



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNICAS DE LA
NAVEGACION Y DE LA CONSTRUCCION NAVAL**

AREA: CONSTRUCCIONES NAVALES

TESIS DOCTORAL

**ARQUITECTURA Y TECNOLOGIA EN EL DISEÑO DEL
ESTANDAR MERCANTE BERGANTIN**

Autor:

D. Josu Ruiz Godia

Directores:

Dr. Emilio Eguía López

Dr. Francisco Fernández González

Santander, Septiembre de 2010

COLABORACIONES



Colabora en la obra la Subdirección General de los Archivos Estatales del Ministerio de Cultura.

CRÉDITOS REPRODUCCIONES

Nuestro agradecimiento a las siguientes instituciones:

© Consorci de les Drassanes Reials i Museu Marítim de Barcelona. Autor: Francisco Jaén para el *Plano del bergantín Segundo Romano* y *Plano del bergantín Nueva Casimira*

© España. Ministerio de Cultura. Archivo General de Simancas para los documentos y *planos del bergantín Ardilla* y *bergantín El Cazador*, SMA 362 y MPD, 21, 49

© Fundación Oceanográfica de Guipúzcoa – Aquarium de Donostia-San Sebastián para el plano *Nº 1 Plano por la construcción de uno bergantín goleta del porte de 110 a 130 toneladas*

© Museo Naval. Madrid para el *Plano del bergantín El Gargo*

Capítulo V

Resultados y Análisis

Como resultado de la creación de las piezas reales que forman la estructura del bergantín, vista en el capítulo anterior, se puede construir, además de como se ha visto, la nave en un entorno más realista, es decir, "renderizando" las piezas con textura de madera y situando dichas piezas en un lugar en el que existen luces y sombras. De este modo se consigue ver dicho montaje con un gran realismo. En la primera parte de los resultados se podrá ver esta operación siendo dicha operación la más importante de la Tesis dada la complejidad de procesos, ya vistos, necesarios para llegar a ese objetivo.

En la segunda parte se mostrarán los resultados del cálculo de estabilidad del bergantín de la S.O.G. para un calado de 2.50 m y se analizarán los datos obtenidos.

En la tercera parte se mostrarán los resultados del comportamiento estructural del bergantín de la S.O.G. para varias condiciones de mar.

Finalmente se mostrarán datos relacionados al arqueo basándose en las dimensiones del bergantín de la S.O.G.

Imágenes "renderizadas" del bergantín

Veamos, a continuación, unas imágenes renderizadas del bergantín. La "renderización" es un proceso en el cual se cubren los objetos en 3D con el material seleccionado. En este caso se ha seleccionado madera de teca para poder ver la embarcación de un modo más realista. Las luces se han situado de modo que muestren las piezas de manera clara y proyecten las sombras en la superficie.



Figura 239 Piezas que forman la quilla



Figura 240 Quilla montada



Figura 241 Se añaden las estructuras principales de proa y popa



Figura 242 Se refuerzan proa y popa y se añaden los yugos

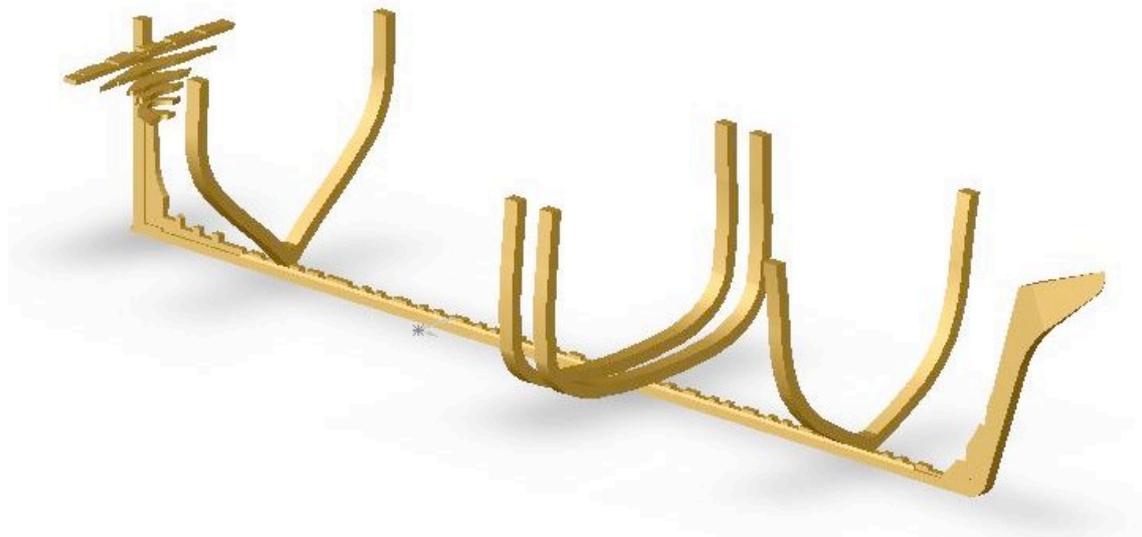


Figura 243 Se añaden las cuadernas principales: cuaderna maestra doble y raseles de proa y popa

