-64</i>
<i>Ilustración 43. Tabla propiedades mecánicas maderas.....</i>	<i>4-65</i>
<i>Ilustración 44. Tabla propiedades mecánicas maderas.....</i>	<i>4-66</i>
<i>Ilustración 45. Tabla propiedades mecánicas maderas.....</i>	<i>4-67</i>
<i>Ilustración 46. Tabla propiedades mecánicas maderas.....</i>	<i>4-68</i>
<i>Ilustración 47. Madera teca.....</i>	<i>4-71</i>
<i>Ilustración 48. Madera Roble blanco.....</i>	<i>4-71</i>
<i>Ilustración 49. Madera Cedro rojo.....</i>	<i>4-72</i>
<i>Ilustración 50. Madera abeto Sitka.....</i>	<i>4-72</i>
<i>Ilustración 51. Conjunto de la quilla.....</i>	<i>4-73</i>
<i>Ilustración 52. Timón.....</i>	<i>4-73</i>
<i>Ilustración 53. Casco.....</i>	<i>4-74</i>
<i>Ilustración 54. Conjunto de quillote.....</i>	<i>4-75</i>
<i>Ilustración 55. Huellas en varengas.....</i>	<i>4-75</i>
<i>Ilustración 56. Cuadernas simples.....</i>	<i>4-76</i>
<i>Ilustración 57. Cuadernas dobles.....</i>	<i>4-76</i>
<i>Ilustración 58. Huellas en cuadernas de proa.....</i>	<i>4-77</i>
<i>Ilustración 59. Plancha base del mástil.....</i>	<i>4-78</i>
<i>Ilustración 60. Base del mástil.....</i>	<i>4-78</i>
<i>Ilustración 61. Baos.....</i>	<i>4-79</i>
<i>Ilustración 62. Brazolas y baos.....</i>	<i>4-79</i>

<i>Ilustración 63. Cubiertas</i>	4-80
<i>Ilustración 64. Refuerzos</i>	4-80
<i>Ilustración 65. Refuerzos</i>	4-81
<i>Ilustración 66. Estructura de la embarcación</i>	4-81
<i>Ilustración 67. Características elementos madera de Sitka</i>	4-82
<i>Ilustración 68. Características elementos madera de Teca de la quilla</i>	4-83
<i>Ilustración 69. Características elementos madera de Douglas de la quilla</i>	4-83
<i>Ilustración 70. Características elementos madera de cedro rojo</i>	4-85
<i>Ilustración 71. Características elementos madera de Teca de la cubierta</i>	4-85
<i>Ilustración 72. Contactos 1</i>	4-86
<i>Ilustración 73. Contactos 2</i>	4-86
<i>Ilustración 74. Sistema de coordenadas locales y global</i>	4-87
<i>Ilustración 75. Conjunto de sistema de coordenadas locales empleados</i>	4-87
<i>Ilustración 76. Tamaño de malla</i>	4-88
<i>Ilustración 77. Mallado elementos sólidos</i>	4-88
<i>Ilustración 78. Malla elementos estructurales</i>	4-89
<i>Ilustración 79. Malla casco</i>	4-89
<i>Ilustración 80. Mallado de cubierta y escotillas</i>	4-90
<i>Ilustración 81. Mallado de la embarcación</i>	4-90
<i>Ilustración 82. Mallado de la estructura interior</i>	4-91
<i>Ilustración 83. Situación de las condiciones de contorno</i>	4-92
<i>Ilustración 84. Condición de contorno proa</i>	4-93
<i>Ilustración 85. Condición de contorno popa</i>	4-93
<i>Ilustración 86. Geometría de la ola troncooidal</i>	4-94
<i>Ilustración 87. Geometría del casco con forma de la ola troncooidal</i>	4-94
<i>Ilustración 88. Carga presión hidrostática mar en calma</i>	4-95
<i>Ilustración 89. Carga presión hidrostática mar en calma</i>	4-95
<i>Ilustración 90. Deformación global con la mar en calma</i>	4-96
<i>Ilustración 91. Tensiones principales en la mar en calma</i>	4-97
<i>Ilustración 92. Tensiones principales en la quilla debido al mástil con la mar en calma</i>	4-98
<i>Ilustración 93. Tensiones principales en la quilla- anillos estructurales</i>	4-98
<i>Ilustración 94. Reacciones en proa</i>	4-99
<i>Ilustración 95. Reacciones en popa</i>	4-100
<i>Ilustración 96. Deformación global sobre la ola</i>	4-101
<i>Ilustración 97. Tensiones principales de la embarcación sobre la ola</i>	4-101
<i>Ilustración 98. Tensiones principales en la sección del mástil, embarcación sobre ola</i>	4-102
<i>Ilustración 99. Tensiones principales a popa de la quilla, embarcación sobre ola</i>	4-103

Índice

Dedicatoria	2-3
Agradecimientos	2-5
Resumen	2-7
Abstract	2-9
Lista de imágenes.....	2-11
Indice.....	¡Error! Marcador no definido.
1. Introducción	2-17
1.1. Objetivo	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Fases del proyecto.....	2-17
1.3. Historia del barco	¡Error! Marcador no definido.
2. Revisión Bibliográfica.....	2-21
2.1. Introducción.....	2-21
2.2. Bibliografía	2-21
2.2.1. Madera: Estado del arte.....	2-21
2.2.2. Análisis Estructural de un velero.....	2-29
3. Preparación del modelo para su importación a ANSYS.....	¡Error! Marcador no definido.

3.1.	Introducción.....	3-35
3.2.	Cuerpo estructural del R-Boat Pirate	3-35
3.3.	Modelización de la estructura.	3-37
3.3.1.	Confección del Casco y Quilla.	3-39
3.3.2.	Timón y Quilla.....	3-46
3.3.3.	Cubierta Principal	3-49
3.3.4.	Bañera y superestructura.....	3-50
3.3.5.	Anillo estructural	3-51
3.3.6.	Base del Mástil y Mástil.	3-55
3.3.7.	Modelado del estado de carga: Quebranto	3-57
4.	ANÁLISIS GLOBAL POR ELEMENTOS FINITOS MEDIANTE ANSYS. ¡Error! Marcador no definido.	
4.1	Introducción	4-59
4.2	Definición de los materiales	4-60
4.3	Geometría.....	4-72
4.4.	Espesores.....	4-81
4.5.	Contactos.....	4-85
4.6.	Orientación madera.....	4-86
4.7	Mallado	4-87
4.8.	Cargas y condiciones de contorno	4-91
4.9.	Resultados.....	4-95
5.	RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO. ¡Error! Marcador no definido.	
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	¡Error! Marcador no definido.

1. Introducción

1.1. Objetivo

Este proyecto tiene como objetivo principal el análisis, mediante el programa de elementos finitos ANSYS, de la respuesta estructural global del R- Boat Pirate.

Construido en 1926, y restaurado entre 199 y 2005, Pirate es el mejor ejemplo existente hoy en día de la R- Class. En 1929 la corbeta ganó el campeonato nacional de dicha clase, convirtiéndose en el R- Boat mas rápido construido hasta el momento. Pirate ha sido señalado como el mejor ejemplo de la supervivencia de la clase, que sin duda representa el espíritu y el ingenio de diseño de yates a principios del siglo XX y la construcción en el área de Seattle.

Se realizará una búsqueda intensiva para encontrar la información del R-Boat Pirate que permita su modelado y análisis por elementos finitos, para distintas condiciones de carga. En este caso se centrará en un análisis global del velero, ya que es el punto de partida para el comienzo de un proyecto.

La investigación se focalizará en cómo abordar un análisis por elementos finitos en ANSYS de un material ortotrópico, como lo es la madera.

1.2. Fases del proyecto

En este primer capítulo, se hace una pequeña introducción de las generalidades de este proyecto. Una pequeña descripción del R-Boat Pirate y una puesta en situación del contenido que se aborda en las páginas siguientes.

En el segundo capítulo, Revisión Bibliográfica, se recoge un resumen de toda la información en la que se ha basado para la realización de este proyecto. Consta con el extracto de un informe sobre la construcción y reforma de la estructura del barco, varias y diversas investigaciones, proyectos y tesis, artículos que tratan el problema de

como analizar la madera mediante el método de elementos finitos. También se habla de las condiciones de contorno a las que estará sometido el barco para su correcto análisis en ANSYS.

En el tercer capítulo, Preparación del modelo para su análisis, se recoge el método que se ha seguido para la modelización de una estructura del R-Boat Pirate, simplificada. Se explica paso a paso, como se modelizó cada uno de los principales elementos estructurales, con las correspondientes consideraciones para su posterior importación a ANSYS software.

Una vez realizado el modelo, se explica en un cuarto capítulo, Análisis Global por MEF mediante ANSYS, como abordar el análisis estructural del R-Boat Pirate en un software como ANSYS. Una vez importado el modelo, se centrará en la definición de cada elemento estructural que compone la embarcación y las consideraciones pertinentes a tener en cuenta, así como el mallado de los mismos. Se someterá al barco a dos diferentes situaciones de carga, en aguas tranquilas y en situación de quebranto. Se discutirán los resultados obtenidos en ambos casos.

El penúltimo capítulo, Conclusiones del Proyecto, contiene un pequeño conciso del análisis realizado y de los resultados obtenidos en el mismo.

Por último, se incluye una lista bibliográfica en la cual se ha basado la búsqueda de la información necesaria para la realización del proyecto.

1.3. Historia del R-Boat Pirate

El velero Pirate, actualmente propiedad del Center Wooden Boats (CWB), es probablemente el barco de competición más conocido y mejor documentado en la clase R. Completamente restaurado entre 1999 y 2005, Pirate es el mejor ejemplo existente para la R-class.



Ilustración 1. Pirate 1930

Pirate, fue construido en 1926 por Lake Union Dry Dock, en Seattle. Incorporó las técnicas más avanzadas y talentosas en el diseño y la construcción de yates en el área de Seattle a principios del siglo XX. Este barco es un descendiente directo del Sir Tom, un yate de clase I, diseñado por Ted Geary, el cual ganó la copa Lipton todos los años desde su creación en 1914 hasta 1928.

Después de una carrera prospera como barco de regatas, entre lo que se puede destacar que fue vencedor de la Pacific Coast Star Championship en 1925, Pirate disfrutó de su retiro bajo el cuidado de diferentes propietarios en los más prestigiosos clubs náuticos del sur de California. En la década de 1930, de acuerdo con el Registro de Yates estadounidenses de Lloyd, dos familias muy prominentes de Malibú, las familias Rindge y Adamson, compraron el Pirate en asociación.

En 1999, Scott Rohrer, un navegante titular y condecorado de Seattle, encontró al campeón descansando, inactivo, en un astillero al sur de California, donde el tiempo había hecho mella en él. Rohrer y un grupo de asociados, conocidos como Pitare

Syndicate (el Sindicato Pirata), compraron el velero y lo trasladaron a su lugar de origen, Seattle, donde sería meticulosamente restaurado a condiciones casi originales en el transcurso de los siguientes cinco años.

Siguiendo cuidadosamente las especificaciones del barco y la documentación de la geometría del diseño, Rohrer, junto a tres voluntarios del CWB y un equipo de constructores de barco a tiempo parcial, desmontaron tabla a tabla la obra maestra de Geary. Rohrer y su equipo fueron capaces de conseguir planos originales de 1925 del diseño de Geary y con ello pudieron restaurar el Pirate, dándole condición de campeón que se merecía adornando los muelles del Center Wooden Boats.

Pirate, todavía sigue atrayendo miradas llenas de admiración por su belleza y notable ingeniería en distintas e importantes exposiciones de barcos de madera, como en el Port Townsend Wooden Boat Festival. Pirate se ha definido como el mejor ejemplo superviviente de la clase R; ciertamente encarna el espíritu y el ingenio de principios del siglo 20, yate de diseño y construcción en el área de Seattle.

Hoy en día se puede encontrar navegando en las aguas del Lake Union.



Ilustración 2. Pirate navegando (Seattle)

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción

Se recopilan los resultados de una búsqueda intensiva de los artículos e investigaciones más actuales que tienen como objeto el estudio de la madera mediante el método de elementos finitos.

También se analizarán los esfuerzos que son ejercidos sobre un velero. Se trata de una recopilación de las consideraciones a tener en cuenta para la aplicación de las cargas en un análisis estructural.

Este capítulo tiene la finalidad de comprender el procedimiento necesario al que se deberá someter R-Boat Pirate para conseguir un correcto análisis mediante ANSYS.

2.2. Bibliografía

2.2.1. Madera: Estado del arte

David E. Kretschmann (1), realizó un estudio sobre las propiedades mecánicas de la madera, que se recogió en un capítulo del libro Wood Handbook, Wood as Engineering Material. Muchas de las propiedades mecánicas de la madera tabuladas en este capítulo se derivaron de amplios procedimientos de muestreo y análisis. Estas propiedades se representaron como las propiedades mecánicas medias de la especie. Algunas propiedades, como la tensión paralela al grano, y todas las propiedades de algunas especies importadas se basan en un número más limitado de especímenes que no fueron sometidos a los mismos procedimientos de muestreo y análisis. La

adecuación de estas últimas propiedades para representar las propiedades medias de una especie es incierto; sin embargo, las propiedades representan la mejor información disponible.

La variabilidad, o variación en las propiedades, es común a todos los materiales. Debido a que la madera es un material natural y el árbol está sujeta a alteraciones constantes (como la humedad, las condiciones del suelo y el espacio de cultivo), las propiedades de la madera varían considerablemente. En este capítulo se proporciona información, cuando es posible, sobre la naturaleza y magnitud de la variabilidad de las propiedades.

También incluye una discusión del efecto de características de crecimiento, tales como nudos y pendiente de grano, sobre propiedades de madera claras. Se discuten los efectos de los entornos de fabricación y de servicio sobre las propiedades mecánicas y se comparan sus efectos sobre la madera clara y el material que contiene características de crecimiento.

Jesús Alejandro Torres (3), realizó un estudio del comportamiento de la tapa armónica de una guitarra clásica mediante ANSYS, donde se pretendía comparar el análisis de los modos de vibración del ciprés en el sonido de la guitarra y sus propiedades mecánicas, con un estudio ya realizado anteriormente del abeto. Se analizó que parámetros tenían más influencia en el valor de las frecuencias y modos normales. Se encontró con que la densidad es un parámetro que altera las frecuencias, aunque esto no cambia las relaciones relativas de frecuencias o los patrones de los modos. El módulo de corte no afecta significativamente los resultados, excepto en el caso de Glr. Mientras, el módulo de Young es uno de los parámetros más influyentes, y el coeficiente de Poisson (0.3 dato general en las maderas) tiene una fuerte influencia en los resultados sobre cualquier rango de variación. En el cálculo, se fijó todo el contorno, de modo que la tapa no pudiera tener movimientos de traslación en ninguna dirección, como si estuviera montada en la caja, pero sin el brazo ensamblado. El elemento que utilizó para mallar el modelo es una estructura sólida en forma tetraédrica con 10 nodos, recomendado para figuras irregulares, y que obviamente soporta un análisis modal. Finalmente, como se puede ver en la *imagen 3* se observó que existe una clara similitud entre los modos de vibración entre ambas maderas, a pesar de que el valor de las frecuencias de vibración varía de un material a otro.

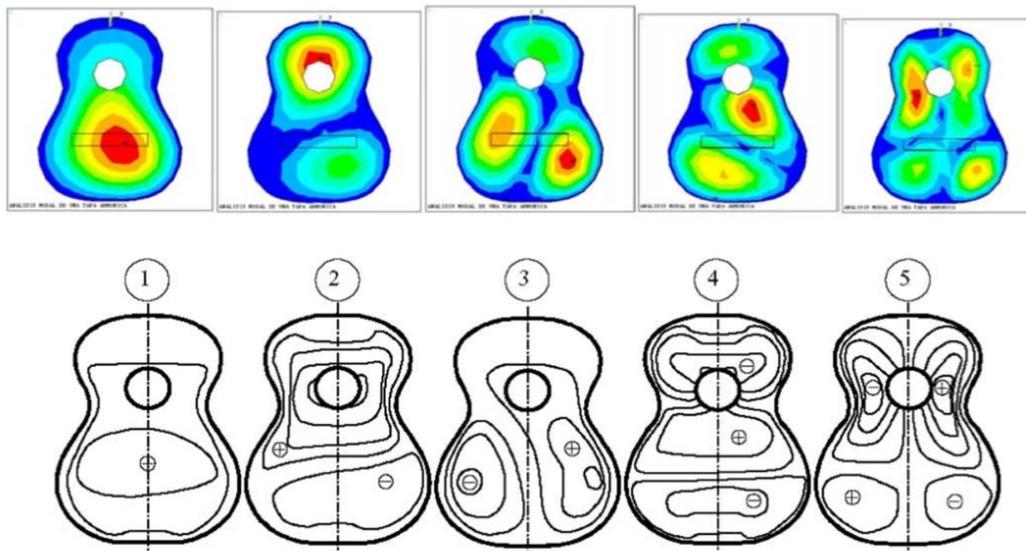


Ilustración 3. Comparación modos de vibración entre tapas de guitarra acústica entre ciprés y abeto

David M. Moses y Helmut G.L. Prion (4), realizaron dos estudios para predecir el comportamiento de la madera y los compuestos de esta, en los cuales utilizaron la plasticidad anisotrópica y el modelo Weibull de falla más débil. El modelo ortotrópico elástico lineal utilizado normalmente para la madera se muestra insuficiente para la predicción de la resistencia final de esta. El comportamiento no lineal, no recuperable en compresión en cada una de las direcciones de material ortogonales, es de particular interés en los casos en que el aplastamiento localizado gobierna el comportamiento de carga-desplazamiento de la madera.

La opción de plasticidad anisotrópica en ANSYS se utilizó para predecir el comportamiento de rendimiento y post-rendimiento para el compuesto de madera utilizado en este estudio, ya que se encontró que las tensiones de rendimiento en direcciones ortogonales se encontraban en la proporción de 1:1, 2:5. Se desarrolló una subrutina Fortran programable por el usuario para que ANSYS realizara el análisis de fallas en cada paso de carga en post-procesamiento. El modelo se verificó mediante dos casos:

l) Prueba de bloqueo por cizalla ASTM D143

Se construyó un modelo tridimensional del bloque de cizalla ASTM D143. Se utilizaron elementos SOLID45 para el bloque de madera y para las superficies rígidas de acero. Se utilizaron elementos CONTAC49 en las interfaces entre los platos de carga de acero y el bloque de madera. Se obtuvieron resultados de desplazamiento de carga

para tres orientaciones de carga y dos tamaños de bloque acordado con los resultados experimentales.

II) Conexiones atornilladas

Se utilizó un modelo tridimensional con una conexión de un solo perno para predecir el comportamiento de carga-desplazamiento y la resistencia final. Se requirió un análisis tridimensional debido a que los resultados experimentales han mostrado que los desplazamientos no uniformes se producen a través del espesor de la madera debido a la flexibilidad del perno, y a la trituración producida cerca de las superficies que lo envuelven. Se utilizaron elementos SOLID45 para el perno y la madera, con una interfaz de contacto de fricción de elementos CONTAC49. El endurecimiento cinemático bilineal se asumió para el comportamiento de rendimiento de pernos. Las curvas de desplazamiento de carga de la conexión se compararon bien con los resultados experimentales.

En 2015 Jan Pěňčík, en su tesis doctoral (5), describió el comportamiento de elementos y estructuras de madera por el método de elementos finitos, utilizando el modelo de material ortotrópico, en combinación con criterios no interactivos (criterio de estrés máximo) o de fallo interactivo (criterio de Hoffman y Tsai-Wu). El modelo general de material presentado se utilizó en combinación con la idealización de anillos anulares por superficie cilíndrica para el modelado de muestras de madera, en concreto de pino silvestre (*Pinussylvestris*). Los resultados obtenidos mostraron un buen acuerdo entre los resultados del análisis numérico y del ensayo experimental de muestras de madera. El uso del modelo de material anisotrópico también se puede ver en los casos en que el nivel de la carga aplicada es mayor que el nivel en que se produce el fallo del material de madera.

El modelo de material de plasticidad anisotrópico definido por 9 constantes elásticas y 18 constantes materiales es descrito por Moses y Prion (2004) como un modelo de material general, que permitió definir diferentes comportamientos elasto-plásticos bilineales con posible endurecimiento del material en tres direcciones perpendiculares, incluyendo la definición de comportamiento, diferente en estas direcciones, en tensión, compresión y cizallamiento.

El modelo numérico para las pruebas experimentales se idealizó como superficies cilíndricas de especímenes individuales, que definían los anillos anuales y el comportamiento de la madera. Las constantes de material se ajustaron para satisfacer las condiciones de incompresibilidad y plasticidad. El modelo se complementó con un criterio de fallo no interactivo, criterio de esfuerzo máximo (Vinson y Sierakowski,

2002), para permitir la descripción del fallo de la madera por falla frágil en tensión. Ni el endurecimiento del material, ni la limitación relativa a la reserva de plasticidad se consideraron para la compresión.

El modelado de las características de los anillos anuales se basó en una de las dos vistas frontales de los especímenes. Se omitió la forma cónica general del tronco, así como la disposición en espiral de las fibras a lo largo de toda la longitud del tronco. Las características de los anillos fueron reemplazadas por superficies cilíndricas, y se esperaba que los especímenes tuvieran una curvatura constante a lo largo de su longitud.

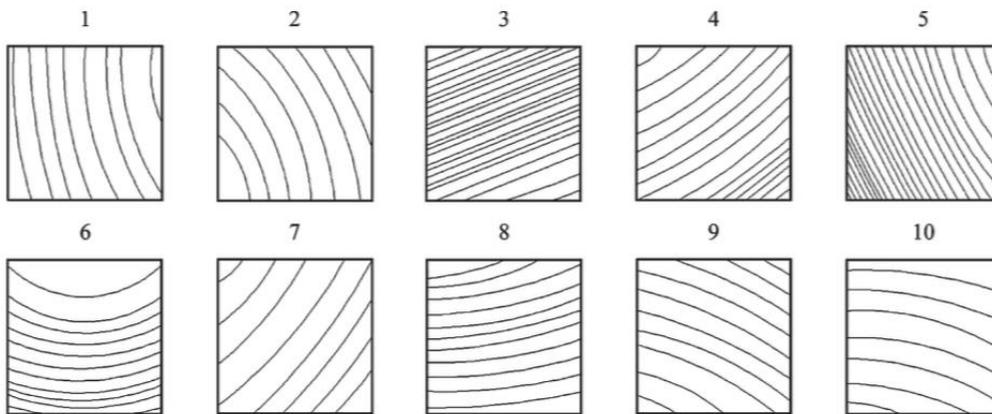


Ilustración 4. Idealización de las características de los anillos de los especímenes

Los cálculos se realizaron en etapas, teniendo en cuenta la no linealidad material. Además, se tuvo en cuenta el efecto de grandes desplazamientos y rotaciones de elementos finitos, es decir, la no linealidad geométrica.

Los resultados parciales de las pruebas experimentales de especímenes muestran que las constantes E y R dependen de la orientación y densidad de los anillos anuales. Teniendo en cuenta el criterio de fallo no interactivo y la idealización de las características anuales de los anillos, la diferencia entre los resultados experimentales y los determinados numéricamente es, en promedio, de hasta el 2,7%. Como se puede comprobar en la ilustración (5), Las curvas de carga determinadas numéricamente siguen las curvas de carga determinadas por pruebas experimentales,

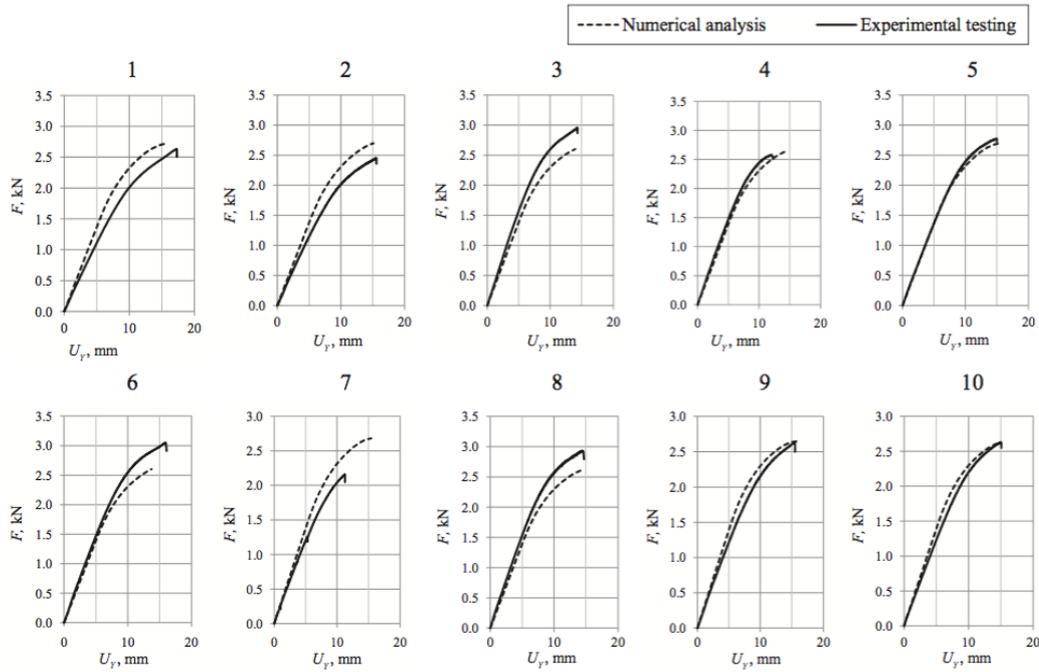


Ilustración 5. Comparación de las gráficas Carga-Desplazamiento determinadas numéricamente y experimentalmente

El uso de un modelo de material de plasticidad anisotrópico se puede ver en ejemplos de modelado de pruebas de carga y determinación numérica de capacidad de carga propia, es decir, en casos en que el nivel de la carga aplicada es mayor que la carga de rotura del material. De lo contrario, el desarrollo puede ser reemplazado por un modelo de material ortotrópico más simple, con constantes elásticas de acuerdo con los criterios de fallo interactivos - Hoffman (Hoffman, 1967) y Tsai-Wu (Tsai y Wu, 1971).

Jung- Pyo Hong (6) realizó un estudio con el objetivo de desarrollar un modelo de una articulación de madera unida por un clavo para el análisis tridimensional mediante elementos finitos. Este estudio se desarrolló a partir de la teoría de material plástico anisótropo y la teoría "Beam on the foundation", ya que se basó en que el comportamiento de la madera afectada por clavo de unión sería equiparable al de la cimentación. Así se determinaron las constantes mecánicas del modelo. Y con experimentos simples, el modelo de material desarrollado mostró una simulación muy eficiente sobre el comportamiento de compresión de la madera.

En 1974, Foschi propuso un modelo exponencial unidimensional para la madera, asumiendo que está por debajo de un clavo, de forma no lineal. Sobre este enfoque, se ideó un procedimiento para expandir el modelo unidimensional al tridimensional.

Como se puede ver en la imagen (6), se consideró que el vástago incrustado afectaba a un cierto volumen cilíndrico de madera. De esta forma, se puede utilizar un mallado no lineal en la parte que envuelve el vástago para el estudio de elementos finitos.

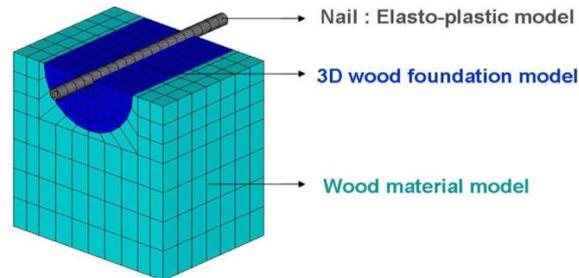


Ilustración 6. Incorporación de la madera en contacto con el clavo, al bloque de unión.

También, se asumió que el comportamiento de resistencia de la madera bajo la unión sigue el módulo de cimentación. El módulo de cimentación debe determinarse a partir del ensayo de incrustación de clavos en tres direcciones.

Dado que la prueba de compresión se diseñó para inducir un esfuerzo uniforme sobre la muestra de madera, se puede pensar que la simulación implicaba un simple comportamiento del material constitutivo. Por lo tanto, se realizó la compresión estándar ASTM D143 perpendicular a la fibra, se comparó el comportamiento de resistencia con los resultados simulados para la validación del modelo de material de madera. Se observó que el espécimen de madera estaba sometido a una carga parcial en el área de contacto, la cual generaba tensiones no uniformes sobre el material y su falla de corte de madera en los bordes de un bloque de acero de carga. Aunque el modelo de material basado en la plasticidad no es capaz de predecir la falla frágil de corte, la simulación 3D por Elementos Finitos mostró resultados aceptables, como se puede comprobar en las siguientes imágenes:

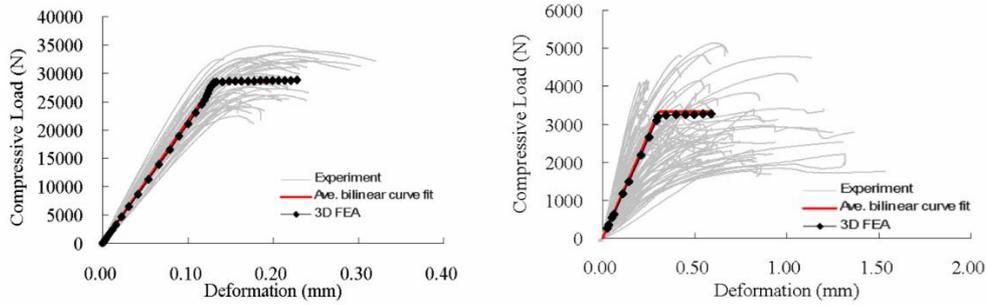


Fig 3 Compression of simulated results in wood compression: parallel to grain (left) and perpendicular to grain (right)

Ilustración 7. Compresión paralela al grano y compresión perpendicular al grano

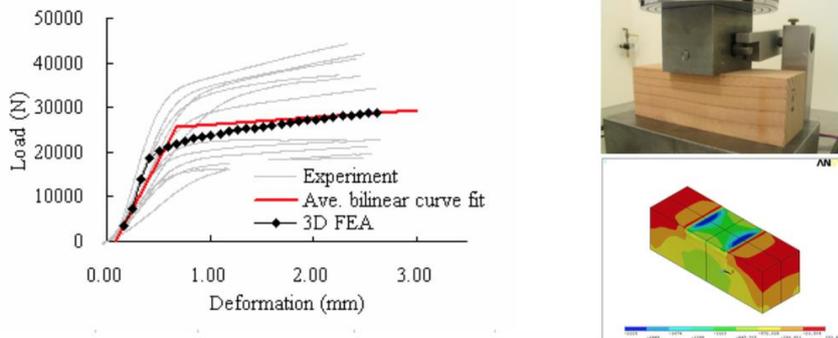


Fig 4 ASTM D 143 perpendicular to grain compression test and the 3D FE simulation

Ilustración 8. Compresión perpendicular al grano por simulación en 3D de Elementos Finitos

En cuanto al comportamiento del clavo, los buenos resultados en las comparaciones de las curvas de carga-incrustación entre el experimento y la simulación en paralelo/perpendicular a la dirección de la fibra, deben ser siempre evidentes, ya que se forzaron las curvas simuladas para hacerlas coincidir con las curvas experimentales en el proceso de la determinación de los factores de conversión. Sin embargo, los resultados simulados de la prueba de 45 grados a la fibra se tomaron como una estimación de la validación del modelo. La curva de carga-incrustación simulada en la prueba de 45 grados reveló una buena concordancia con el experimento. Esto significa que las tensiones internas complejas en la madera fueron representadas con éxito por el modelo desarrollado.

