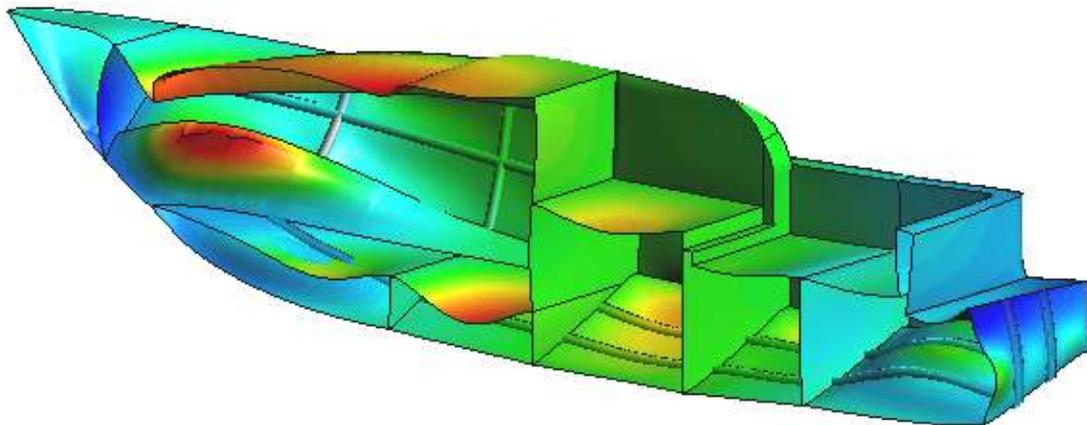




PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA TÉCNICA NAVAL



# Escantillonado y AEF de una embarcación de recreo



Febrero de 2010

**Autor:** Francisco De Haro Lisón

**Director:** Francisco Blasco Lloret

Unidad Predepartamental de Tecnología Naval

# Índice

<b>1.-<a href="#">Introducción</a></b>	<b>1</b>
1.1- <a href="#">Sinopsis</a>	1
1.2- <a href="#">Categoría de diseño y zonas de navegación para las embarcaciones de recreo</a>	2
1.2.1- <a href="#">Escala Beaufort</a>	4
1.2.2- <a href="#">Altura significativa de ola</a>	5
1.2.3- <a href="#">Teoría de Stokes para altura máxima de ola</a>	6
1.3- <a href="#">Breve introducción a los materiales compuestos</a>	7
1.3.1- <a href="#">Definición, ventajas y desventajas</a>	7
1.3.2- <a href="#">Concepto de lámina y laminado</a>	8
1.3.3- <a href="#">Resina de poliéster</a>	9
1.3.4- <a href="#">Fibra de vidrio</a>	9
1.3.5- <a href="#">Laminado Sándwich</a>	10
1.3.5.1- <a href="#">Espumas</a>	11
<b>2.-<a href="#">Escantillonado ISO 12215-5</a></b>	<b>13</b>
2.1- <a href="#">Introducción</a>	13
2.2- <a href="#">Objeto y campo de aplicación</a>	14
2.3- <a href="#">Datos principales de la embarcación</a>	16
2.4- <a href="#">Definiciones importantes</a>	17
2.5- <a href="#">Método para la determinación de las propiedades mecánicas</a>	19
2.6- <a href="#">Hojas de cálculo</a>	20

2.6.1.- <a href="#">Hoja 1</a>	21
2.6.2.- <a href="#">Hoja 2</a>	21
2.6.3.- <a href="#">Hoja 3</a>	24
2.6.4.- <a href="#">Hoja 4</a>	25
2.6.5.- <a href="#">Hoja 5</a>	27
<b>2.7.-<a href="#">Resultados de escantillonado</a></b>	<b>29</b>
2.7.1.- <a href="#">Cubierta</a>	30
2.7.2.- <a href="#">Mamparos</a>	33
2.7.3.- <a href="#">Fondo</a>	35
2.7.3.1.- <a href="#">Paneles</a>	35
2.7.3.2.- <a href="#">Refuerzos</a>	38
2.7.4.- <a href="#">Costado</a>	41
2.7.4.1.- <a href="#">Paneles</a>	41
2.7.4.2.- <a href="#">Refuerzos</a>	43
<b>2.8-<a href="#">Resumen de resultados</a></b>	<b>46</b>
<b>2.9.-<a href="#">Cálculo del peso de la estructura</a></b>	<b>47</b>
<b>3.-<a href="#">Modelado 3D para AEF</a></b>	<b>48</b>
3.1 <a href="#">Exportación</a>	52
<b>4.-<a href="#">Método de los elementos finitos (MEF)</a></b>	<b>52</b>
4.1.- <a href="#">Breve introducción al MEF</a>	52
4.2.- <a href="#">Historia MEF</a>	53
4.3.- <a href="#">Definición del MEF</a>	55