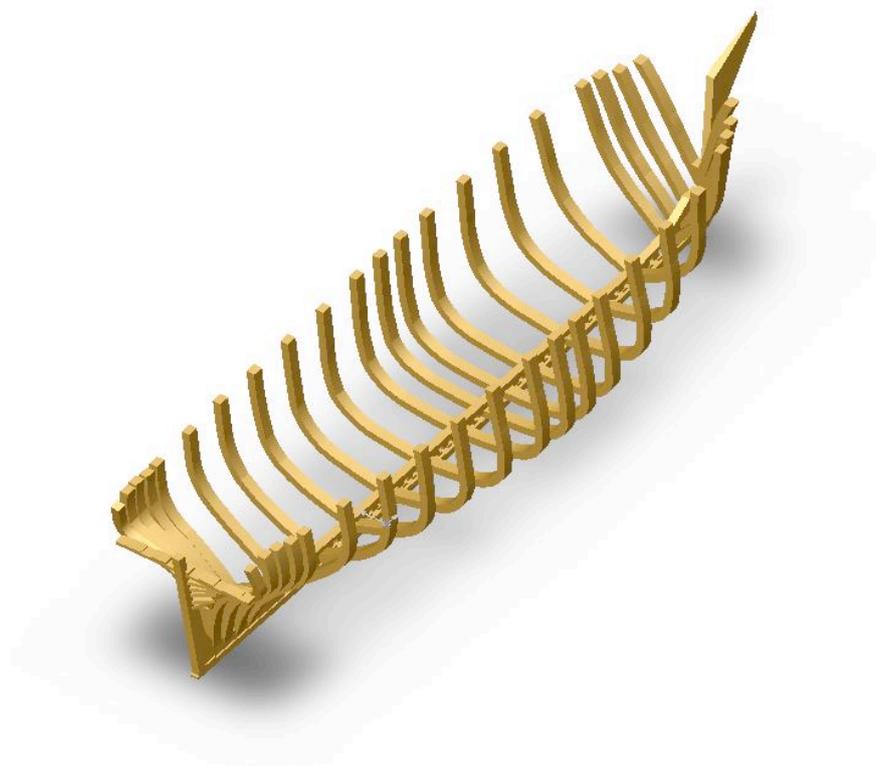


Figura 244 Se añaden el resto de las cuadernas de armar

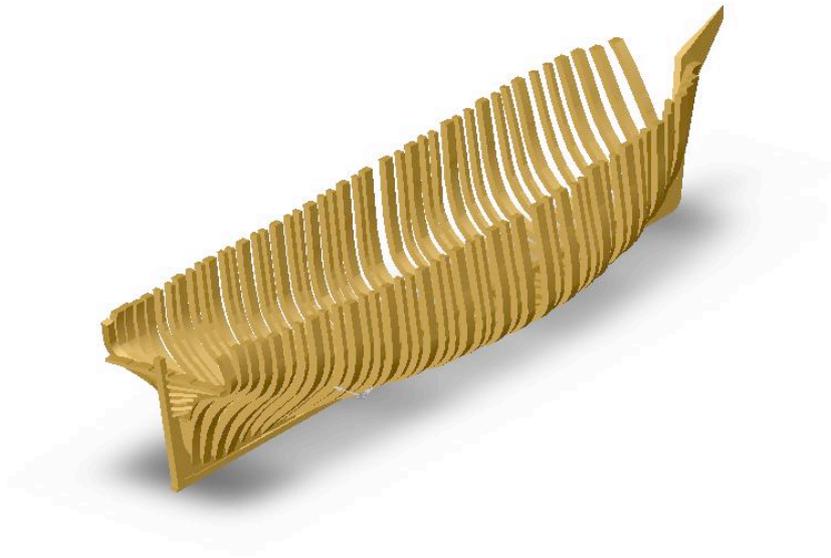


Figura 245 Se añaden las cuadernas de relleno

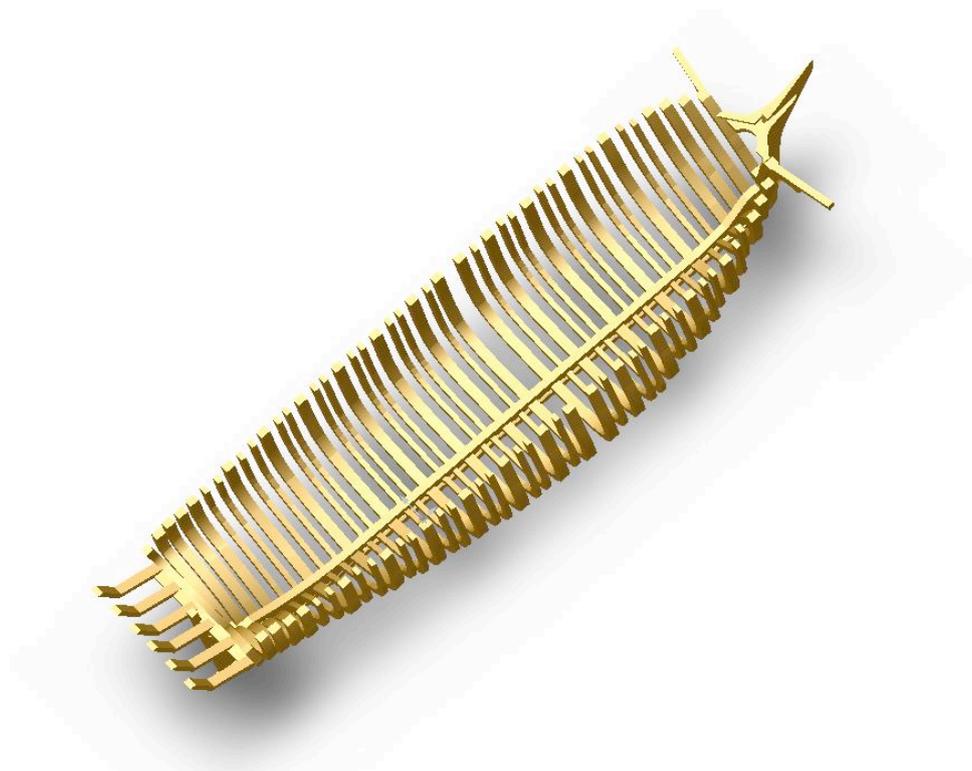


Figura 246 Otra perspectiva. Puede verse la sobrequilla

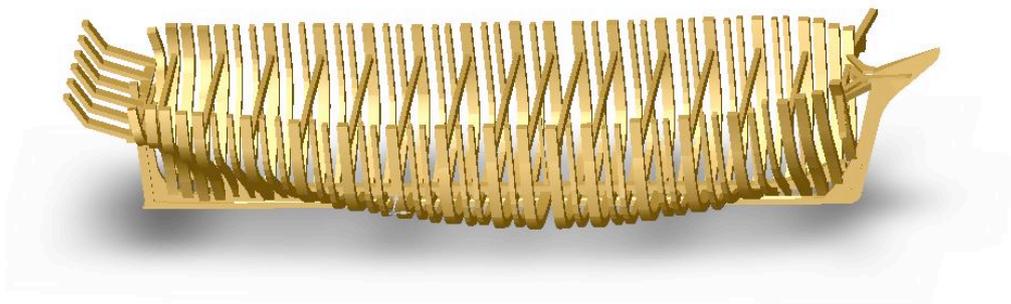


Figura 247 Se añaden los baos, gambotas, escobenes y curvas

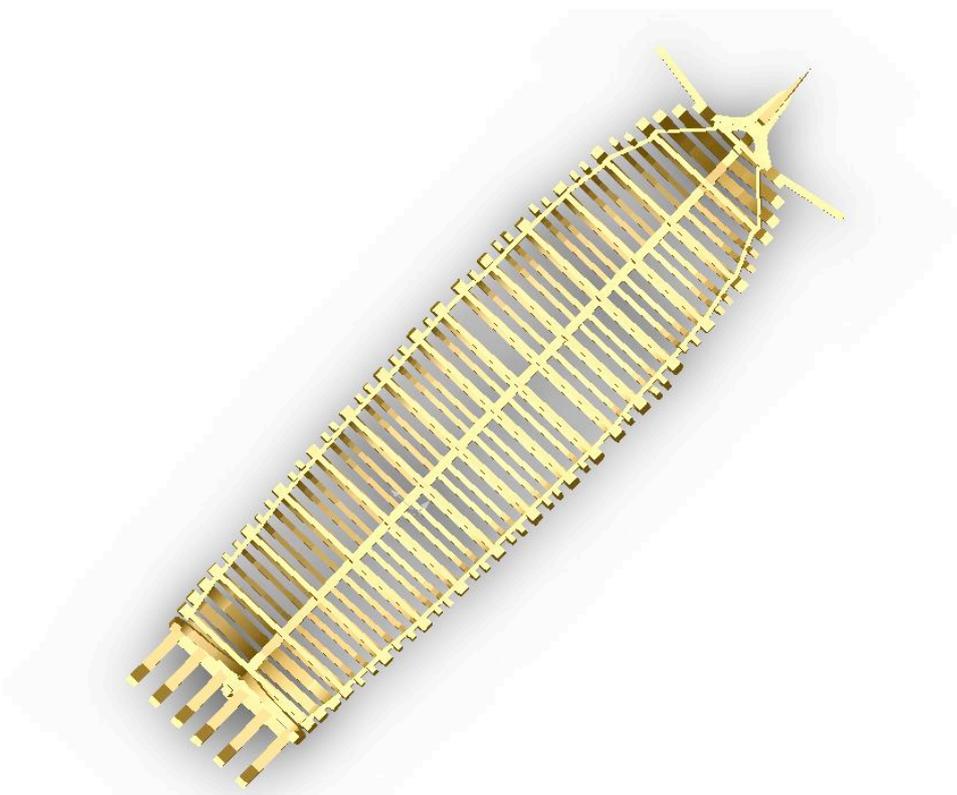


Figura 248 A vista de pájaro

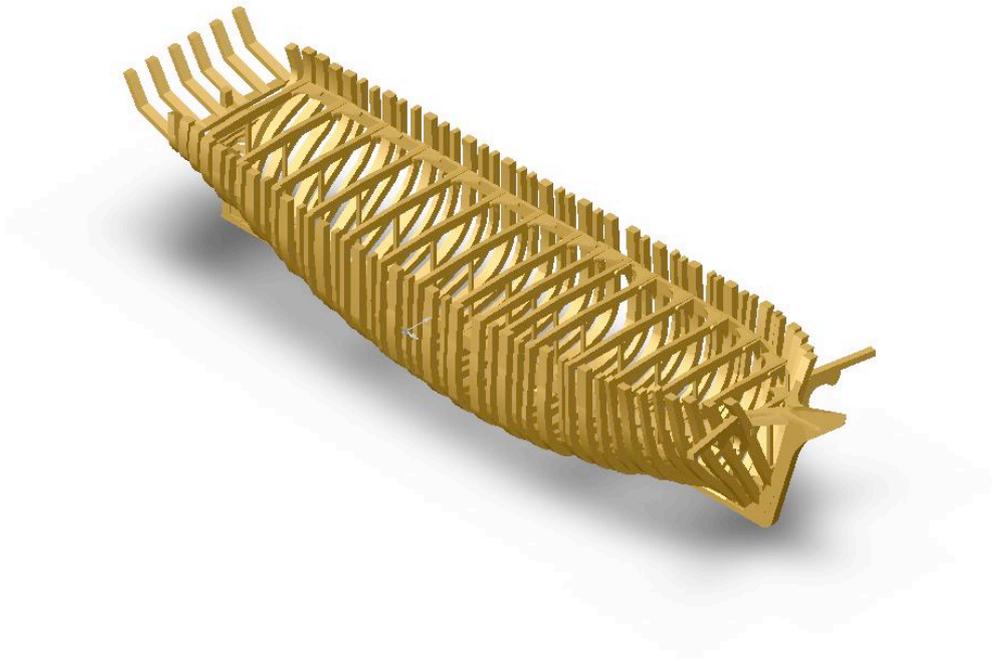


Figura 249 Perspectiva por la amura de estribor

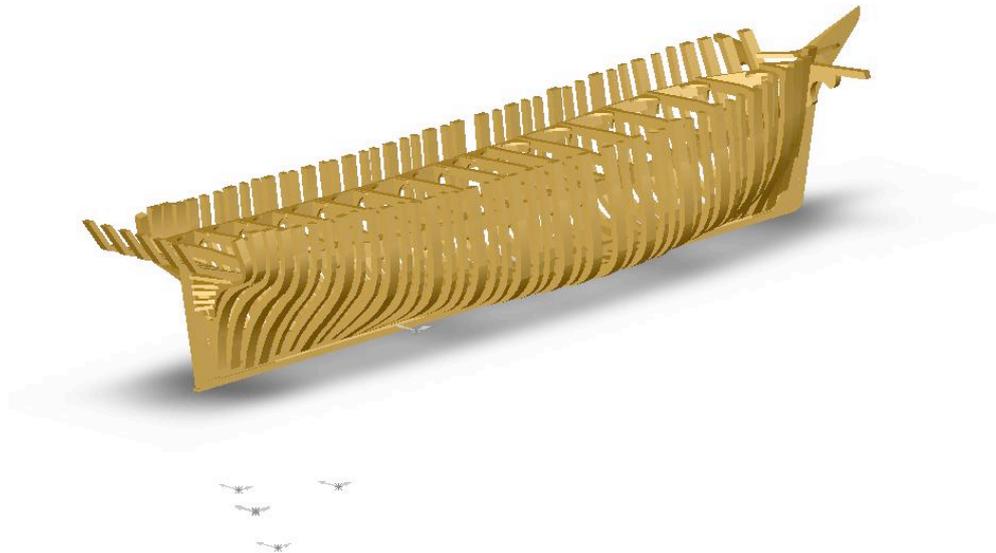


Figura 250 Perspectiva por la aleta de estribor

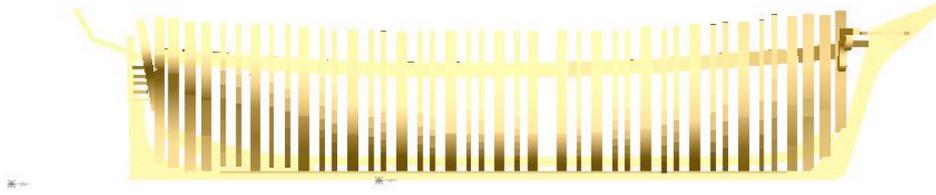


Figura 251 Perfil

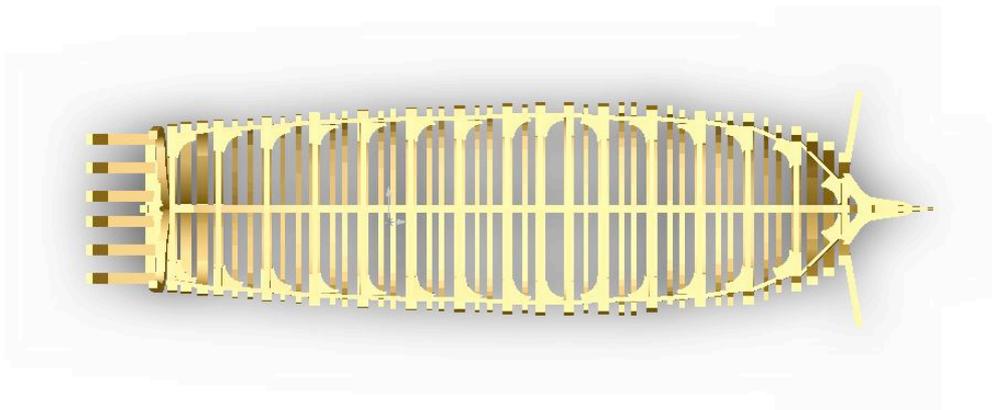


Figura 252 Planta

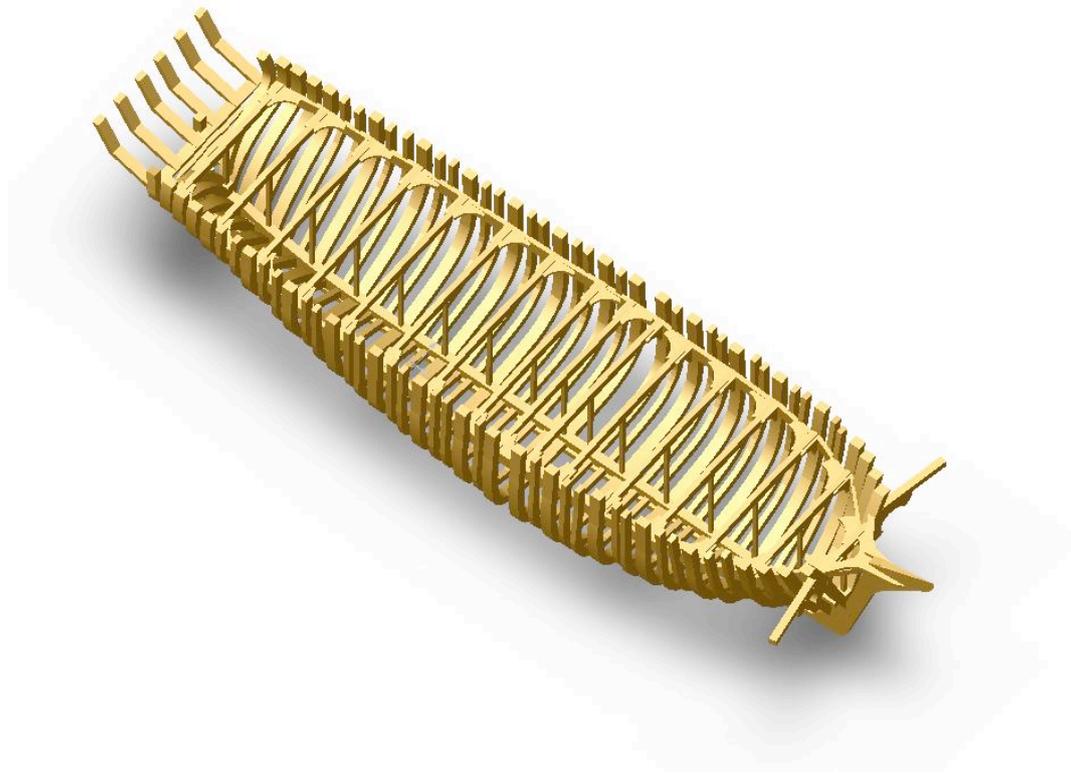


Figura 253 Perspectiva desde arriba



Figura 254 Perspectiva desde abajo

Estabilidad

Se ejecuta y el resultado que muestra, para un calado de 250 cm., de acuerdo con la línea de flotación del plano, es el siguiente:

CARENAS RECTAS DE MEDIOS CASCOS TRAPECIALES

Autor: Francisco Fernández González.