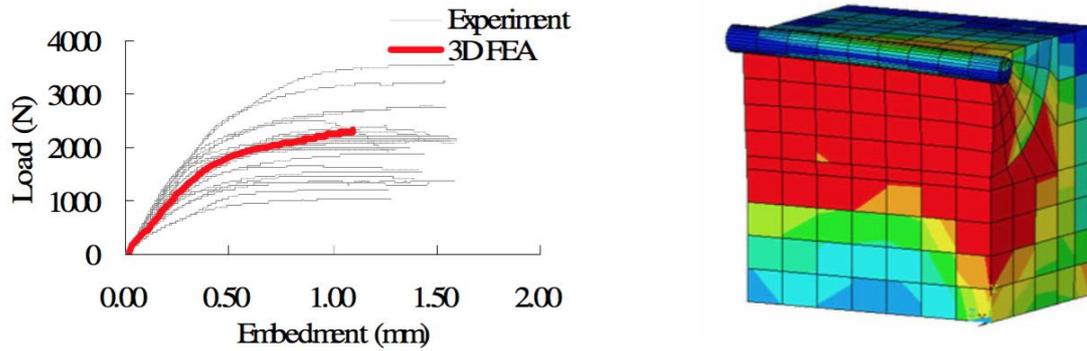


Ilustración 9. Curva Carga-Incrustación a 45° respecto a la fibra.

2.2.2. Análisis Estructural de un velero.

A. Besednjak (7) recopiló en un informe *Análisis estructural de un velero*, el conjunto de fuerzas para analizar la resistencia de un barco.

Se hará la consideración de que se trata de una viga flotante. Formada de un modo continuo por todos sus elementos longitudinales constituyentes, desde proa a popa. Los elementos transversales funcionan como nexos de unión entre los longitudinales.

La viga buque está sometida a la fuerza de su propio peso, el peso de la carga, y al empuje del agua según el principio de Arquímedes. Si se analiza el buque en aguas tranquilas, suponiendo la superficie del agua plana, se obtendrá que en la zona central del buque el empuje es mayor que en los extremos del buque. Esto es debido a que los pesos actuantes son livianos en relación al volumen que ocupan, mientras que, en los extremos de proa y popa, la forma de la carena se estrecha, por lo que los empujes son menores. Estos esfuerzos resultantes generarán tensiones internas, momentos flectores y esfuerzos cortantes, que pretenderán deformar la viga buque. Si se analiza el buque en aguas no tranquilas, y consideramos las olas como olas estándar, la condición más desfavorable es cuando la sección central del barco se encuentra sobre la cresta de la ola (quebranto) y cuando o en el seno de la misma (arrufo).

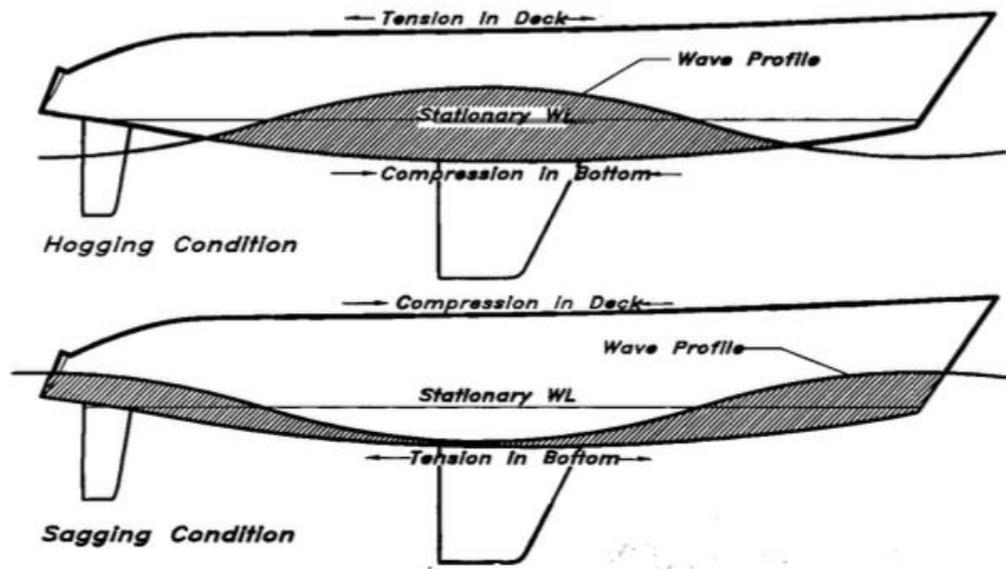


Ilustración 10. Situaciones de Quebranto y Arrufo.

En la situación de quebranto, la viga buque tendera a flexionarse produciendo tensiones de tracción en la cubierta y de compresión en el fondo, mientras que, en la situación de arrufo, la viga buque tendera a flexionarse produciendo tensiones de compresión en la cubierta superior y de tracción en el fondo.

En los barcos de vela la situación más crítica es la de Arrufo. La razón es que el momento flector longitudinal será mayor, esto es debido a la fuerza añadida que el palo ejerce sobre la viga buque. Será pues, la sección transversal del mástil donde se debe calcular el módulo de la sección del casco, ya que posee el máximo momento flector.

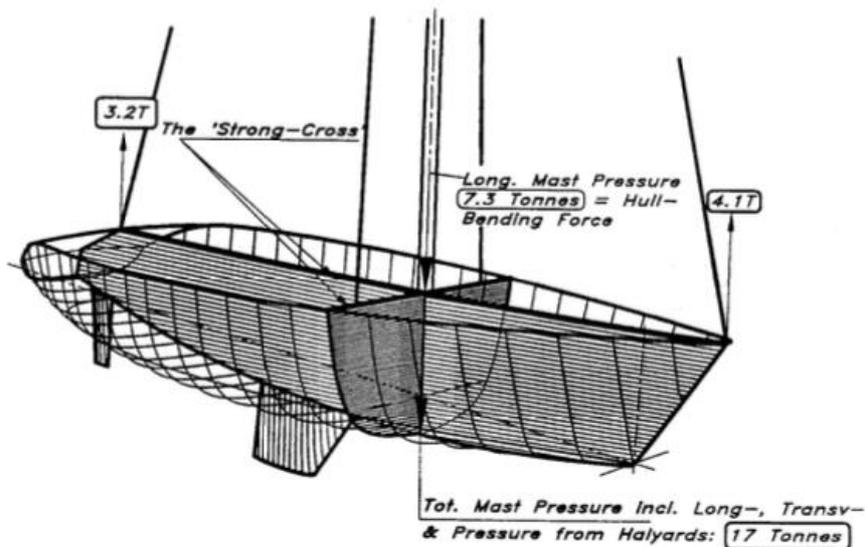


Ilustración 11. Sección transversal del mástil

Las Sociedades de Clasificación reglamentan el cálculo de la estructura de modo preciso, y para simplificarlo consideran el buque en aguas tranquilas y a los esfuerzos determinados se le aplican distintos factores presentes cuando la embarcación navega en el mar. Sin embargo, algunas Sociedades de Clasificación no consideran necesarios los cálculos del momento flector y resistencia de la viga buque en embarcaciones con esloras menores a 24 metros, por considerar que sus efectos no son significativos.

Transversalmente, los principales esfuerzos son producidos por la presión del agua y la deformación transversal por esfuerzo de inercia. Tanto el costado como el fondo deben ser dimensionados, conjuntamente con los refuerzos, para soportar la presión hidrostática. En el caso del dimensionamiento de veleros, no es suficiente considerar que la presión hidrostática afecta solamente al carenado del velero cuando se encuentra en aguas tranquilas, si no que afectara a todo el caso, esto es debido a que cuando navega escorado, las crestas de las olas alcanzan fácilmente la borda.

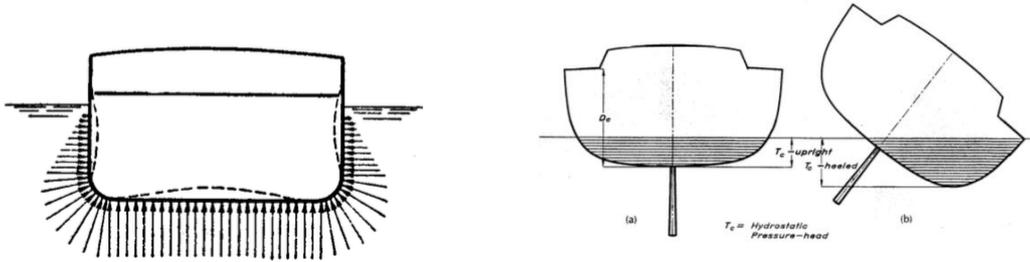


Ilustración 12. Presión hidrostática

También existen ciertos esfuerzos locales que son aquellos que afectan a zonas limitadas de la embarcación, y pueden ser de distintos tipos:

- Cargas internas concentradas. En el caso de los veleros, dos de las cargas locales más importantes son las producidas por la quilla y el timón.
- Cargas externas concentradas. Se tratan de tensiones considerables en zonas o porciones externas relativamente pequeñas de la embarcación, como sucede por puntales, presión concentrada en una zona del fondo por varadura o por varadura intencional...
- Impactos contra el agua. Las presiones hidrodinámicas locales aumentan con el cuadrado de la velocidad. Cuando la proa del barco sale del agua y golpea bruscamente con la superficie de la misma se producen impactos locales muy severos. En veleros el procedimiento para determinar dichas cargas consiste en calcular una presión de diseño y afectarla posteriormente por un factor slamming, en función de la zona del barco que se esté estudiando.
- Esfuerzos dinámicos locales. Todos los pesos de una embarcación navegando adquieren una cierta aceleración, por lo que poseen fuerzas de inercia.
- Esfuerzos locales originados por esfuerzos estructurales. El hecho de que la viga buque esté sometida a flexión, ocasiona, una compresión o tracción en las chapas del casco y cubierta. Si estas chapas se encuentran entre dos baos sucesivos, se encontrará sometida a tensión o compresión, y si se considera aislada, existe la posibilidad de que sufra pandeo.

La siguiente figura nos muestra un velero navegando visto desde barlovento. Las flechas sombreadas nos indican las cargas globales impuestas en la viga buque por las fuerzas de su aparejo. También se muestran cargas locales, como la presión hidrostática, con la adición de cargas de slamming en la parte delantera del barco, que intentan combar el forro y doblar los refuerzos. Esta es la fuerza más importante cuando calculamos el espesor de los forros y dimensionamos los refuerzos.

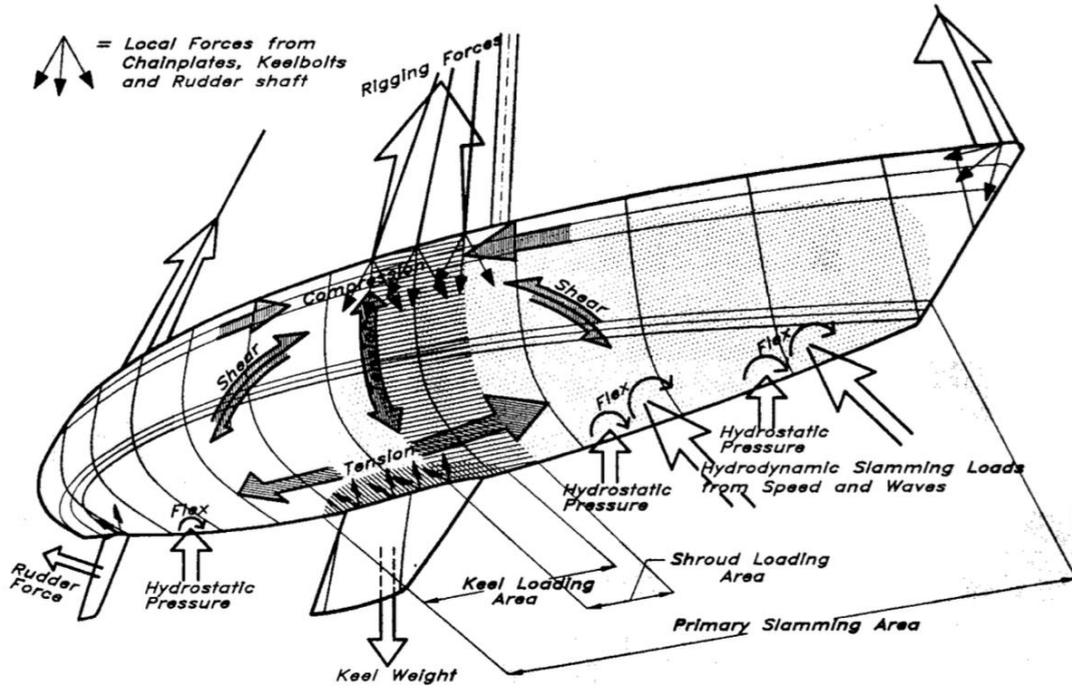


Ilustración 13. Sumario de cargas vistas desde barlovento.

La resistencia del global del barco será suficiente si su dimensionamiento es suficiente para soportar cargas hidrostáticas e hidrodinámicas.

3. Preparación del Modelo

3.1. Introducción

Se analizará, en una primera instancia, la estructura de Pirate. Se trata de una pequeña recopilación de los materiales, medidas y conexiones entre las distintas piezas estructurales que conforman este velero.

A partir de este extracto sobre la estructura del R-Boat Pirate se procederá a su modelización en el software RhinoCeros. Se explicará paso a paso como se realizó el modelado y las consideraciones tomadas para su posterior exportación a ANSYS.

3.2. Cuerpo estructural del R-Boat Pirate

Citando el informe “Detalles de Construcción – R-Class Sloop Pirate” el cual nos proporciona el plano original (1925) detallado con notas sobre detalles y excepciones que se encontraron durante el proceso de restauración:

El forro del casco está compuesto por una capa de Cedro Rojo Occidental, con tablones de 5/8". Los elementos de sujeción en el encofrado son clavos de sección rectangular de hierro negro. Cada tablón interno está atornillado al forro exterior, con dos tornillos de cabeza redonda de bronce 8 x 7/8", a las claras entre cuadernas.

Las cuadernas, en su gran mayoría, son de roble blanco y conformadas al vapor. Están biseladas a cruja y su sección rectangular, de 1-3/4" x 1-7/8", va disminuyendo de manera gradual, desde el empalme con la sentina hasta la abrazadera. Cada tres cuadernas, se encuentra con una cuaderna doble reforzada. Las cuadernas dobles son de Roble Blanco aserrado. La sección de cada una de estas piezas mide 1"x 1-

3/4". Todas las cuadernas están fijadas a la abrazadera con tornillos de 1/4" de hierro negro, con tuercas y arandelas en los interiores. Cada cuaderna está encajonada en la quilla y atornillada a tablonces de madera de teca aserrada que cubren, en el interior del casco, la conexión entre cuadernas y quilla (Varengas).

Los elementos estructurales primarios del buque son dos vigas de abeto de Douglas, que forman la quilla. Se trata de la sobrequilla con una profundidad de 11" y una anchura de 11"; y la parte posterior llamada horn timber, la cual conecta la quilla con el espejo de popa, con 11" de profundidad y 11" de ancho. Estas dos piezas están unidas a solape, dicha unión está reforzada por largos tornillos negros y por tirafondos. Esta unión está reforzada por una pieza de teca seca y el codaste de popa. La quilla recorre toda la eslora del barco dando soporte a la estructura del casco.

La base del mástil es de teca, fue aserrada y construida según los planos originales, asegurado transversalmente mediante pernos de hierro con una sección de 5/6".

Los baos son de teca aserrada, de 1- 7/8" en profundidad y 1- 1/4" de ancho, a un ángulo de caída constante. Cada uno está atornillado a la cubierta con dos tornillos de hierro negro y asegurados con tuercas.

Listones de teca definen los perfiles de la bañera, la superestructura y la escotilla de proa. En los listones de la superestructura y de la escotilla van encajados pequeños baos, mientras que los márgenes de la bañera son pequeñas cubiertas en las que desembocan pequeñas vigas cortas.

Los planos de la construcción original son un poco vagos con respecto a la cubierta. En 1999, Pirate tenía una cubierta de teca 7/8" fijada a los baos, mediante tornillos de cabeza plana de bronce. Los listones de madera eran de 2" de ancho, con bordes biselados que formaban una ranura entre ellos. No constaba con calafateado. Esta cubierta parecía tener entre 30 y 45 años. Posteriormente, un forro de madera contrachapada, con 1/4" de espesor, se instaló sobre la compuesta cubierta y se sujetó con tornillos de acero inoxidable. Es posible, que los pesados tableros de teca que cubrían la cubierta se añadieran al mismo tiempo. Después de esto se eliminaron y se encontraron los restos oxidados de clavos de hierro negro en las copas de los baos de cubierta. Esto sugiere que las vigas eran probablemente originales y en algún momento anterior habían sido reemplazados.

Los mamparos de la superestructura son construcción de una única pieza de teca, con 1" de escantillonado. La cubierta de la superestructura es de cedro, con 5/8" de espesor, y está unida a las vigas mediante clavos.

En cuanto al aparejo y las velas, fotografías archivadas desde 1926 a 1929 muestran que los equipos de cubierta son consecuentes a los planos de construcción. La llegada de las horcas Génova, de espís simétricos, y el nuevo aparejo "en diamante" alteraron radicalmente la forma en que los veleros de regatas eran equipados y gobernados. Los propietarios de embarcaciones anteriores, se vieron obligados a adaptar sus barcos a las nuevas condiciones si esperaban tener éxito en la década de 1930. Se añadieron driza y cabrestantes de escota (sheet winches), junto con tangones de dos extremos y de sus artes. En 1999, muy poco de los equipos/armamento hardware de la cubierta original del Pirate permanecieron. Los accesorios existentes incluyen el estay de proa, la claraboya en la cubierta de la superestructura, los soportes de la placa del constructor de bronce fundido, y la pareja principal de bronce. Todos menos el último elemento también mostró evidencia de niquelado.

El mástil tiene 50' de largo y un diámetro máximo de 6" en la cubierta por las reglas de clase, y está compuesto por abeto de Sitka.

3.3. Modelización de la estructura

El modelado de un barco se puede desarrollar por diferentes métodos dependiendo siempre de los datos de partida que se tengan y del software que se use para su ejecución.

En la construcción naval se aplica el término plano de formas, a un plano a escala conveniente, constituido por un conjunto de líneas representadas en tres proyecciones ortogonales, obtenidas al cortar el buque por un sistema de planos paralelos a los tres ejes del triedro trirrectángulo. Las secciones transversales, igualmente espaciadas entre las perpendiculares de proa y popa, constituyen lo que se conoce como caja de cuadernas. Dependiendo de la eslora del buque se cogerá un número u otro de cuadernas, denominadas cuadernas de trazado. Estas son obtenidas por la intersección del casco con los planos transversales. Además, se añadirán dos secciones en los puntos medios entre los espacios finales, tanto de proa como de popa, debido a la acentuación del cambio de las formas del buque en dichas zonas.

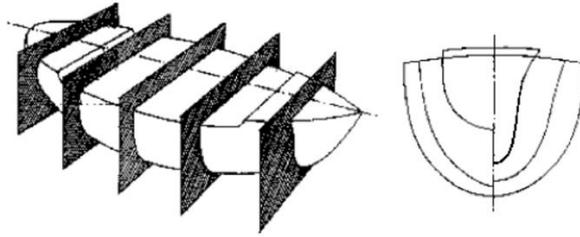


Ilustración 14. Secciones de Trazado, Caja de Cuadernas

En la proyección horizontal del casco se alojan las Líneas de Agua, las cuales son el resultado de los cortes de planos paralelos a la flotación con el casco.

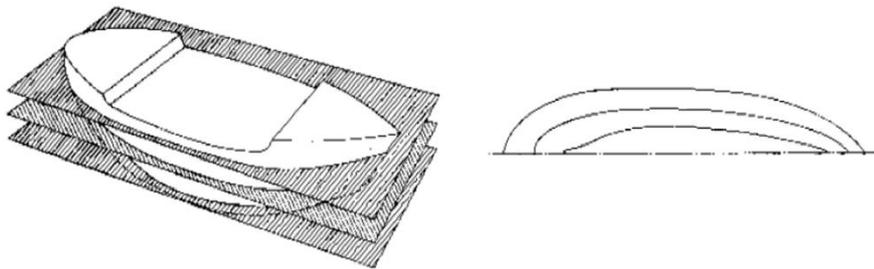


Ilustración 15. Ilustración: Líneas de Agua.

Finalmente, en la proyección longitudinal, se obtendrán las intersecciones de los planos paralelos al plano de crujía con el casco, denominándose Líneas Longitudinales.

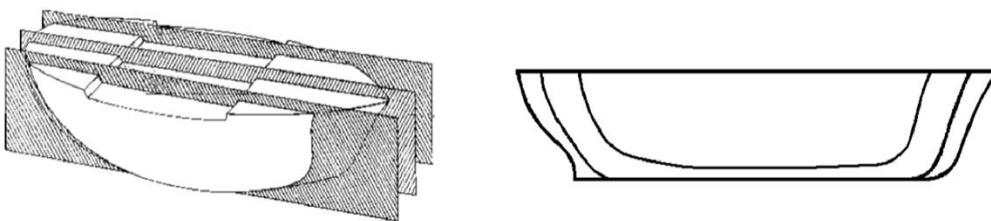


Ilustración 16. Líneas de Agua.

Debido a la simetría del buque respecto a crujía, en el plano de formas únicamente se dibuja la mitad del buque. Por su parte, las secciones de la mitad de proa se dibujan a la derecha de la proyección del plano de crujía y las de popa a la izquierda. Las formas de un barco quedan definidas por la cartilla de trazado, la cual alberga una serie de mediciones específicas que revelan las semimangas que corresponden a la intersección de las líneas de agua con las secciones.

En este caso, para la modelización estructural del R-Boat Pirate, se partirá de su correspondiente plano de formas, y es en el software RhinoCeros donde se definirá la estructura del modelo bajo los criterios necesarios para su importación y análisis en ANSYS.

3.3.1. Confección del Casco y Quilla.

La modelización del buque se empezará con la confección del casco del buque. Para ello, se establecerá de fondo de pantalla el plano de formas del Pirate, sobre el cual se calcarán sus trazas mediante poli-líneas.

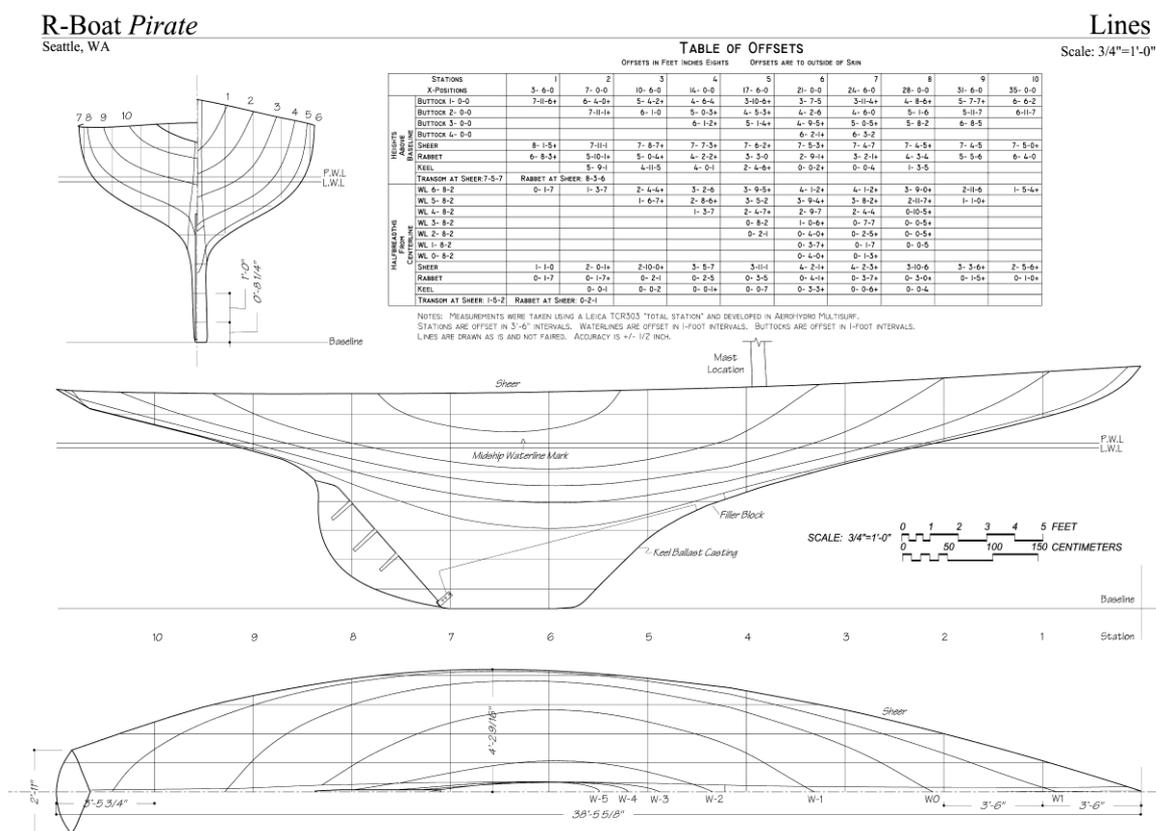


Ilustración 17. Plano de formas

Utilizando los comandos bitmap del software, se escanearán en el fondo del programa las imágenes del susodicho plano, obteniendo en cada vista su correspondiente bitmap de fondo. Se debe tener muy en cuenta la precisión a la hora de proyectar el plano como plantilla, el punto de origen se situará en el plano de crujía o plano de simetría del velero, en la línea base y respecto a la ubicación longitudinal en la perpendicular de popa. También es de gran importancia su escala a las medidas especificadas por nuestro barco, ya que esto facilitará en gran medida la realización del modelo.

A partir de este punto se definirán las secciones de trazado, mediante poli-líneas 3D, con el menor número de puntos de control posible, para facilitar con posterioridad la creación de la superficie. A estas poli-líneas se les darán las coordenadas correspondientes en el sentido de la eslora, para que queden definidas en el espacio y no en un plano. Así, se desarrollará el mismo proceso para los longitudinales, los cuales se situarán según sus coordenadas a lo largo de la semimanga del buque, y por último se distribuirán las líneas de agua a lo largo del puntal.

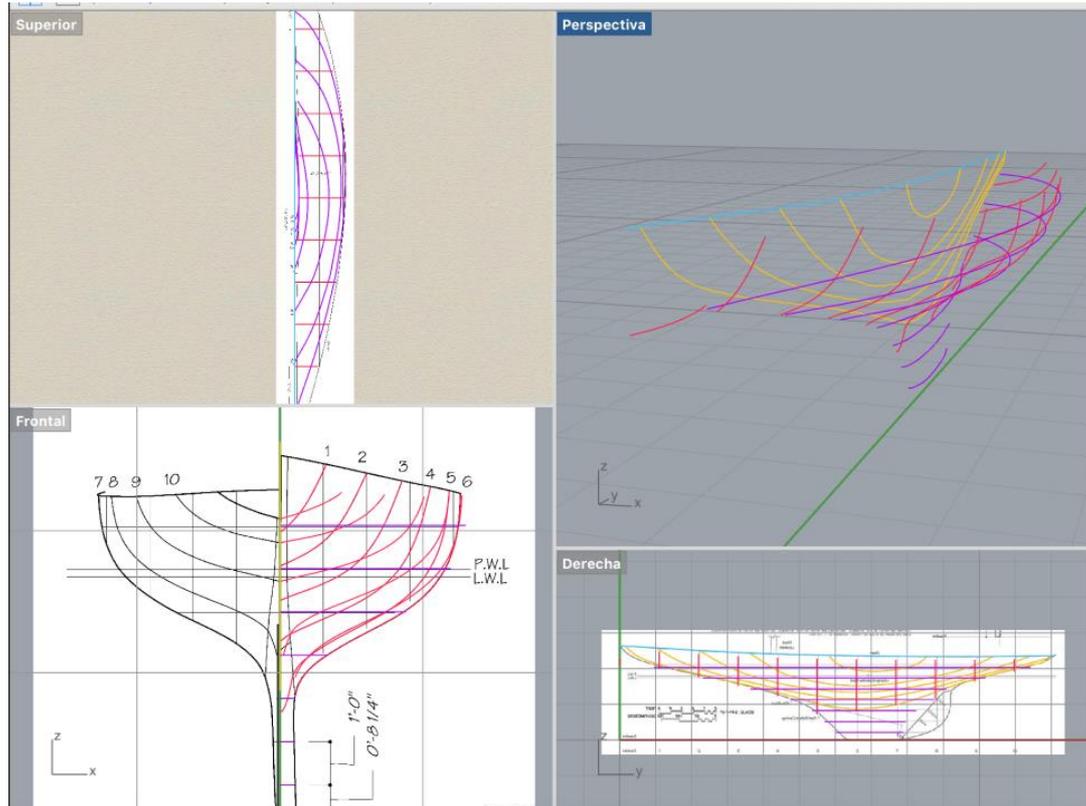


Ilustración 18. Poli-líneas definidas desde el plano de formas.

Una vez digitalizadas las secciones, se utilizarán como guía interactiva para la creación de la superficie NURBS del casco.

No obstante, esta no será la superficie a utilizar ya que, se encontrará con una superficie con discontinuidades y no ajustada a las formas del buque. Esto es debido a la escasa información de la que se dispone para^o modelizar la totalidad del casco, o a que las líneas no están suficientemente alisadas.

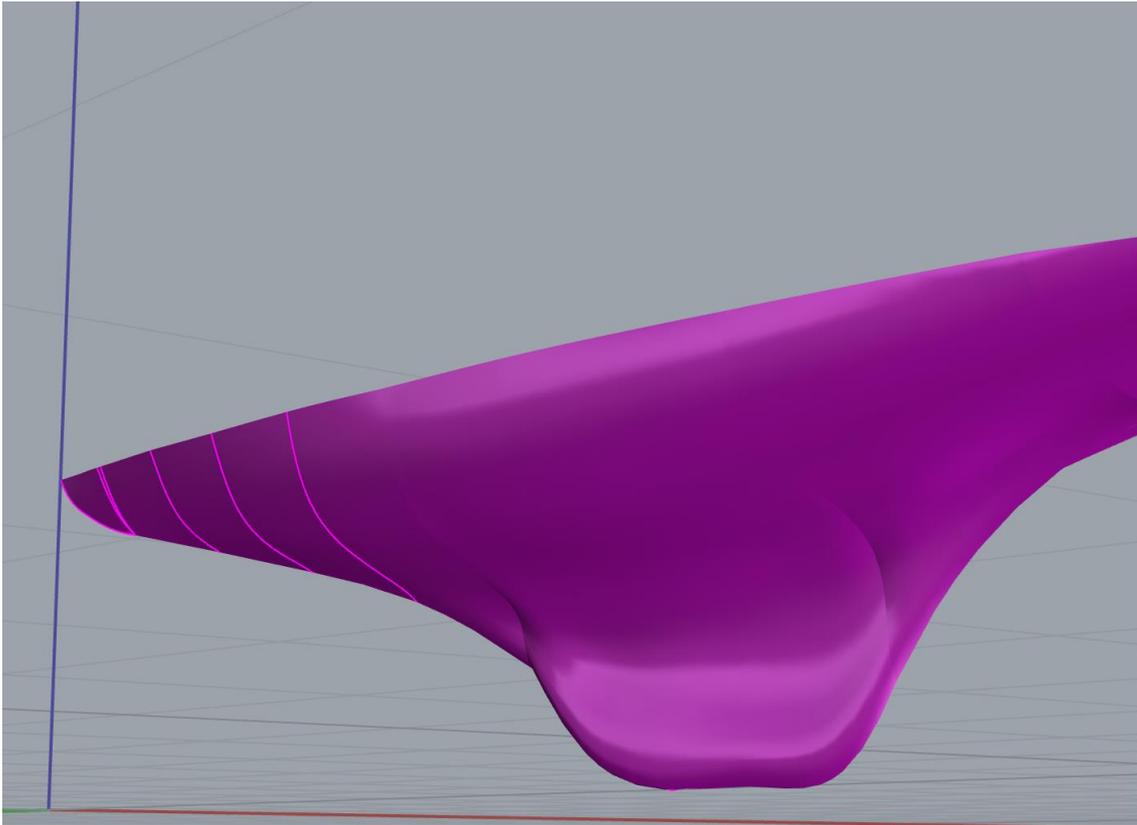


Ilustración 19. Primera superficie generada

Debido al nivel estructural al que se sujeta este proyecto, este problema no afectara a los resultados a analizar. Pero si se habla en términos hidrodinámicos, la forma e imperfecciones de la superficie del casco afectarían enormemente a su comportamiento en la mar. Por este motivo se procederá al ajuste y alisado de las secciones creadas, a las formas del R-Boat Pirate.