4.4.- <a href="#">Funcionamiento básico de un paquete de elementos finitos</a>	56
<b>5.-<a href="#">Análisis por elementos finitos</a></b>	<b>59</b>
5.1.- <a href="#">Preparación de modelo para la asignación de propiedades</a>	59
5.2.- <a href="#">Asignación de propiedades</a>	61
5.2.1.- <a href="#">Creación de materiales, laminados y asignación de estos</a>	61
5.2.1.1.- <a href="#">Criterio de fallo de Tsai-Wu</a>	64
5.2.2.- <a href="#">Condiciones de contorno</a>	65
5.2.3.- <a href="#">Condiciones de carga</a>	66
5.3.- <a href="#">Generación de la malla</a>	72
5.4.- <a href="#">Análisis</a>	73
5.5.- <a href="#">Resultados</a>	74
5.5.1.- <a href="#">Arrufo</a>	74
5.5.2.- <a href="#">Quebranto</a>	76
5.6.- <a href="#">Análisis de planchas bajo presiones de diseño</a>	79
5.6.1.- <a href="#">Plancha de cubierta</a>	79
5.6.2.- <a href="#">Mamparo</a>	80
5.6.3.- <a href="#">Plancha de fondo en zona de proa</a>	81
5.6.4.- <a href="#">Plancha de fondo en zona de popa</a>	82
5.6.5.- <a href="#">Plancha de costado</a>	83
5.7.- <a href="#">Comentarios</a>	84
6.- <a href="#">Conclusiones</a>	87
7.- <a href="#">Bibliografía</a>	88



## 1.-Introducción

### 1.1.-Sinopsis

En este proyecto se detalla la forma de realizar, primeramente un escantillado siguiendo la norma UNE-EN ISO 1225-5, y posteriormente un análisis estructural por el método de los elementos finitos (AEF), de una embarcación de recreo construida en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

Los datos de partida son los siguientes:

1. Archivo IGS con las formas de la carena.
2. Archivo PDF con los planos de disposición general.
3. Requisitos de proyecto:
  1. Servicio: embarcación de recreo
  2. Marcado CE
  3. Categoría de diseño: B.
  4. Velocidad máxima: 25 nudos
  5. Potencia: 2 x 250 kW

Con estos datos de partida el esquema de trabajo a seguir será el siguiente:

1. Escantillado de la estructura UNE-EN ISO 1225-5.
2. Modelado 3D para AEF.
3. Selección de las condiciones de carga a estudiar.
4. Análisis por elementos finitos.

El objetivo último del proyecto es realizar un análisis por elementos finitos de la estructura de la embarcación bajo una condición de carga lo más realista posible, dentro de las posibilidades que nos ofrezca el programa de análisis por elementos finitos, y de los datos que se disponen de la embarcación, que en principio son escasos.

Con este análisis se comprobará que el escantillado realizado mediante la norma UNE-EN ISO 1225-5 es satisfactorio para las condiciones de carga analizadas.

## 1.2-Categoría de diseño y zonas de navegación para las embarcaciones de recreo

Categoría de diseño	Fuerza del viento (Escala Beaufort)	Altura significativa de las olas (H <sub>1/3</sub> ; metros)	Zonas de navegación correspondientes
A «Oceánicas»	Más de 8.	Más de 4.	1,2,3,4,5,6,7
B «En alta mar»	Hasta 8 incluido.	Hasta 4 incluido.	2,3,4,5,6,7
C «En aguas costeras»	Hasta 6 incluido.	Hasta 2 incluido.	4,5,6,7
D «En aguas protegidas»	Hasta 4 incluido.	Hasta 0.3 incluido.	7

### Definiciones:

- A. Oceánicas: embarcaciones diseñadas para viajes largos en los que los vientos pueden superar la fuerza 8 (escala Beaufort) y olas de altura de cuatro metros o más, quedando excluidas las situaciones anormales, y que son embarcaciones autosuficientes en gran medida.
- B. En alta mar: embarcaciones diseñadas para viajes en alta mar en los que pueden encontrarse vientos de hasta fuerza 8 y olas de altura significativa de hasta cuatro metros.
- C. En aguas costeras: embarcaciones diseñadas para viajes en aguas costeras, grandes bahías, grandes estuarios, lagos y ríos, en los que puedan encontrarse vientos de hasta fuerza 6 y olas de altura significativa de hasta dos metros.
- D. En aguas protegidas: diseñadas para viajes en aguas costeras protegidas, pequeñas bahías, pequeños lagos, ríos y canales, en los que puedan encontrarse vientos de hasta fuerza 4 y olas de altura significativa de hasta 0.3 metros, y ocasionalmente olas de 0.5 metros de altura máxima provocadas, por ejemplo, por el paso de embarcaciones.