Versión: Julio de 2007 .

sManga máxima de las formas = 285.82

Puntal mínimo id. id. = 378.07

id. máximo id. id. = 428.04

se calcula hasta el calado = 250

y un número de calados = 1

mm de flotación hasta la primera sección = 33.33

id. desde última id. = 30

eslora entre secciones = 1895

id. en la flotación = 1958.33

***** *RESULTADOS para Calado = 250* *****

en mm del Medio Modelo brig-sog

<i>i</i>	<i>idn</i>	<i>xs</i>	<i>s/manga</i>	<i>s/area</i>	<i>momz</i>
<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>89.01872</i>	<i>5956.005</i>	<i>1104429</i>
<i>2</i>	<i>2</i>	<i>27</i>	<i>143.6354</i>	<i>10120.48</i>	<i>1874705</i>
<i>3</i>	<i>4</i>	<i>72</i>	<i>178.8429</i>	<i>15350.6</i>	<i>2755041</i>

4	6	117	199.1429	19605.32	3464812
5	8	162	216.3102	24685.22	4252198
6	10	295	240.0817	34965.3	5701922
7	12	428	256.1359	43811.78	6796139
8	14	561	266.6385	51125.69	7563882
9	16	694	273.3864	56486.33	8078930
10	18	827	276.4523	60725.05	8393375
11	20	960	279.6321	62933.86	8561822
12	22	1093	282.4822	64240.81	8666526
13	24	1226	281.0378	62749.71	8548919
14	26	1360	276.0711	59640.48	8280945
15	28	1493	264.0623	53124.31	7640004
16	30	1626	239.3345	42489.78	6436056
17	32	1759	187.3582	27764.85	4476784
18	34	1801	159.3008	21148.91	3516644
19	36	1848	119.0311	13385.66	2355194
20	38	1895	70.83865	5856.913	1147861

----- Hidrostáticas al Calado 25 -----

en cm. del Medio Modelo brig-sog

Eslora entre # = 189.5

Eslora con extremos = 195.833

semiManga máxima = 28.24822

Área transversal máxima = 642.4081

Volumen carena entre # = 87188.23

Centro vertical id. = 14.56153 = 58.24614 % calado
Abscisa desde L/2 = 3.695125 = 1.949934 % eslora
Volumen carena con extra = 87375.34
Centro vertical id. = 14.53037 = 58.24614 % calado
Abscisa desde L/2 = 3.674738 = 1.939176 % eslora
Área de flotación entre # = 4640.51
Centro mayor que L/2 = -.4783253 = -.2524144 % eslora
Radio metacentro trvs. = 11.6431 = 41.21712 % manga
Radio metacentro long. = 134.3611 = .7090296 esloras
Área flotación con extra = 4665.97
Centro mayor que L/2 = -.4763993 = -.2442516 % eslora
Radio metacentro trvs. = 11.62143 = 41.14039 % manga
Radio metacentro long. = 134.0737 = .6846329 esloras
Volumen hasta L/2 entre # = 40376.23 = 46.30927 % Vol.
id. desde L/2 id. = 46812 = 53.69073 % Vol.
Volumen hasta L/2 con extra = 40475.49 = 46.3237 % Vol.
id. desde L/2 id. = 46899.86 = 53.6763 % Vol.
Coefficiente de Bloque hasta # = .6515047
Afinamiento de flotación id. = .8668928
Coefficiente de la maestra = .9096617
Coefficiente prismático = .7162055
Coefficiente de Bloque c/extra = .6317888
Afinamiento flotación id. = .843461
Coefficiente maestra id. = .9096617
Coefficiente prismático id. = .6945316

Fco. Fdez-Glez. 08-22-2007.

Como se puede ver, es bastante la información que se muestra.

Lo que nos incumbe son los datos referentes al metacentro. En el plano se muestran las alturas del metacentro, es decir, distancia entre el centro de gravedad (G) y el metacentro (M), mientras que el programa nos da como resultado el valor del radio metacéntrico, es decir, la distancia desde el centro de la carena hasta el metacentro. Con el valor resultante del cálculo hecho por el programa podemos afirmar que el bergantín de la S.O.G. tiene una buena estabilidad. Se ha podido constatar, además, que si se compara el coeficiente de bloque con el bergantín catalán *Segundo Romano*, el bergantín de la S.O.G. tiene mayor coeficiente de bloque.

Para poder comparar los resultados se pasará el dato del programa a altura metacéntrica aplicando la fórmula siguiente:

$$GM = KM - KG = KB + BM - KG$$

Donde K es el punto en la base, G es el centro de gravedad (CdG), B es el centro de carena, y M es el metacentro.

El programa da KB y BM. Los barcos de vela de esa época tenían un G muy cerca de la flotación, por lo que se puede tomar la distancia KG como calado de trazado, es decir, el calado real a la base de la quilla o zapata menos el peralto de la quilla, lo que baja de K.

Según datos del programa:

- KB es el centro vertical de la carena = 1´45.
- BM es el radio metacéntrico transversal = 1´16.
- KG es la altura del centro de gravedad sobre la base = 1´25 (según plano).

Entonces:

$$GM = 1´45 + 1´16 - 1´25 = 1´36$$

Se puede ver que en la leyenda del plano del bergantín de la SOG el valor es 1´35, por lo que se entiende que está correcto y coinciden ambos. La estabilidad es suficiente.

Si se analiza el KG que resulta del análisis que hace el programa de sólidos, en el que considera ya el grosor de todas las piezas que forman la nave (se recuerdan dichas piezas en la imagen inferior ya que no están forro, arboladura, jarcia, clavazón, tablazones, forro de cobre si lo tuviera...), se observa que el KG en su estructura es de 2´16 m. Se entiende que el centro de gravedad sube debido a que existen muchos pesos por encima del original como son puntales, baos, durmientes, curvas, etc. Con este nuevo dato se obtiene un GM menor, de 0´45 m. Es aún positivo, pero de un valor muy bajo. Esto haría peligrar la estabilidad de la embarcación, con lo que sería importante lastrar la nave en su zona inferior para bajar el centro de gravedad.

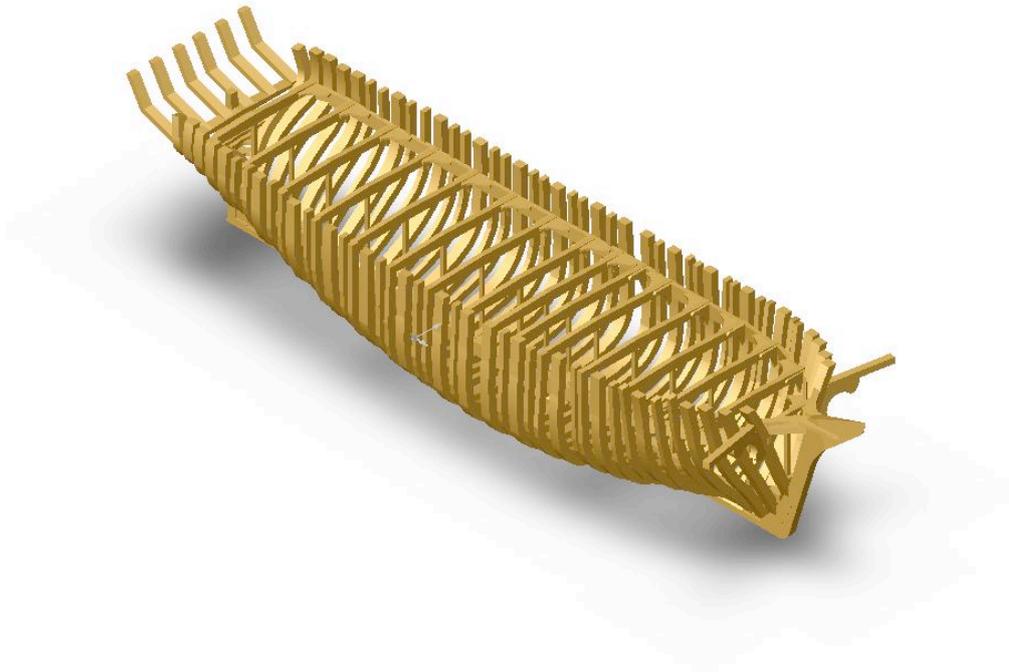


Figura 255 Bergantín de la S.O.G.

El método de los trapecios, como se ha comentado, era utilizado en el siglo XVIII. Actualmente se utilizan programas informáticos que hacen análisis muy completos tanto de la estabilidad como de la hidrostática. Se ha creído conveniente hacer un análisis completo en este sentido y mostrar los datos resultantes del bergantín de la S.O.G.

Para poder llevar a cabo dicha tarea ha sido necesario digitalizar el plano a un formato válido (IGES¹¹⁴). Se ha utilizado el programa Maxsurf¹¹⁵. Una vez que se tienen los datos en el formato correcto, se sitúan pesos a bordo y el programa ofrece una serie de datos en la que pueden analizarse cómo se comportará la

¹¹⁴ IGES es la especificación para intercambio inicial de gráficos (Initial Graphics Exchange Specification). Define un formato neutral de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora (CAD).

¹¹⁵ Maxsurf es una aplicación para el diseño de embarcaciones y el análisis de su comportamiento en la mar.

nave en la mar. Se parte del plano con el centro de gravedad (CG) y el de flotación (CF) situados tal y como se muestra:

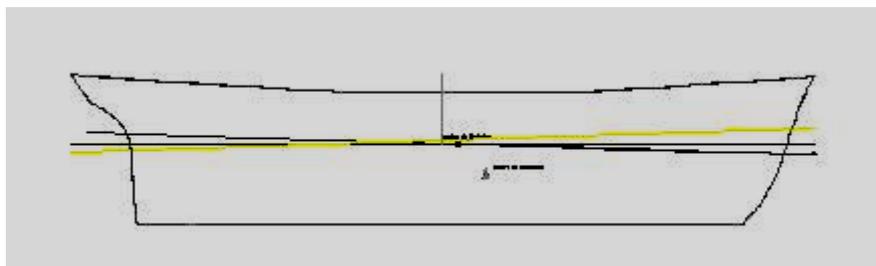


Figura 256 Plano del bergantín con CG y CF

El hecho de que el centro de gravedad, longitudinalmente, esté a proa del centro de flotación, dará como resultado que el barco esté aporado, es decir, tenga un asiento negativo. Al parecer, los datos de ambos centros son para el barco en rosca y será la distribución de la carga y el lastre los que definan la situación final de ambos. El programa muestra gráficos y tablas en los que pueden consultarse datos referentes a la estabilidad y a la hidrostática del bergantín de la S.O.G. Se muestran a continuación dichos datos.