Hay que tener en cuenta, antes de proceder a eliminar las discontinuidades del casco, que cuando se vaya a realizar el mallado de la superficie en ANSYS, esta perderá la exactitud de su forma, por lo que tampoco se requerirá un alisado perfecto. Se intentará hacer un mallado lo más fino posible, para mantener la forma de la superficie lo más cerca posible a la realidad y no perder todo el trabajo realizado.

El alisado de una curva es un proceso laborioso, ya que no es posible alisarla por ordenador de forma automática. Las técnicas de alisado automáticas pueden suavizar una superficie, pero no tienen la capacidad para conseguir el equilibrio necesario entre el alisado y la forma correcta, ya que se rigen mediante métodos matemáticos sin tener en cuenta la forma real del casco. Algunos programas sí que garantizan el alisado de una curva o superficie, pero esto solo se consigue limitando fuertemente la forma de la superficie.

La mayoría de los programas de diseño incluyen diferentes maneras de comprobar el alisado de un casco. Bien utilizando la curva de la segunda derivada, que mide la curvatura de las curvas que definen las formas, o utilizando una representación a color de la curva Gaussiana de la superficie en un modelo 3D. A los proyectistas que utilizan el software (como es el caso) no les hace falta conocer la teoría matemática que hay detrás de estas técnicas, solo necesitan ver cómo la técnica resuelve todas las discontinuidades, bultos, abolladuras y puntos de inflexión. El proyectista cambia de forma interactiva la forma del casco, moviendo los puntos de control para obtener una curva de la segunda derivada suave, continua y sin picos.

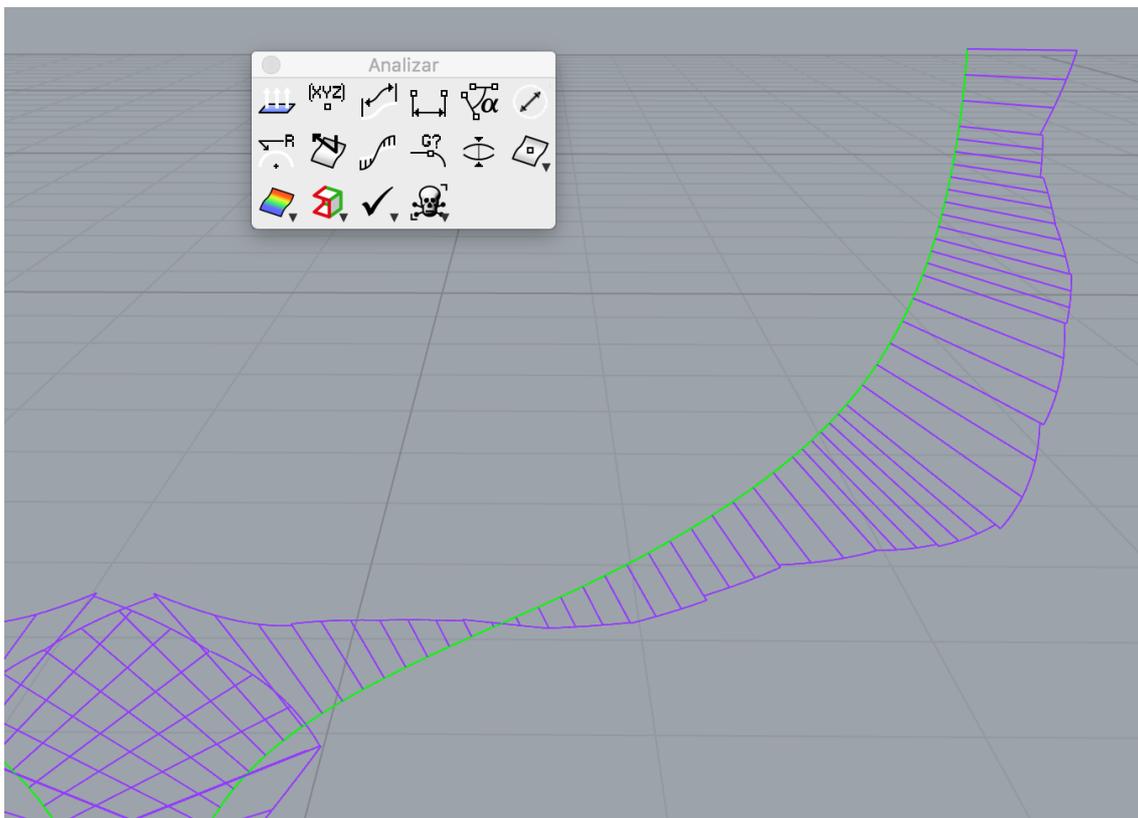


Ilustración 20. Alisado de la segunda derivada de la curva

Como se puede observar en la siguiente imagen la superficie conseguida sigue sin ser una buena referencia.

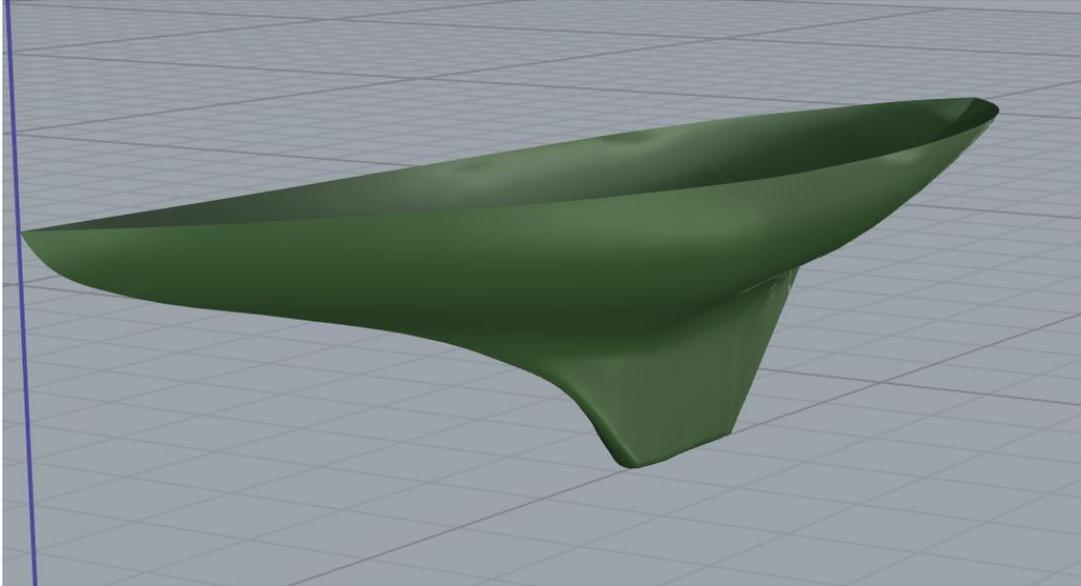


Ilustración 21. Superficie abollada del casco

Así pues, se creará una nueva superficie a partir de la existente. Para ello, se utilizarán una serie de planos perpendiculares a la superficie del casco; en el cuerpo central del buque se introducirán planos perpendiculares al casco, mientras que, en las zonas de proa y popa, estos cortarán de forma oblicua y todos ellos serán referenciados a un mismo origen en un abanico de unos 90 grados. En las zonas en las que la curvatura del buque es más brusca, como por ejemplo en la zona donde comienza y termina la quilla, sería conveniente aumentar el número de planos que intersectaran el casco.

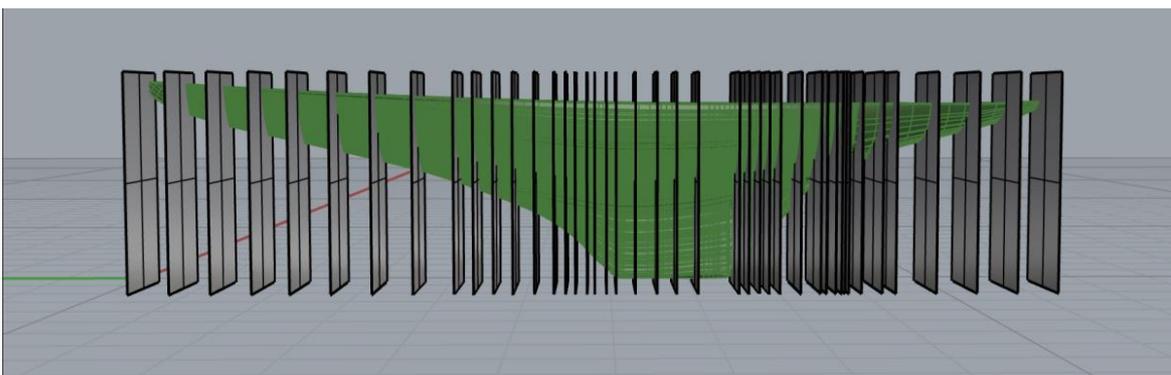


Ilustración 22. Planos cortantes

Las intersecciones obtenidas reproducirán las nuevas secciones de trazado que se ajustarán a la forma del buque y a las que se procederá a su alisado exactamente igual que se realizó en un primer momento, y a partir de las cuales se obtendrá una segunda superficie mejorada.

El alisado de la parte inferior del casco resistente, la quilla, se realizará de forma separada, pero siguiendo el mismo proceso. Esto es debido a la dificultad de alisado de las formas en la unión casco y quilla. Esta separación también será necesaria con posterioridad, ya que quilla está constituida por distintas piezas de maderas de distintas propiedades. Por lo que se hará cruzar un plano en sentido horizontal con la forma en que la quilla se inserta al casco, así que, se separará para, con posterioridad, crear una quilla sólida que nos facilitará el futuro análisis estructural.

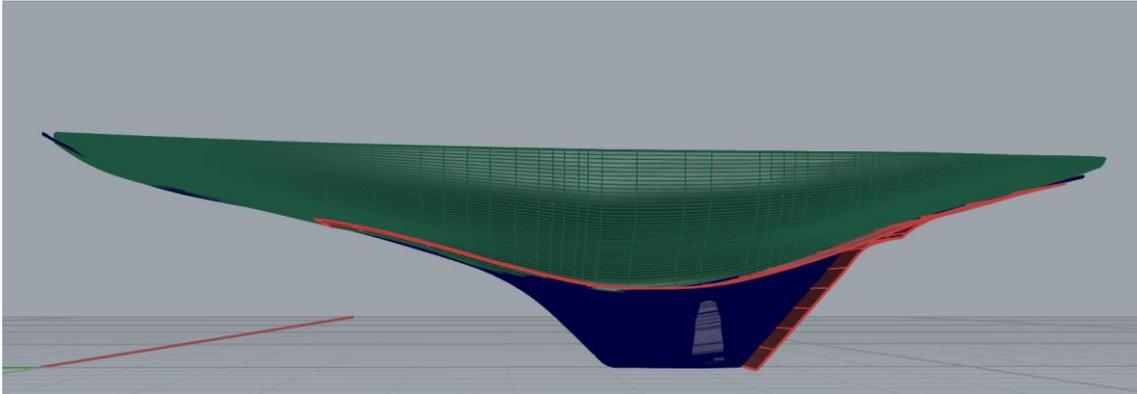


Ilustración 23. Separación del casco resistente y quilla

Se procurará siempre tener el menor número de puntos de control como sea posible, los suficientes para que la superficie mantenga la forma que se desea, lo que nos proporcionará una definición más suave de la superficie. Esto significa que cuanto mayor sea el número de puntos de control, mayor será el riesgo a deformaciones y discontinuidades.

El procedimiento de alisado descrito, se reproducirá tantas veces como sea necesario hasta conseguir ese deseado equilibrio entre alisado y ajuste de formas. Dando como resultado:

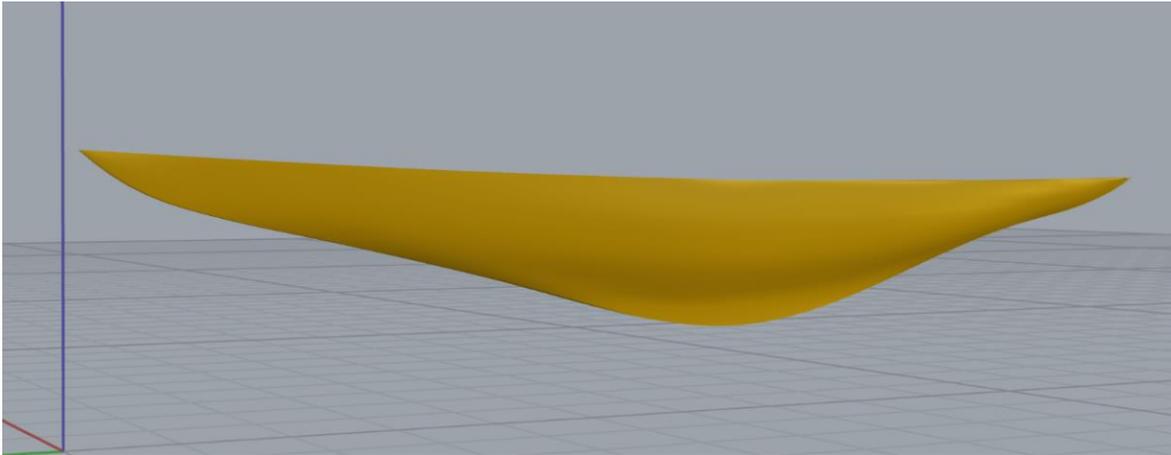


Ilustración 24. Casco alisado.

Una vez adquirido el forro del caso, se procederá a modelizar toda la estructura contenida en su interior. Para ello se introducirá el plano estructural del R-Boat Pirate como bitmap de fondo. Por supuesto, con el mismo cuidado en la escala y situación que se tuvo con anterioridad al introducir el plano de formas.

R-Boat *Pirate*
Seattle, WA

Framing and Deck Plans

Scale: 3/4"=1'-0"

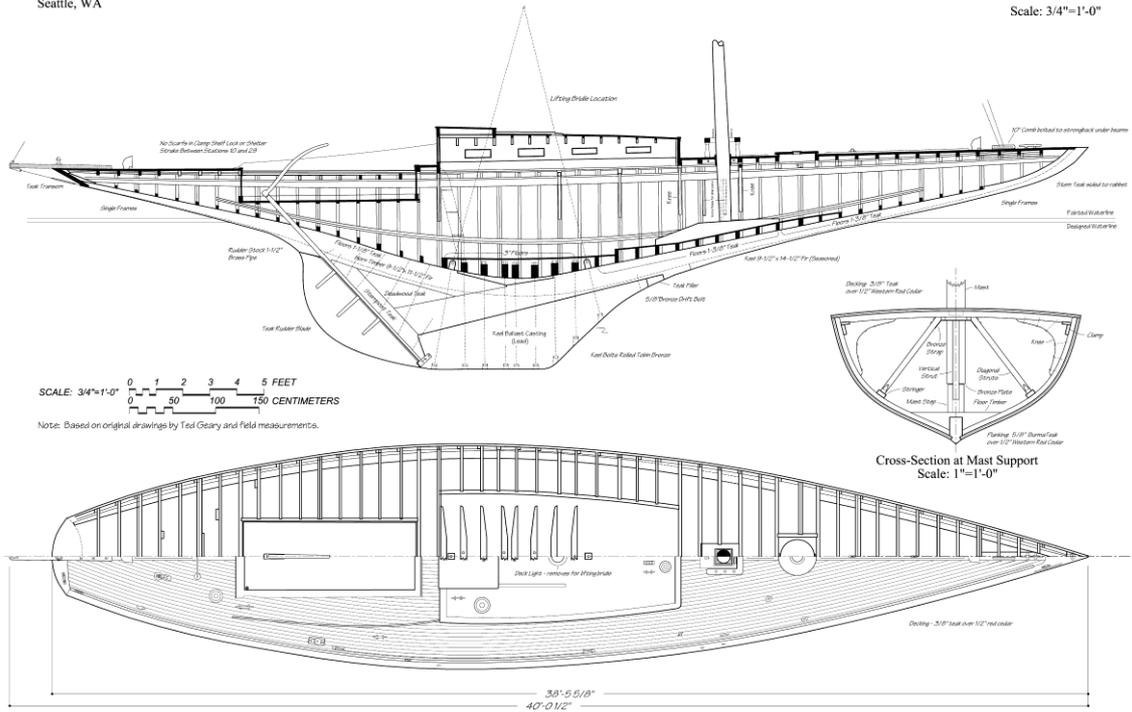


Ilustración 25. Plano estructural del R-Boat Pirate

3.3.2. Timón y Quilla.

Se procederá a alisar la quilla siguiendo el mismo proceso que se aplicó al casco estructural, es decir se atravesaran planos perpendiculares a la superficie para sacar nuevas trazas que definan la quilla.

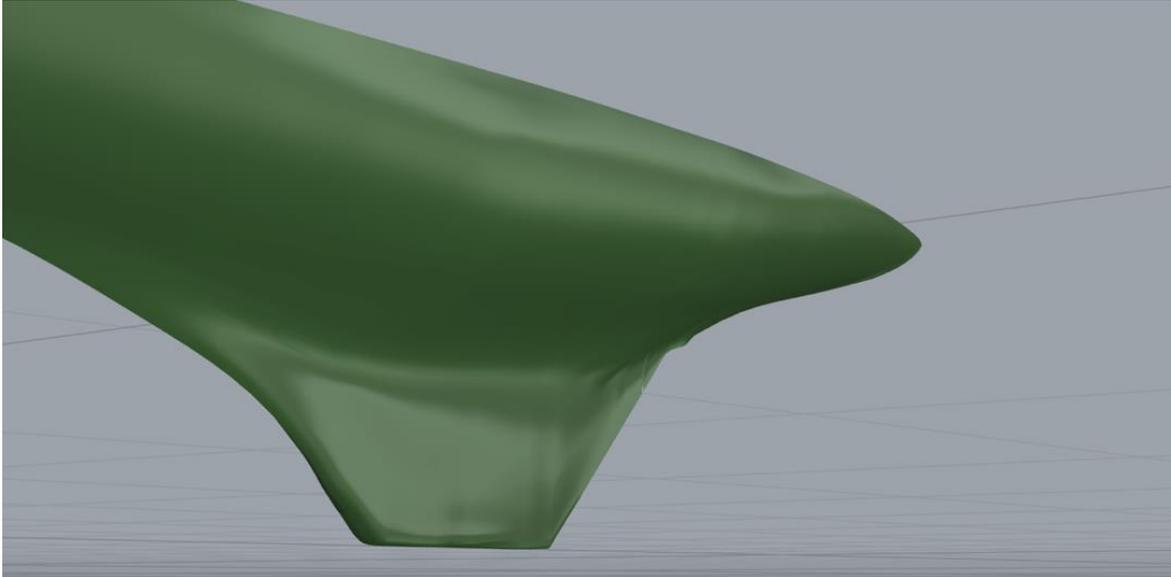


Ilustración 26. Zona de quilla y popa abollada

Cuando se trabaje la quilla y el timón, se modelizarán como elementos sólidos y se supondrán planos. La razón por la que se crearán sólidos en lugar de superficies, es debido a que tanto la quilla como el timón son los principales causantes de dos de las cargas locales más importantes que sufre la embarcación. En el caso de la quilla, para poder determinar esta carga se adoptará una postura de diseño que consiste en colocar la embarcación escorada 90° y fuera del agua, y considerar la quilla como una viga empotrada en uno de sus extremos. Las fuerzas del timón son desarrolladas cuando el timón está produciendo una fuerza lateral, es decir cuando navega, por lo que es una función de velocidad y del ángulo de ataque del fluido. Para simplificar el modelo y facilitar su reconocimiento por ANSYS, se considerarán planos a estos elementos estructurales, ya que su forma solo afecta a un concepto hidrodinámico.

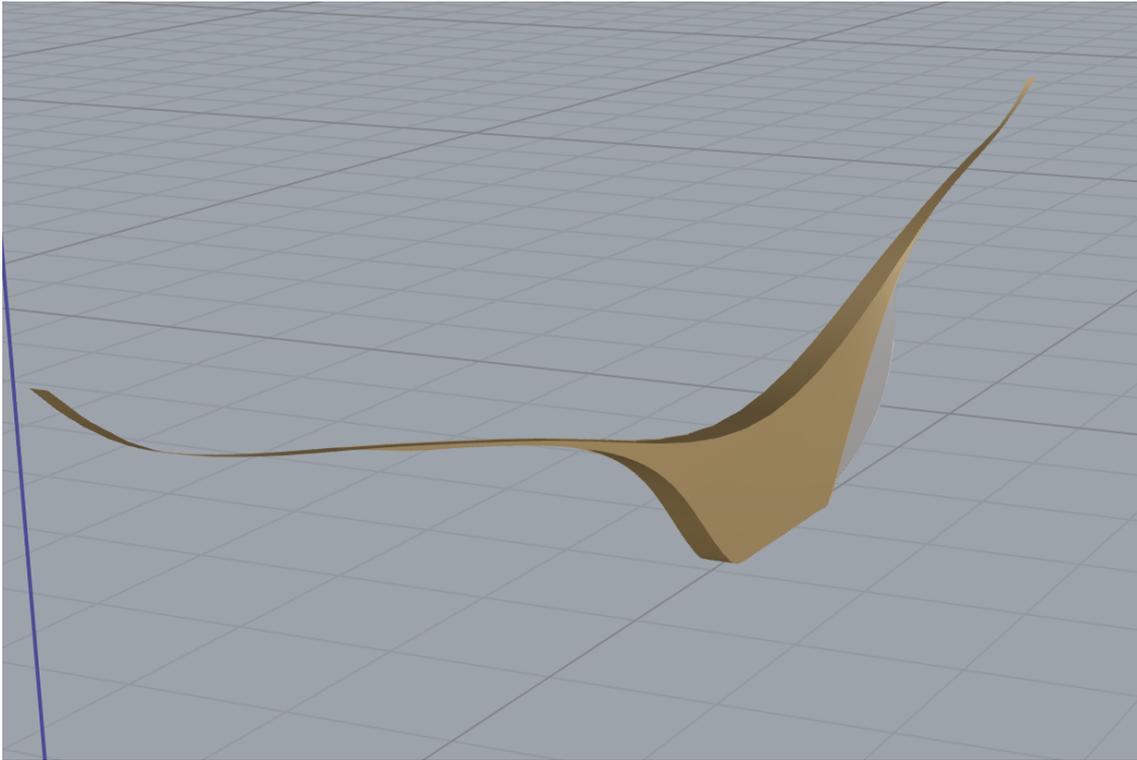


Ilustración 27. Quilla y Timón

Una vez se obtiene el conjunto de la quilla sólida, se extruirá hacia el interior del casco, ya que es el forro el que muere en esta.

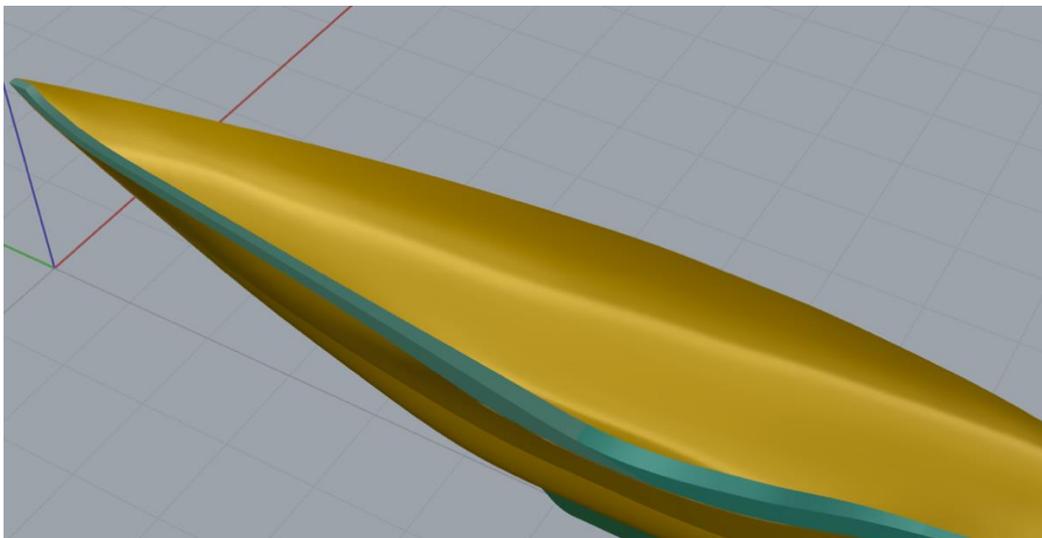


Ilustración 28. Quilla extrusionada.

A su vez, la quilla está formada por un conjunto de piezas de maderas con diferentes propiedades. Para la importación de la misma al ANSYS, es muy importante modelizar por separado todo aquello que posea distinto material, para poder definir las con sus

correspondientes propiedades sin ningún problema. Así pues, se dividirá en tantas partes como distintas maderas se posea.

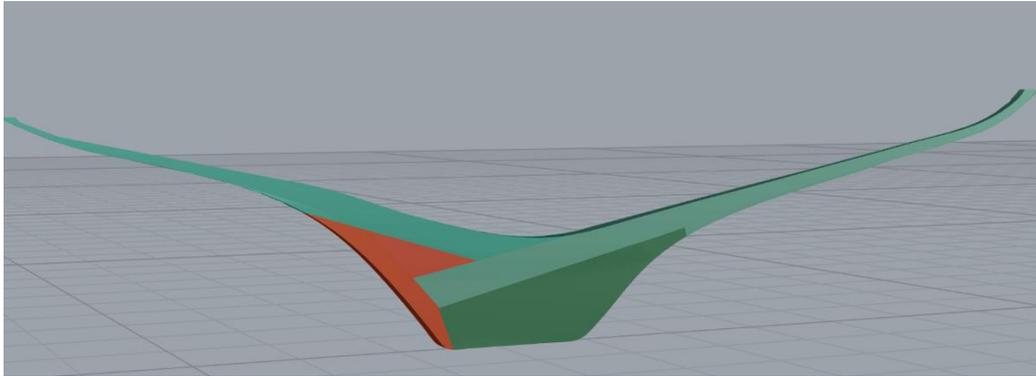


Ilustración 29. Diferentes elementos que conforman la quilla

3.3.3. Cubierta Principal

A continuación, se creará una superficie que cierre, de forma estanca, el casco de la embarcación. Esta superficie será la cubierta principal del R-Boat Pirate. Y aunque la cubierta posee una brusca (curvatura de la superficie en sentido transversal), la modelizaremos plana, ya que no alcanza ni el 2% de la manga del buque, y nos facilitara el posterior análisis.

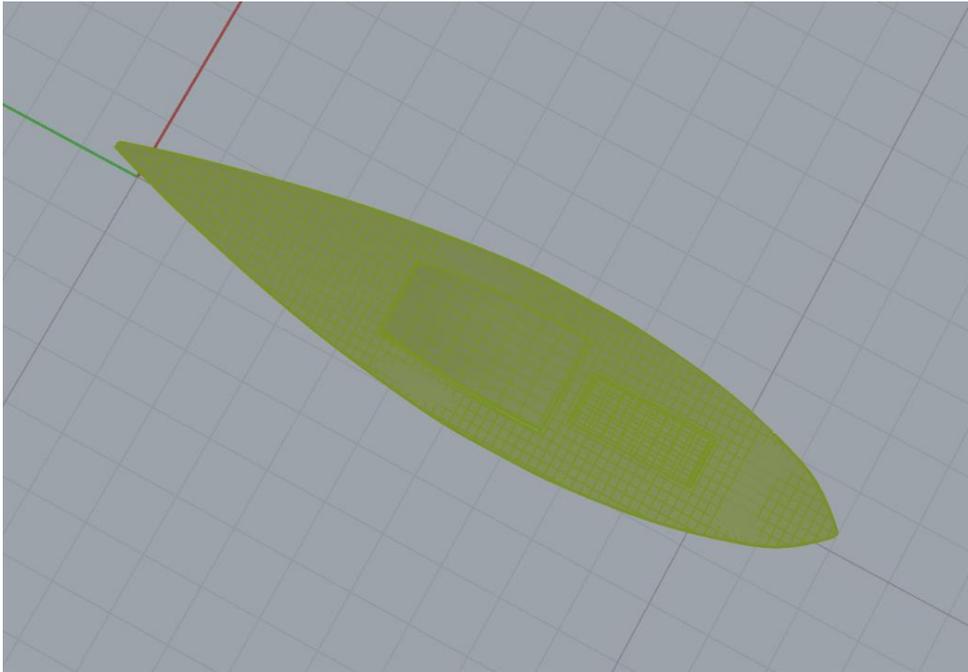


Ilustración 30. Cubierta principal

3.3.4. Bañera y superestructura.

El velero dispone de una cámara abierta a popa, donde va alojada la caña del timón y desde donde se puede manejar las escotas de las velas, llamada bañera. Para modelizarla, se bajará el trozo de cubierta a la distancia correspondiente y se cerrará con mamparos a la cubierta superior. Estos mamparos no son un simple elemento de cierre, si no que se trata de elementos estructurales resistentes y estancos.

Pirate también dispone de una estructura que sobresale desde la cubierta principal. La modelización de esta superestructura se realizará del mismo modo que la bañera de popa. Se elevará el correspondiente trozo de cubierta, y se cerrará con mamparos estancos.

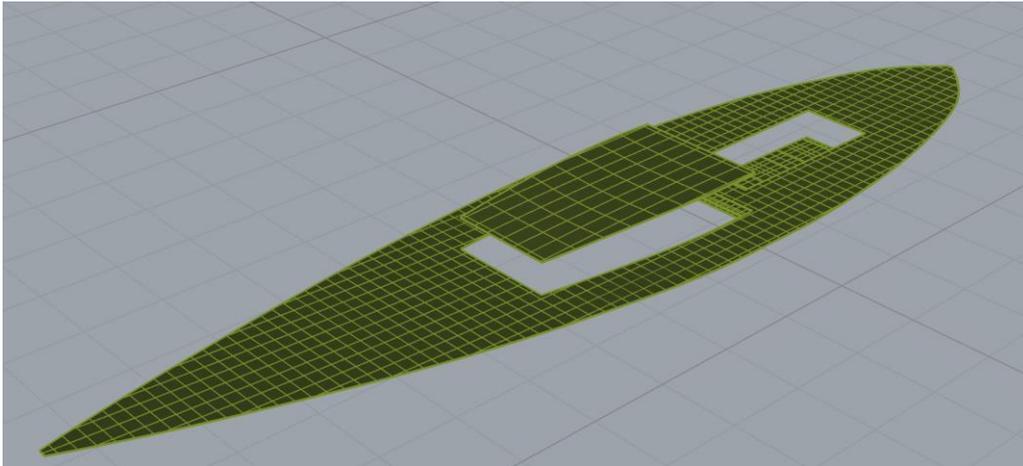


Ilustración 31. Cubierta de la superestructura y la bañera

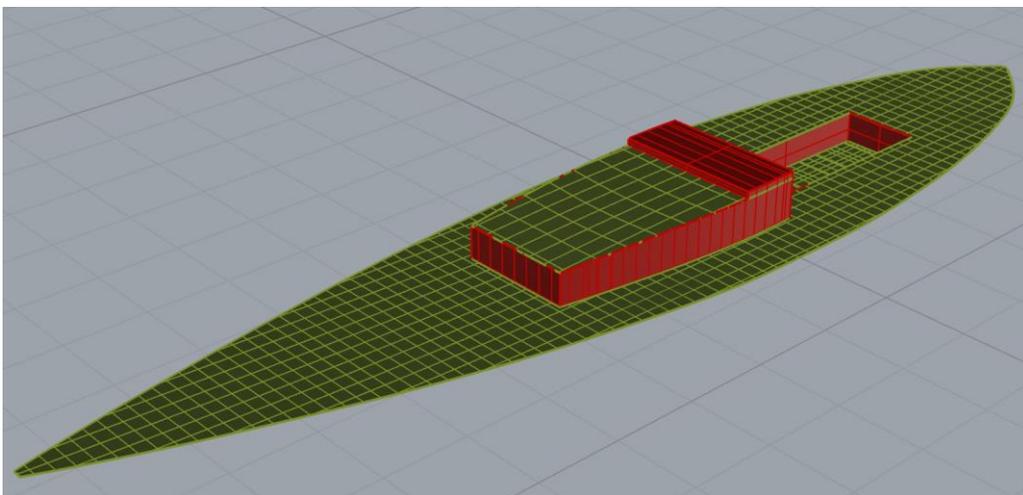


Ilustración 32. Superestructura y bañera

3.3.5. Anillo estructural

Pirate fue construido según un sistema transversal formado por un conjunto de refuerzos unidos entre sí, los cuales simulan una serie de anillos de gran resistencia estructural que recorren toda la eslora del barco en el interior del forro del casco. Estos componentes estructurales se modelizarán como elementos del tipo plancha o lámina, y a los que posteriormente se le definirán sus correspondientes espesores en ANSYS.