En cada categoría, las embarcaciones deben estar diseñadas y construidas para resistir estos parámetros por lo que respecta a la estabilidad, la flotabilidad y resistencia estructural.

Se establecen las siguientes Zonas de navegación:

- A. Zona de navegación Oceánica. Le corresponde la siguiente Zona:
  - Zona 1. Zona de navegación ilimitada.
- B. Zona de navegación en Alta Mar. Comprende las siguientes Zonas de navegación:
  - Zona 2. Navegación en la zona comprendida entre la costa y la línea paralela a la misma trazada a 60 millas.
  - Zona 3. Navegación en la zona comprendida entre la costa y la línea paralela a la misma trazada a 25 millas.
- C. Zona de navegación en aguas costeras. Comprende las siguientes Zonas de navegación:
  - Zona 4. Navegación en la zona comprendida entre la costa y la línea paralela a la misma trazada a 12 millas.
  - Zona 5. Navegación en la cual la embarcación no se aleje más de 5 millas de un abrigo o playa accesible.
  - Zona 6. Navegación en la cual la embarcación no se aleje más de 2 millas de un abrigo o playa accesible.
- D. Zona de navegación en aguas protegidas. Le corresponde la siguiente Zona:
  - Zona 7. Navegación en aguas costeras protegidas, puertos, radas, rías, bahías abrigadas y aguas protegidas en general.

### 1.2.1-Escala Beaufort

La Escala de Beaufort es una medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto de la mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	<b>Calma</b>	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	<b>Ventolina</b>	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	<b>Flojito</b> (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	7 a 10	<b>Flojo</b> (Brisa débil)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	<b>Bonancible</b> (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	<b>Fresquito</b> (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	<b>Fresco</b> (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas
7	50 a 61	28 a 33	<b>Frescachón</b> (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento

8	62 a 74	34 a 40	<b>Temporal</b> (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa
9	75 a 88	41 a 47	<b>Temporal fuerte</b> (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	48 a 55	<b>Temporal duro</b> (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	56 a 63	<b>Temporal muy duro</b> (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	118 y más	64 a 71>	<b>Temporal huracanado</b> (Huracán)	El aire está lleno de espuma y rociones. Enorme oleaje. Visibilidad casi nula	Destrucción total

### 1.2.2-Altura significativa de ola

La llamada *altura significativa* de la ola ( $H\frac{1}{3}$ ) se define como «la altura media del tercio mayor de todas las olas observadas». Aunque esta definición pueda parecer algo complicada, por naturaleza, un observador tiende a poner más atención a las olas mayores, de tal manera que cuando reporta la altura de las olas, normalmente esta altura es coincidente con la altura significativa.

Seis son los parámetros o variables que caracterizan las olas. De ellos tres son variables independientes y hay que medirlos directamente. Los otros pueden obtenerse de estos tres mediante fórmulas sencillas. Los parámetros a medir directamente son:

Altura (H): Distancia vertical entre una cresta y un seno consecutivos.

Período (T): Tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas (o dos senos) consecutivos por un mismo lugar (por ejemplo, un objeto flotante sin velocidad propia).

Longitud (L): Distancia entre dos crestas consecutivas.

Interesan además los siguientes parámetros:

Amplitud (A): De la ondulación es la mitad de la altura ( $A = H/2$ ).

Velocidad (C): De propagación, es la de avance de una línea de crestas; resulta igual a la longitud dividida por el período ( $C = L/T$ ).

Pendiente: Es el cociente de dividir la altura por la longitud de onda ( $P = H/L$ ).

### 1.2.3-Teoría de Stokes para altura máxima de ola

Según Stokes una ola con una pendiente mayor a  $1/7$  rompe, por lo que la altura máxima será aquella que haga la pendiente igual a  $1/7$ .

La pendiente de una ola se define como el cociente entre su altura (H) y su longitud (L).

$$\frac{H_{max}}{L} = \frac{1}{7}$$

$$H_{max} = \frac{L}{7}$$

Así por ejemplo, una ola de  $L = 9,8$  metros alcanzará una  $H_{max} = 1,4$  metros. Esta altura no puede hacerse mayor, ya que de lo contrario la ola rompería al tener una pendiente mayor a  $1/7$ .

Esta teoría se usará en la sección 5.2.3 para definir la altura de ola en la que se analizará la embarcación.

### **1.3-Breve introducción a los materiales compuestos**

#### **1.3.1-Definición, ventajas y desventajas**

Un material compuesto es aquel formado por dos, o más, materiales distintos que presenta algunas propiedades físicas determinadas superiores a las de los materiales que lo constituyen.