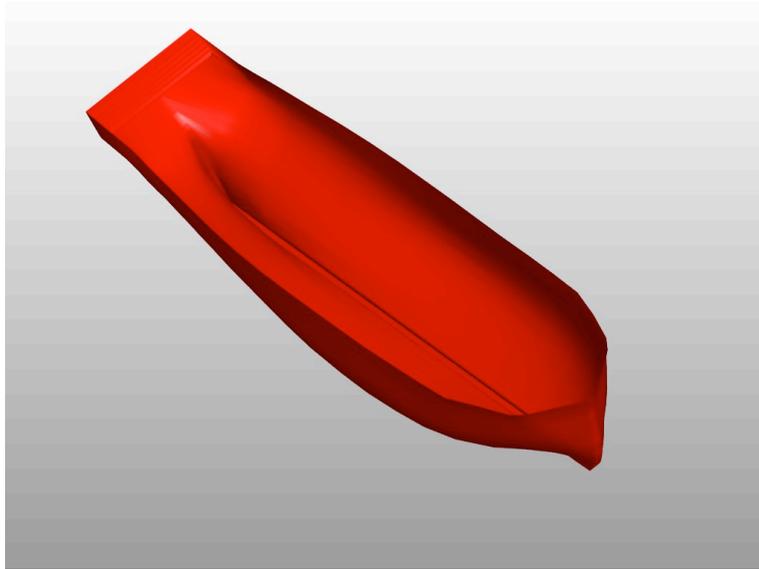


Figura 257 Plano del bergantín con CG y CF

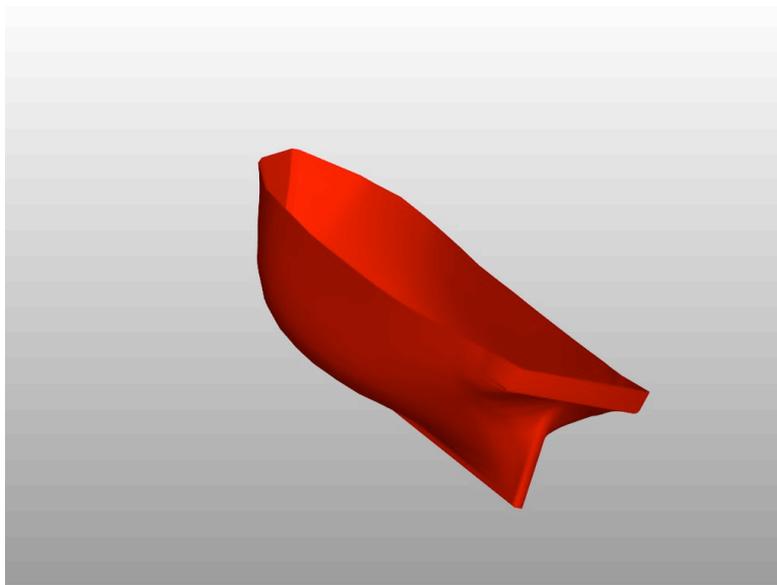


Figura 258 Perspectiva de Maxsurf

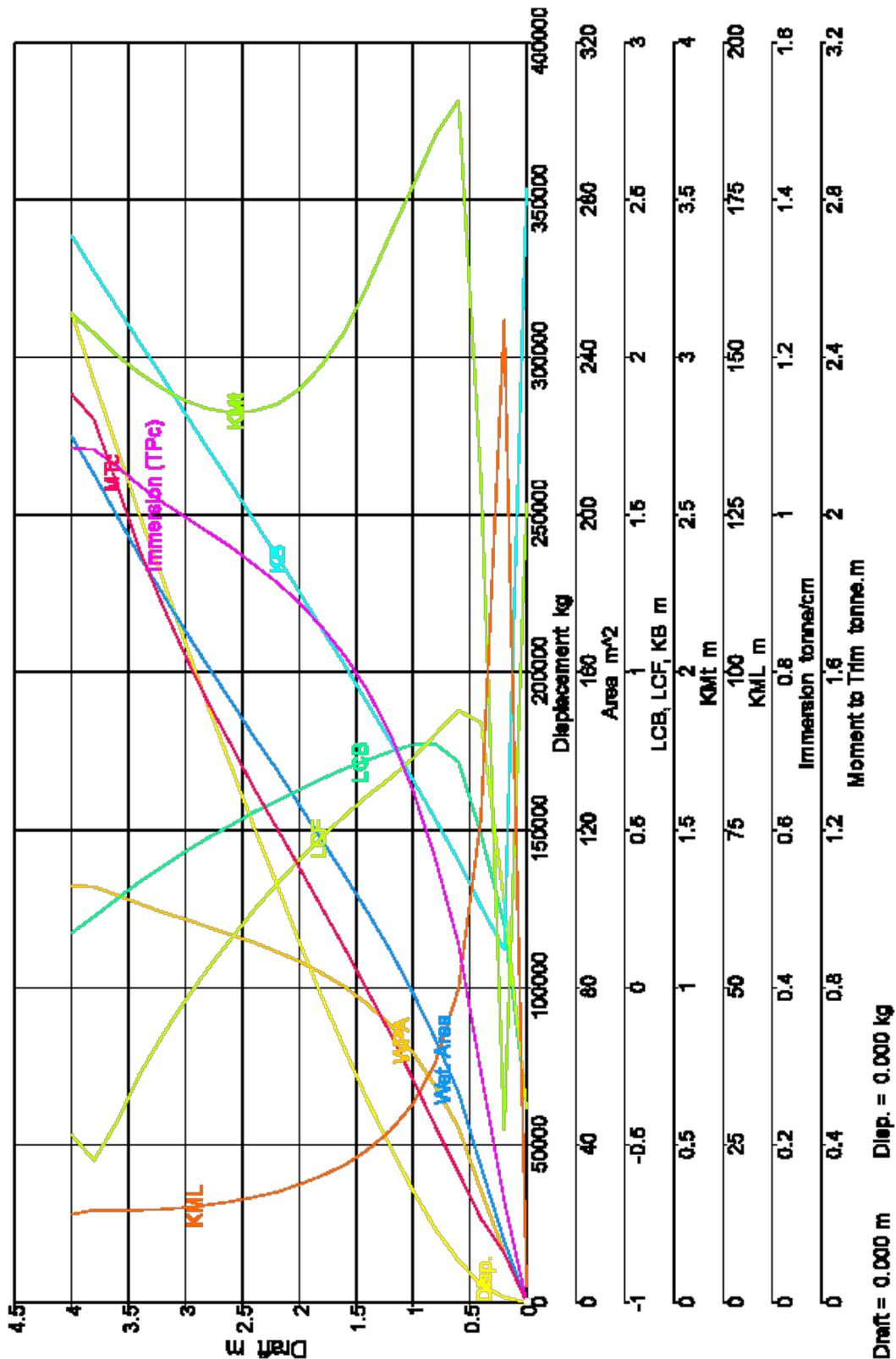


Gráfico 1. Curvas Hidrostáticas

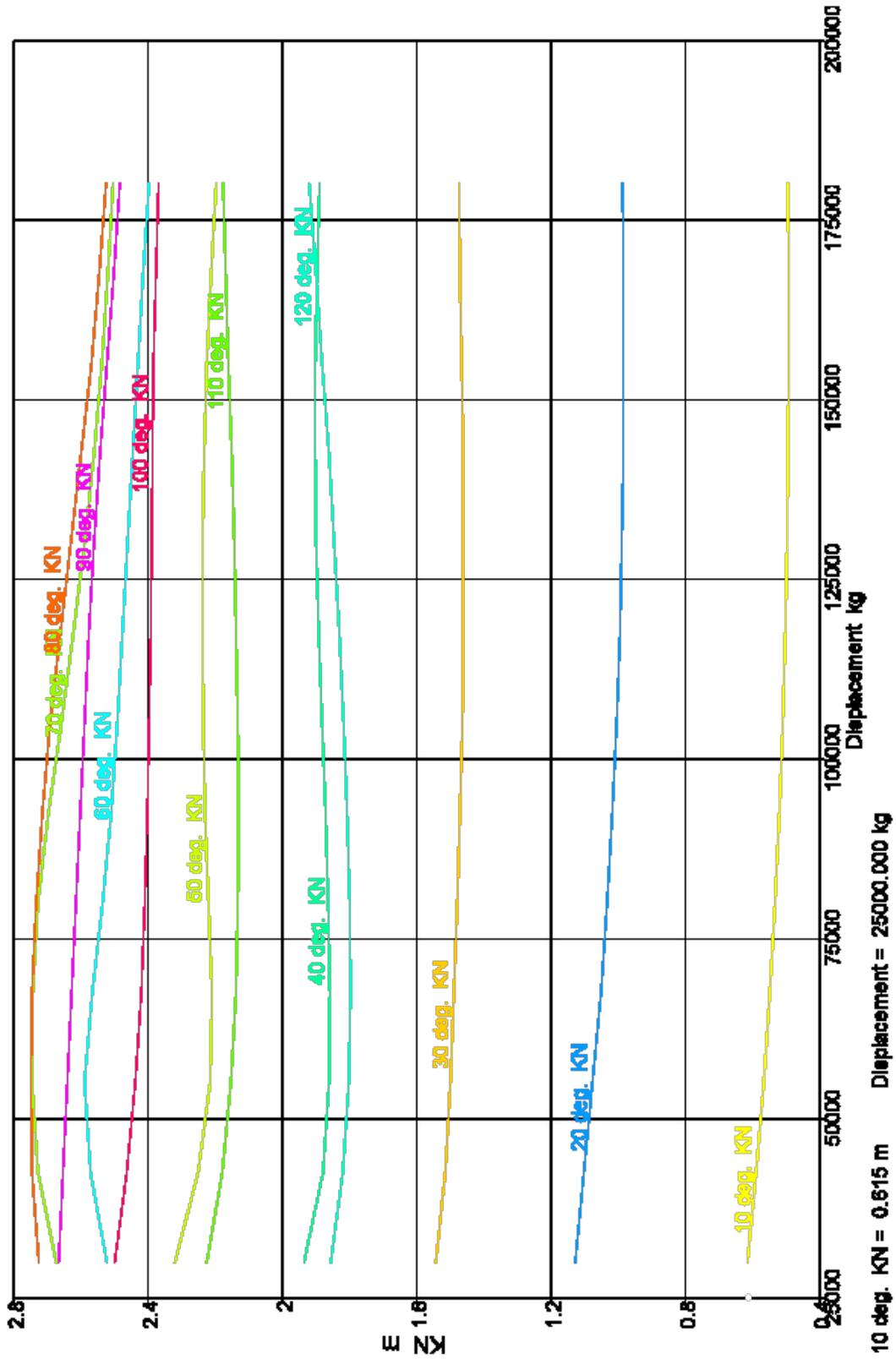


Gráfico 2. Curvas de los valores de KN

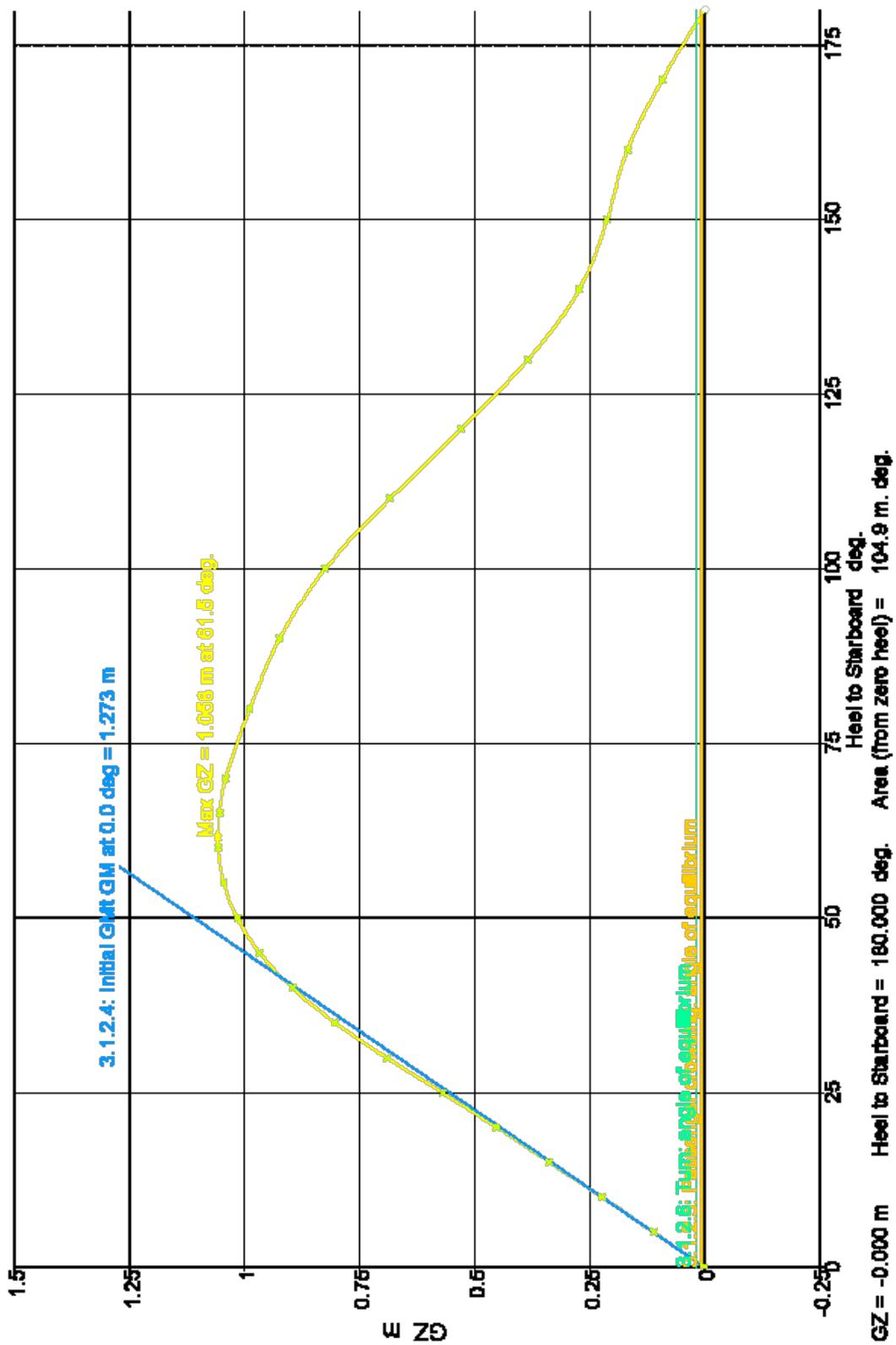


Gráfico 3. Estabilidad a grandes ángulos

Como puede verse en el gráfico superior, actualmente y en cualquier reglamento de estabilidad, el cálculo del GM o altura metacéntrica no se utiliza para analizar la estabilidad, sino que se utiliza la resultante de la curva GZ. Se puede ver que el máximo GZ se produce con una escora de $61^{\circ}50'$ y su valor es de $1^{\circ}058$ m. Como ya se había comprobado antes por medio del método de los trapecios y ahora con técnicas modernas, el bergantín de la S.O.G. es una nave estable.

Comportamiento estructural

El modelo estructural utilizado ha partido del conjunto de sólidos generados en la sección anterior pero ha sido necesario hacer algunos cambios importantes. Se ha hecho un corte longitudinal por la línea de crujía del bergantín para poder hacer la simulación y se define la estructura así con menos elementos en casos de simetría. Para que el análisis sea posible ha sido necesario unir o "coser" cada una de las piezas o sólidos que forman el bergantín (mas de 1.000) con superficies de modo que formen un verdadero conjunto y se relacionen físicamente entre todas, es decir, contacten físicamente. El modelo tiene continuidad geométrica en todas sus piezas. Este "cosido" es un contacto de piezas que físicamente se tocan entre ellas y transmiten la continuidad de modo que el modelo tiene continuidad geométrica en todas las piezas. La estructura, como se ha comentado en el capítulo III, no es la real en la que las piezas van unidas con clavazón, pernos,... pero se aproxima a la realidad.

Además ha sido necesario generar un forro exterior o casco con las mismas características que las comentadas elaborándose una superficie entre las cuadernas y en la zona del espejo de la popa se ha tenido que definir lo más aproximado a una popa real. Por último, Esto ha sido posible gracias a software con soporte gráfico GID.¹¹⁶

El modelo matemático es lineal y estático, de sólidos. Se ha definido un módulo (E) de Young de 250 y un coeficiente de transición de 0,3.

¹¹⁶ Propiedad de la Universidad Politécnica de Cataluña.