En primer lugar, se crearán planos que atraviesen perpendicularmente el casco. Con ayuda del plano estructural, que ya se ha dispuesto como fondo, se colocarán en las coordenadas longitudinales donde se requieran los anillos, separados entre sí una clara de cuadernas.

Las líneas resultantes, de estas intersecciones del plano con el casco, nos permitirá modelar las cuadernas del barco, las cuales, recorren de forma perpendicular a la superficie del forro del casco, están delimitadas por la cubierta en su parte superior, y van encajadas a la quilla por su parte inferior. Así, se crearán los elementos lamina para las cuadernas, extrusionando perpendicularmente al casco dichas líneas, a su correspondiente altura.

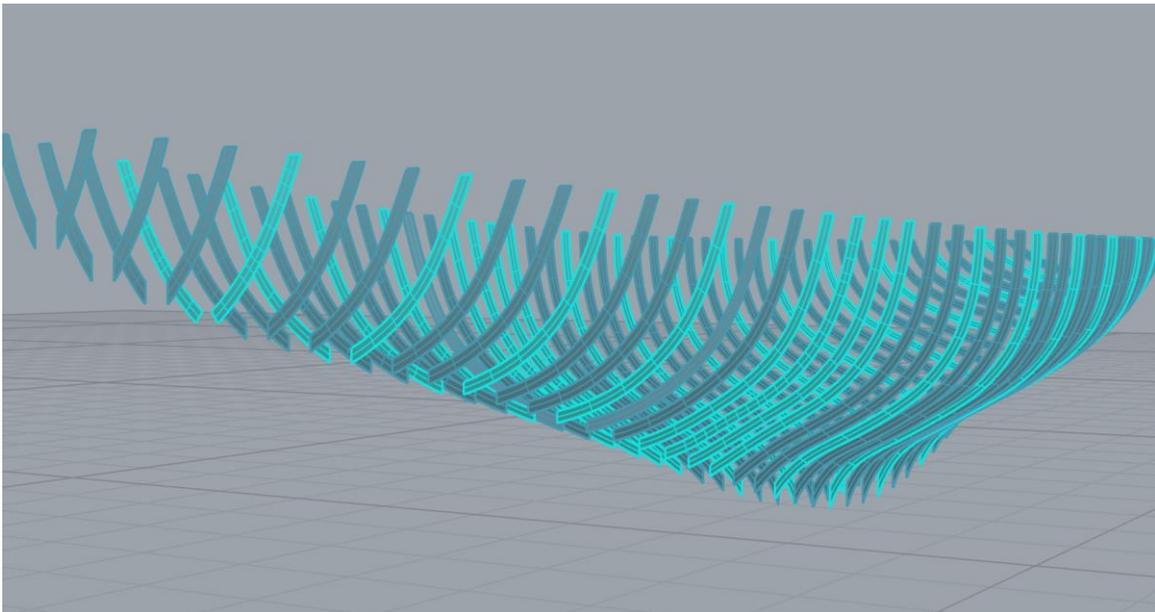


Ilustración 33. Cuadernas simples y dobles

Como se puede diferenciar en la anterior imagen, se modelizarán de diferente color los dos tipos de cuadernas que Pirate posee. Así resultará más sencillo definir sus propiedades.

Los baos serán definidos a partir de las intersecciones con la cubierta de los mismos planos que se utilizaron anteriormente. El procedimiento será el mismo, las líneas resultantes se extruirán su altura correspondiente, perpendicularmente y bajo la cubierta. Las intersecciones con las cubiertas de las superestructuras también producirán baos.

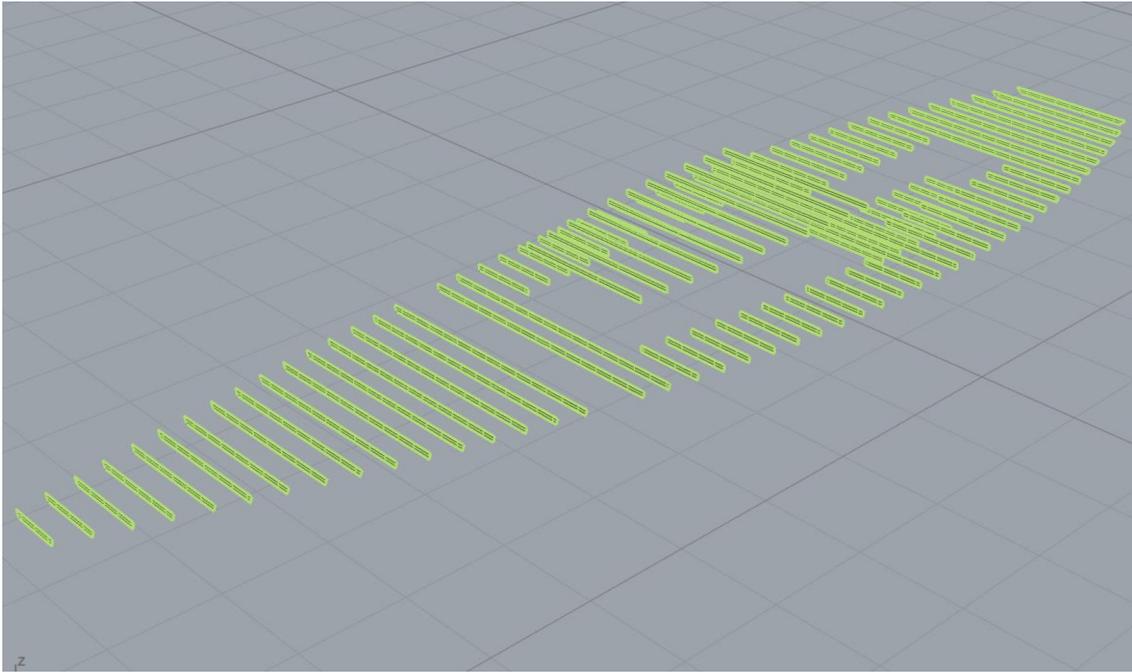


Ilustración 34. Baos

Por último, se crearán los elementos plancha que cierran el anillo estructural en su parte inferior, las varengas. Estos refuerzos estarán limitados la superficie del casco, por las vigas de la quilla en las que el forro del casco muere, y por las cuadernas. Por lo que será tan fácil como crear un plano a la correspondiente altura y recortarlo por donde dichos elementos los definen.

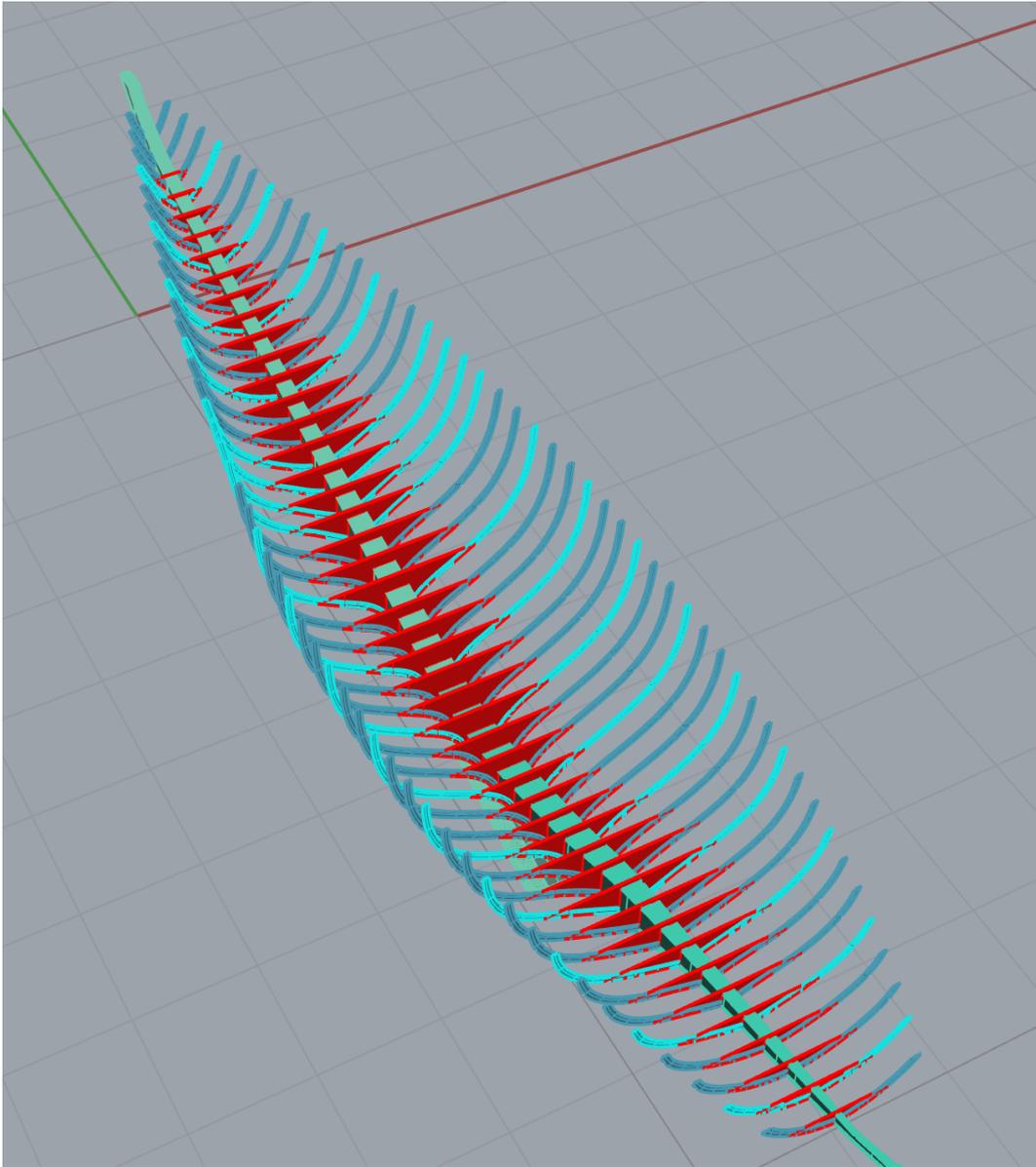


Ilustración 35. Varengas

En algunas secciones se requerirá reforzar dicho conjunto estructural mediante concretos en la unión bao-cuaderna, como es el caso de las secciones en las que se encuentra el mástil, debido a la delicada posición en la que se encuentran, ya que estarán sometidos esfuerzos mucho mayores.

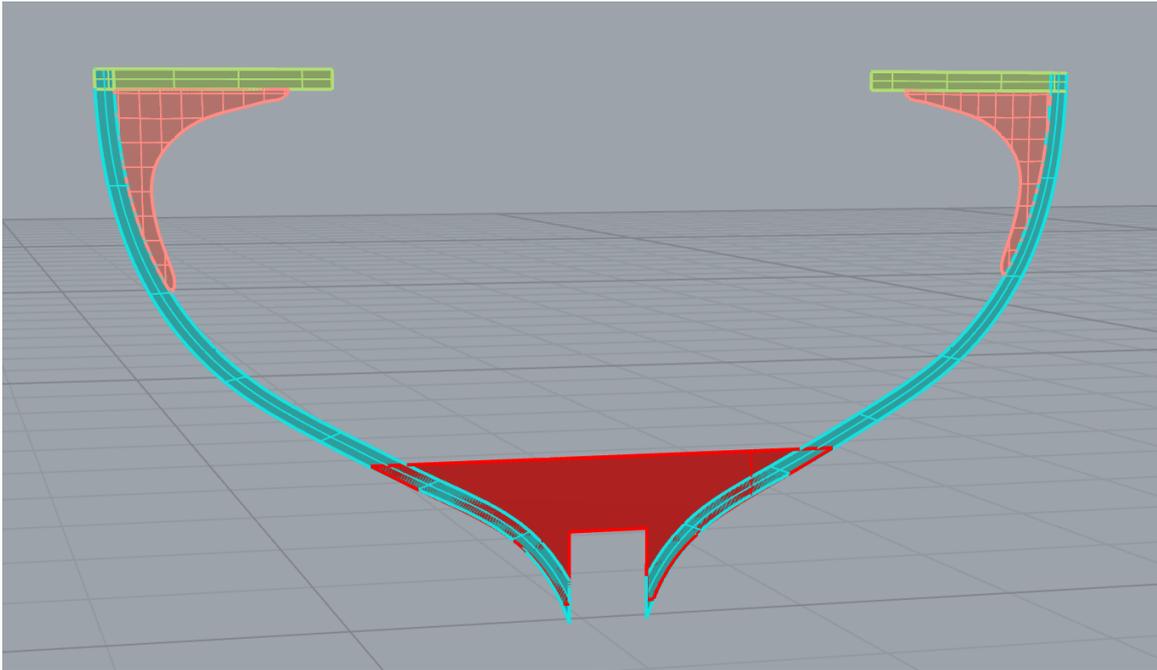


Ilustración 36. Anillo estructural

Estos elementos plancha modelizados para definir los anillos estructurales necesitarán estar en contacto para su posterior análisis, lo que significa que sus espesores se podrán definir cada uno en sentido contrario.

Para que ANSYS software reconozca dos piezas en contacto se necesitará crear una huella en la zona de unión entre los elementos que se quieren unir. Para crear esta huella, se recortarán ambos elementos, uno con respecto al otro. Por ejemplo, se recortarán los baos con respecto a las cuadernas y se unirán de nuevo, para después se recortarán las cuadernas con respecto a los baos y posteriormente se procederá a su pegado nuevamente.

3.3.6. Base del Mástil y Mástil.

En última instancia, se procederá a dibujar el mástil y los elementos de sujeción del mismo. El palo del barco irá encajado en una base maciza, la cual estará fijada a una cubierta sobre las varengas.

Tanto el mástil como la base de este, son elementos de gran espesor que estarán sometidos a importantes esfuerzos y por ello se definirán como sólidos. En un velero lastrado normal, la presión acumulada en la base del palo, proveniente de los stays, obenques y drizas en tensión, pueden alcanzar un valor que doble el desplazamiento del barco.

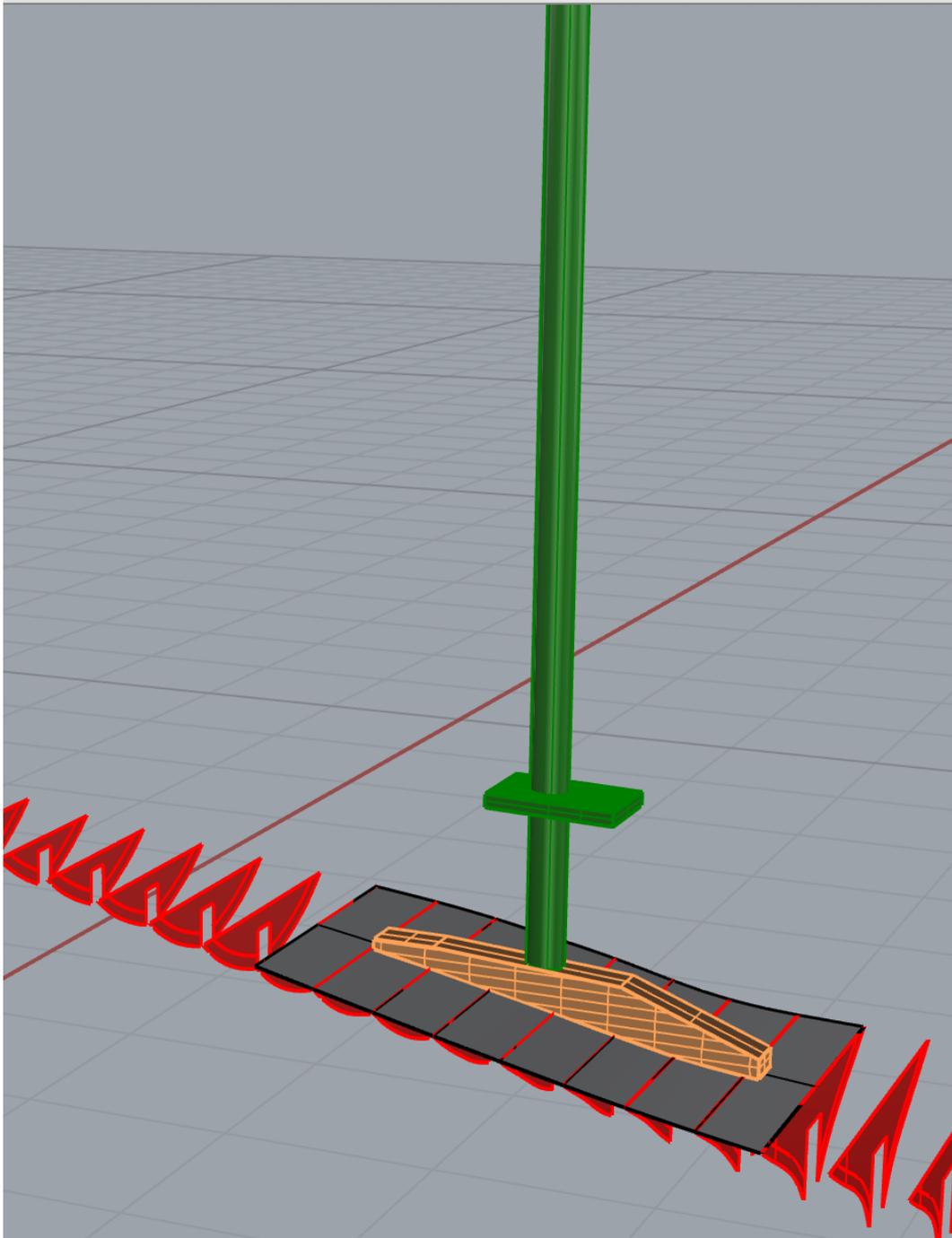


Ilustración 37. Estructura del mástil

Finalmente, todo lo descrito anteriormente, compone el modelo del R-Boat Pirate terminado y listo para su inserción a ANSYS

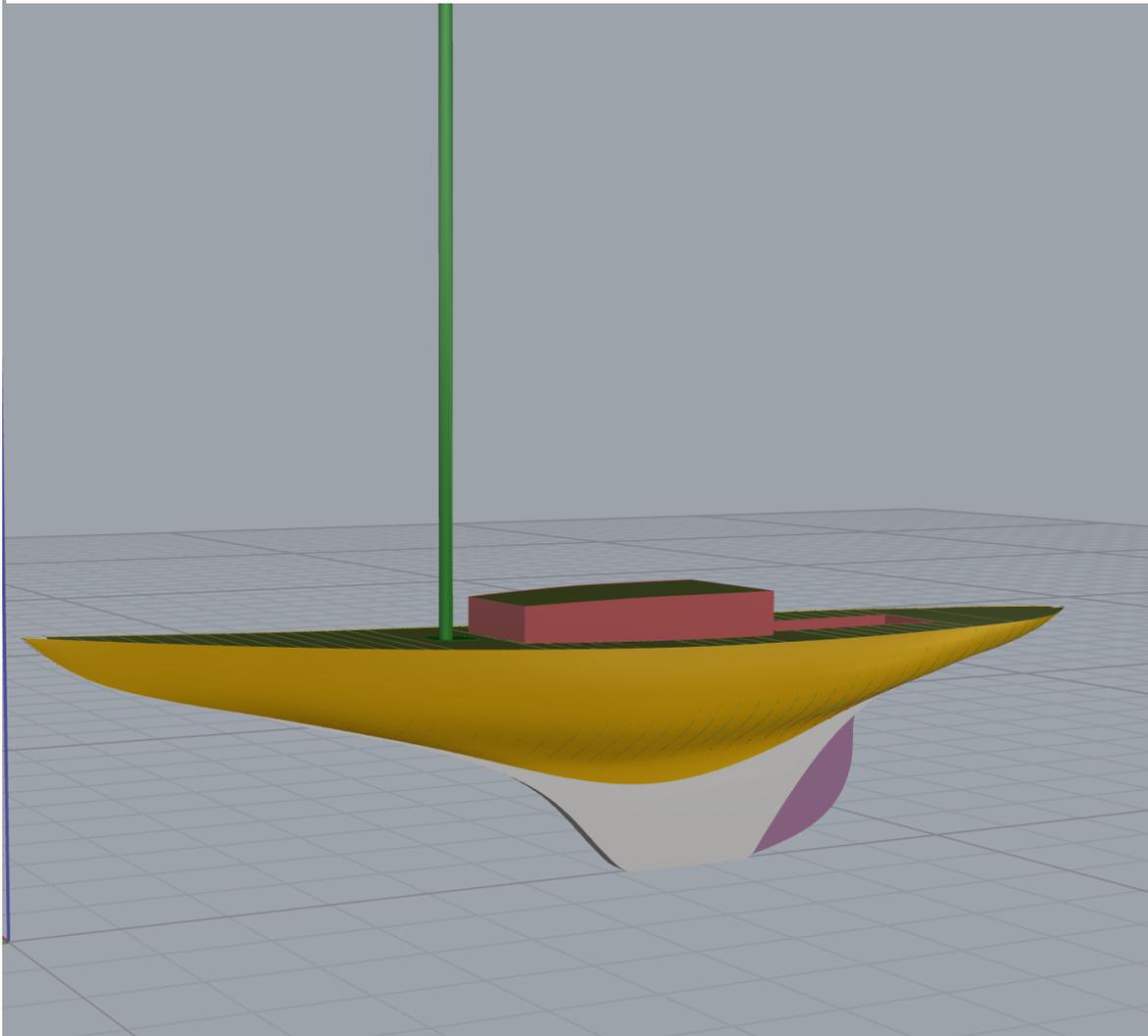


Ilustración 38. Modelo R-Boat Pirate

3.3.7. Modelado del estado de carga: Quebranto

Los estados de carga a analizar en este proyecto serán dos, con la mar en calma y en ola. De las dos condiciones en ola, la más desfavorable es cuando el barco navega perpendicularmente a estas olas y la sección media del barco se encuentra sobre la cresta o el seno de la ola. En este proyecto se analizará cuando el barco se encuentra sobre la cresta de la ola, estado de quebranto.

Para una correcta aplicación de la carga hidrostática que genera la ola sobre el casco del velero, lo que se puede hacer, con anterioridad, es una partición del modelo del caso con la forma troncoidal de la ola. Así pues, se dibujará un plano ola que atraviese el casco y se procederá a su división.

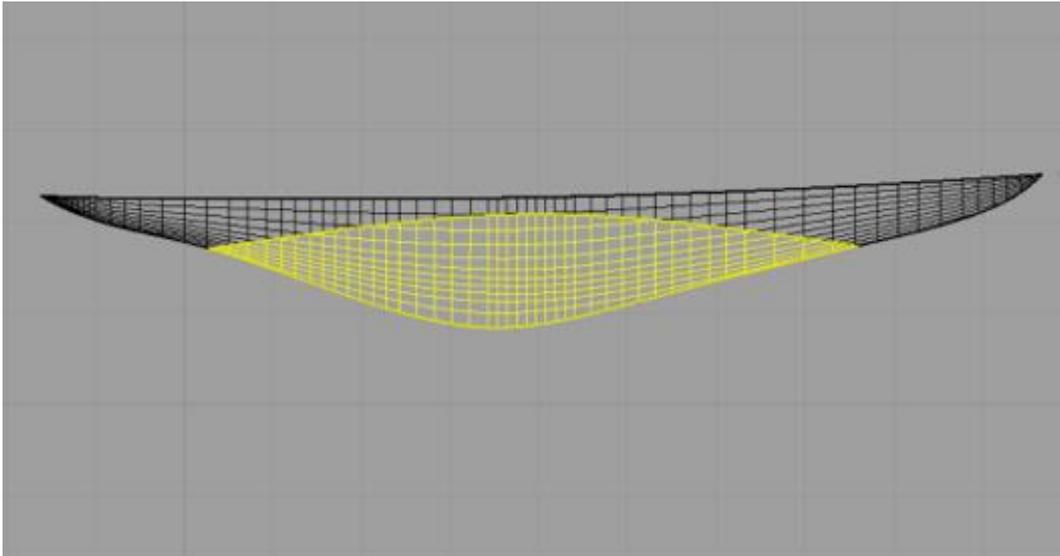


Ilustración 39. Barco con ola en Quebranto

4. ANÁLISIS GLOBAL POR ELEMENTOS FINITOS MEDIANTE ANSYS

4.1. Introducción

En este capítulo se procede a la descripción del cálculo mediante el método de elementos finitos de la estructura de la embarcación sometida a estudio. R-Boat Pirate es un barco de madera clásico que tiene la peculiaridad de poseer estructura, casco y quilla íntegramente de madera, por lo que se deberá considerar material ortotrópico. Se define material ortotrópico cuando sus propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares entre sí. Esto llevará a una definición diferente de cada una de sus propiedades mecánicas en cada uno de sus ejes ortogonales, así como la correcta orientación simulando la dirección de los anillos de la madera.

Tras la revisión bibliográfica del estado del arte contemplada en este proyecto, se conoce el comportamiento de la madera, así como la aplicación de herramientas de cálculo (como es el ANSYS) para calcular el comportamiento global de la estructura basándonos en las recomendaciones de los reglamentos y en la experiencia adquirida lo largo del tiempo en esta clase de barcos.

En este apartado se demostrará mediante el uso de la herramienta de cálculo ANSYS el comportamiento global de la estructura de madera del velero en dos estados de carga con ola y sin ola. Se describirá y aplicarán las cargas con las condiciones de contorno acorde las normas y reglamentos.

En el proceso de cálculo se exportará la geometría generada en el programa RhinoCeros a ANSYS, donde se establecerán los espesores y se asignarán las propiedades de los materiales correspondientes. Se establecerán los contactos entre los distintos componentes estructurales gracias a las huellas de contacto entre los elementos creados en RhinoCeros. Se empleará contacto “bonded” estableciendo de esta forma las uniones de los componentes estructurales.

Al tratarse de un barco de pequeñas dimensiones, 12 metros de eslora, se permite realizar un mallado homogéneo y uniforme de pequeño tamaño ofreciendo un comportamiento detallado de la estructura y al ser de pequeñas dimensiones, un coste de cálculo relativamente bajo.

4.2. Definición de los materiales

Como se trata de una embarcación compuesta por diferentes maderas habrá que analizar y establecer las propiedades de cada una de ellas. Pero antes hay que analizar cuál es su comportamiento en cada uno de sus ejes

La madera se describe como material ortótropo. Esto es, que tiene únicas e independientes propiedades en cada uno de sus ejes perpendiculares, longitudinal, radial y tangencial. El eje longitudinal “L” es paralelo a la fibra, el eje radial “R” es el perpendicular a los anillos de la madera y el eje tangencial “T” es también perpendicular a las fibras, pero esta vez de forma tangencial a los anillos de la madera.

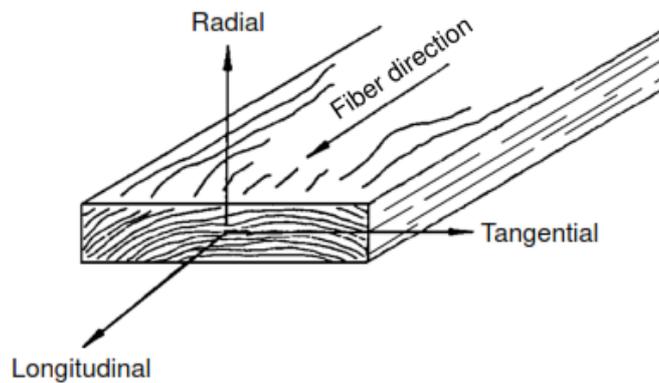


Ilustración 39. Orientación de las fibras de la madera

La orientación y la asignación correcta de los ejes en los distintos elementos estructurales de la embarcación serán de vital importancia ya que las propiedades mecánicas difieren según el eje debido a la propia naturaleza de la madera. Entre los factores que influyen en este aspecto es de gran importancia la orientación de las fibras y la orientación de los anillos. Estas características naturales de la madera, van a depender claramente del modo de corte de los propios elementos estructurales de la materia prima (el árbol), así como del grado de humedad contenido en ella. Para este proyecto se ha considerado madera “seca” con un grado de humedad relativa menor al 12%.

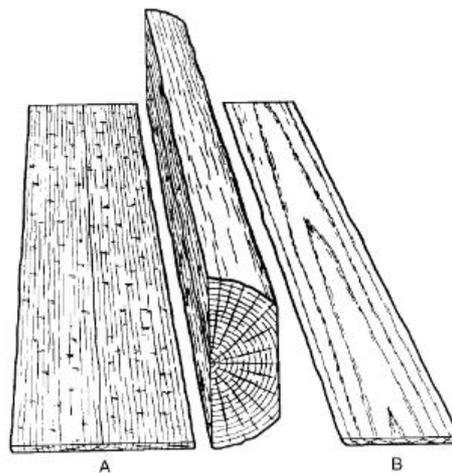


Ilustración 40. Corte de las maderas

Se ha de mencionar también que dependiendo del tipo de madera del que se trate, serán más o menos propensas a ciertas deformaciones, por lo que los cortes se

deberán de realizar considerándose los valores de distorsión dimensional que se producen en ellas. Esto desemboca a emplear, en el mundo de la construcción naval, ciertas maderas específicas, ya que dependiendo de su naturaleza a lo largo del tiempo van a deformarse y según su porosidad, serán más o menos resistentes a la podredumbre debido al ambiente degradado del efecto del mar sobre la madera.

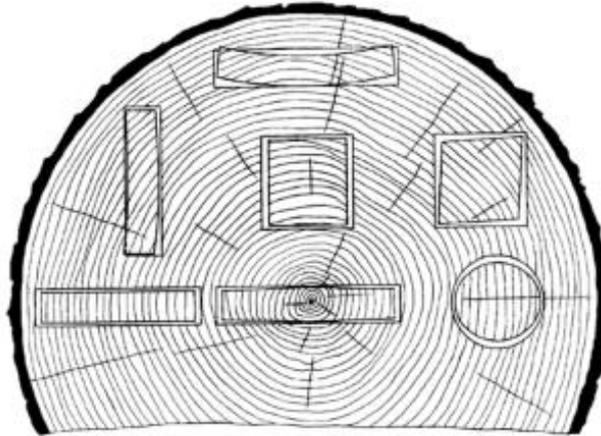


Ilustración 41. Distorsión en las maderas

De esta forma y considerando lo mencionado anteriormente, la embarcación R-Boat Pirate, emplea maderas de las siguientes especies: Roble blanco, Abeto Douglas, Teca y el Cedro rojo para los elementos que componen la totalidad de la estructura del barco.

Para cada una de las maderas que se emplea es necesario definir propiedades mecánicas. Existen 12 constantes elásticas que deben definirse (9 de ellas independientes) para describir el comportamiento elástico de la madera. Se trata de 3 módulos de elasticidad E_l , E_t y E_r en cada uno de sus ejes, 3 módulos de rigidez, uno por eje G_l , G_t y G_r , y 6 coeficientes de Poisson.