Los plásticos reforzados con fibras presentan altas cualidades mecánicas, gran facilidad de aplicación y libertad de diseño, esto hace que sean un material muy adecuado para la construcción de cierto tipo de embarcaciones como pesqueros, barcos auxiliares de acuicultura, barcos de recreo, deportivos y yates, entre otros.

El material compuesto más usado en construcción naval está constituido por laminados de fibras de vidrio tipo E y una matriz de resina de poliéster, debido a su excelente relación calidad/precio. A este compuesto se le conoce o abrevia con las siglas PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio).

Los materiales compuestos de alta tecnología, como laminados de fibras de carbono, de aramida, híbridos, con resinas epoxi, permiten obtener estructuras altamente resistentes con muy bajo peso y son usados en productos de características especiales, como cascos de embarcaciones de regata de alta competición, mástiles de velas, y otros. Su uso no se extiende a todo tipo de cascos debido a su alto precio.

Entre las ventajas de aplicación de los materiales compuestos se pueden citar:

- Resistencia al ambiente marino
- Larga duración
- Bajo mantenimiento
- Alta resistencia en relación con su peso
- Coste competitivo
- Posibilidad de moldear formas complicadas.
- Construcción del casco sin costuras

Entre los inconvenientes, sobre todo al compararlos con materiales metálicos, se tienen que considerar:

- Menor rigidez al tener bajo módulo de elasticidad
- Tendencia a prolongar su deformación si está sometida a cargas de larga duración
- Menor resistencia a la fatiga
- Transmisión de vibraciones
- Vulnerabilidad al fuego.

### 1.3.2-Concepto de lámina y laminado

En materiales compuestos, la lámina constituye la unidad básica de laminado. Una lámina consta de una capa o tela de fibra inmersa en resina.

Existen tres grandes tipos de láminas:

- a) Lámina unidireccional. Todas las fibras están orientadas en una única dirección. Se considera que en este tipo de lámina existe isotropía transversal<sup>1</sup>
- b) Lámina tipo tejido. Todas las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí. La urdimbre (fibras longitudinales) está entrelazada con la trama (fibras transversales). El 50% de las fibras puede estar orientada en cada dirección (tejido equilibrado) o puede haber más fibras en una dirección que en otra (tejido no equilibrado). Se considera que existe ortotropía<sup>2</sup> en este tipo de lámina.
- c) Lámina tipo mat. Está compuesta por fibras cortadas aleatoriamente orientadas. Se considera que existe isotropía<sup>3</sup>.

La lámina es la configuración básica de una estructura de materiales compuestos. Como el espesor de la lámina es muy bajo, en general, de 0.1 mm a 1.5 mm, los

---

<sup>1</sup> Mismas propiedades en todas las direcciones en un plano perpendicular al de las fibras.

<sup>2</sup> Propiedades diferentes en direcciones perpendiculares entre sí.

<sup>3</sup> Mismas propiedades en todas las direcciones.

espesores resistentes están formados por una agrupación secuencial de láminas, denominada laminado. Por lo tanto el laminado está formado por un conjunto de telas o capas de fibra de refuerzo unidas entre sí por la adherencia de la resina.

### **1.3.3-Resina de poliéster**

Los tipos de resinas más utilizados en construcción naval con fibra de vidrio son las de poliéster, que pueden ser ortoftálicas e isoftálicas. Las primeras son las que se emplean en embarcaciones de menor calidad, pues tienen mayor riesgo de absorción de agua en los laminados, fenómeno conocido como ósmosis, y las segundas son las utilizadas generalmente, al tener mejores propiedades mecánicas y de resistencia al medio marino. La densidad de las resinas de poliéster es de 1.2 gr/cm<sup>3</sup>.

Un aspecto a destacar es que las resinas de poliéster están sometidas a una contracción de volumen importante durante la polimerización, que junto con la reacción exotérmica pueden provocar tensiones que perjudiquen la estabilidad dimensional de la pieza. Además, las resinas utilizadas en construcción naval deben ser resistentes a la llama, y tixotrópicas para evitar que escurran cuando se aplican a superficies verticales.

### **1.3.4-Fibra de vidrio**

Las fibras de vidrio están constituidas por delgados y duros filamentos con gran resistencia a la tracción. En todos los casos la fibra de vidrio se prepara con unos productos químicos que la hacen impregnable con las resinas plásticas.

Existen multitud de tejidos. Los más utilizados son el mat y el roving, los cuales vienen en rollos de aproximadamente un metro de ancho. La densidad de la fibra de vidrio tipo E es de 2.56 gr/cm<sup>3</sup>.