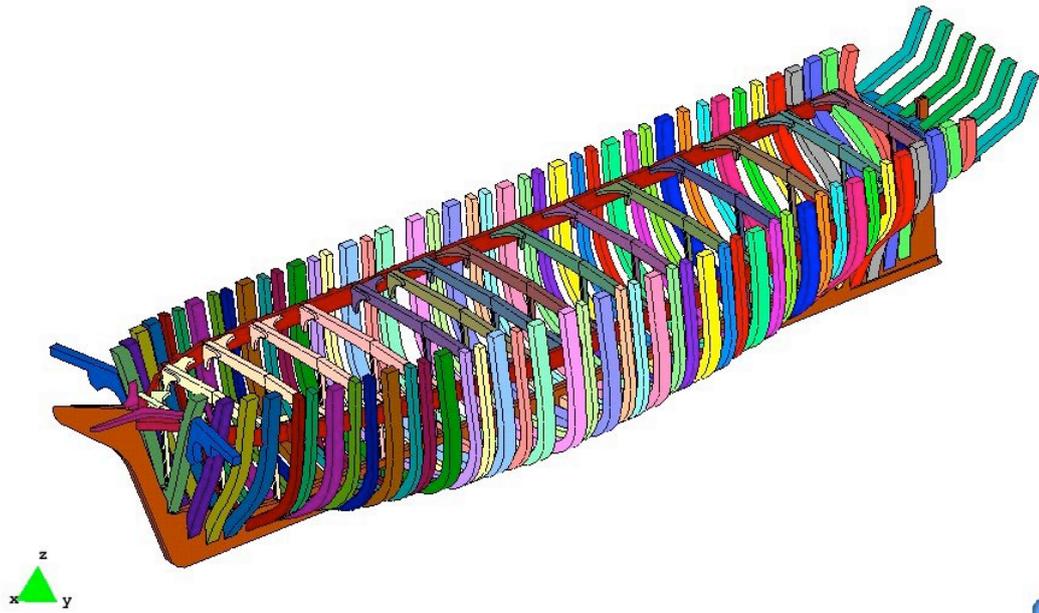


Figura 259. Bergantín modelo

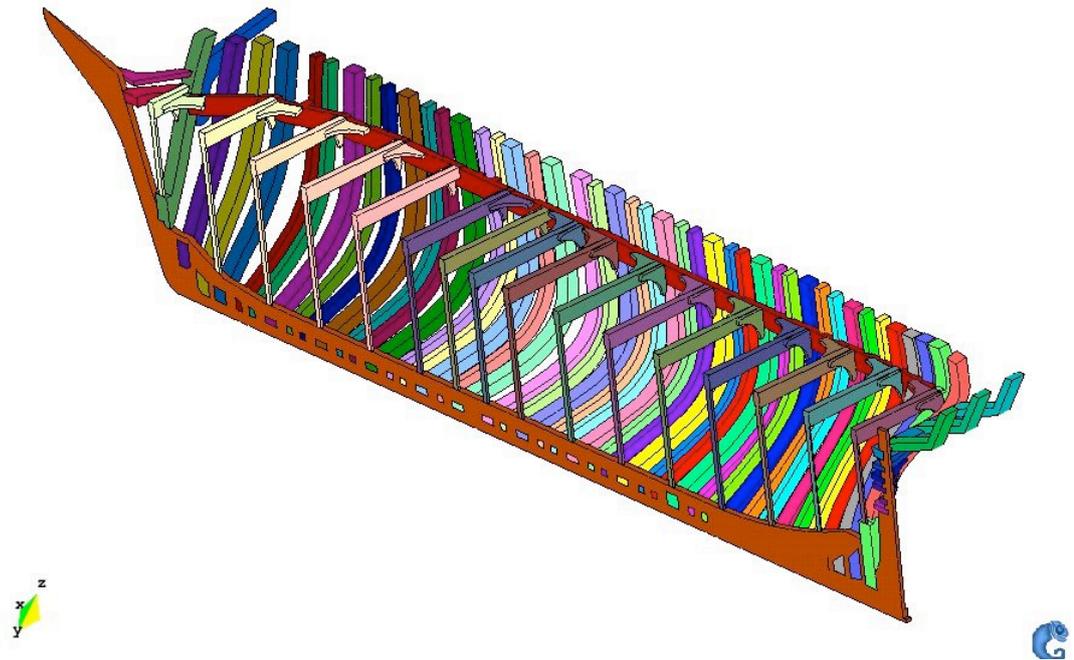


Figura 260. Corte por crujía.

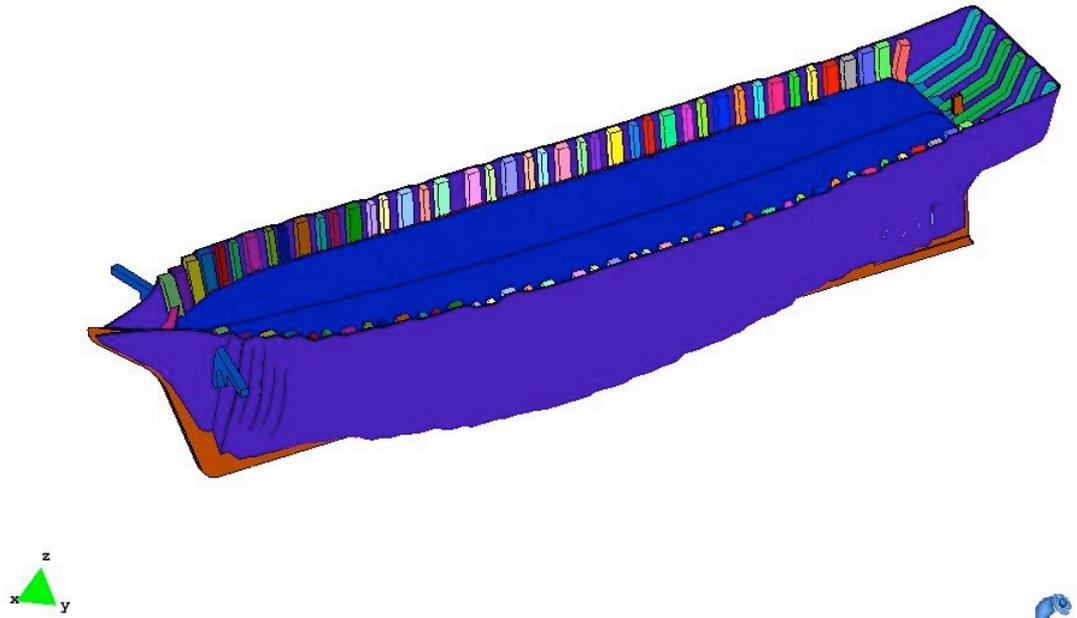


Figura 261. Modelo con forro. Vista proa

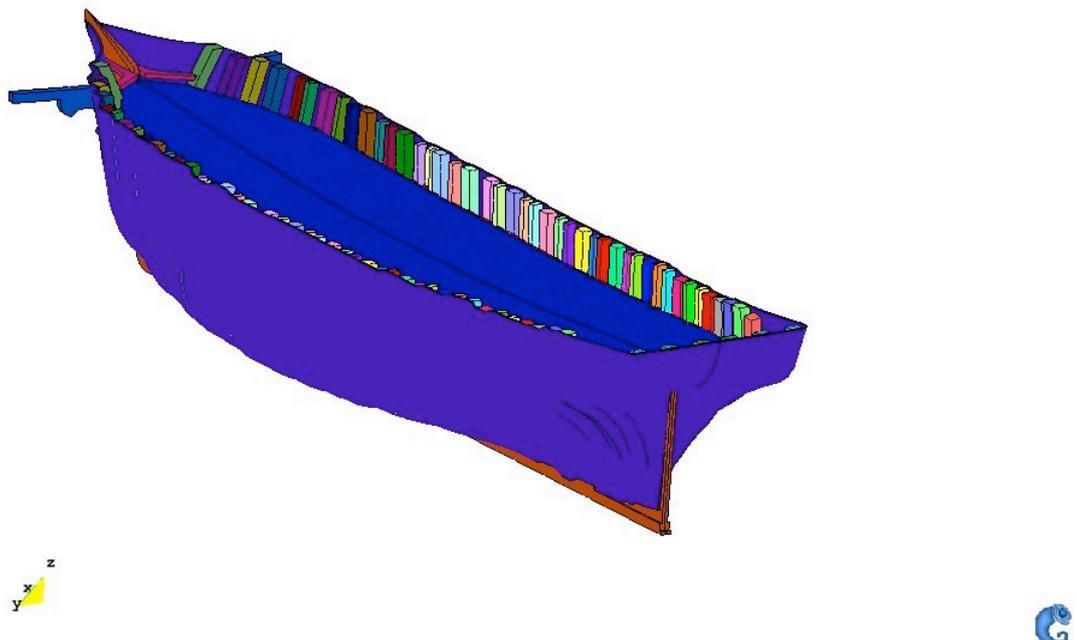


Figura 262. Modelo con forro. Vista popa.

Una vez finalizado el diseño se ha simulado con el software llamado *Compass FEM*¹¹⁷ que permite un análisis estructural y de cálculo de sólidos tridimensionales basado en el método de los elementos finitos así como la simulación del comportamiento de dichas estructuras en los fluidos.

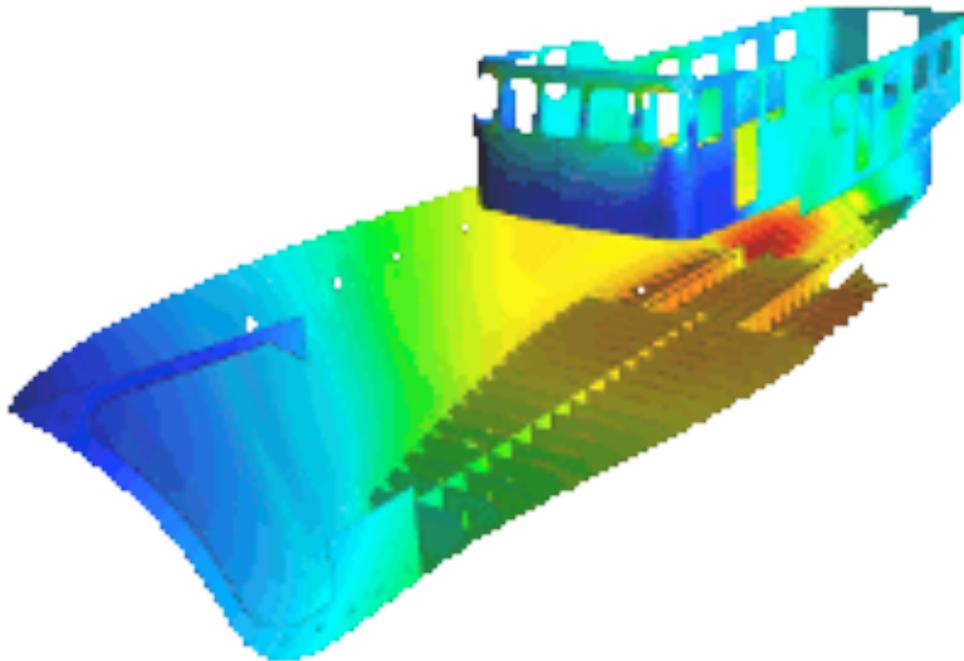


Figura 263. Software Compass FEM

El análisis simulará el comportamiento estructural del bergantín bajo diversas condiciones de mar que serán las siguientes:

1. Mar plana.
2. Ola de 5 metros de longitud y 1.25 metros de altura.
3. Ola de 20 metros de longitud y 5 metros de altura.

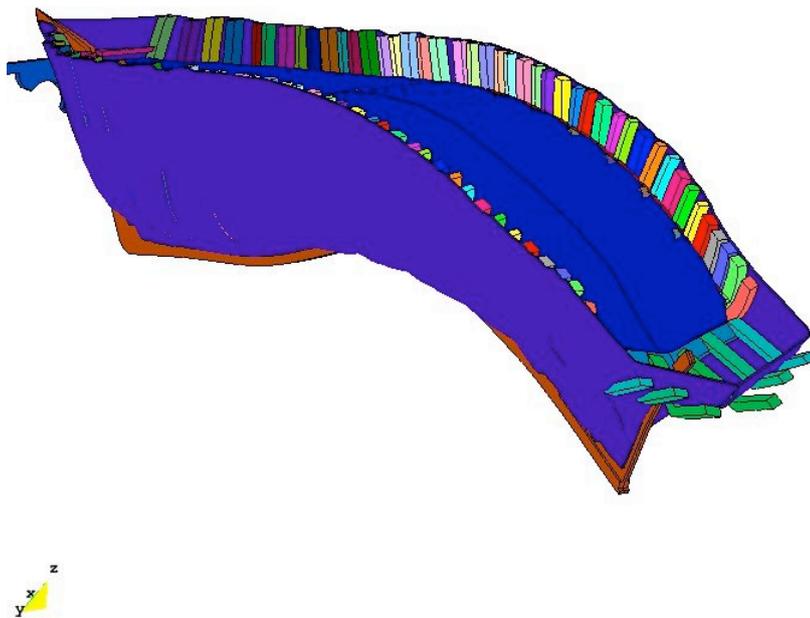
Condición de calado para todas: 2.5 metros.