La primera propiedad que se define es la densidad, en la referencia [7] de las referencias bibliográficas de este proyecto que se describe en el segundo capítulo, la densidad de diferentes variedades de maderas. A continuación, se muestra una tabla resumen de las maderas empleadas y sus densidades:

MADERA	DENSIDAD
TECA	690 Kg/m ³
DOUGLAS	510 Kg/m ³
CEDRO ROJO	350 Kg/m ³
ROBLE BLANCO	740 Kg/m ³
ABETO SITKA	450 Kg/m ³

Siguiendo con la definición de propiedades hay que definir el coeficiente de Poisson en cada uno de los ejes, es decir en función de la aplicación del esfuerzo. Cuando un miembro está cargado axialmente, la deformación perpendicular en relación a la dirección de la carga, es proporcional a la deformación paralela de la carga. Las relaciones de Poisson se denotan por μ . A continuación, se muestra la tabla resumen de los coeficientes de Poisson para cada una de las maderas:

Species	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Hardwoods						
Ash, white	0.371	0.440	0.684	0.360	0.059	0.051
Aspen, quaking	0.489	0.374	—	0.496	0.054	0.022
Balsa	0.229	0.488	0.665	0.231	0.018	0.009
Basswood	0.364	0.406	0.912	0.346	0.034	0.022
Birch, yellow	0.426	0.451	0.697	0.426	0.043	0.024
Cherry, black	0.392	0.428	0.695	0.282	0.086	0.048
Cottonwood, eastern	0.344	0.420	0.875	0.292	0.043	0.018
Mahogany, African	0.297	0.641	0.604	0.264	0.033	0.032
Mahogany, Honduras	0.314	0.533	0.600	0.326	0.033	0.034
Maple, sugar	0.424	0.476	0.774	0.349	0.065	0.037
Maple, red	0.434	0.509	0.762	0.354	0.063	0.044
Oak, red	0.350	0.448	0.560	0.292	0.064	0.033
Oak, white	0.369	0.428	0.618	0.300	0.074	0.036
Sweetgum	0.325	0.403	0.682	0.309	0.044	0.023
Walnut, black	0.495	0.632	0.718	0.367	0.052	0.036
Yellow-poplar	0.318	0.392	0.703	0.329	0.030	0.019
Softwoods						
Baldcypress	0.338	0.326	0.411	0.356	—	—
Cedar, northern white	0.337	0.340	0.458	0.345	—	—
Cedar, western red	0.378	0.296	0.484	0.403	—	—
Douglas-fir	0.292	0.449	0.390	0.374	0.036	0.029
Fir, subalpine	0.341	0.332	0.437	0.336	—	—
Hemlock, western	0.485	0.423	0.442	0.382	—	—
Larch, western	0.355	0.276	0.389	0.352	—	—
Pine						
Loblolly	0.328	0.292	0.382	0.362	—	—
Lodgepole	0.316	0.347	0.469	0.381	—	—
Longleaf	0.332	0.365	0.384	0.342	—	—
Pond	0.280	0.364	0.389	0.320	—	—
Ponderosa	0.337	0.400	0.426	0.359	—	—
Red	0.347	0.315	0.408	0.308	—	—
Slash	0.392	0.444	0.447	0.387	—	—
Sugar	0.356	0.349	0.428	0.358	—	—
Western white	0.329	0.344	0.410	0.334	—	—
Redwood	0.360	0.346	0.373	0.400	—	—
Spruce, Sitka	0.372	0.467	0.435	0.245	0.040	0.025
Spruce, Engelmann	0.422	0.462	0.530	0.255	0.083	0.058

Ilustración 42. Coeficientes de Poisson madera 12% de humedad

La elasticidad define la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas se eliminan. Cuando se supera el valor de tensión se produce la plastificación o rotura del material. En materiales ortotrópicos es necesario definir en cada una de las direcciones principales según la orientación de las fibras de la madera, cada uno de los límites elásticos E_l , E_r y E_t , longitudinal, tangencial y radial.

Los módulos de elasticidad se determinan en función del E_l y los coeficientes de Poisson se obtienen los módulos de elasticidad E_t y E_r . A continuación, se muestra la tabla de propiedades mecánicas de las principales maderas estructurales con los valores de E_l .

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ m ⁻³)						
Hardwoods											
Alder, red	Green	0.37	45,000	8,100	55	560	20,400	1,700	5,300	2,700	2,000
	12%	0.41	68,000	9,500	58	510	40,100	3,000	7,400	2,900	2,600
Ash											
Black	Green	0.45	41,000	7,200	83	840	15,900	2,400	5,900	3,400	2,300
	12%	0.49	87,000	11,000	103	890	41,200	5,200	10,800	4,800	3,800
Blue	Green	0.53	66,000	8,500	101	—	28,800	5,600	10,600	—	—
	12%	0.58	95,000	9,700	99	—	48,100	9,800	14,000	—	—
Green	Green	0.53	66,000	9,700	81	890	29,000	5,000	8,700	4,100	3,900
	12%	0.56	97,000	11,400	92	810	48,800	9,000	13,200	4,800	5,300
Oregon	Green	0.50	52,000	7,800	84	990	24,200	3,700	8,200	4,100	3,500
	12%	0.55	88,000	9,400	99	840	41,600	8,600	12,300	5,000	5,200
White	Green	0.55	66,000	9,900	108	970	27,500	4,600	9,300	4,100	4,300
	12%	0.60	103,000	12,000	115	1,090	51,100	8,000	13,200	6,500	5,900
Aspen											
Bigtooth	Green	0.36	37,000	7,700	39	—	17,200	1,400	5,000	—	—
	12%	0.39	63,000	9,900	53	—	36,500	3,100	7,400	—	—
Quaking	Green	0.35	35,000	5,900	44	560	14,800	1,200	4,600	1,600	1,300
	12%	0.38	58,000	8,100	52	530	29,300	2,600	5,900	1,800	1,600
Basswood, American	Green	0.32	34,000	7,200	37	410	15,300	1,200	4,100	1,900	1,100
	12%	0.37	60,000	10,100	50	410	32,600	2,600	6,800	2,400	1,800
Beech, American	Green	0.56	59,000	9,500	82	1,090	24,500	3,700	8,900	5,000	3,800
	12%	0.64	103,000	11,900	104	1,040	50,300	7,000	13,900	7,000	5,800
Birch											
Paper	Green	0.48	44,000	8,100	112	1,240	16,300	1,900	5,800	2,600	2,500
	12%	0.55	85,000	11,000	110	860	39,200	4,100	8,300	—	4,000
Sweet	Green	0.60	65,000	11,400	108	1,220	25,800	3,200	8,500	3,000	4,300
	12%	0.65	117,000	15,000	124	1,190	58,900	7,400	15,400	6,600	6,500
Yellow	Green	0.55	57,000	10,300	111	1,220	23,300	3,000	7,700	3,000	3,600
	12%	0.62	114,000	13,900	143	1,400	56,300	6,700	13,000	6,300	5,600
Butternut	Green	0.36	37,000	6,700	57	610	16,700	1,500	5,200	3,000	1,700
	12%	0.38	56,000	8,100	57	610	36,200	3,200	8,100	3,000	2,200
Cherry, black	Green	0.47	55,000	9,000	88	840	24,400	2,500	7,800	3,900	2,900
	12%	0.50	85,000	10,300	79	740	49,000	4,800	11,700	3,900	4,200
Chestnut, American	Green	0.40	39,000	6,400	48	610	17,000	2,100	5,500	3,000	1,900
	12%	0.43	59,000	8,500	45	480	36,700	4,300	7,400	3,200	2,400
Cottonwood											
Balsam poplar	Green	0.31	27,000	5,200	29	—	11,700	1,000	3,400	—	—
	12%	0.34	47,000	7,600	34	—	27,700	2,100	5,400	—	—
Black	Green	0.31	34,000	7,400	34	510	15,200	1,100	4,200	1,900	1,100
	12%	0.35	59,000	8,800	46	560	31,000	2,100	7,200	2,300	1,600
Eastern	Green	0.37	37,000	7,000	50	530	15,700	1,400	4,700	2,800	1,500
	12%	0.40	59,000	9,400	51	510	33,900	2,600	6,400	4,000	1,900
Elm											
American	Green	0.46	50,000	7,700	81	970	20,100	2,500	6,900	4,100	2,800
	12%	0.50	81,000	9,200	90	990	38,100	4,800	10,400	4,600	3,700
Rock	Green	0.57	66,000	8,200	137	1,370	26,100	4,200	8,800	—	—
	12%	0.63	102,000	10,600	132	1,420	48,600	8,500	13,200	—	—
Slippery	Green	0.48	55,000	8,500	106	1,190	22,900	2,900	7,700	4,400	2,900
	12%	0.53	90,000	10,300	117	1,140	43,900	5,700	11,200	3,700	3,800
Hackberry	Green	0.49	45,000	6,600	100	1,220	18,300	2,800	7,400	4,300	3,100
	12%	0.53	76,000	8,200	88	1,090	37,500	6,100	11,000	4,000	3,900

Ilustración 43. Tabla propiedades mecánicas maderas

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ m ⁻³)						
Hickory, pecan											
Bitternut	Green	0.60	71,000	9,700	138	1,680	31,500	5,500	8,500	—	—
	12%	0.66	118,000	12,300	125	1,680	62,300	11,600	—	—	—
Nutmeg	Green	0.56	63,000	8,900	157	1,370	27,400	5,200	7,100	—	—
	12%	0.60	114,000	11,700	173	—	47,600	10,800	—	—	—
Pecan	Green	0.60	68,000	9,400	101	1,350	27,500	5,400	10,200	4,700	5,800
	12%	0.66	94,000	11,900	95	1,120	54,100	11,900	14,300	—	8,100
Water	Green	0.61	74,000	10,800	130	1,420	32,100	6,100	9,900	—	—
	12%	0.62	123,000	13,900	133	1,350	59,300	10,700	—	—	—
Hickory, true^d											
Mockernut	Green	0.64	77,000	10,800	180	2,240	30,900	5,600	8,800	—	6,400
	12%	0.72	132,000	15,300	156	1,960	61,600	11,900	12,000	—	8,800
Pignut	Green	0.66	81,000	11,400	219	2,260	33,200	6,300	9,400	—	6,800
	12%	0.75	139,000	15,600	210	1,880	63,400	13,700	14,800	—	9,500
Shagbark	Green	0.64	76,000	10,800	163	1,880	31,600	5,800	10,500	—	6,500
	12%	0.72	139,000	14,900	178	1,700	63,500	12,100	16,800	—	8,400
Shellbark	Green	0.62	72,000	9,200	206	2,640	27,000	5,600	8,200	—	7,400
	12%	0.69	125,000	13,000	163	2,240	55,200	12,400	14,500	—	8,100
Honeylocust	Green	0.60	70,000	8,900	87	1,190	30,500	7,900	11,400	6,400	6,200
	12%	—	101,000	11,200	92	1,190	51,700	12,700	15,500	6,200	7,000
Locust, black	Green	0.66	95,000	12,800	106	1,120	46,900	8,000	12,100	5,300	7,000
	12%	0.69	134,000	14,100	127	1,450	70,200	12,600	17,100	4,400	7,600
Magnolia											
Cucumbertree	Green	0.44	51,000	10,800	69	760	21,600	2,300	6,800	3,000	2,300
	12%	0.48	85,000	12,500	84	890	43,500	3,900	9,200	4,600	3,100
Southern	Green	0.46	47,000	7,700	106	1,370	18,600	3,200	7,200	4,200	3,300
	12%	0.50	77,000	9,700	88	740	37,600	5,900	10,500	5,100	4,500
Maple											
Bigleaf	Green	0.44	51,000	7,600	60	580	22,300	3,100	7,700	4,100	2,800
	12%	0.48	74,000	10,000	54	710	41,000	5,200	11,900	3,700	3,800
Black	Green	0.52	54,000	9,200	88	1,220	22,500	4,100	7,800	5,000	3,700
	12%	0.57	92,000	11,200	86	1,020	46,100	7,000	12,500	4,600	5,200
Red	Green	0.49	53,000	9,600	79	810	22,600	2,800	7,900	—	3,100
	12%	0.54	92,000	11,300	86	810	45,100	6,900	12,800	—	4,200
Silver	Green	0.44	40,000	6,500	76	740	17,200	2,600	7,200	3,900	2,600
	12%	0.47	61,000	7,900	57	640	36,000	5,100	10,200	3,400	3,100
Sugar	Green	0.56	65,000	10,700	92	1,020	27,700	4,400	10,100	—	4,300
	12%	0.63	109,000	12,600	114	990	54,000	10,100	16,100	—	6,400
Oak, red											
Black	Green	0.56	57,000	8,100	84	1,020	23,900	4,900	8,400	—	4,700
	12%	0.61	96,000	11,300	94	1,040	45,000	6,400	13,200	—	5,400
Cherrybark	Green	0.61	74,000	12,300	101	1,370	31,900	5,200	9,100	5,500	5,500
	12%	0.68	125,000	15,700	126	1,240	60,300	8,600	13,800	5,800	6,600
Laurel	Green	0.56	54,000	9,600	77	990	21,900	3,900	8,100	5,300	4,400
	12%	0.63	87,000	11,700	81	990	48,100	7,300	12,600	5,400	5,400
Northern red	Green	0.56	57,000	9,300	91	1,120	23,700	4,200	8,300	5,200	4,400
	12%	0.63	99,000	12,500	100	1,090	46,600	7,000	12,300	5,500	5,700
Pin	Green	0.58	57,000	9,100	97	1,220	25,400	5,000	8,900	5,500	4,800
	12%	0.63	97,000	11,900	102	1,140	47,000	7,000	14,300	7,200	6,700
Scarlet	Green	0.60	72,000	10,200	103	1,370	28,200	5,700	9,700	4,800	5,300
	12%	0.67	120,000	13,200	141	1,350	57,400	7,700	13,000	6,000	6,200
Southern red	Green	0.52	48,000	7,900	55	740	20,900	3,800	6,400	3,300	3,800
	12%	0.59	75,000	10,300	65	660	42,000	6,000	9,600	3,500	4,700
Water	Green	0.56	61,000	10,700	77	990	25,800	4,300	8,500	5,700	4,500
	12%	0.63	106,000	13,900	148	1,120	46,700	7,000	13,900	6,300	5,300

Ilustración 44. Tabla propiedades mecánicas maderas

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ m ⁻³)						
Cedar—con.											
Port-Orford	Green	0.39	45,000	9,000	51	530	21,600	2,100	5,800	1,200	1,700
	12%	0.43	88,000	11,700	63	710	43,100	5,000	9,400	2,800	2,800
Western redcedar	Green	0.31	35,900	6,500	34	430	19,100	1,700	5,300	1,600	1,200
	12%	0.32	51,700	7,700	40	430	31,400	3,200	6,800	1,500	1,600
Yellow	Green	0.42	44,000	7,900	63	690	21,000	2,400	5,800	2,300	2,000
	12%	0.44	77,000	9,800	72	740	43,500	4,300	7,800	2,500	2,600
Douglas-fir ^c											
Coast	Green	0.45	53,000	10,800	52	660	26,100	2,600	6,200	2,100	2,200
	12%	0.48	85,000	13,400	68	790	49,900	5,500	7,800	2,300	3,200
Interior West	Green	0.46	53,000	10,400	50	660	26,700	2,900	6,500	2,000	2,300
	12%	0.50	87,000	12,600	73	810	51,200	5,200	8,900	2,400	2,900
Interior North	Green	0.45	51,000	9,700	56	560	23,900	2,500	6,600	2,300	1,900
	12%	0.48	90,000	12,300	72	660	47,600	5,300	9,700	2,700	2,700
Interior South	Green	0.43	47,000	8,000	55	380	21,400	2,300	6,600	1,700	1,600
	12%	0.46	82,000	10,300	62	510	43,000	5,100	10,400	2,300	2,300
Fir											
Balsam	Green	0.33	38,000	8,600	32	410	18,100	1,300	4,600	1,200	1,300
	12%	0.35	63,000	10,000	35	510	36,400	2,800	6,500	1,200	1,700
California red	Green	0.36	40,000	8,100	44	530	19,000	2,300	5,300	2,600	1,600
	12%	0.38	72,400	10,300	61	610	37,600	4,200	7,200	2,700	2,200
Grand	Green	0.35	40,000	8,600	39	560	20,300	1,900	5,100	1,700	1,600
	12%	0.37	61,400	10,800	52	710	36,500	3,400	6,200	1,700	2,200
Noble	Green	0.37	43,000	9,500	41	480	20,800	1,900	5,500	1,600	1,300
	12%	0.39	74,000	11,900	61	580	42,100	3,600	7,200	1,500	1,800
Pacific silver	Green	0.40	44,000	9,800	41	530	21,600	1,500	5,200	1,700	1,400
	12%	0.43	75,800	12,100	64	610	44,200	3,100	8,400	—	1,900
Subalpine	Green	0.31	34,000	7,200	—	—	15,900	1,300	4,800	—	1,200
	12%	0.32	59,000	8,900	—	—	33,500	2,700	7,400	—	1,600
White	Green	0.37	41,000	8,000	39	560	20,000	1,900	5,200	2,100	1,500
	12%	0.39	68,000	10,300	50	510	40,000	3,700	7,600	2,100	2,100
Hemlock											
Eastern	Green	0.38	44,000	7,400	46	530	21,200	2,500	5,900	1,600	1,800
	12%	0.40	61,000	8,300	47	530	37,300	4,500	7,300	—	2,200
Mountain	Green	0.42	43,000	7,200	76	810	19,900	2,600	6,400	2,300	2,100
	12%	0.45	79,000	9,200	72	810	44,400	5,900	10,600	—	3,000
Western	Green	0.42	46,000	9,000	48	560	23,200	1,900	5,900	2,000	1,800
	12%	0.45	78,000	11,300	57	580	49,000	3,800	8,600	2,300	2,400
Larch, western	Green	0.48	53,000	10,100	71	740	25,900	2,800	6,000	2,300	2,300
	12%	0.52	90,000	12,900	87	890	52,500	6,400	9,400	3,000	3,700
Pine											
Eastern white	Green	0.34	34,000	6,800	36	430	16,800	1,500	4,700	1,700	1,300
	12%	0.35	59,000	8,500	47	460	33,100	3,000	6,200	2,100	1,700
Jack	Green	0.40	41,000	7,400	50	660	20,300	2,100	5,200	2,500	1,800
	12%	0.43	68,000	9,300	57	690	39,000	4,000	8,100	2,900	2,500
Loblolly	Green	0.47	50,000	9,700	57	760	24,200	2,700	5,900	1,800	2,000
	12%	0.51	88,000	12,300	72	760	49,200	5,400	9,600	3,200	3,100
Lodgepole	Green	0.38	38,000	7,400	39	510	18,000	1,700	4,700	1,500	1,500
	12%	0.41	65,000	9,200	47	510	37,000	4,200	6,100	2,000	2,100
Longleaf	Green	0.54	59,000	11,000	61	890	29,800	3,300	7,200	2,300	2,600
	12%	0.59	100,000	13,700	81	860	58,400	6,600	10,400	3,200	3,900
Pitch	Green	0.47	47,000	8,300	63	—	20,300	2,500	5,900	—	—
	12%	0.52	74,000	9,900	63	—	41,000	5,600	9,400	—	—

Ilustración 46. Tabla propiedades mecánicas maderas

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ m ⁻³)						
Pine—con.											
Pond	Green	0.51	51,000	8,800	52	—	25,200	3,000	6,500	—	—
	12%	0.56	80,000	12,100	59	—	52,000	6,300	9,500	—	—
Ponderosa	Green	0.38	35,000	6,900	36	530	16,900	1,900	4,800	2,100	1,400
	12%	0.40	65,000	8,900	49	480	36,700	4,000	7,800	2,900	2,000
Red	Green	0.41	40,000	8,800	42	660	18,800	1,800	4,800	2,100	1,500
	12%	0.46	76,000	11,200	68	660	41,900	4,100	8,400	3,200	2,500
Sand	Green	0.46	52,000	7,000	66	—	23,700	3,100	7,900	—	—
	12%	0.48	80,000	9,700	66	—	47,700	5,800	—	—	—
Shortleaf	Green	0.47	51,000	9,600	57	760	24,300	2,400	6,300	2,200	2,000
	12%	0.51	90,000	12,100	76	840	50,100	5,700	9,600	3,200	3,100
Slash	Green	0.54	60,000	10,500	66	—	26,300	3,700	6,600	—	—
	12%	0.59	112,000	13,700	91	—	56,100	7,000	11,600	—	—
Spruce	Green	0.41	41,000	6,900	—	—	19,600	1,900	6,200	—	2,000
	12%	0.44	72,000	8,500	—	—	39,000	5,000	10,300	—	2,900
Sugar	Green	0.34	34,000	7,100	37	430	17,000	1,400	5,000	1,900	1,200
	12%	0.36	57,000	8,200	38	460	30,800	3,400	7,800	2,400	1,700
Virginia	Green	0.45	50,000	8,400	75	860	23,600	2,700	6,100	2,800	2,400
	12%	0.48	90,000	10,500	94	810	46,300	6,300	9,300	2,600	3,300
Western white	Green	0.36	32,000	8,200	34	480	16,800	1,300	4,700	1,800	1,200
	12%	0.35	67,000	10,100	61	580	34,700	3,200	7,200	—	1,900
Redwood											
Old-growth	Green	0.38	52,000	8,100	51	530	29,000	2,900	5,500	1,800	1,800
	12%	0.40	69,000	9,200	48	480	42,400	4,800	6,500	1,700	2,100
Young-growth	Green	0.34	41,000	6,600	39	410	21,400	1,900	6,100	2,100	1,600
	12%	0.35	54,000	7,600	36	380	36,000	3,600	7,600	1,700	1,900
Spruce											
Black	Green	0.38	42,000	9,500	51	610	19,600	1,700	5,100	700	1,500
	12%	0.42	74,000	11,100	72	580	41,100	3,800	8,500	—	2,400
Engelmann	Green	0.33	32,000	7,100	35	410	15,000	1,400	4,400	1,700	1,150
	12%	0.35	64,000	8,900	44	460	30,900	2,800	8,300	2,400	1,750
Red	Green	0.37	41,000	9,200	48	460	18,800	1,800	5,200	1,500	1,600
	12%	0.40	74,000	11,400	58	640	38,200	3,800	8,900	2,400	2,200
Sitka	Green	0.37	39,000	8,500	43	610	18,400	1,900	5,200	1,700	1,600
	12%	0.40	70,000	10,800	65	640	38,700	4,000	7,900	2,600	2,300
White	Green	0.33	34,000	7,900	41	560	16,200	1,400	4,400	1,500	1,200
	12%	0.36	65,000	9,600	53	510	35,700	3,000	6,700	2,500	1,800
Tamarack	Green	0.49	50,000	8,500	50	710	24,000	2,700	5,900	1,800	1,700
	12%	0.53	80,000	11,300	49	580	49,400	5,500	8,800	2,800	2,600

^aResults of tests on clear specimens in the green and air-dried conditions, converted to metric units directly from Table 5-3b. Definition of properties: impact bending is height of drop that causes complete failure, using 0.71-kg (50-lb) hammer; compression parallel to grain is also called maximum crushing strength; compression perpendicular to grain is fiber stress at proportional limit; shear is maximum shearing strength; tension is maximum tensile strength; and side hardness is hardness measured when load is perpendicular to grain.

^bSpecific gravity is based on weight when oven-dry and volume when green or at 12% moisture content.

^cModulus of elasticity measured from a simply supported, center-loaded beam, on a span depth ratio of 14/1. To correct for shear deflection, the modulus can be increased by 10%.

^dValues for side hardness of the true hickories are from Bendtsen and Ethington (1975).

^eCoast Douglas-fir is defined as Douglas-fir growing in Oregon and Washington State west of the Cascade Mountains summit. Interior West includes California and all counties in Oregon and Washington east of, but adjacent to, the Cascade summit; Interior North, the remainder of Oregon and Washington plus Idaho, Montana, and Wyoming; and Interior South, Utah, Colorado, Arizona, and New Mexico.

Ilustración 47. Tabla propiedades mecánicas maderas

Conocidos los valores de E_I y los coeficientes de Poisson se obtienen los valores del resto de parámetros como E_t y E_r , así como los módulos de rigidez G_I , G_r y G_t . En la Ilustración 48 se muestra la relación entre Poisson y E_I , dando los valores necesarios para definir correctamente las maderas empleadas en la embarcación.

Species	E_T/E_L	E_R/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
Hardwoods					
Ash, white	0.080	0.125	0.109	0.077	—
Balsa	0.015	0.046	0.054	0.037	0.005
Basswood	0.027	0.066	0.056	0.046	—
Birch, yellow	0.050	0.078	0.074	0.068	0.017
Cherry, black	0.086	0.197	0.147	0.097	—
Cottonwood, eastern	0.047	0.083	0.076	0.052	—
Mahogany, African	0.050	0.111	0.088	0.059	0.021
Mahogany, Honduras	0.064	0.107	0.066	0.086	0.028
Maple, sugar	0.065	0.132	0.111	0.063	—
Maple, red	0.067	0.140	0.133	0.074	—
Oak, red	0.082	0.154	0.089	0.081	—
Oak, white	0.072	0.163	0.086	—	—
Sweetgum	0.050	0.115	0.089	0.061	0.021
Walnut, black	0.056	0.106	0.085	0.062	0.021
Yellow-poplar	0.043	0.092	0.075	0.069	0.011
Softwoods					
Baldcypress	0.039	0.084	0.063	0.054	0.007
Cedar, northern white	0.081	0.183	0.210	0.187	0.015
Cedar, western red	0.055	0.081	0.087	0.086	0.005
Douglas-fir	0.050	0.068	0.064	0.078	0.007
Fir, subalpine	0.039	0.102	0.070	0.058	0.006
Hemlock, western	0.031	0.058	0.038	0.032	0.003
Larch, western	0.065	0.079	0.063	0.069	0.007
Pine					
Loblolly	0.078	0.113	0.082	0.081	0.013
Lodgepole	0.068	0.102	0.049	0.046	0.005
Longleaf	0.055	0.102	0.071	0.060	0.012
Pond	0.041	0.071	0.050	0.045	0.009
Ponderosa	0.083	0.122	0.138	0.115	0.017
Red	0.044	0.088	0.096	0.081	0.011
Slash	0.045	0.074	0.055	0.053	0.010
Sugar	0.087	0.131	0.124	0.113	0.019
Western white	0.038	0.078	0.052	0.048	0.005
Redwood	0.089	0.087	0.066	0.077	0.011
Spruce, Sitka	0.043	0.078	0.064	0.061	0.003
Spruce, Engelmann	0.059	0.128	0.124	0.120	0.010

* E_L may be approximated by increasing modulus of elasticity values in Table 5-3 by 10%.

Ilustración 48. Modulo elasticidad y módulos de rigidez

Conocidos todos los parámetros se definen las maderas en ANSYS como se muestra a continuación.

Properties of Outline Row 4: Douglas			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	512	kg m... ▾
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	12600	MPa ▾
5	Young's Modulus Y direction	630	MPa ▾
6	Young's Modulus Z direction	856,8	MPa ▾
7	Poisson's Ratio XY	0,45	
8	Poisson's Ratio YZ	0,39	
9	Poisson's Ratio XZ	0,229	
10	Shear Modulus XY	982,8	MPa ▾
11	Shear Modulus YZ	88,2	MPa ▾
12	Shear Modulus XZ	806,4	MPa ▾

Ilustración49. Madera Douglas

Properties of Outline Row 7: Teka			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	690	kg m... ▾
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	10700	MPa ▾
5	Young's Modulus Y direction	460,1	MPa ▾
6	Young's Modulus Z direction	984,4	MPa ▾
7	Poisson's Ratio XY	0,392	
8	Poisson's Ratio YZ	0,329	
9	Poisson's Ratio XZ	0,318	
10	Shear Modulus XY	738,3	MPa ▾
11	Shear Modulus YZ	117,7	MPa ▾
12	Shear Modulus XZ	802,5	MPa ▾

Ilustración 47. Madera teka

Properties of Outline Row 5: Roble blanco			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	740	kg m... ▾
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	12300	MPa ▾
5	Young's Modulus Y direction	885,6	MPa ▾
6	Young's Modulus Z direction	2004	MPa ▾
7	Poisson's Ratio XY	0,428	
8	Poisson's Ratio YZ	0,37	
9	Poisson's Ratio XZ	0,29	
10	Shear Modulus XY	1045,5	MPa ▾
11	Shear Modulus YZ	73,8	MPa ▾
12	Shear Modulus XZ	1057,8	MPa ▾

Ilustración 48. Madera Roble blanco

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	370	kg m...
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	7700	MPa
5	Young's Modulus Y direction	423,5	MPa
6	Young's Modulus Z direction	623,7	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0,296	
8	Poisson's Ratio YZ	0,484	
9	Poisson's Ratio XZ	0,378	
10	Shear Modulus XY	662,2	MPa
11	Shear Modulus YZ	38,5	MPa
12	Shear Modulus XZ	669,9	MPa

Ilustración 49. Madera Cedro rojo

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	450	kg m...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Young's Modulus X direction	9900	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Young's Modulus Y direction	584,1	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Young's Modulus Z direction	772,2	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio XY	0,467		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Poisson's Ratio YZ	0,245		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio XZ	0,372		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Shear Modulus XY	633,6	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus YZ	603,9	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Shear Modulus XZ	29,7	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ilustración 50. Madera abeto Sitka

4.3. Geometría

Tras haber generado la geometría en el programa RhinoCeros se procede a su importación al programa ANSYS para poder ejecutar los cálculos.

Los elementos de la quilla, debido a su espesor serán considerados como sólidos. La quilla, está constituida por varios elementos tal y como se aprecia en la ilustración 51. El motivo por el que se han introducido como elementos separados es que cada uno de los elementos es de una madera distinta con sus propiedades mecánicas particulares por lo que es necesaria su segregación.

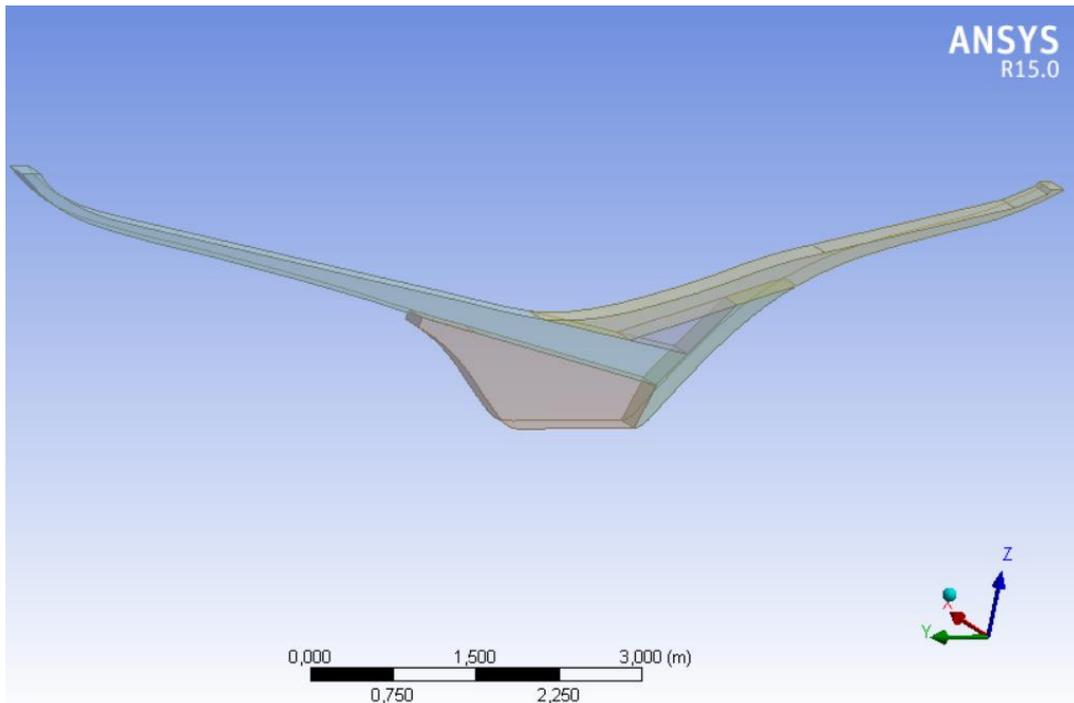


Ilustración 51. Conjunto de la quilla

El timón también se trata de una pieza sólida. Esta parte de la embarcación no tiene requisitos estructurales, pero al ser una pieza de gran tamaño y gran espesor de madera, el peso que aporta en la zona de popa de la embarcación es considerable por lo que se considerará en el cálculo. En la siguiente imagen se muestra su ubicación.