El mat está compuesto por hilos de fibra de vidrio de 4 ó 5 cm unidos aleatoriamente por un ligante en varias capas. Tiene gran facilidad para impregnarse bien en resina, es isotrópico, fácil de manejar manualmente adaptándose bien a las superficies difíciles. Los gramajes más utilizados son de 300, 450 y 600 gr/m<sup>2</sup>. El mat debe combinarse con tejidos como el roving que le confieren al laminado las propiedades de resistencia adecuadas.

El tejido roving es un tafetán que se forma entrelazando hilo de trama y urdimbre de forma alternada, es decir, un hilo urdimbre pasa alternativamente por encima de uno de trama y al siguiente por debajo. Se emplea mucho en gramajes de 800 gr/m<sup>2</sup>.

El entrelazado dificulta la penetración de la resina de poliéster pero lo hace fácil de trabajar con las manos.



Tejido mat.



Tejido roving.

La dificultad de la absorción de la resina hace que no sea aconsejable poner dos capas contiguas de roving, por lo que se intercala una capa de mat entre dos de roving, ya que el mat absorbe bien la resina y consigue la unión de todas las capas.

### 1.3.5-Laminado sándwich

La baja rigidez a la flexión es una de las desventajas de los laminados de fibra. Una forma de aumentar esta rigidez en una embarcación consiste en aumentar el número de refuerzos del casco o mamparos para disminuir el espaciado entre ellos y por tanto que el tamaño de los paneles de plancha laminada no soportado sea menor. Otro método sería aumentar el espesor del laminado con el consiguiente aumento de peso. El tercer método consiste en utilizar paneles sándwich, colocando un material de núcleo de baja resistencia y densidad entre dos "pieles" de un laminado de gran resistencia.

La rigidez de un panel sándwich no solo depende de la rigidez de los componentes, de su módulo de flexión, sino también de la distancia que el núcleo separa los laminados exteriores. De hecho, la rigidez es proporcional al cubo del espesor del panel. Esto

significa que un ligero aumento del espesor aumenta considerablemente la resistencia a la flexión.

Los materiales utilizados como núcleo de estructuras sándwich deben poseer las siguientes cualidades:

1. Baja densidad
2. Buena resistencia a compresión
3. Buena resistencia a cizalladura
4. Buena resistencia a los agentes químicos y ambientales
5. Buena adherencia a las resinas utilizadas en los laminados de las paredes.

Los materiales de núcleo que se utilizan son la madera de balsa, las espumas, los paneles de nido de abeja y los fieltros.

#### **1.3.5.1-Espumas**

Las espumas son los materiales de núcleo más comunes en construcción de embarcaciones en materiales compuestos, siendo el PVC uno de los más utilizados. Son materiales alveolares que permiten la construcción de barcos de bajo peso y altas prestaciones. Bajo esta denominación se incluyen un amplio grupo de materiales que responden a distintos polímeros: poliestireno, poliuretano, y cloruro de polivinilo (PVC). Los dos primeros tienen escasas propiedades mecánicas, y se utilizan exclusivamente como material de soporte para elementos rigidizadores, como los refuerzos de la estructura interior del casco. El poliestireno expandido es atacado químicamente por los disolventes de las resinas de poliéster, y se utiliza como material de relleno para espacios de flotabilidad.

Existen dos tipos de espumas de polivinilo de utilización como núcleo estructural. Las espumas lineales (*non cross linked*), denominadas también elásticas, compuestas por PVC puro, y las espumas reticulares o rígidas (*cross linked*), formadas por una mezcla de polivinilo y poliuretano. Las espumas rígidas poseen, en general, un buen comportamiento mecánico frente a esfuerzos de compresión y cizalladura, pero son frágiles. Por el contrario, las espumas lineales, son ligeramente menos resistentes a

compresión y a cizalladura, pero su alta capacidad de deformación les permite absorber impactos sin llegar a la rotura del material.

Las espumas lineales separan el estireno de la resina de poliéster, lo cual tiene efectos adversos al causar un curado incompleto de la resina y una debilitación de la propia espuma. Para prevenir este inconveniente, se puede utilizar un tratamiento con un acelerador para curar rápidamente la primera capa de resina de contacto. Otra alternativa es sellar la superficie de la espuma con una fina capa de resina muy catalizada. La espuma puede venir sellada de fábrica, pero hay que tener cuidado de no eliminarla, cosa que ocurre al lijar.

## **2.-Escantillonado UNE-EN ISO 12215-5**

El escantillonado de la embarcación se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN ISO 12215-5. Esta norma es la versión oficial, en español, de la norma europea EN ISO 12215-5:2008, que a su vez adopta la Norma internacional ISO 12215-5:2008.