Fases de las olas: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°. Las olas rompen el equilibrio peso-empuje por lo que bajo el punto de vista estructural el modelo

¹¹⁷ Propiedad de la empresa Compassis, con licencia de Nautatec.

“sufrir” más si no se iguala el peso al empuje teniendo en este caso un margen añadido.

En un primer análisis se muestran las deformadas. Estas imágenes son clave para continuar o no con el análisis ya que muestran el comportamiento de la estructura en diversas condiciones de simulación con un factor de 500 veces la realidad de modo que se ve claramente la respuesta a las tensiones. Si en esta etapa las imágenes no son lógicas no se continúa.



Deformation (x500): Displacements (mm) of N9, step 1.



Figura 264. Deformada.

En un segundo análisis se muestran las tensiones S_x y finalmente las Von Mises.

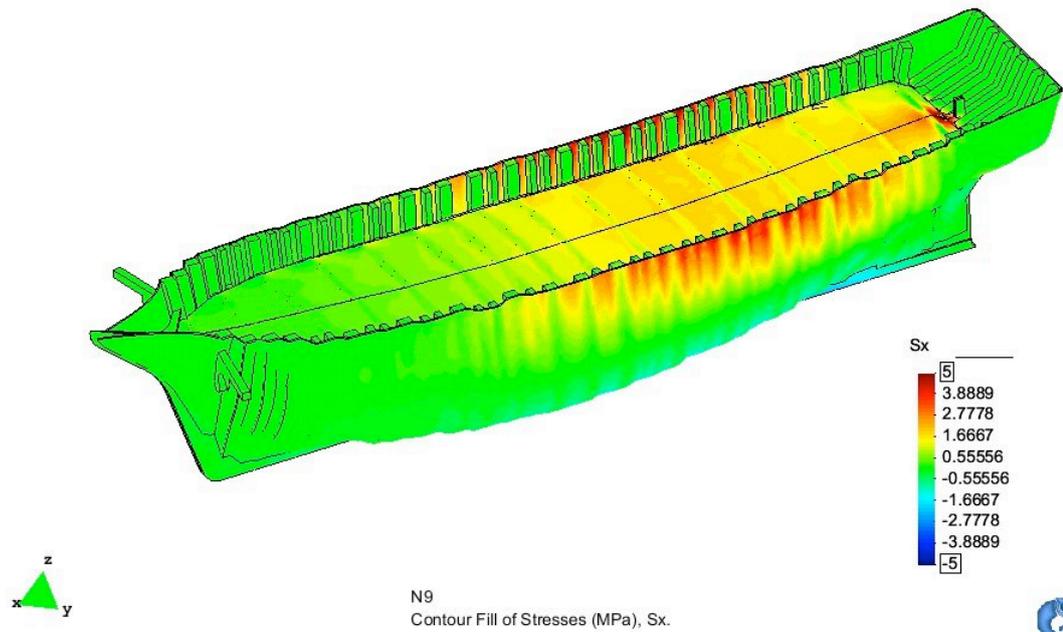


Figura 265. Tensiones Sx

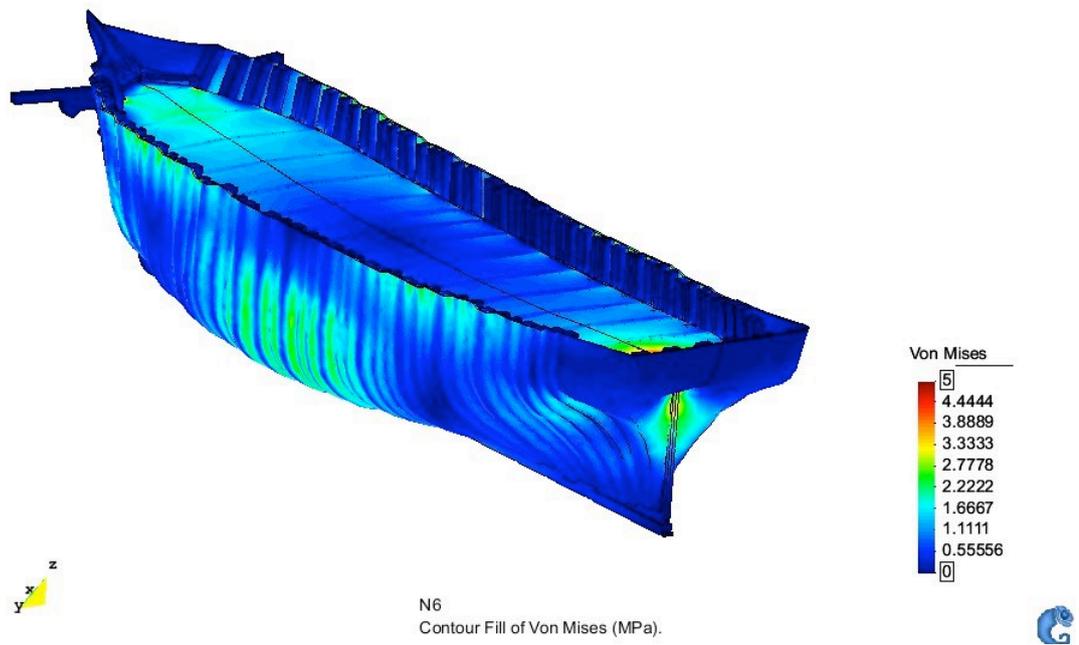


Figura 266. Von Mises.

Características físicas de la madera de roble para el cálculo:

- Módulo elástico: 11 GPa.
- Módulo de Poisson: 0.3
- Densidad: 500 kg/m³.
- Resistencia a la rotura: 60 MPa.
- Límite elástico: 25 MPa.

Asimismo se introducen una serie de cargas para un cálculo real:

- Peso propio (madera): 245314 N (25006.50 kg)
- Presión hidrostática para calado de 2.5 m: 1703410 N (173640.2 kg).

Se puede comprobar que es muy parecido al que sale de la tablas hidrostáticas (ver Tabla 5). Como el peso propio no es igual a la presión hidrostática se añaden algunas cargas:

- Cargas en bodegas entre las posiciones 4.34 metros a 15.82 metros de popa: 1215076 N (123861 kg). Las cargas van desde la cuaderna 10 a la 39 y son perpendiculares a la parte interior de la cuadernas. Las cargas hidrostáticas de bodega son perpendiculares a la cubierta.

- Cargas en cubierta: 243020 N (24772,70 kg).

Se deja una relación de 5 veces la carga en bodegas respecto a la de cubierta como algo razonable.

RESULTADOS

1. Mar plana.

Figura 267. Deformada. Mar plana. Vista lateral.

No se aprecia ninguna alteracion significativa incluso sabiendo que el factor de la deformada está exagerado en 500 veces. Como ya se ha comentado anteriormente, no son las deformadas una gran fuente de información sino que su cometido principal es ser una referencia visual.

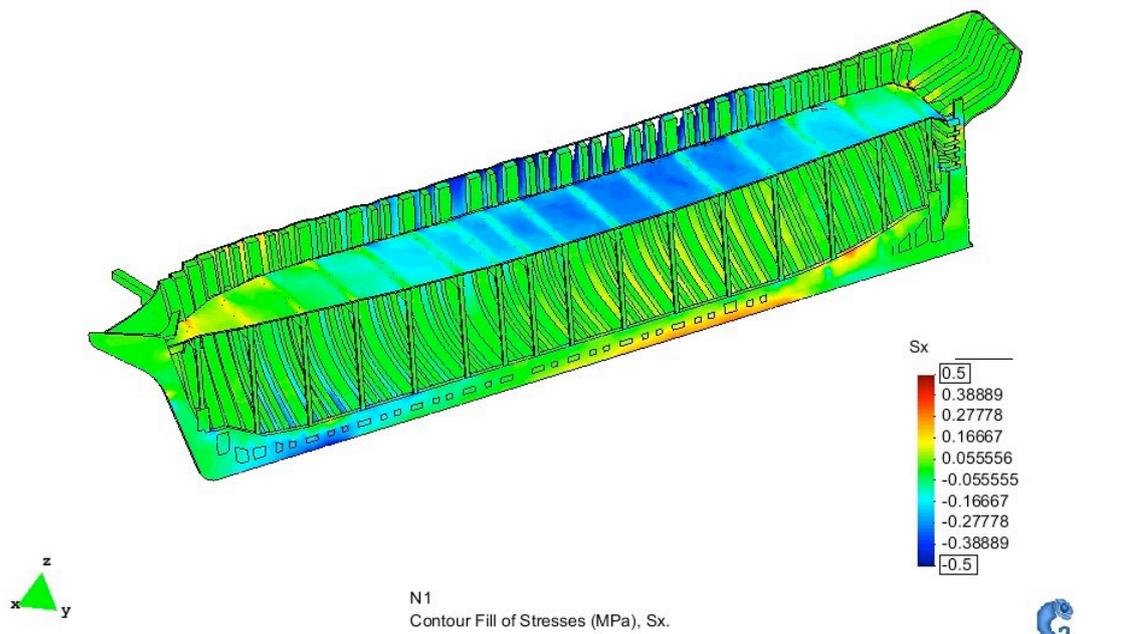


Figura 268. Tension Sx. Mar plana. Vista proa

Tampoco se aprecian grandes tensiones ni de tracción (positivas, en rojo mayores) ni de compresión (negativas, en azul mayores).

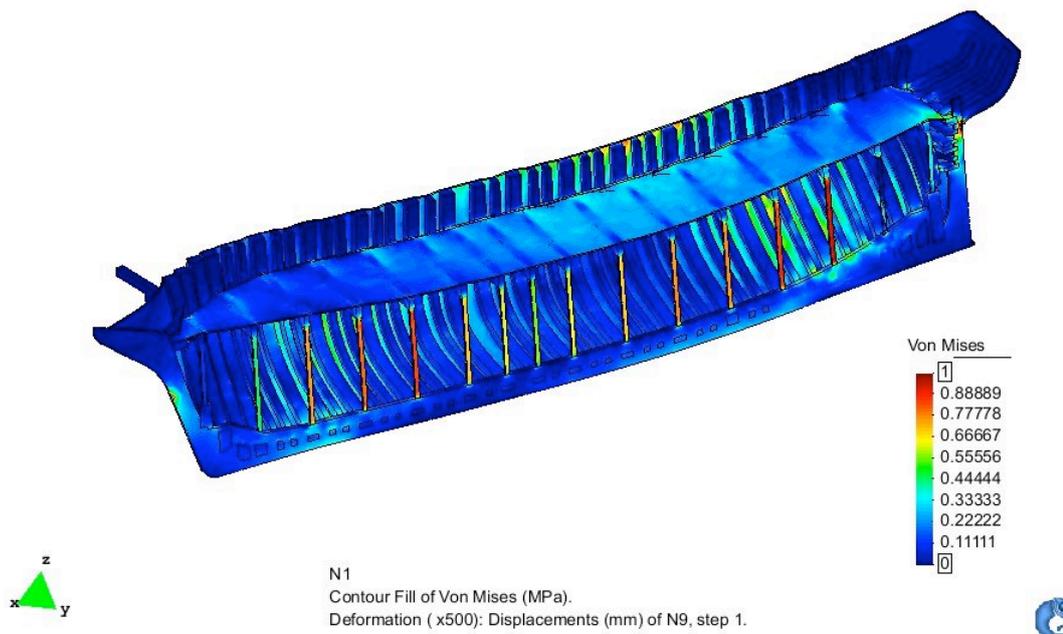


Figura 269. Von Mises. Mar plana. Vista proa

Las Von Mises muestran los valores de fallo. El límite es de 25 MPa. El programa nos da los valores con aceleración 1. En el caso de un bergantín puede

considerarse un valor real el de 2^{118} por lo que el valor máximo, que es 1, nos daría como resultado 2 y entonces sabemos que estamos con un margen de más de 12 veces.

2. Ola de 5 metros de longitud y 1.25 metros de altura.



Figura 270. Deformada por ola 90°. Vista lateral.

¹¹⁸ La aceleración dinámica local de impacto. No se van a recibir olas de impacto nunca debido a la baja velocidad del bergantín.