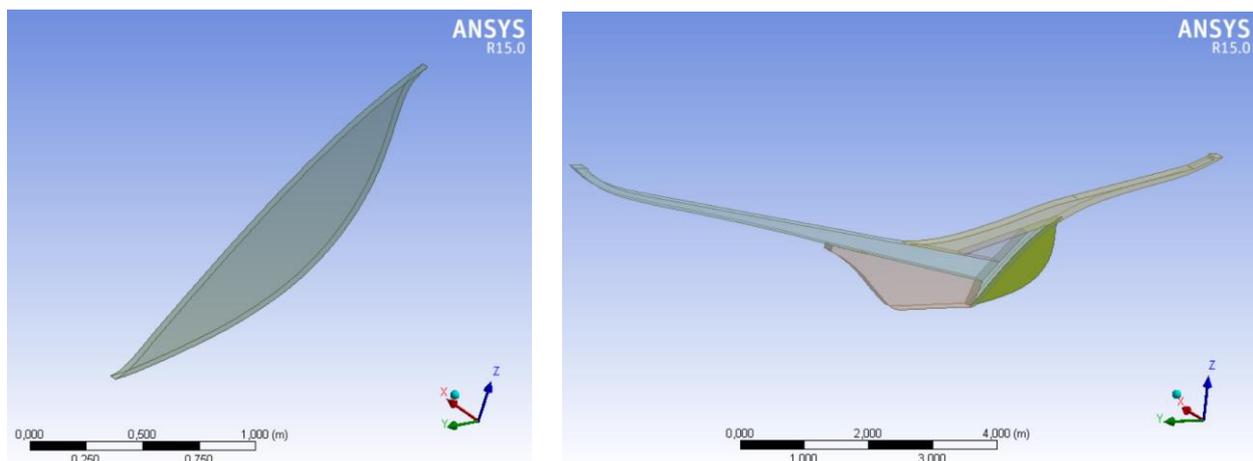


Ilustración 52. Timón

Los siguientes elementos estructurales serán tipo “Shell” a los que se les asignará posteriormente espesores y un mallado uniforme. De esta forma se simplifica el proceso de cálculo.

Una de las partes más importantes de la embarcación es el forro del casco. Sobre él se aplican las cargas de presión hidrostática y el cual constituye un cierre estanco que engloba la totalidad de los elementos estructurales del buque. El casco, tal y como se ha visto con anterioridad ha sido dividido en dos partes (siendo un único cuerpo) para más adelante poder calcular el comportamiento de la embarcación con la condición de carga situado sobre la cresta de la ola.

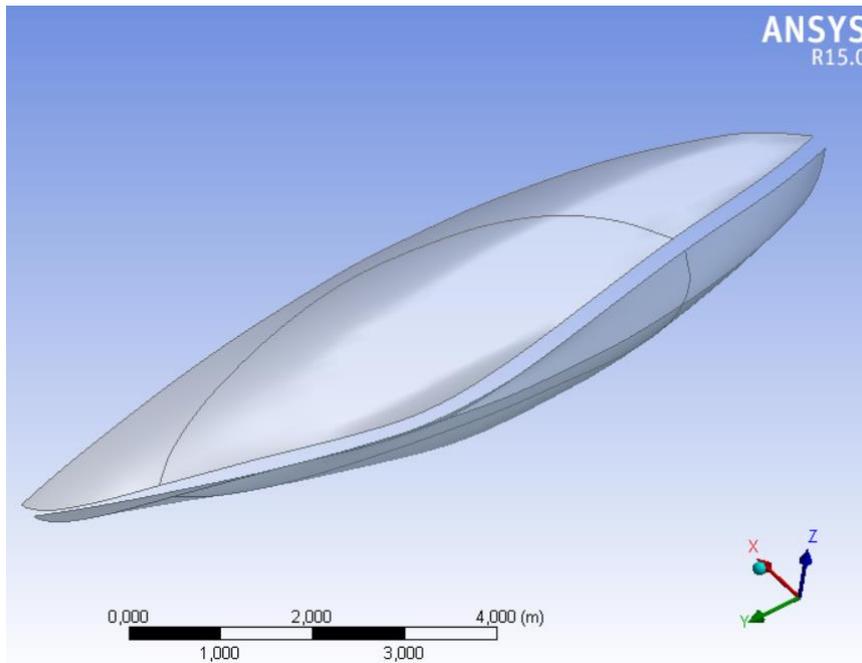


Ilustración 53. Casco

Siguiendo con los elementos modelizados, se introduce las varengas. Estos elementos están dispuestos en el fondo de la embarcación siendo los elementos de transición de carga entre el casco y la armadura de la estructura, llamada anillo estructural.

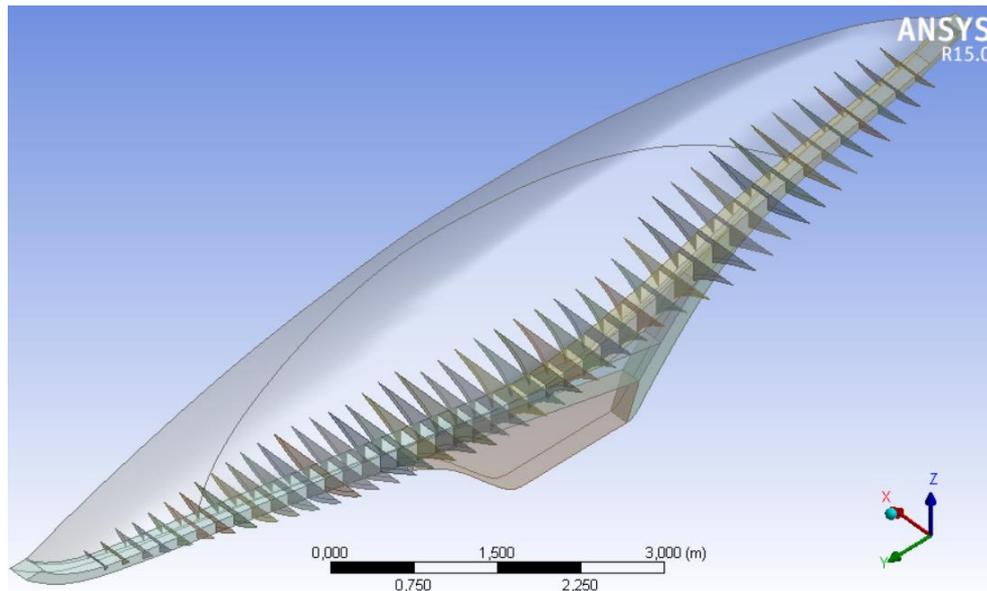


Ilustración 54. Conjunto de quillote

Como se puede observar, en los elementos estructurales que componen el anillo baocuada-varenga, se modelizaron con una huella de contacto que será la parte en unión con el elemento estructural pertinente. A continuación, se muestra el detalle de la huella generada en las varengas.

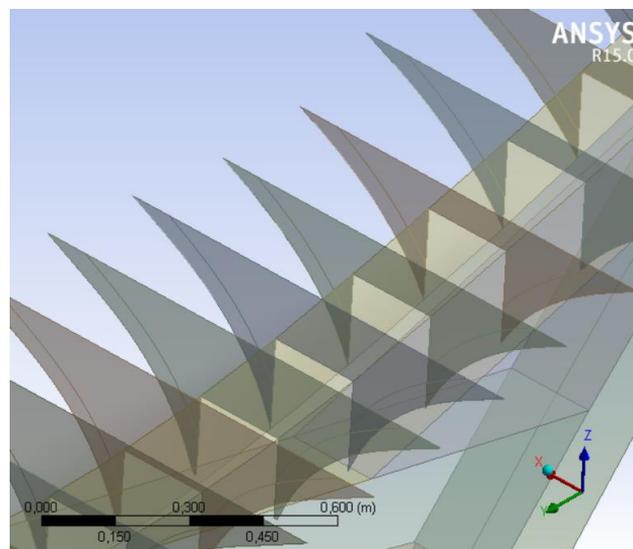


Ilustración 55. Huellas en varengas

Los siguientes elementos a modelizar son las cuadernas. En este tipo de embarcaciones tradicionales existen dos tipos de ellas. Unas simples y otras dobles, estas últimas poseerán mayor espesor que las segundas. Se encontrará con una

cuaderna doble cada tres simples, y también en secciones que necesiten de un mayor refuerzo.

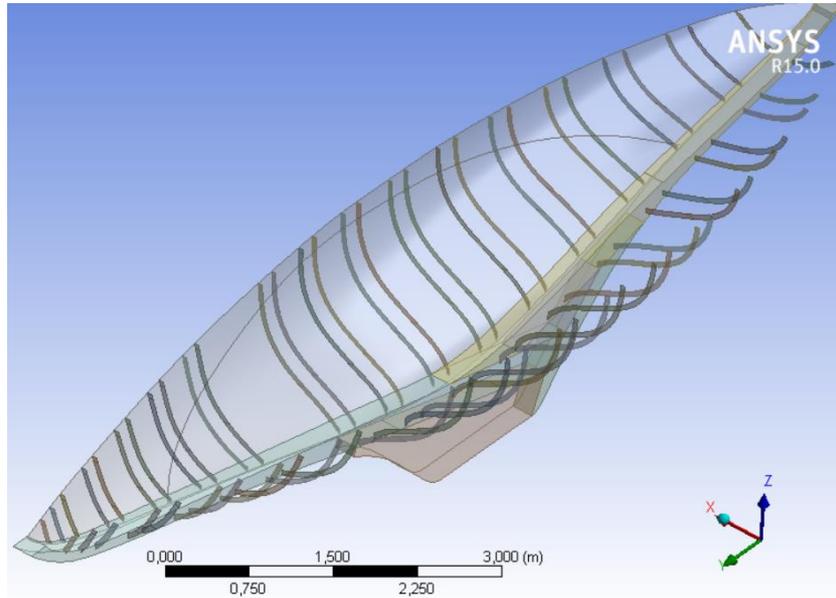


Ilustración 56. Cuadernas simples

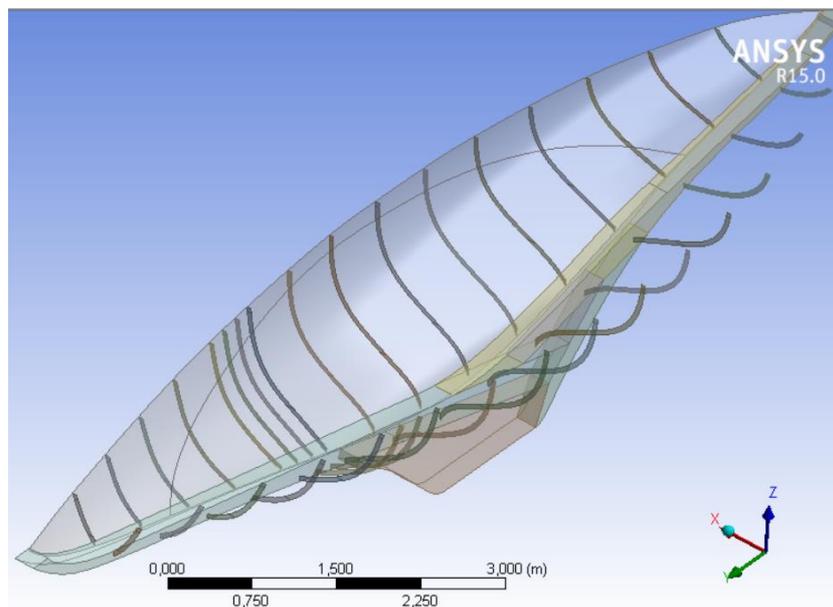


Ilustración 57. Cuadernas dobles

De esta forma el conjunto de las cuadernas dobles y simples, abarca toda la eslora de la embarcación, entre baos y quilla, aportando resistencia en la zona del pantoque y costado de la embarcación. Nuevamente y al ser elementos del anillo estructural, las cuadernas fueron modelizadas con las huellas para establecer el contacto entre los elementos.

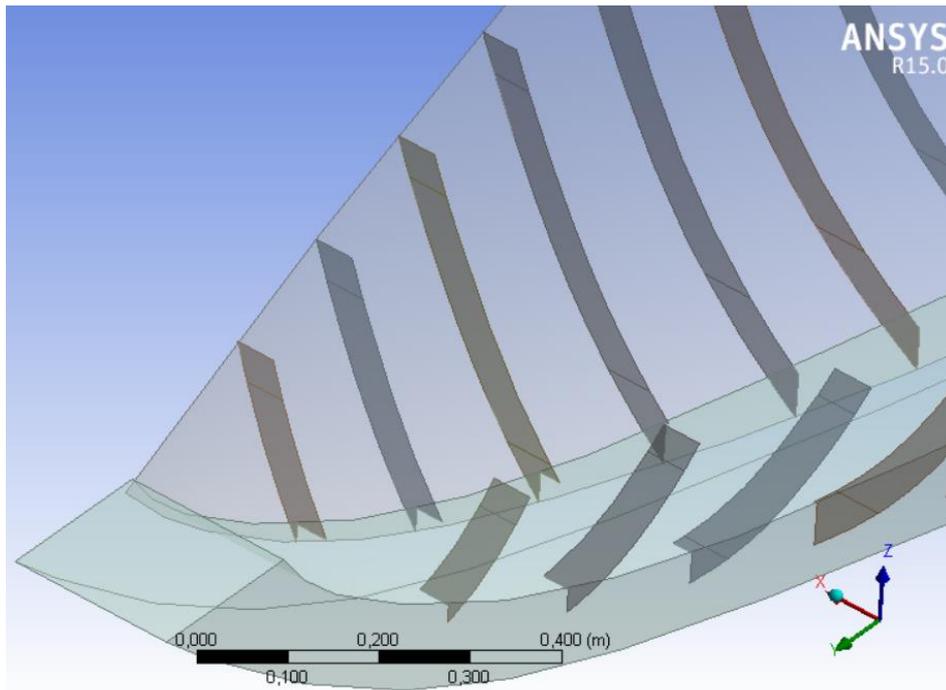


Ilustración 58. Huellas en cuadernas de proa

En la zona del mástil tiene una estructura peculiar. Esto es debido a que es una sección de esfuerzos crítica de la estructura, y también porque se trata de una embarcación histórica, artesanal y de madera. Dispone de una cubierta (listones de madera) posicionada sobre las varengas, y sobre la que se apoya la pieza base del mástil. Esta cubierta tendrá un papel importante en la distribución de esfuerzos generados por el peso del mástil, evitando que una fuerte concentración de tensiones. Es en esta sección también donde se sitúan estratégicamente varias cuadernas dobles aportando mayor resistencia estructural y mayor rigidez en la zona debido al peso extra del mástil y su sistema de anclaje.

A continuación, se muestra la plancha sobre las varengas y el sistema de anclaje de la base del mástil.

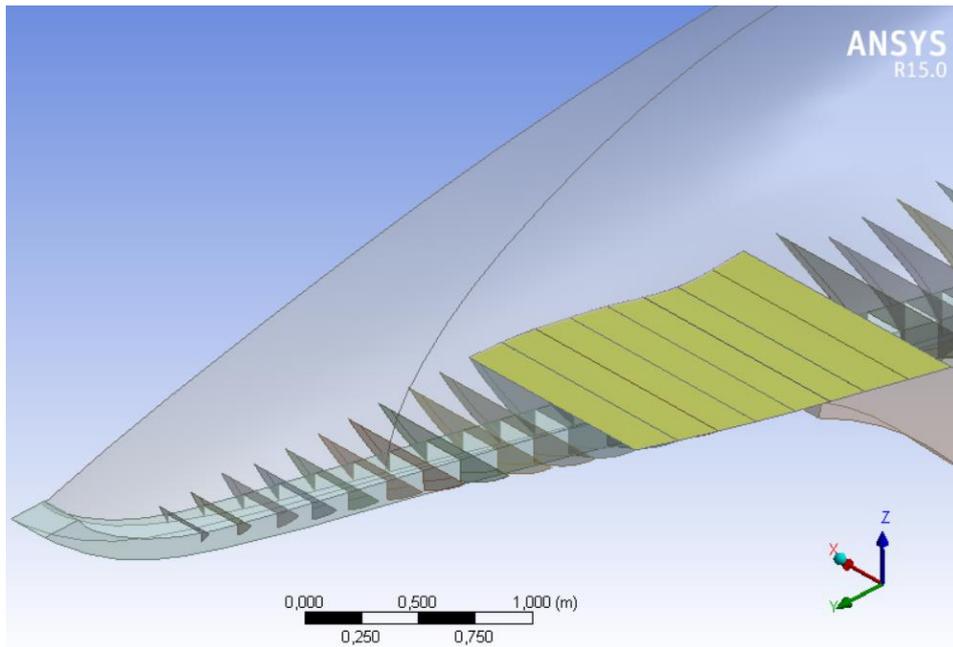


Ilustración 59. Plancha base del mástil

El elemento de sujeción del mástil, en el que se bloquea, es una pieza maciza de madera con un gran peso para poder aguantar las tensiones generadas en la base del mástil. Este elemento se modeliza como sólido al igual que los elementos de la quilla.

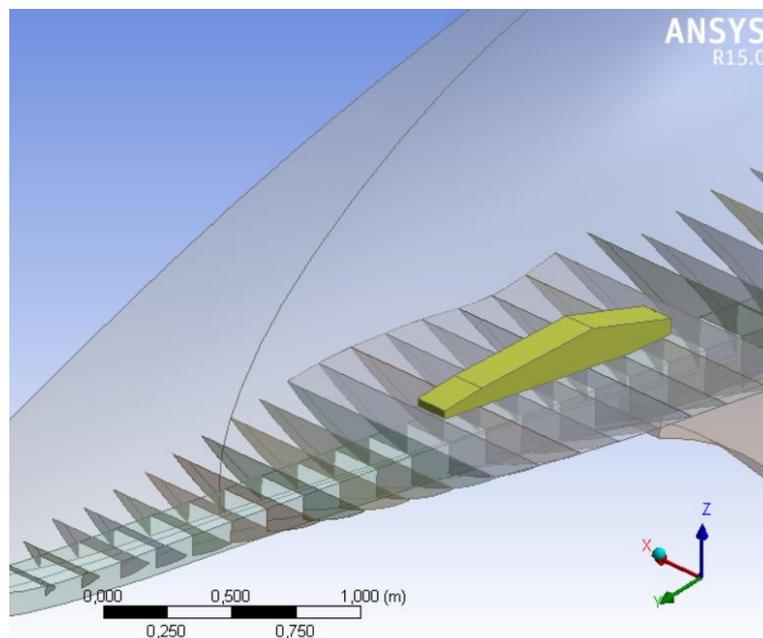


Ilustración 60. Base del mástil

Los siguientes elementos son los baos, que son elementos dispuestos transversalmente, de cuaderna a cuaderna, como refuerzos de las distintas cubiertas y

superestructuras, siendo el cierre superior de los anillos estructurales. Una vez más, estos elementos tendrán la huella de contacto.

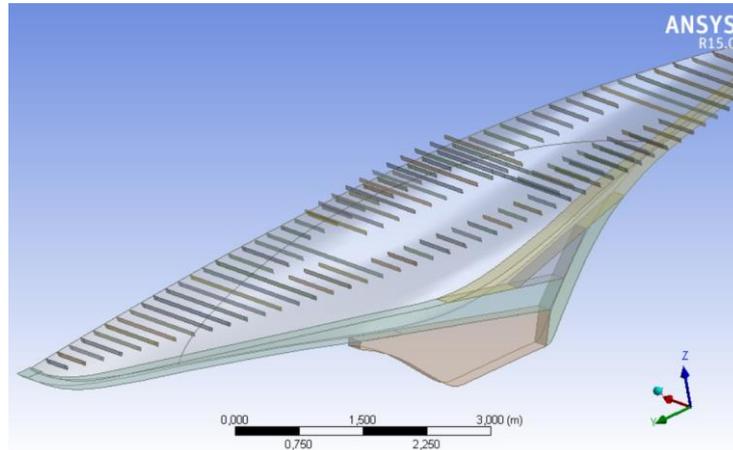


Ilustración 61. Baos

Nótese que existen tres niveles en los que se han introducido los baos, se debe a las características propias de la embarcación, ya que dispone de una cubierta superestructura elevada y una cubierta de bañera en la zona de popa. En ambas partes, los baos se unirán con las brazolas siendo estas últimas con dimensiones suficientes para poder soportar la estructura.

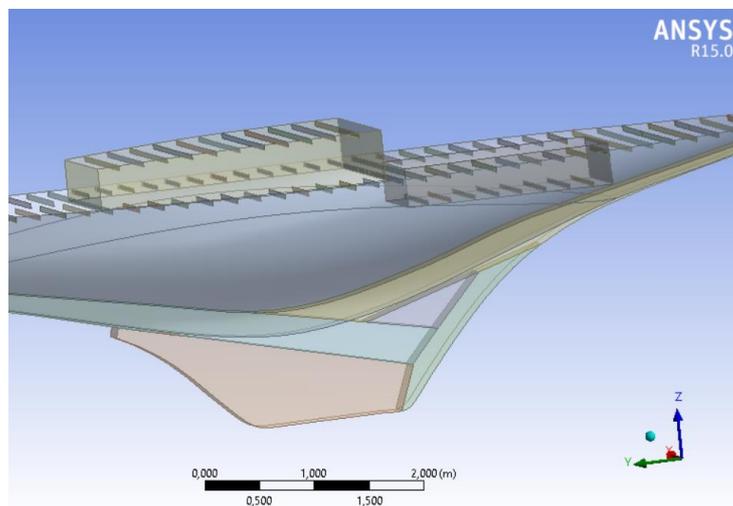


Ilustración 62. Brazolas y baos

Introducidos todos los elementos estructurales que conforman el interior del casco de la embarcación se procede a la introducción de las superficies de cubiertas realizando el cierre de la estructura.

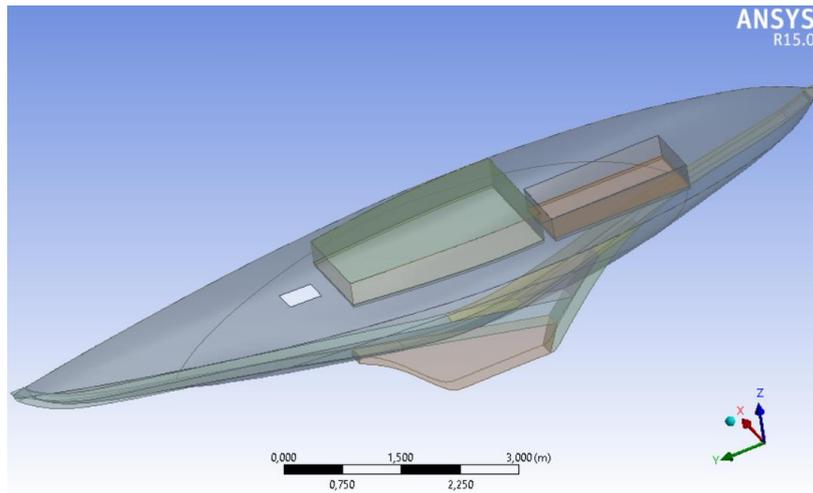


Ilustración 63. Cubiertas

Quedan por definir varios elementos estructurales de refuerzo que se sitúan en posiciones estratégicas sometidas a grandes esfuerzos. Estos refuerzos, concretos, se sitúan entre los baos y las cuadernas, generando una transición de tensiones suave y eliminando la acumulación de las mismas.

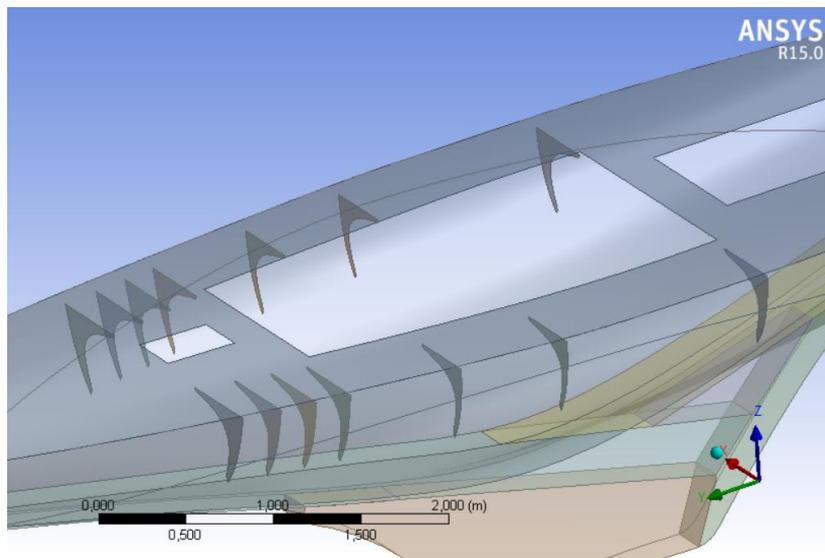


Ilustración 64. Refuerzos

Finalmente se introduce el mástil. Elemento de gran peso y envergadura que afecta considerablemente las tensiones en las zonas en las que descansa. Estos elementos son una vez más elementos sólidos, la base del mástil como ya se ha comentado y la salida del mástil por la cubierta, ya que es un elemento sometido a una gran exigencia estructural reforzada por los baos y refuerzos.

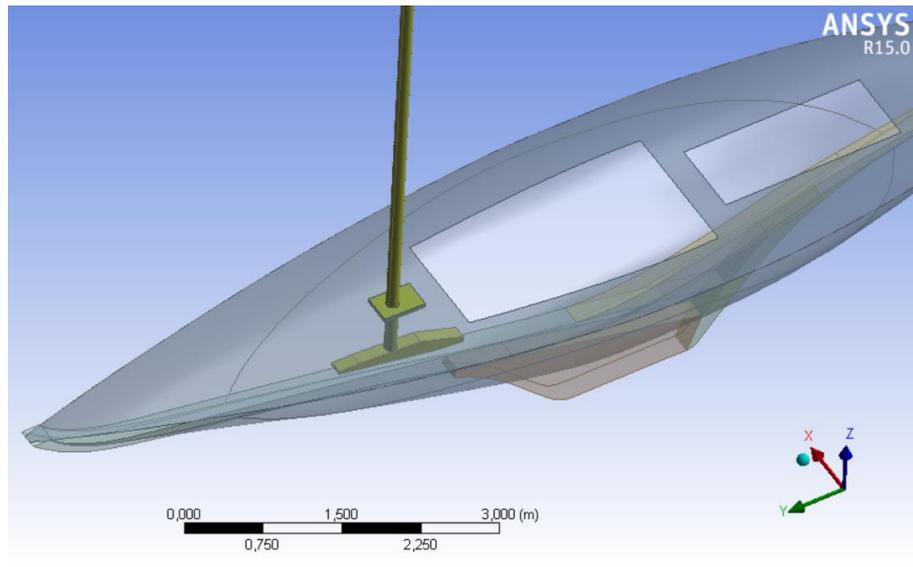


Ilustración 65. Refuerzos

Así resulta la estructura completa de la embarcación R-Boat Pirate.

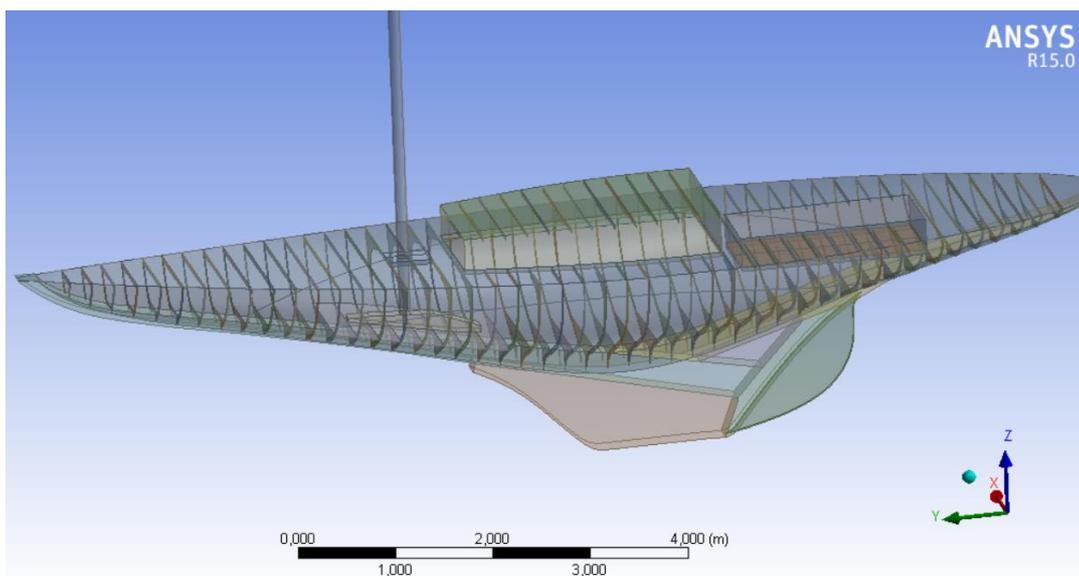


Ilustración 66. Estructura de la embarcación

4.4. Espesores

Una vez introducida la geometría de la embarcación, el siguiente punto será asignar a cada uno de los elementos introducidos las propiedades y espesores, diferenciando a cada elemento con el tipo de madera correspondiente, con las propiedades ya definidas anteriormente.

El mástil y sus elementos de anclaje y sujeción son de Abeto Sitka y han sido introducidos como sólidos tipo SOLID186, el cual es un elemento sólido de 3D de orden superior. El elemento está definido por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo: desplazamientos en las direcciones nodales x, y, z. El elemento soporta la plasticidad, la hiper-elasticidad, la fluencia, el endurecimiento bajo la tensión, la deflexión grande, y con capacidades de deformación grandes. También tiene capacidad de formulación mixta para simular deformaciones de materiales elastoplásticos, casi incompresibles, y materiales hiperelásticos completamente incompresibles.

Details of "Base mastil"		Details of "Mastil"	
+ Graphics Properties		+ Graphics Properties	
- Definition		- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Suppressed	No
ID (Beta)	41	ID (Beta)	44
Stiffness Behavior	Flexible	Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Base y salida mastil	Coordinate System	Mastil
Reference Temperature	By Environment	Reference Temperature	By Environment
- Material		- Material	
Assignment	Sitka	Assignment	Sitka
Nonlinear Effects	No	Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No	Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box		+ Bounding Box	
+ Properties		+ Properties	
+ Statistics		+ Statistics	

Details of "Salida mastil cubierta"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
ID (Beta)	47
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Base y salida mastil
Reference Temperature	By Environment
- Material	
Assignment	Sitka
Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box	
+ Properties	
+ Statistics	

Ilustración 67. Características elementos madera de Sitka

En cuanto a la quilla, está compuesta por diferentes elementos de diferentes maderas y propiedades, introducidos también como elementos sólidos SOLID186, al igual que el mástil. En este caso se emplean las maderas Douglas y Teca para el conjunto de la quilla.

En las siguientes imágenes se muestran los atributos asignados a los elementos de la quilla de las maderas Douglas y Teca, definiendo por tanto los elementos en su totalidad.

Details of "Quillote timón"		Details of "Quillote medio"	
+ Graphics Properties		+ Graphics Properties	
- Definition		- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Suppressed	No
ID (Beta)	26	ID (Beta)	38
Stiffness Behavior	Flexible	Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Quillote	Coordinate System	Quillote
Reference Temperature	By Environment	Reference Temperature	By Environment
- Material		- Material	
Assignment	Teka	Assignment	Teka
Nonlinear Effects	No	Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No	Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box		+ Bounding Box	
+ Properties		+ Properties	
+ Statistics		+ Statistics	

Ilustración 68. Características elementos madera de Teca de la quilla

Details of "Quillote quilla"		Details of "Quillote proa"		Details of "Quillote popa"	
+ Graphics Properties		+ Graphics Properties		+ Graphics Properties	
- Definition		- Definition		- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Suppressed	No
ID (Beta)	29	ID (Beta)	32	ID (Beta)	35
Stiffness Behavior	Flexible	Stiffness Behavior	Flexible	Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Quillote	Coordinate System	Quillote	Coordinate System	Quillote
Reference Temperature	By Environment	Reference Temperature	By Environment	Reference Temperature	By Environment
- Material		- Material		- Material	
Assignment	Douglas	Assignment	Douglas	Assignment	Douglas
Nonlinear Effects	No	Nonlinear Effects	No	Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No	Thermal Strain Effects	No	Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box		+ Bounding Box		+ Bounding Box	
+ Properties		+ Properties		+ Properties	
+ Statistics		+ Statistics		+ Statistics	

Ilustración 69. Características elementos madera de Douglas de la quilla

Quedan así, definidos todos los elementos tipo SOLIDO186 que se emplean.

Posteriormente se asignan el resto de propiedades a los elementos estructurales restantes que constituyen la estructura de la embarcación. La característica principal de dichos componentes estructurales es que se tratan de elementos "lámina", que se introducen en ANSYS como SHELL181. Este elemento es adecuado para analizar estructuras tipo plancha de delgadas a moderadamente gruesas (siendo este último el caso que se atiende). Es un elemento de cuatro nodos con seis grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones x, y, z y rotaciones alrededor de los ejes x, y, z. SHELL181 se puede utilizar para aplicaciones en capas para el modelado de láminas de material compuesto o construcción en sándwich.