A continuación se incluyen la introducción y el objeto y campo de aplicación de esta norma.

### **2.1-Introducción**

La razón de ser de esta parte de la Norma ISO 12215 es la de que, tanto las normas como las prácticas recomendadas para la determinación de cargas sobre el casco y el dimensionamiento de las pequeñas embarcaciones, difieren notablemente de unas a otras, por lo que se limita la aceptación general de estas embarcaciones en todo el mundo.

El objetivo de esta parte de la norma ISO 12215 es conseguir una resistencia estructural global que asegure la integridad de la embarcación tanto en su integridad al agua como a la intemperie. Se ha desarrollado para constituir un método de evaluación del escantillonado de la embarcación, en comparación con otras prácticas de menor nivel, y no pretende constituir un método de diseño de estructuras.

Los requisitos del escantillonado se basan principalmente en la obtención de una adecuada resistencia local. No se tienen en cuenta las exigencias de funcionamiento, tales como las deformaciones bajo las cargas normales de funcionamiento, la resistencia global ni la estabilidad del casco. El proyectista de la estructura puede estimar necesario tener en cuenta otras consideraciones suplementarias de los criterios contenidos en esta norma.

Las propiedades mecánicas dadas como valores por defecto no incluyen un margen específico para el deterioro causado por el uso, y no garantizan de ningún modo que se puedan alcanzar estos valores para una embarcación en particular. La responsabilidad de la utilización de esta parte de la norma ISO 12215 como un elemento para el diseño recae únicamente sobre el proyectista y/o constructor.

Las presiones de diseño de esta parte de la norma ISO-12215 se deben utilizar únicamente con las correspondientes ecuaciones que se dan en la norma.

Considerando el desarrollo futuro, tanto en tecnología como en los tipos de embarcaciones, así como las pequeñas embarcaciones que actualmente están fuera del campo de aplicación de esta parte de la Norma ISO 12215, y siempre que existan métodos apoyados en una tecnología adecuada, se puede aceptar su uso en tanto se consiga una resistencia equivalente a la de esta parte de la Norma ISO 12215.

Se considera que el dimensionamiento de acuerdo con esta parte de la norma ISO 12215 recoge la práctica actual, siempre que la embarcación esté correctamente manejada por una persona con experiencia marinera y que esté operada a la velocidad adecuada al estado de la mar.

## **2.2.-Objeto y campo de aplicación**

Esta parte de la Norma ISO 12215 se aplica para la determinación de las presiones y las tensiones de diseño, y para la determinación del escantillado, incluyendo los refuerzos de la estructura interior, de las pequeñas embarcaciones de un solo casco construidas de plástico reforzado con fibras, y aleaciones de aluminio o acero, de madera encolada o de cualquier otro material conveniente para la construcción de embarcaciones de una eslora de casco,  $L_H$ , comprendida entre 2,5 m y 24 m, determinada de acuerdo con la Norma ISO 8666. Esta norma sólo se aplica a las embarcaciones en estado intacto.

Sólo se debe aplicar a las embarcaciones que tengan una velocidad máxima de  $\leq 50$  nudos en condiciones MLDC.

La evaluación debe incluir generalmente todas las partes de la embarcación que se consideren estancas al agua y a la intemperie cuando se evalúe la estabilidad, el francobordo y la flotabilidad de acuerdo con la Norma ISO 12217, que son esenciales para la seguridad de la embarcación y de las personas que se encuentren a bordo.

Para el escantillonado completo de la embarcación, se debe utilizar esta parte de la Norma ISO 12215 conjuntamente con la parte 6 para los detalles, con la parte 7 para los multicascos, con la parte 8 para los timones y con la parte 9 para los apéndices y los puntos de sujeción de la jarcia.

La determinación de escantillonado de las ventanas, portillos, tapas ciegas, escotillas y puertas, se debe efectuar de acuerdo con la Norma ISO 12216. La estructura que soporta estos elementos debe estar de acuerdo con esta parte de la Norma ISO 12215.

NOTA 1 El escantillonado determinado en esta parte de la Norma ISO 12215 está previsto, en primer lugar, para aplicarse a las embarcaciones de recreo, incluidas las de alquiler, y puede que no sea conveniente para las embarcaciones de competición.

NOTA 2 Esta parte de la Norma ISO 12215 está basada en la asunción de que los escantillones están gobernados solamente por las cargas locales.

NOTA 3 El escantillonado determinado en esta parte de la Norma ISO 12215 se considera que corresponde a los requisitos estructurales mínimos de las embarcaciones, tanto a motor como a vela, operadas de una forma segura y responsable, y con conocimiento de las condiciones predominantes de viento y mar.