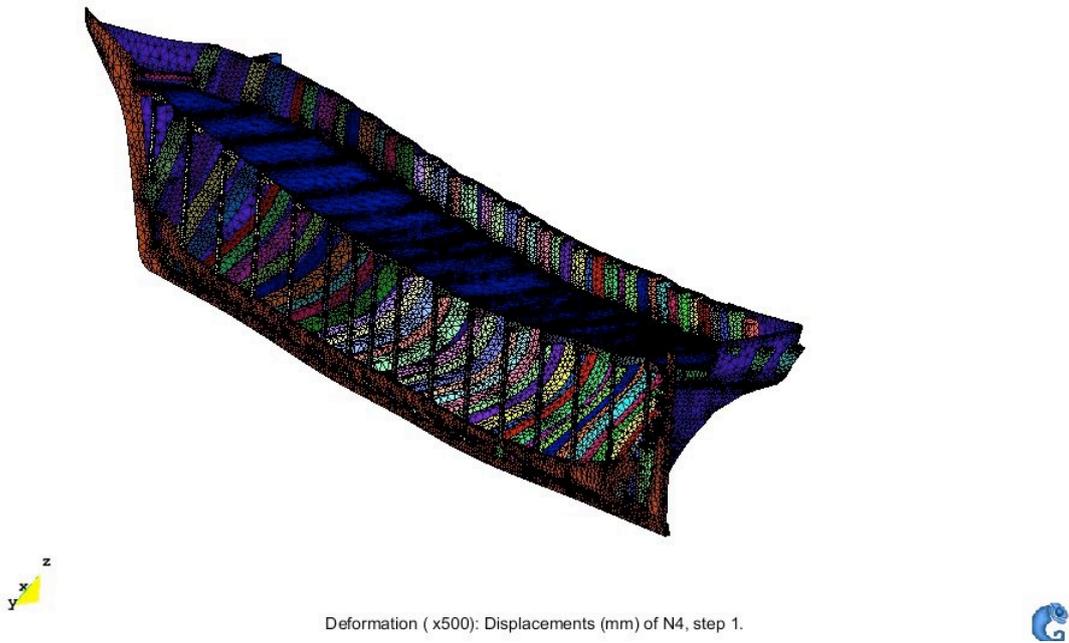


Figura 271. Deformada por ola 90°. Vista popa.

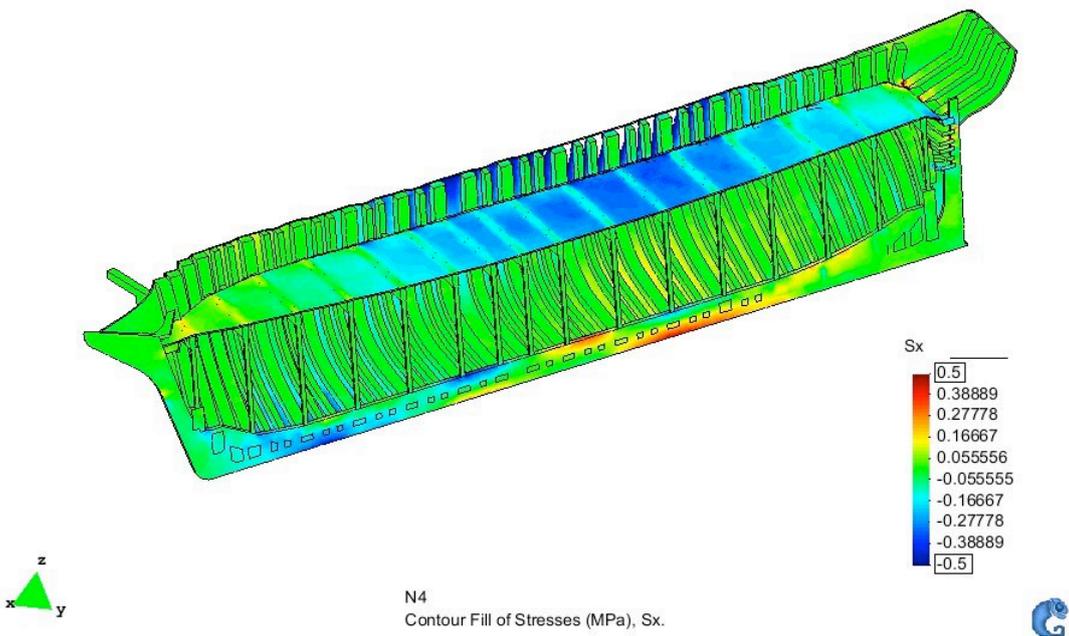


Figura 272. Tension Sx por ola 90°. Vista proa.

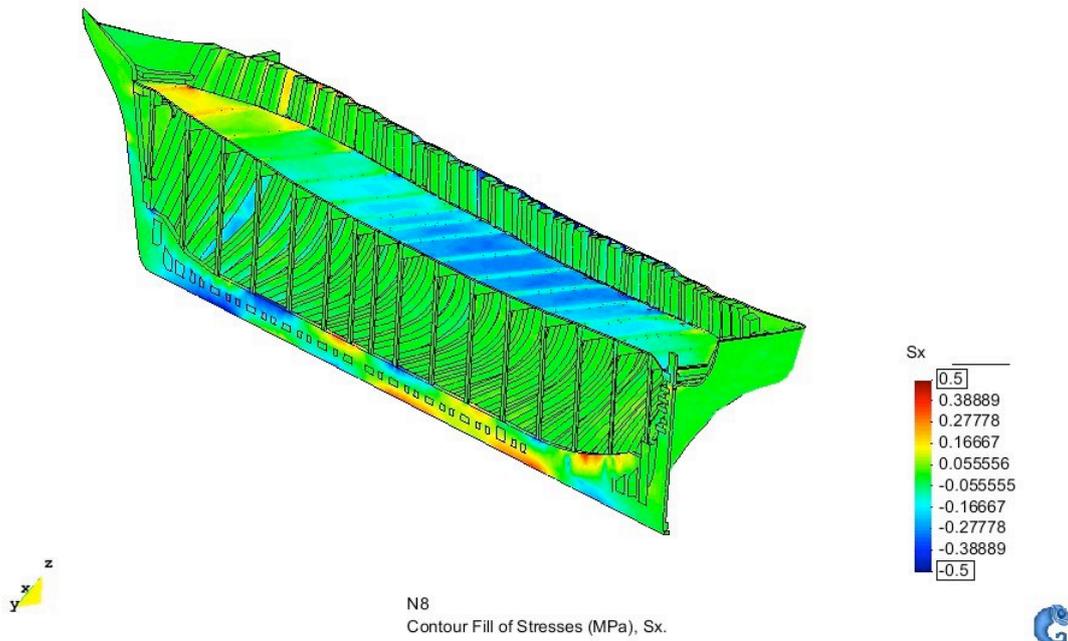


Figura 273. Tension Sx por ola 270°. Vista popa.

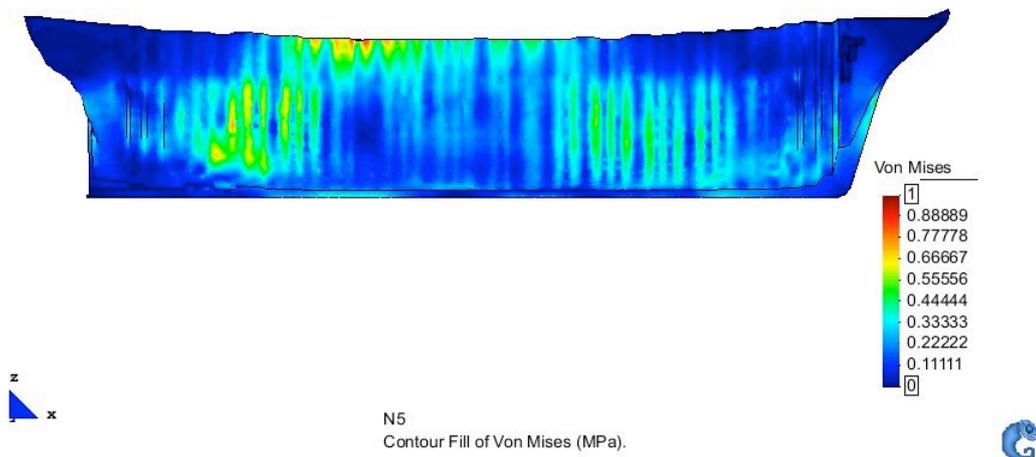


Figura 274. Von Mises por ola 135°. Vista lateral.

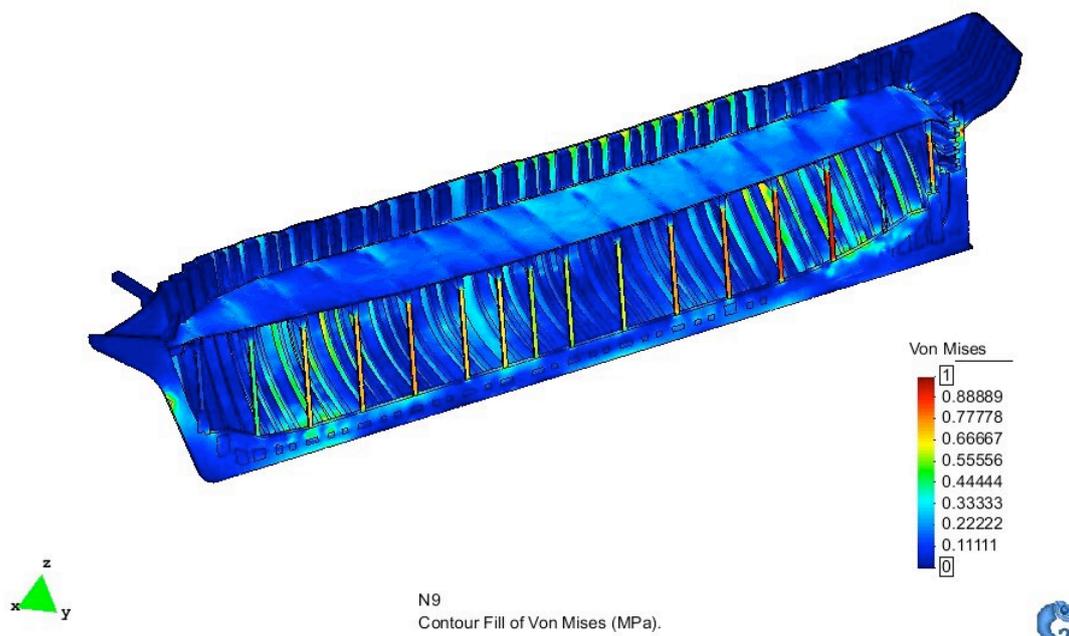


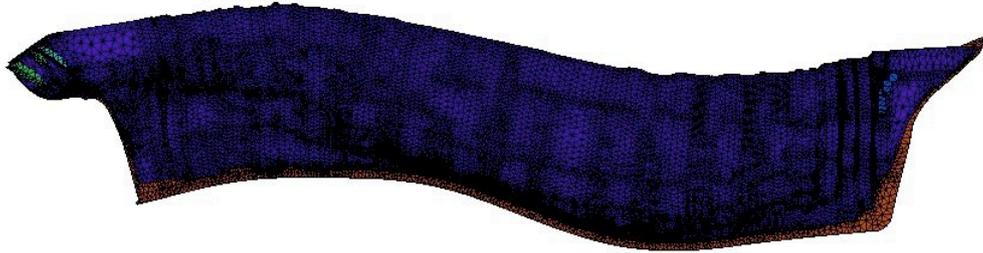
Figura 275. Von Mises por ola 35°. Vista proa.

En este caso se puede comprobar que el valor máximo tampoco sobrepasa 1 MPa. Como se considera el valor de la aceleración igual a 2, se obtiene entonces un valor de 2, que es más de 12 veces inferior al límite elástico.

La carga de las olas es directamente proporcional a la curva de la ola y ese es el nivel hidrostático en cada momento.

No se ha considerado con escora. El cálculo es con el modelo adrizado ya que no se ha considerado importante ese efecto.

3. Ola de 20 metros de longitud y 5 metros de altura.



Deformation (x500): Displacements (mm) of N2, step 1.



Figura 276. Deformada por ola de fase 0°. Vista lateral.



Deformation (x500): Displacements (mm) of N8, step 1.



Figura 277 Deformada por ola fase 225°. Vista lateral.