Los elementos estructurales que conforman el anillo de la estructura de la embarcación, cuadernas, cuadernas dobles, baos y varengas, son elementos de roble blanco, a los cuales, y según lo mencionado en el capítulo de descripción de la embarcación, se les asigna el espesor y el tipo de madera definiendo los elementos.

Details of "Varengas.44"	Details of "Refuerzos.14"	Details of "Baos.88"
Graphics Properties	Graphics Properties	Graphics Properties
Definition	Definition	Definition
<input type="checkbox"/> Suppressed	<input type="checkbox"/> Suppressed	<input type="checkbox"/> Suppressed
Stiffness Behavior	Stiffness Behavior	Stiffness Behavior
Coordinate System	Coordinate System	Coordinate System
Reference Temperature	Reference Temperature	Reference Temperature
<input type="checkbox"/> Thickness	<input type="checkbox"/> Thickness	<input type="checkbox"/> Thickness
Thickness Mode	Thickness Mode	Thickness Mode
Offset Type	Offset Type	Offset Type
Material	Material	Material
Assignment	Assignment	Assignment
Nonlinear Effects	Nonlinear Effects	Nonlinear Effects
Thermal Strain Effects	Thermal Strain Effects	Thermal Strain Effects
Bounding Box	Bounding Box	Bounding Box
Properties	Properties	Properties
Statistics	Statistics	Statistics

Details of "Cubiertas simples.60"	Details of "Cubiertas dobles.34"
Graphics Properties	Graphics Properties
Definition	Definition
<input type="checkbox"/> Suppressed	<input type="checkbox"/> Suppressed
Stiffness Behavior	Stiffness Behavior
Coordinate System	Coordinate System
Reference Temperature	Reference Temperature
<input type="checkbox"/> Thickness	<input type="checkbox"/> Thickness
Thickness Mode	Thickness Mode
Offset Type	Offset Type
Material	Material
Assignment	Assignment
Nonlinear Effects	Nonlinear Effects
Thermal Strain Effects	Thermal Strain Effects
Bounding Box	Bounding Box
Properties	Properties
Statistics	Statistics

Ilustración 72. Características elementos madera de roble blanco anillo estructural

La madera de cedro rojo se emplea en las escotillas y casco de la embarcación donde una vez más se les asigna el espesor y la madera a los elementos.

Details of "Casco.2"		Details of "Escotillas.2"	
+ Graphics Properties		+ Graphics Properties	
- Definition		- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible	Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Casco	Coordinate System	Escotillas
Reference Temperature	By Environment	Reference Temperature	By Environment
<input type="checkbox"/> Thickness	25, mm	<input type="checkbox"/> Thickness	22,5 mm
Thickness Mode	Manual	Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle	Offset Type	Middle
- Material		- Material	
Assignment	Cedro Rojo	Assignment	Cedro Rojo
Nonlinear Effects	No	Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No	Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box		+ Bounding Box	
+ Properties		+ Properties	
+ Statistics		+ Statistics	

Ilustración 70. Características elementos madera de cedro rojo

Y por último se definen las cubiertas, entrepuentes y superestructuras, en este caso de madera de teca, asignando los espesores.

Details of "Cubiertas.3"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Cubiertas
Reference Temperature	By Environment
<input type="checkbox"/> Thickness	20, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Teka
Nonlinear Effects	No
Thermal Strain Effects	No
+ Bounding Box	
+ Properties	
+ Statistics	

Ilustración 71. Características elementos madera de Teca de la cubierta

4.5. Contactos

En aras de la optimización en el proceso de cálculo se emplea el comando "share topology" de ANSYS el cual une automáticamente todos los elementos que comparten geometría, sean aristas o caras evitando tener que definir los contactos uno a uno.

De esta forma se une automáticamente el resto de elementos, de forma que quedan contactos definidos en Cara-Arista o Cara-Cara. Debido a que se han introducido con

la huella de contacto, se define claramente esa zona cómo la de contacto, no estableciendo toda la cara como contacto que podría acarrear errores.

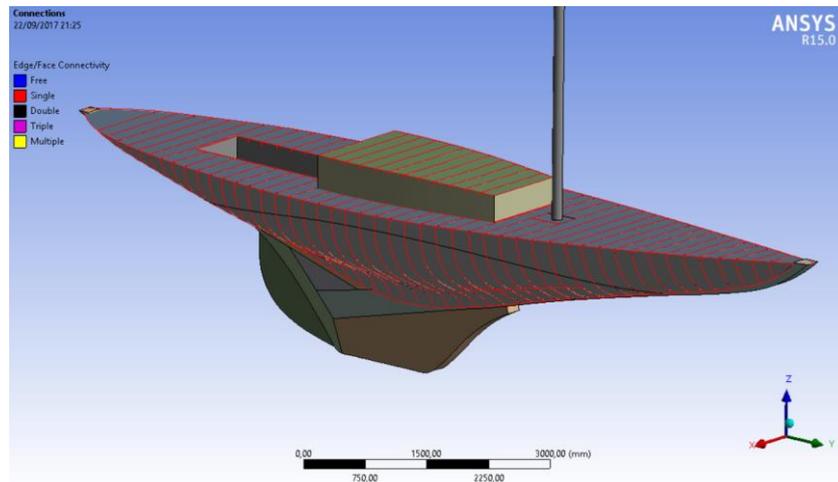


Ilustración 72. Contactos 1

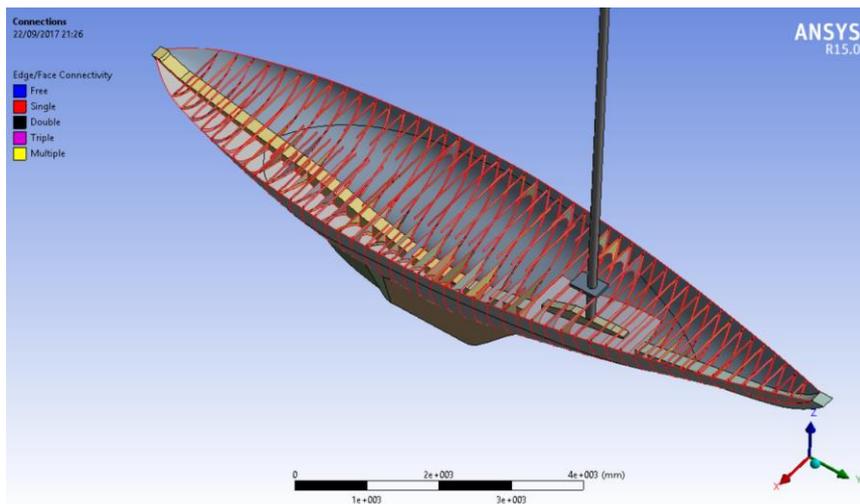


Ilustración 73. Contactos 2

4.6. Orientación madera

Tal y como se ha comentado anteriormente, las maderas según su orientación, acorde a los anillos de crecimiento y la orientación de las fibras, adquiere una resistencia diferente por lo que al ir montadas en la estructura con formas determinadas no es válido tener un único eje de coordenadas global, ya que el parámetro de cada uno de los elementos empleados se vería afectado, asignando mayores o menores propiedades, y no siendo un cálculo realista de la propia estructura.

Para orientar correctamente la madera, en función de sus propiedades mecánicas, se ha generado un nuevo sistema de coordenadas local, independientemente del sistema global utilizado como referencia para orientar los ejes del conjunto de la estructura.

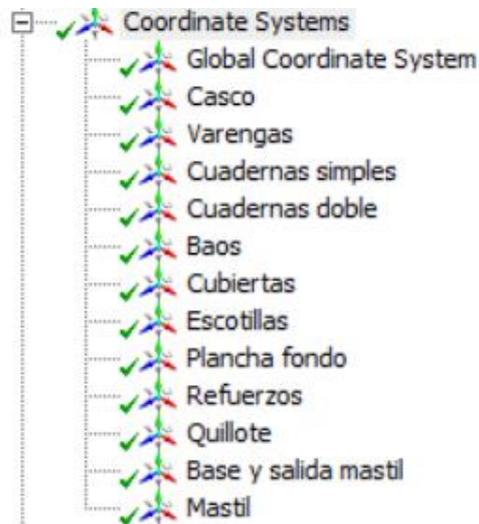


Ilustración 74. Sistema de coordenadas locales y global

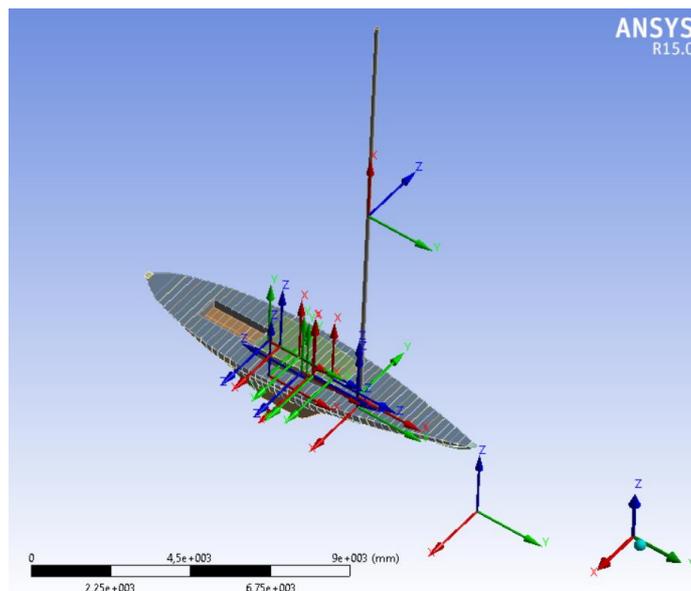


Ilustración 75. Conjunto de sistema de coordenadas locales empleados

4.7. Mallado

En lo referente al mallado, se le ha asignado una malla uniforme ajustada en función de la curvatura de los elementos, dando los resultados que se observan en las siguientes imágenes.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	Default (30,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (8,81480 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (44,0740 mm)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (44,0740 mm)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Minimum Edge Length	1,4427e-002 mm
[+] Inflation	
[-] Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
[-] Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
[+] Advanced	

Ilustración 76. Tamaño de malla

Los tamaños de malla de los elementos que se han seleccionado están en función de los componentes estructurales en sí. En los sólidos se les ha asignado un tamaño máximo de 60mm.

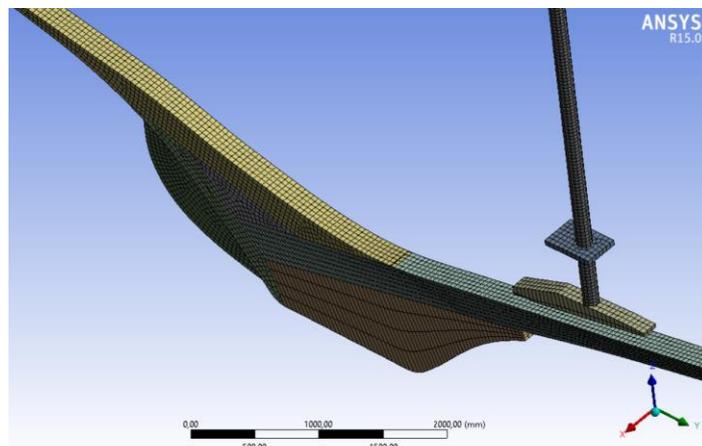


Ilustración 77. Mallado elementos sólidos

A los elementos estructurales que componen el anillo estructural, y debido a que no son grandes elementos, se les ha dado un tamaño máximo de 20 mm.

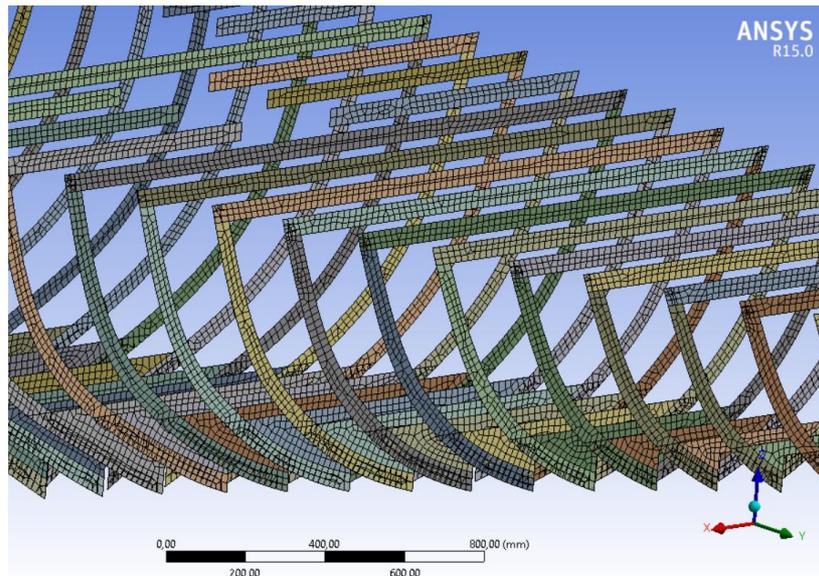


Ilustración 78. Malla elementos estructurales

En cuanto al casco, al tratarse de la superficie más grande, se le asigna un tamaño de malla máximo de 200 mm

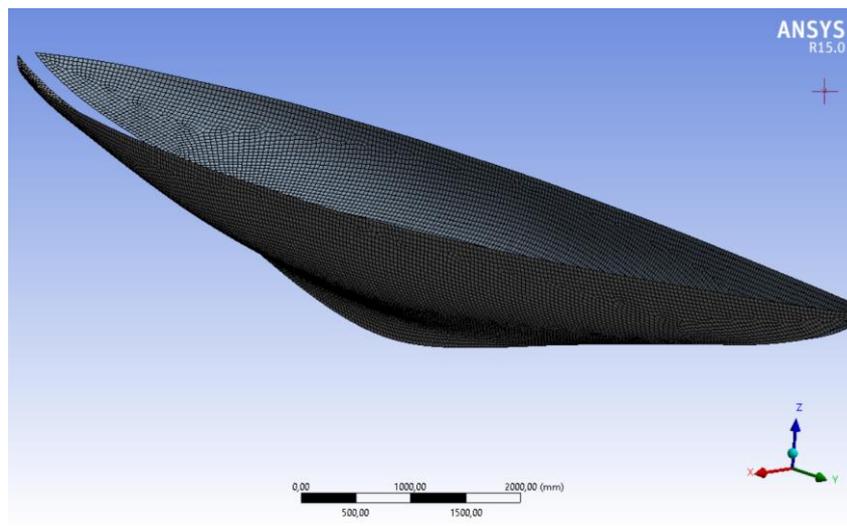


Ilustración 79. Malla casco

En cuanto a las cubiertas y escotillas, se les ha asignado un tamaño máximo de elemento de 50 mm, quedando como se muestra en la imagen siguiente.

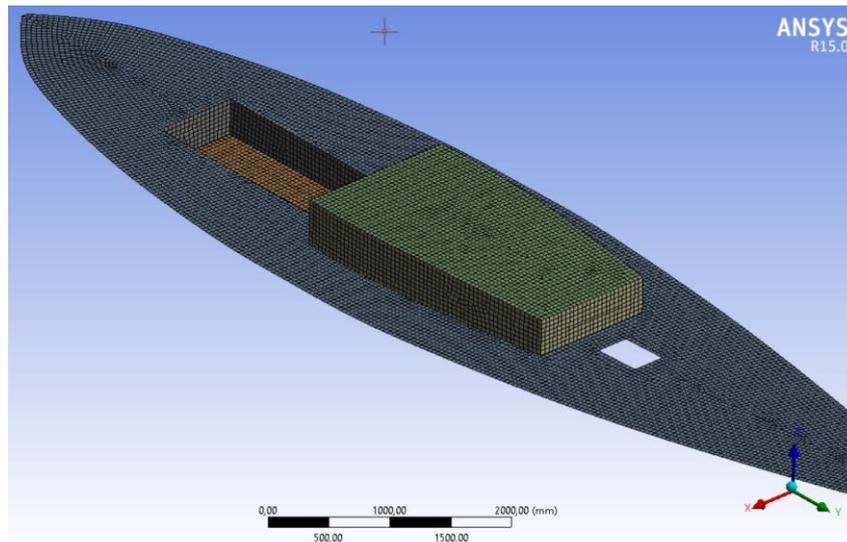


Ilustración 80. Mallado de cubierta y escotillas

De esta forma se define el mallado total de la embarcación.

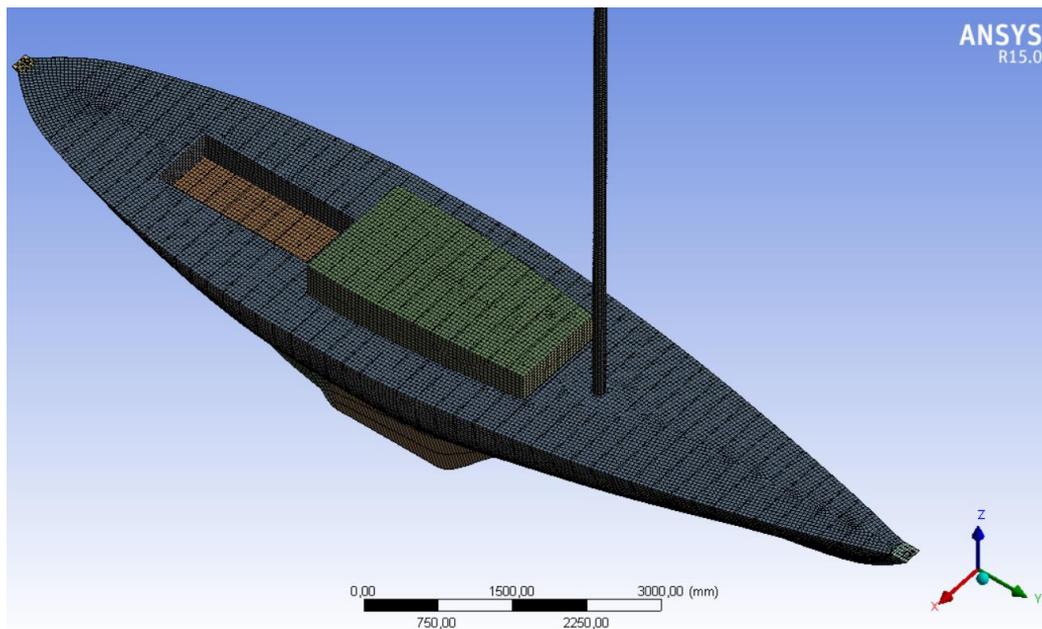


Ilustración 81. Mallado de la embarcación

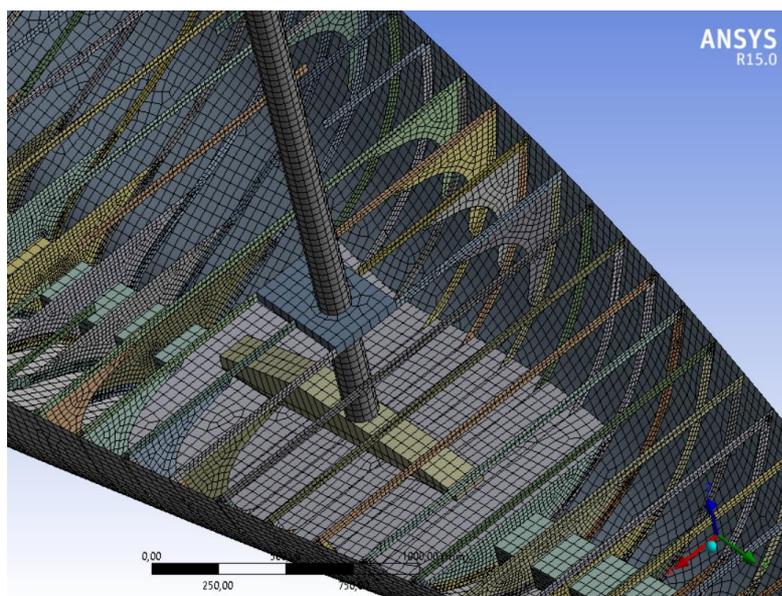


Ilustración 82. Mallado de la estructura interior

4.8. Cargas y condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se emplean para los cálculos están basadas en la información del documento “Análisis Estructural del velero” (referencia 7) de la bibliografía, donde claramente define cuales son las condiciones a modelizar.

Es en la parte extrema de popa donde se restringe los desplazamientos en las direcciones X, Y, Z y mientras que en la zona de proa se dejará libre la dirección en el eje X. Al tratarse de un velero, es un caso particular, y es que tiene mucha obra muerta debido a que su condición de navegación normalmente es escorada y requiere de esa gran obra muerta para evitar el embarque de agua, por lo que, para analizar correctamente las tensiones de la estructura, los apoyos se situarán en los límites extremos de la embarcación tal y como se muestra en el documento de referencia.

Esta condición de contorno se introduce en el programa ANSYS situando y restringiendo correctamente los ejes en cuestión.

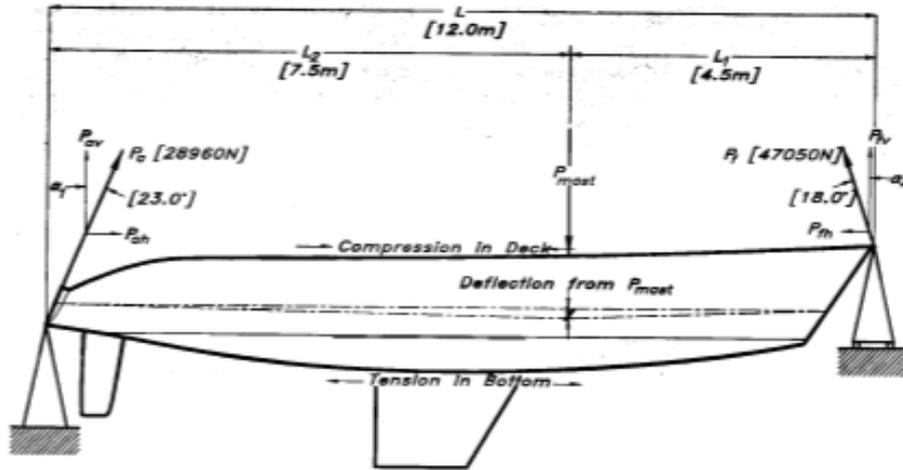


Ilustración 83. Situación de las condiciones de contorno

Details of "Displacement proa"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Vertices
[-] Definition	
ID (Beta)	6028
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (ramped)
Y Component	Free
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
Suppressed	No

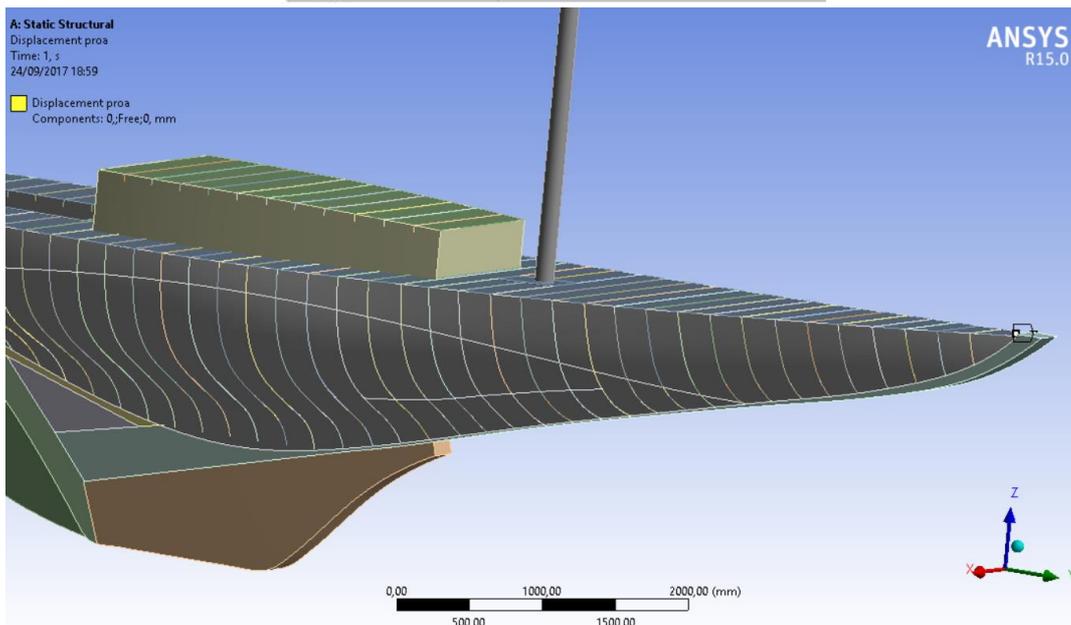


Ilustración 84. Condición de contorno proa

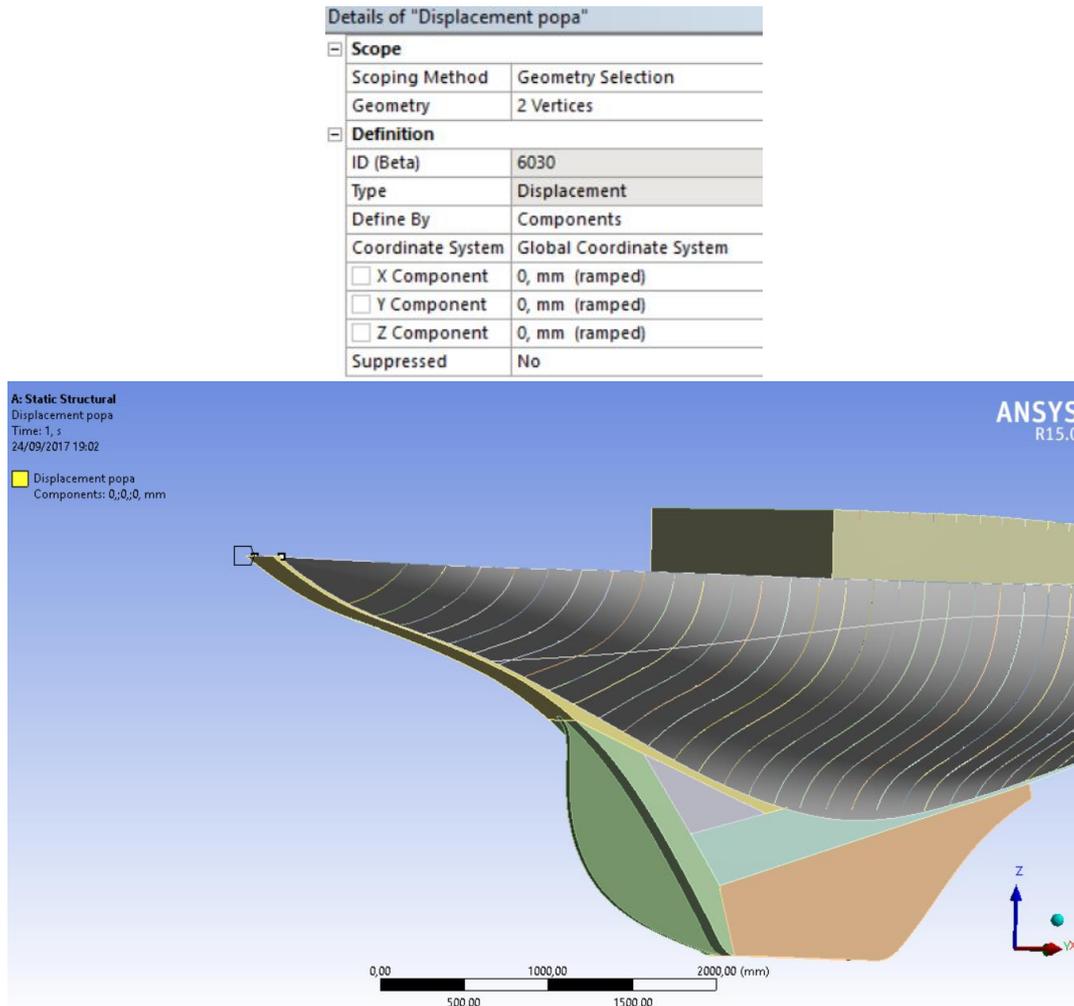


Ilustración 85. Condición de contorno popa

Entre las cargas que se le aplica a la embarcación se encuentran el peso propio de la estructura de madera y la presión hidrostática del agua sobre el casco. Hay que hacer mención de que la estabilidad del buque implica que el peso de la embarcación esté equilibrado con el empuje del agua, por lo que el buque en una condición de mar en calma estará completamente equilibrado $P=E$. Esto significa que dará lugar a pequeñas deformaciones y bajas tensiones, ya que esta en equilibrio estático de cargas.

Para este proyecto se han considerado dos estados de carga. El primero en un mar en calma donde el sistema debe de estar equilibrado y un segundo en el que se sitúa la embarcación en la cresta de la ola. Este último estado de carga implica que el centro de la embarcación se sitúa sobre la cresta de una ola troncooidal de longitud entre senos igual a la eslora del barco (ola típica y estándar que se establece para cálculos

navales). Es aquí donde viene la peculiaridad del modelo ya que el mástil y su conjunto y anclaje, conlleva un gran peso en la embarcación en una zona concentrada por lo que en este estado de carga se debe de considerar.

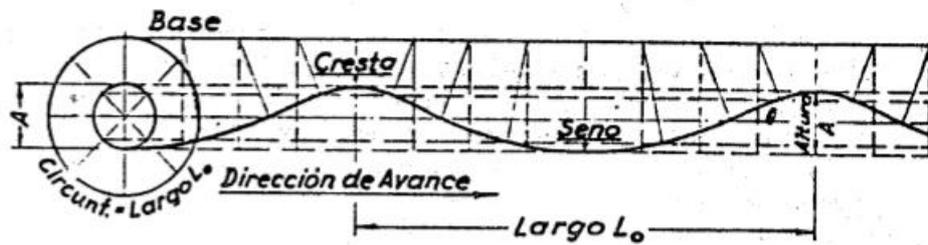


Ilustración 86. Geometría de la ola troncooidal

Por ello el modelo fue introducido con el casco “recortado” con la forma de la ola troncooidal para que de esta forma sea más sencillo aplicar directamente la presión hidrostática marcando como el límite de la superficie libre el borde de la superficie marcada en el casco. A continuación, se muestra la superficie del casco recortada con la forma de la ola troncooidal.