Las presiones y las tensiones se expresan normalmente en pascales, kilopascales o megapascales. Con el fin de facilitar una mejor comprensión de los usuarios de esta parte de la Norma ISO 12215, las presiones se expresan en kilonewtons por metro cuadrado ( $1\text{kN/m}^2$ ) y las tensiones y módulos elásticos en newtons por milímetro cuadrado ( $1\text{ N/mm}^2= 1\text{ MPa}$ ).

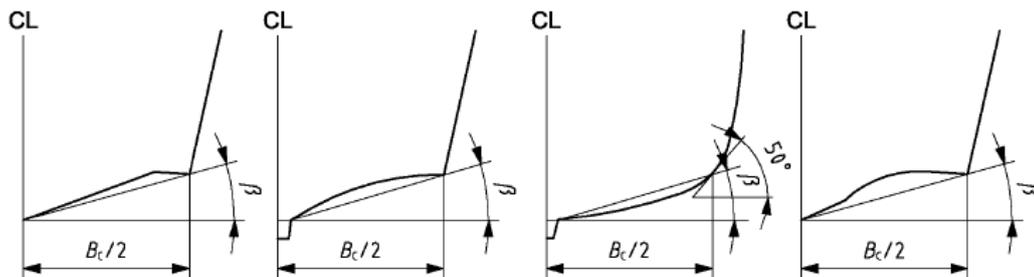
A pesar de que esta norma pretende ser un método de evaluación del escantillonado y no constituir un método de diseño de estructuras, en este proyecto se usará como método de diseño, en este caso la responsabilidad recae únicamente sobre el proyectista. Teniendo en cuenta que el objetivo final del proyecto es realizar un análisis por elementos finitos de la estructura, y no la construcción real de la embarcación, se asume esa responsabilidad ya que esta no existe.

Debe quedar claro que no se ha realizado un escantillonado de detalle (no se han calculado portillos, bancada, detalles estructurales...) si no que se han calculado los espesores mínimos de planchas y los espesores y medidas de refuerzos.

A continuación se definen los datos principales de la embarcación, así como algunos términos que se consideran importantes dentro de esta norma.

### 2.3.-Datos principales de la embarcación

**Bc-Manga en el pantoque:** Manga medida en el pantoque, de acuerdo con la figura 1, a  $0,4L_w$  a proa de su extremo de popa, en metros.



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

**BH-Manga del casco:** Manga medida en metros, entre las partes fijas más exteriores del casco.

**Bwl-Manga en la flotación a plena carga m<sub>LDC</sub>:** Máxima distancia, medida en metros, entre la intersección de la superficie del casco con el plano de flotación para la condición de plena carga.

**LH-Eslora del casco:** Distancia en metros, medida paralelamente a la flotación de referencia entre dos planos transversales, uno situado en el extremo más a popa y el otro en el extremo más a proa

Incluye todas las partes estructurales de la embarcación y las que forman parte integrante de la misma, como rodas o popas de madera, metal o plástico, las amuradas y las juntas casco/cubierta.

Excluye todas las partes móviles que puedan ser desmontadas de forma no destructiva, si afectar a la integridad estructural de la embarcación.

**L<sub>WL</sub>-Eslora en la flotación:** Distancia en metros, medida paralelamente a la flotación de referencia entre dos planos transversales, uno situado en la intersección casco-flotación más a popa y el otro en la intersección roda-flotación.

**V-Velocidad máxima:** Para las embarcaciones a motor, es la velocidad máxima, en nudos, en aguas tranquilas, declarada por el constructor, con la embarcación en condiciones de mLDC. Esta velocidad no debe ser inferior a  $2,36 \sqrt{L_{WL}}$ .

**mLDC-Masa del desplazamiento en carga de la embarcación:** Masa de la embarcación, incluyendo todos los apéndices, cuando se encuentra completamente cargada y en la condición de lista para zarpar, tal y como se define en la norma UNE-EN ISO 8666.

**β<sub>0,4</sub>**-Semiángulo del diedro del fondo a 0,4L<sub>WL</sub> a proa de su extremo de popa, medido de acuerdo con la figura 1, en grados, pero no debe tomarse menor de 10° ni menor de 30°.

Para una definición más extensa de los diferentes datos se hace referencia a normas UNE-EN ISO 12215-5 y UNE-EN ISO 8666.

## 2.4.-Definiciones importantes

Unos de los términos importantes que se utilizan en la presente norma son los de:

### **Embarcación de desplazamiento:**

Embarcación en la que la velocidad máxima en mar llana y en condiciones mLDC, declarada por el constructor, es tal que

$$\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} < 5$$

**Funcionamiento en la modalidad de desplazamiento:**

Forma de funcionamiento de una embarcación en el mar de manera que su masa se soporte principalmente por las fuerzas de flotabilidad (empuje de Arquímedes).