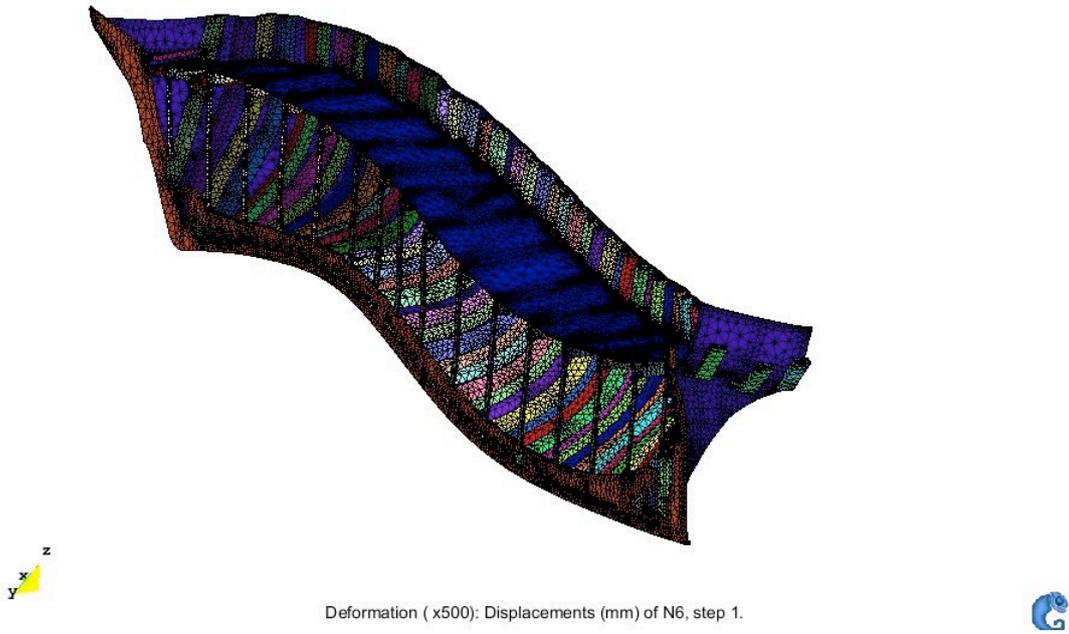


Figura 278. Deformada por ola 180°. Vista popa.

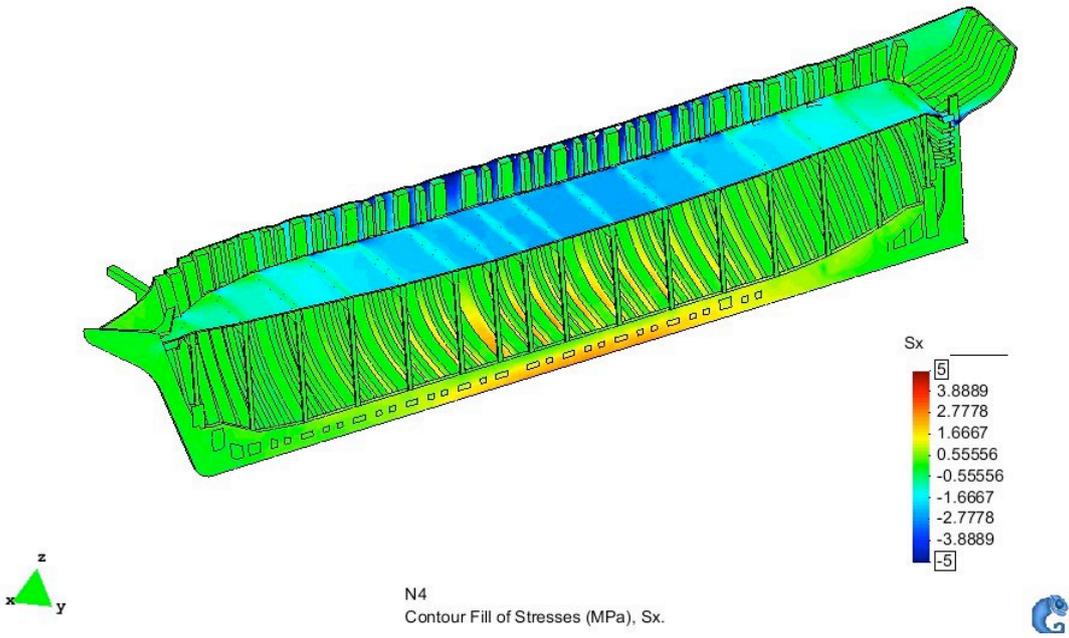


Figura 279. Tension Sx por ola 90°. Vista proa.

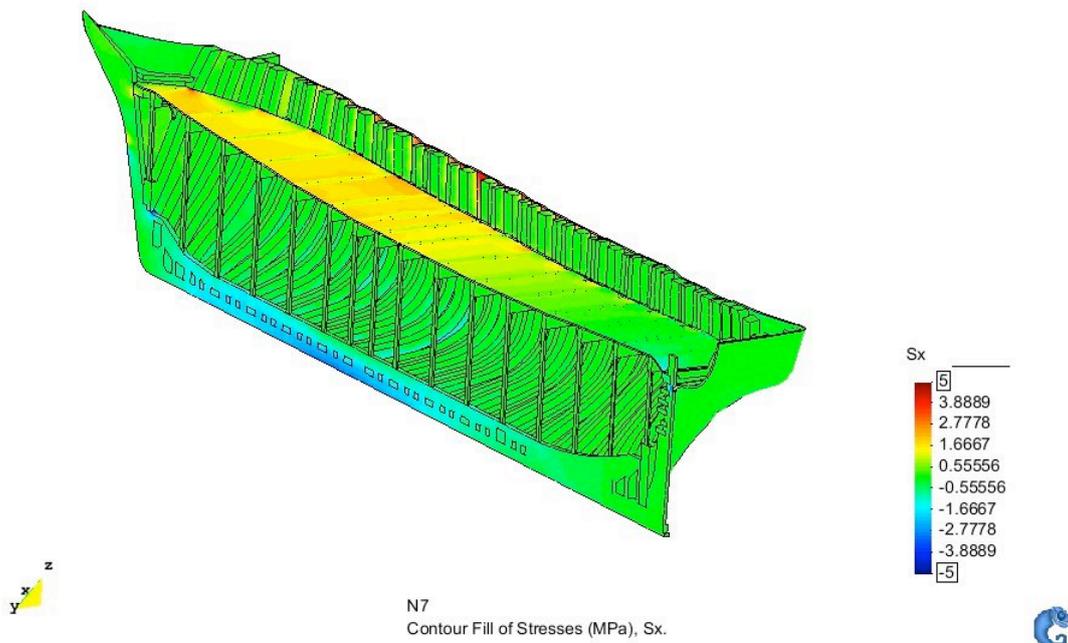


Figura 280. Tension Sx por ola 225°. Vista popa.

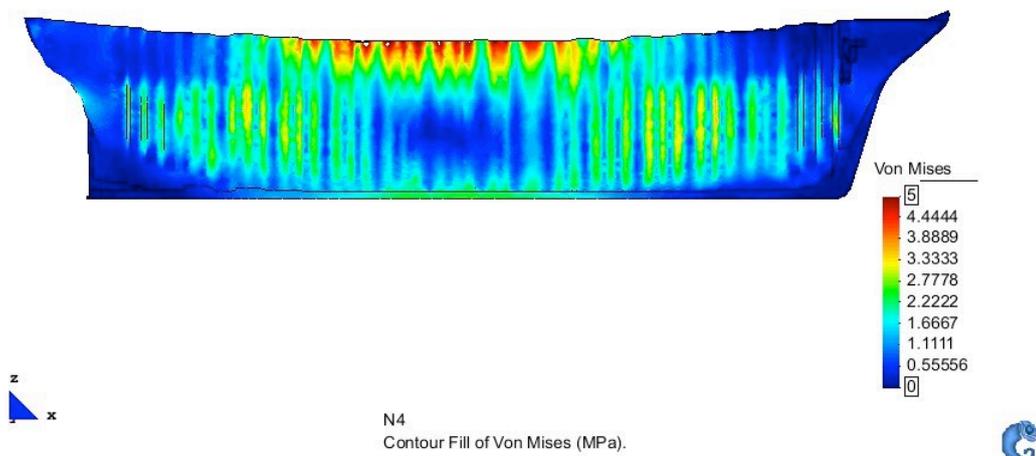


Figura 281. Von Mises por ola 90°. Vista lateral.

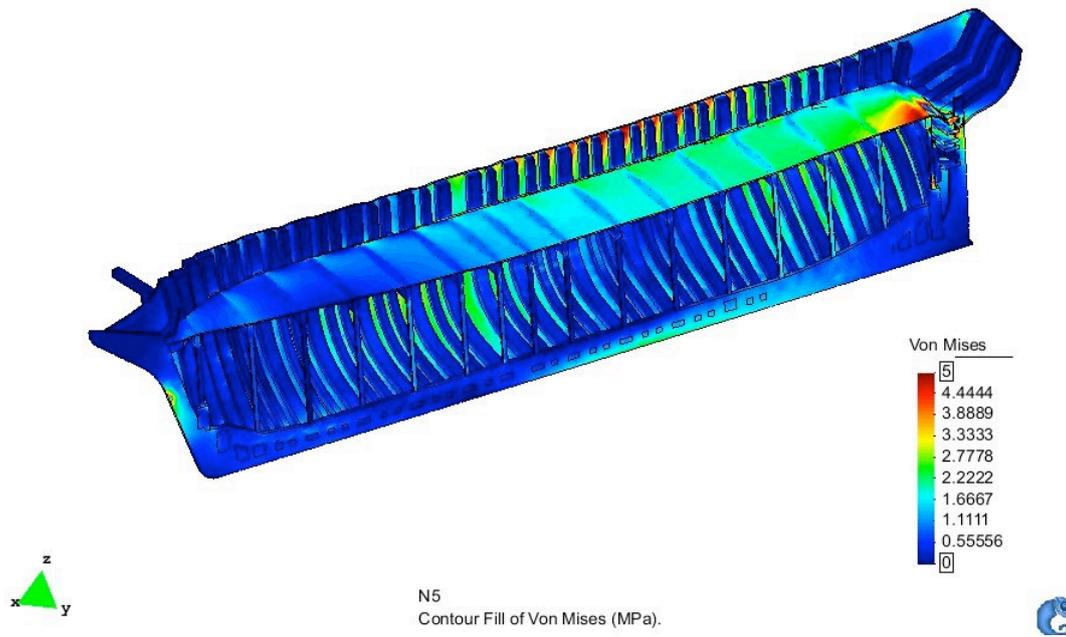


Figura 282. Von Mises por ola 135°. Vista proa.

En este caso se puede comprobar que el valor máximo es de 5. Como se considera el valor de la aceleración igual a 2, se obtiene entonces un valor de 10, que es 2.5 veces inferior al límite elástico.

	Sx	Von Mises
Mar llana	0,5	1
Olas l=5m / h=1.25m	0,5	1
Olas l=20m / h=5m	5	5

Tabla 5. Resumen valores Sx y Von Mises en los casos observados

Arqueo

1. Método del siglo XVI el arqueo en el bergantín de la S.O.G.:

Nos bastaría con saber la eslora y el puntal. En este caso, eslora = 76 pies, es decir, 21'25 metros, ó 37'68 codos del cantábrico. El puntal son 9'25 pies, es decir, 2'59 metros, ó 4'64 codos del cantábrico. Para el cálculo de la manga y la quilla se podría utilizar, como antes, el método As-Dos-Tres, pero ya que se tienen esos datos se usan: 10 codos; y la quilla, 34 codos.

$$Volumen = \frac{10 * 4.64(34 + 37.68)}{32} = 104 \text{ toneles.}$$

Se puede comprobar en el plano del bergantín de la S.O.G. que habla de un bergantín del porte de 110 a 130 toneladas, por lo que el cálculo del arqueo mediante el método aplicado tampoco está muy alejado.

2. Método de Cristobal de Barros en el bergantín de la S.O.G.:

$$Volumen = \frac{5\left(\frac{5 + 2.8}{2}\right) * 37.68}{8} * 1.14 = 104'70 \text{ toneles.}$$

Se ha de tener en cuenta que se mide sobre plano la variable Hnm. Como se puede ver el resultado es similar.

3. Método de las Ordenanzas de 1613 en el bergantín de la S.O.G.:

$$Volumen = 0.95 \frac{10 * 4.64 * 71.68}{32} = 98'74 \text{ toneladas.}$$

Se puede ver que el arqueo ha disminuido con respecto al cálculo anterior. Si se introduce en las tablas de las Ordenanzas, con las dimensiones más aproximadas, da 94'5 toneladas.

En la tabla de arqueo de la ordenanza de 1618 el arqueo resultante para el bergantín de la S.O.G. es de 106 toneladas; se puede ver que es mayor que para el arqueo de la ordenanza de 1613, en la que el resultado eran 94 toneladas.

Este método se utilizó hasta mediados del siglo XVIII, momento en el que se impusieron las actuales técnicas de arqueo basadas en la Regla de Simpson. Esta regla es más exacta cuantas más secciones transversales se toman para su cálculo. En el siglo XVIII se tomaban 3: la cuaderna maestra y los redeles de proa y popa, más la última sección de la popa plana, y su anchura era la mitad de la manga. Actualmente se puede llevar a cabo el cálculo al límite ya que los programas de diseño en 3 dimensiones (sólidos) son capaces de analizar el volumen del barco con miles de secciones, por lo que la exactitud es mucho mayor.

Hay que recordar que las toneladas que se obtienen del arqueo no tienen nada que ver con las del desplazamiento o peso real de las naves, sino que son una medida de tonelaje oficial.