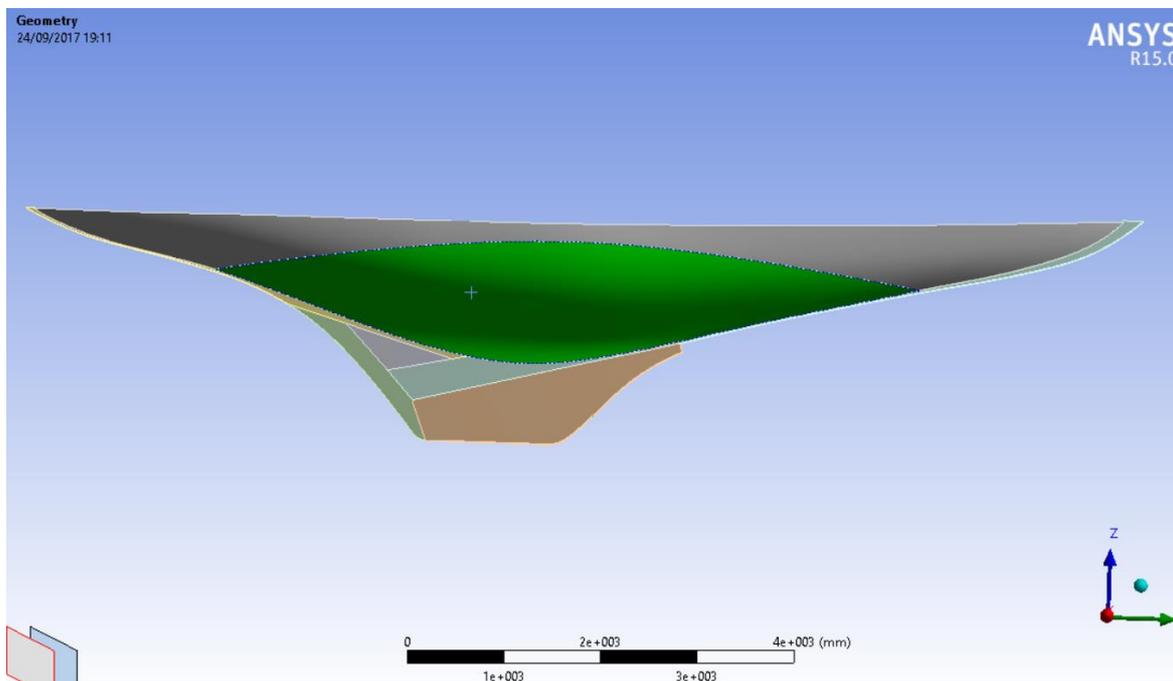


Ilustración 87. Geometría del casco con forma de la ola troncooidal

Se aplica pues las cargas de presión hidrostática sobre el casco con mar en calma:

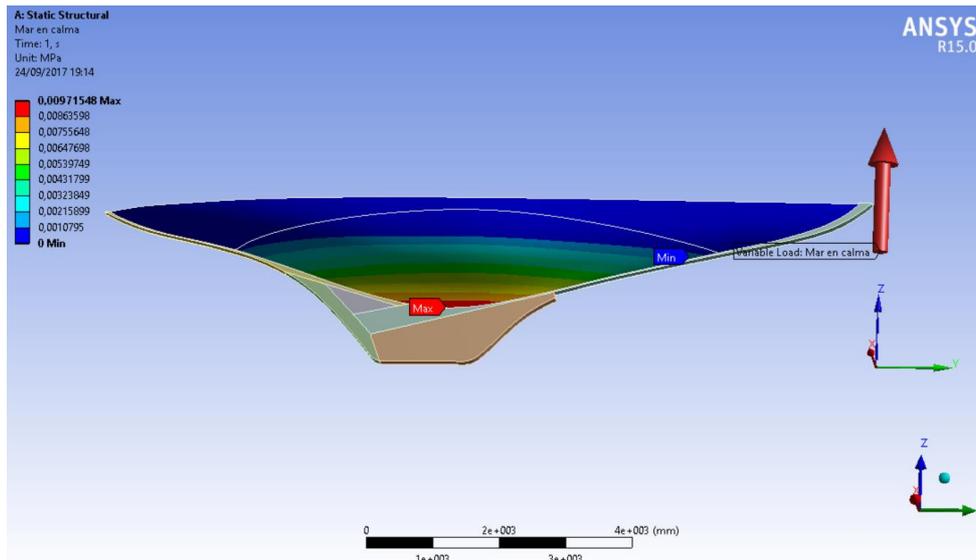


Ilustración 88. Carga presión hidrostática mar en calma

Y la presión hidrostática en la cresta de la ola:

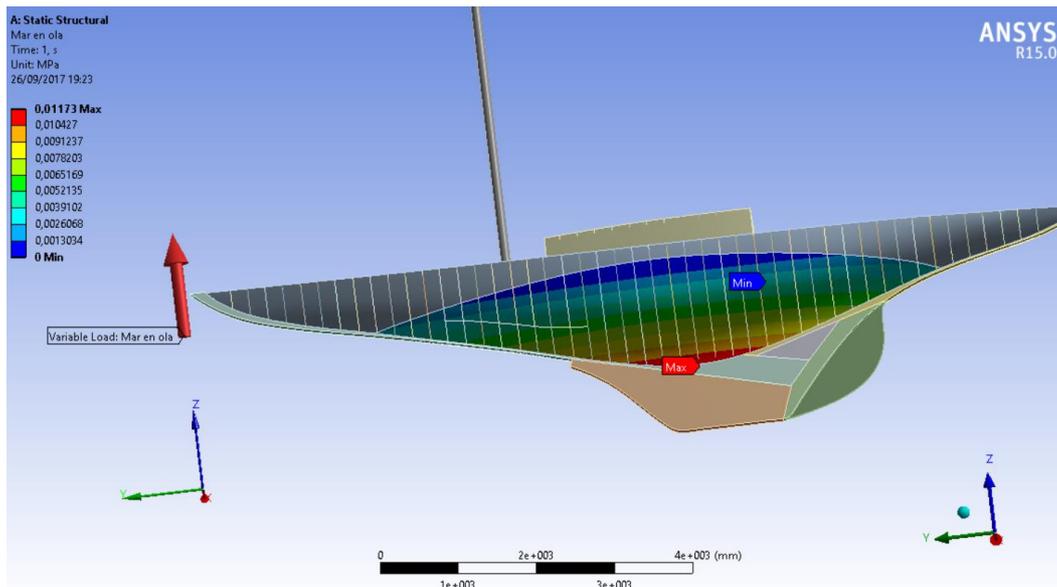


Ilustración 89. Carga presión hidrostática mar en calma

Quedan así definidas las condiciones de carga y las condiciones de contorno necesarias para poder realizar los cálculos.

4.9. Resultados

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, tenemos dos estados de carga, uno es con mar en calma y el otro sobre la cresta de la ola.

En referencia al primero, con la mar en calma, se puede decir que es un estado en el cual el peso de la embarcación queda totalmente en equilibrio por el empuje hidrostático, por lo que las deformaciones son mínimas o casi nulas en la embarcación tal. Ciertamente existe una zona en este tipo de embarcaciones como es la zona del mástil (mucho peso concentrado) que hace que la mayor deformación se produzca en esta zona.

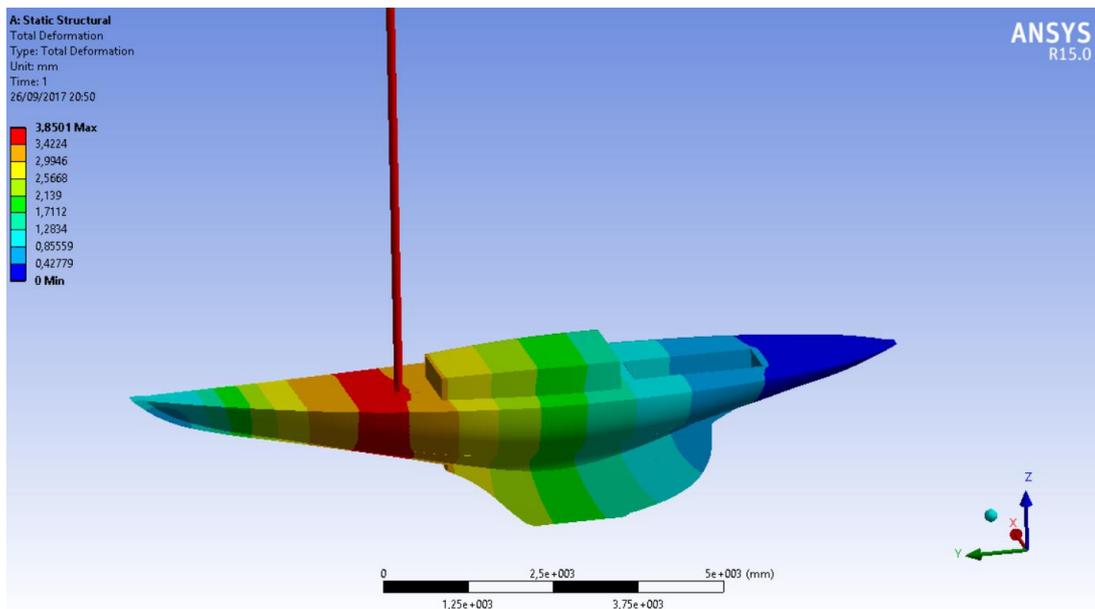


Ilustración 90, Deformación global con la mar en calma

En cuanto a las tensiones que se obtienen de este estado de carga, tal y como se observa en la figura, poseen bajos valores y son equiespaciadas. Esto es debido a las cuadernas que refuerzan la parte interna del casco protegiéndolo de la presión hidrostática, la cual pretende su deformación y hundimiento.

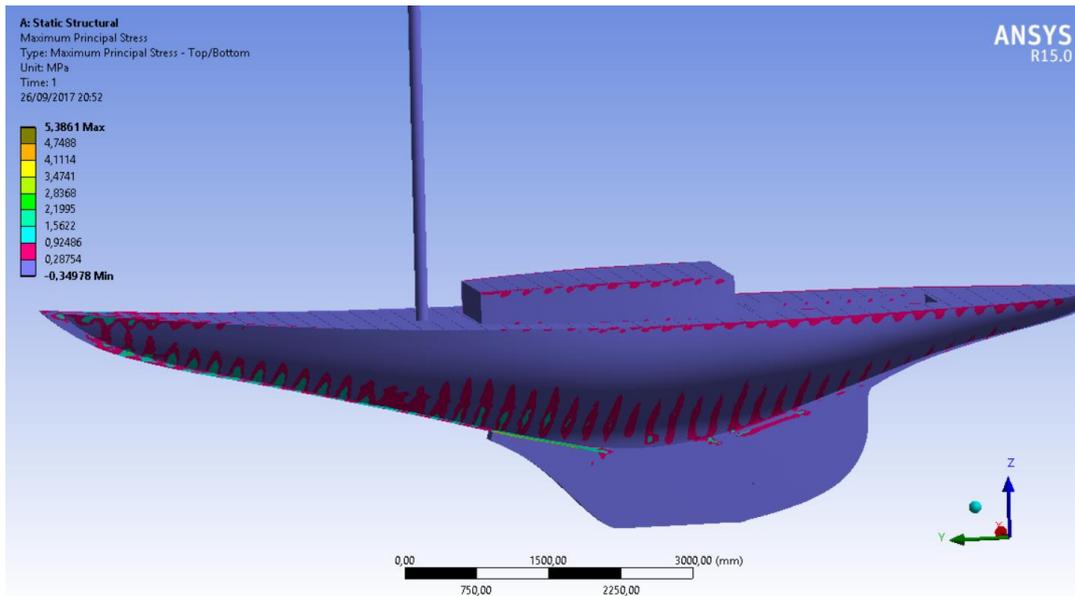


Ilustración 91. Tensiones principales en la mar en calma

Otra de las zonas de acumulación de tensiones es en la base del mástil. Toda la estructura de la embarcación está diseñada para que recaiga sobre las grandes piezas sólidas (macizas) de madera que conforman la quilla. En embarcaciones de vela el mástil se sitúa ligeramente adelantado de su posición central, por lo que y debido al propio peso del mástil de madera, recae todo sobre la viga de proa que compone la quilla. Es esta zona en la que se acumula tensiones debido al peso propio del mástil y los sistemas de anclaje. Nótese que desde el mástil hacia popa está el conjunto de la quilla dando respaldo y reduciendo los efectos del mástil en esta zona, produciendo que sea mayor en proa, allí donde no hay ese respaldo estructural.

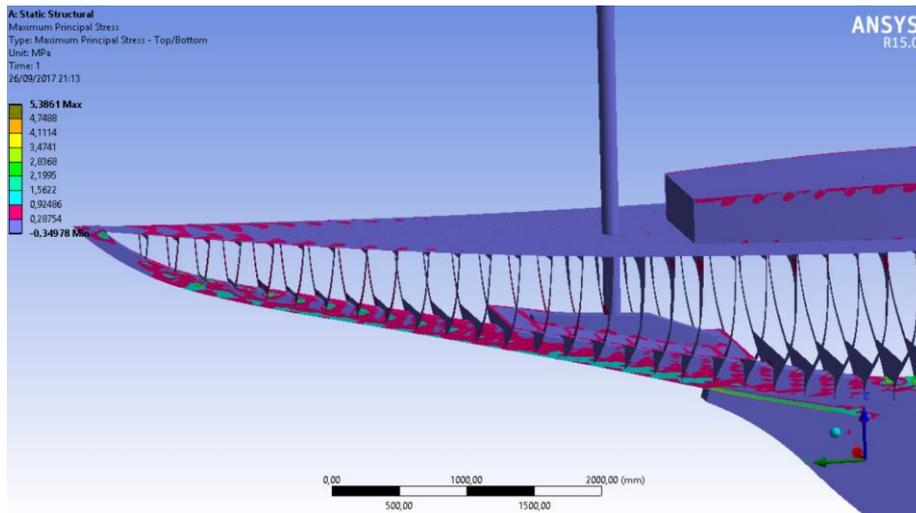


Ilustración 92. Tensiones principales en la quilla debido al mástil con la mar en calma

En cada uno de los anillos estructurales que conforman baos, cuadernas y varengas, existe una transmisión de los esfuerzos que desembocan a la quilla central. De ahí que la quilla parezca que sea de dimensiones “desproporcionadas”, el punto de recepción de tensiones de toda la estructura. Por ello se observan tensiones en estas partes justo en las zonas de los anillos, baos, cuadernas y varengas.

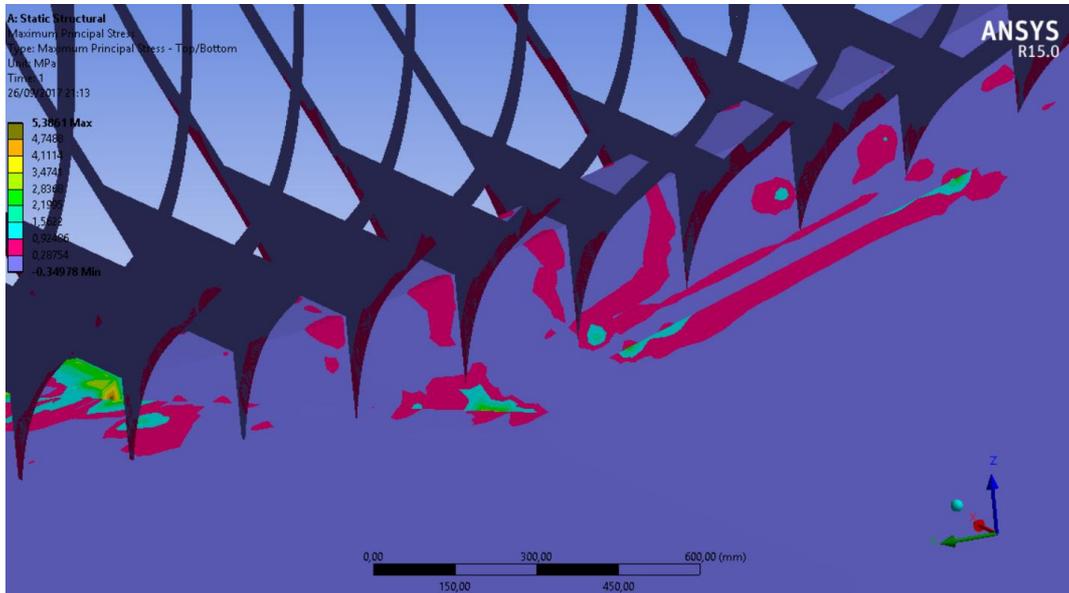


Ilustración 93. Tensiones principales en la quilla- anillos estructurales

Una de las formas con las que en ingeniería naval se comprueba la veracidad de los cálculos es comprobando que realmente el modelo está en equilibrio. Para realizar la comprobación se debe de recurrir a analizar las condiciones de contorno mediante el estudio de las reacciones que se producen en los soportes.

Muchos autores, sociedades y/o reglamentos, difieren ligeramente a la hora de definir el máximo permitido, pero todos ellos quedan cerca los unos de los otros estableciendo fuerzas de reacción en los soportes de hasta el 5% del peso total de la embarcación. En el caso que atiende a este proyecto se obtienen las reacciones siguientes en los soportes, con valores dentro de los límites de los reglamentos y sociedades.

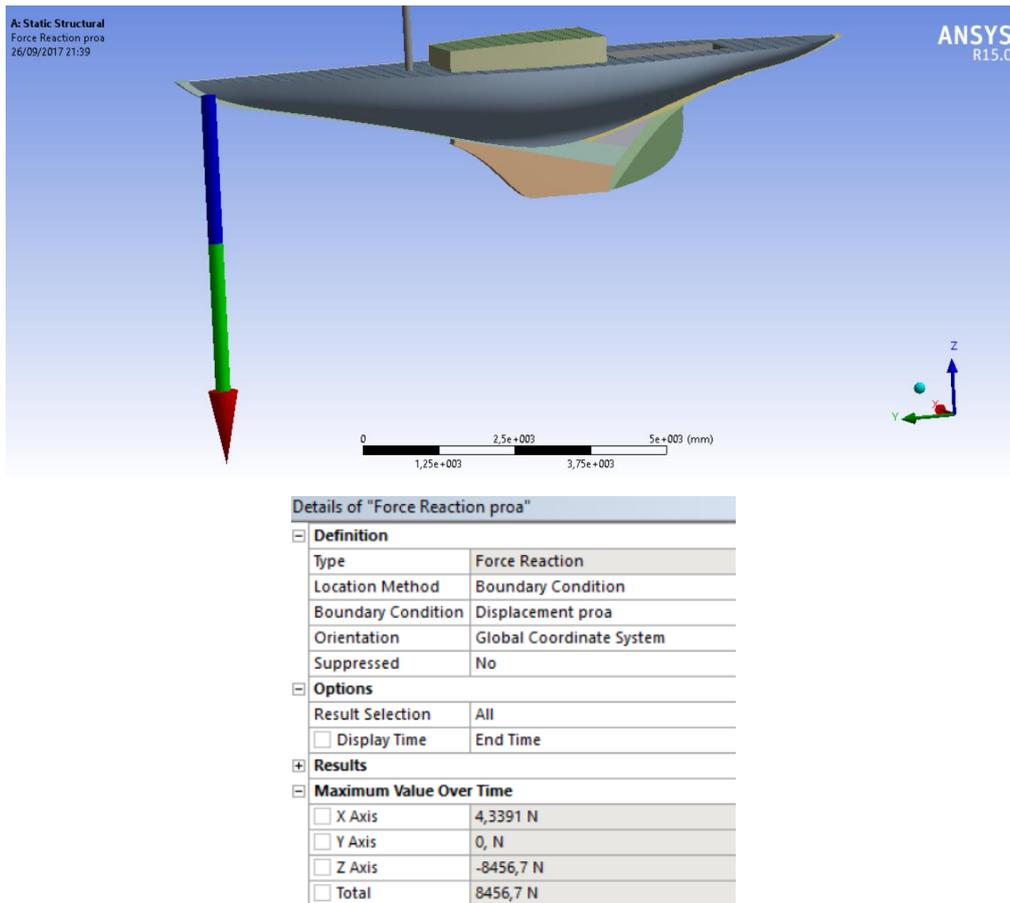


Ilustración 94. Reacciones en proa

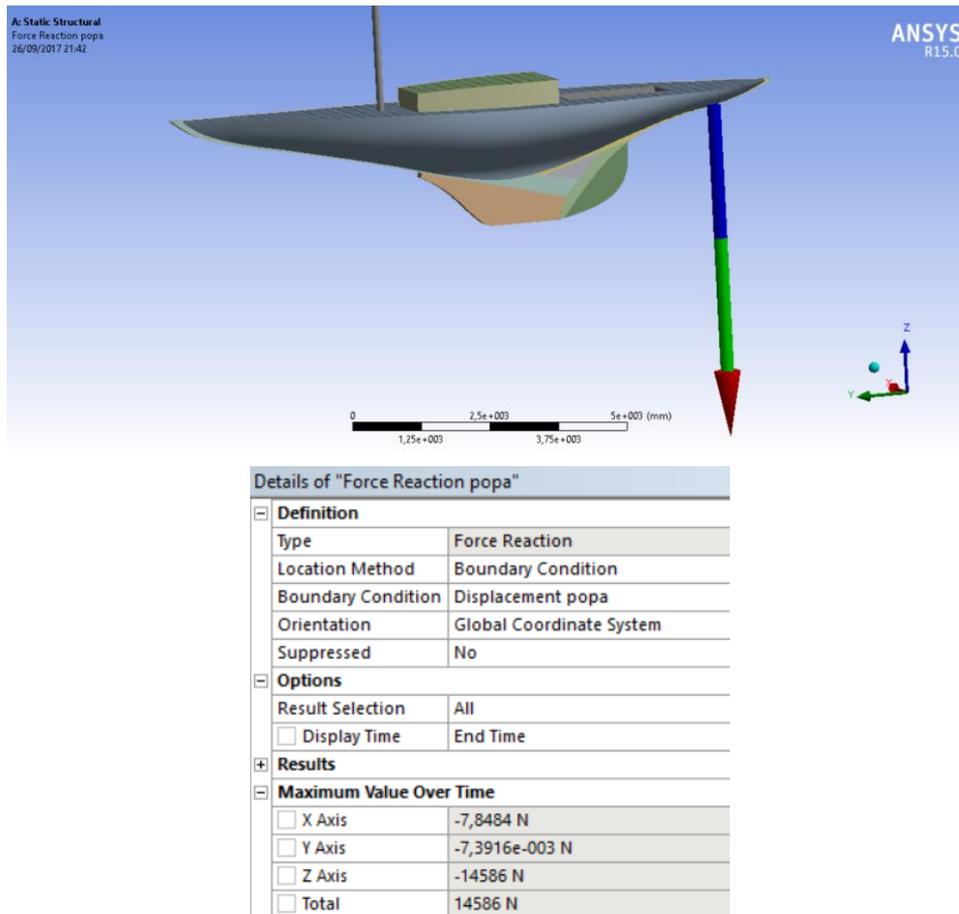


Ilustración 95. Reacciones en popa

En el segundo estado de carga, cuando la embarcación está situada en la cresta de la ola, se aprecia que la deformación progresiva que se producía en el estado de mar en calma (afectada solo por el peso del mástil) se ve alterada ahora por el empuje de la ola troncoideal con cresta en la zona central de la embarcación. Esta alteración corrompe con la uniformidad del desplazamiento produciendo una ondulación global sobre la estructura. La embarcación es empujada en la parte central por la ola, mientras que debido al mástil esta tiende a hincar por proa, volviendo a generar la depresión que se producía por el peso del mástil.

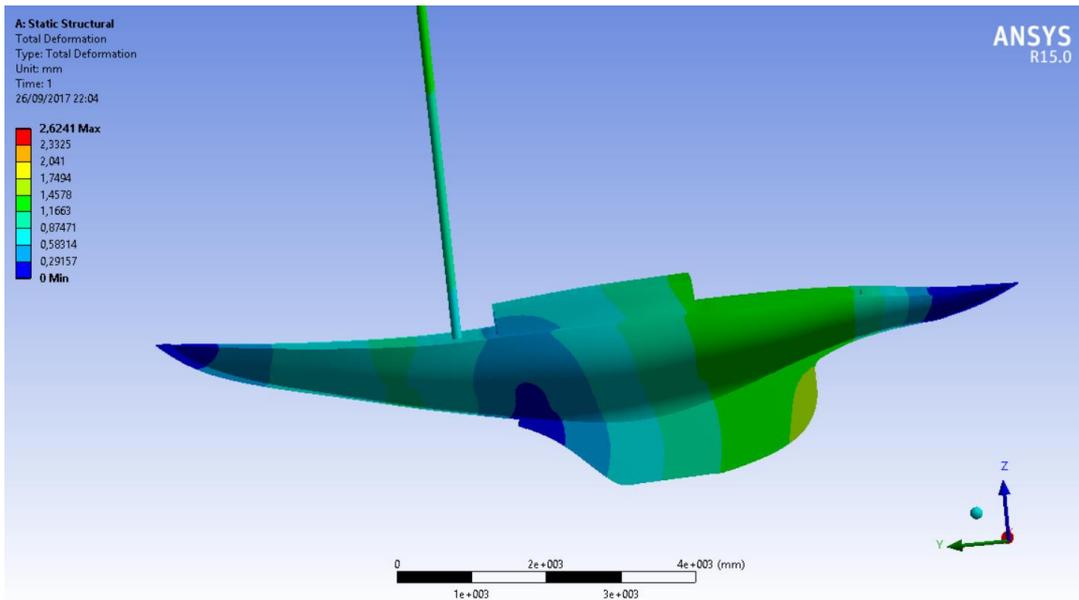


Ilustración 96. Deformación global sobre la ola

En cuanto a las tensiones principales, el empuje de la ola en la parte central provoca la tracción en los elementos estructurales de la parte alta de embarcación, la zona de la cubierta, mientras que en la zona de las varengas se produce una compresión que se ve atenuada debida a la presencia del conjunto de la quilla, confiriendo robustez en esta parte.

Nuevamente en la parte del mástil, y debido a su peso, las tensiones en la zona se ven ligeramente incrementadas por la influencia de la ola.

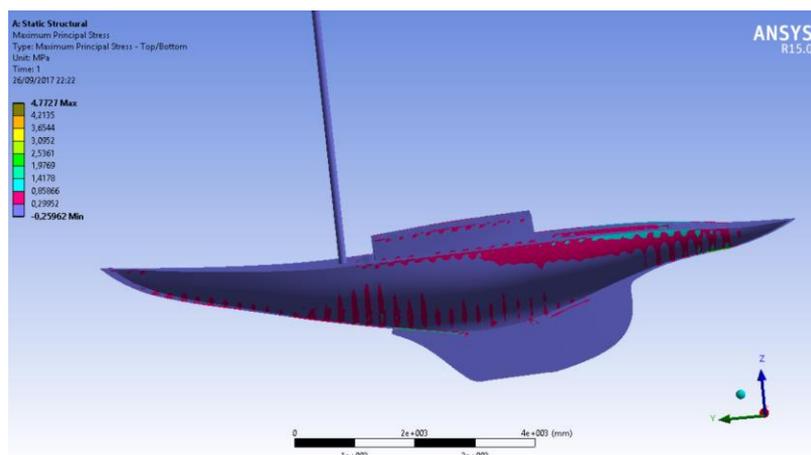


Ilustración 97. Tensiones principales de la embarcación sobre la ola

Al analizar la estructura interior debido a la influencia de la ola, las tensiones del mástil se trasladan hacia popa situándose justo en la perpendicular del propio mástil, de ahí

la importancia de la cubierta de apoyo, la cual reparte las tensiones bajo el soporte del mástil sobre las varengas de la zona aumentando el área y disminuyendo la concentración de las tensiones. En este caso, se aprecia como la viga de la quilla situada a proa del buque, se ve afectada en este estado de carga justo en las uniones donde se encastra con los otros elementos que componen la quilla.

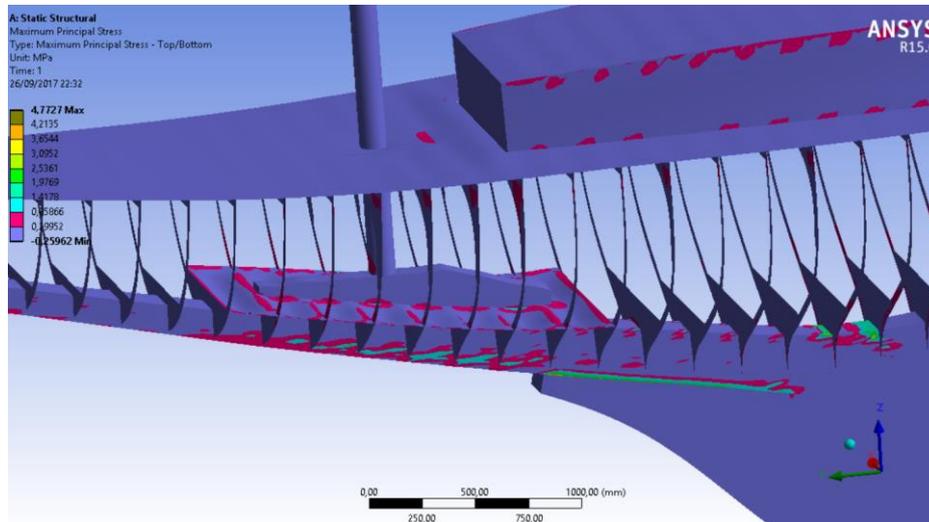


Ilustración 98. Tensiones principales en la sección del mástil, embarcación sobre ola

En la zona de popa se tiene que, justo en la zona de las escotillas y en la quilla de popa, existen zonas de tensiones debido al cambio en la curvatura global de la embarcación debido a la ola. Se encuentra que al igual que ocurre en proa, la viga de la quilla perteneciente a la parte de popa, es un elemento que absorbe las tensiones arrastradas por la estructura en las zonas donde se encastra con el resto de elementos, y sufre tensiones debido al aprisionamiento. Una vez más siendo la razón del tamaño de la quilla en este tipo de embarcaciones para poder soportar y absorber las tensiones en todas las condiciones de navegación que se puedan dar.

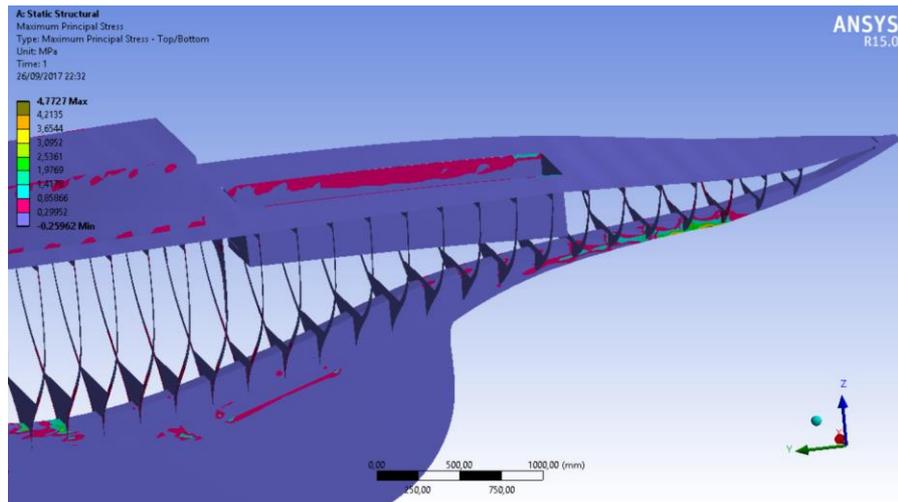


Ilustración 99. Tensiones principales a popa de la quilla, embarcación sobre ola

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El uso del método de los elementos finitos ha ido creciendo a gran velocidad en el mundo de la construcción naval, ya que se trata de una tecnología que permite ampliar y mejorar los cálculos de los resultados del análisis.

No obstante, este tipo de embarcaciones de madera no suelen ser calculadas mediante el método de elementos finitos. Esto es debido, a que este tipo de construcción naval ha sido muy explotada a lo largo de los años, ya que el ser humano ha navegado en embarcaciones de madera desde un pasado muy remoto, y quizá hoy en día se trata más de un método de construcciones artesanal. En cambio, esta aplicación de análisis se emplea en fabricación por materiales compuestos, como lo son la fibra de carbono o la fibra de vidrio. Estos materiales son una combinación de dos o más materiales, por lo que su comportamiento, al igual que el de la madera, dependerá de la dirección de sus ejes.

Tras el análisis establecido, se puede observar que la embarcación sufre el comportamiento esperado, ligeras deformaciones y tensiones acordes a las cargas. Son resultados muy reales y acorde a las características de la embarcación, por lo que los resultados obtenidos son satisfactorios.

Aunque, como ya se ha dicho, no es un método muy utilizado en embarcaciones de madera, se ha podido desarrollar en este proyecto, estableciendo las características de los materiales ortótropos y las correspondientes propiedades mecánicas en cada

uno de los ejes ortogonales, obteniendo resultados verídicos, ajustados a la realidad empleando la metodología descrita acorde a las recomendaciones de los reglamentos y las sociedades de clasificación. Cumpliendo, así, todos los objetivos marcados por este proyecto.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- KRETSCHMANN, DAVID E. "Mechanical Properties of Wood". In: Wood HandBook, Wood as Engineering Material. 04-2010. Centennial Edition. Madison, Wisconsin
- 2- J.L. MORAIS; J.C. XAVIER; N.M. DOURADO; J.L. LOUSADA; "*Mechanical behavior of Wood in the orthotropic directions*". Portugal.
- 3- TORRES T. JESÚS A. "Análisis modal de la tapa armónica de una guitarra clásica mediante la aplicación de ANSYS". Instituto Tecnológico de Querétaro.
- 4- DAVID M MOSES, HELMUT G.L PRION. 07/09/2002. Anisotropic Plasticity and Failure prediction in wood composites. PhD, University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- 5- JAN PĚNČÍK. 2015 "Modelling of Experimental test of wooden specimens from scots pine (pinus sylvestris) with the help of anisotropic plasticity model. PhD University of Technology. Brno, Republica Checa.
- 6- JUNG-PYO HONG. Empirical wood material model for three-dimensional finite element analysis of a nail joint. PhD, University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- 7- BESSEDNJAK, A. *Análisis estructural del velero*. (disponible en: <http://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=17472/2011/1/53028/22654-3130.pdf>)