NOTA Éste es el caso generalmente si la velocidad en el mar y en las condición es del desplazamiento en carga mLDC, son tales que la relación velocidad/eslora hace que la embarcación funcione como una embarcación de desplazamiento.

**Embarcación planeadora:**

Embarcación en la que la velocidad máxima en mar llana y en condiciones mLDC, declarada por el constructor, es tal que

$$\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \geq 5$$

NOTA El límite de la relación velocidad/eslora se ha establecido arbitrariamente en esta parte de la Norma ISO 12215, pero puede variar de una embarcación a otra dependiendo de las formas del casco y de otros parámetros.

**Funcionamiento en la modalidad de planeadora:**

Forma de funcionamiento de una embarcación en el mar de manera que su masa se soporte principalmente por las fuerzas del empuje dinámico debidas a la velocidad en el agua.

NOTA 1 Una embarcación planeadora funciona en la modalidad de planeadora en mar llana.

NOTA 2 Una embarcación planeadora puede verse obligada a reducir de manera significativa su velocidad en mar agitada, y entonces funciona en la modalidad de desplazamiento.

## 2.5.-Método para la determinación de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas a utilizar para determinar los requisitos de escantillado de los apartados 8.1, 8.4, 8.9, 9.2 y del anexo H de la norma UNE-EN ISO 1225-5 se deben determinar con ayuda de uno de los tres métodos siguientes que dependen del nivel de evaluación (EL) de las propiedades mecánicas, utilizado por el constructor y definido en la siguiente tabla:

Nivel de evaluación	Definición	Método
EL-a	Las propiedades mecánicas y el contenido de fibra se determinan por mediciones efectuadas con la ayuda de normas de ensayo reconocidas sobre escantillones representativos del producto fabricado.	Utilizar los resultados de las mediciones corregidas según el apartado C.1.2 de la norma.
EL-b	El contenido de fibra en masa se determina por mediciones. Se efectúan verificaciones puntuales con ayudas de normas de ensayo reconocidas sobre escantillones representativos del producto fabricado para garantizar que el producto cumple o excede los valores de las tablas C.4 a la C.7 de la norma.	Valores por defecto (Tablas C.4 a la C.7 de la norma)
EL-c	No se hacen mediciones explícitas ni del contenido de fibra ni de las propiedades mecánicas. El contenido de fibra se deduce de la tabla C.2 de la norma o de otros valores nominales.	Multiplicar los valores por defecto (Tablas C.4 a la C.7 de la norma) por 0.8.

En el caso este proyecto se ha usado el método de evaluación de nivel "EL-c", es decir, que no se hacen mediciones de ningún tipo sobre ninguna muestra y se usan los valores de contenido de fibra de la tabla C.2 de la norma y las propiedades mecánicas se obtienen de la tabla C.4 multiplicados estos últimos por 0.8.

## **2.6.-Hojas de cálculo**

Para calcular el escantillado de la embarcación se ha usado Excel. Se han desarrollado unas hojas en las que introduciendo los datos principales de la embarcación, y otros datos referentes a la situación y medida de paneles y refuerzos, calculan todos los coeficientes, presiones y parámetros necesarios para el cálculo del espesor mínimo de cada panel y refuerzo.

Debido a la complejidad de las hojas Excel creadas (las celdas de estas hojas contienen gran cantidad de funciones condicionales, máximos y mínimos, sumatorios, comparaciones entre celdas etc.) no resulta posible explicar de forma detallada todos los pasos realizados, de donde proviene cada término y como se obtienen los diferentes parámetros.

A continuación se describirá brevemente el contenido de cada una de estas hojas, sus entradas y salidas.

### 2.6.1-Hoja1

En esta hoja se introducen los datos principales de la embarcación, que serán utilizados en multitud de fórmulas en las hojas posteriores. Así mismo esta hoja nos da la información de si la embarcación funciona en modalidad planeadora o desplazamiento. En el caso de que trabaje en modalidad planeadora, como es el caso presente, se analizará tanto en modalidad planeadora como en modalidad desplazamiento, ya que la embarcación cuando vaya a una velocidad más baja que la de planeo, estará trabajando en modalidad de desplazamiento, y esto, en ocasiones, significa una situación más desfavorable para algunos elementos.

El aspecto de esta hoja es el siguiente:

DATOS DE LA EMBARCACIÓN		
Velocidad máxima (V)	25	nudos
Eslora en la flotación (Lwl)	9,8	metros
Manga en el pantoque (Bc)	3,12	metros
Manga en la flotación (Bwl)	3,17	metros
Puntal total del casco (D)	1,9	metros
$\beta_{0,4}$	18	grados
Masa desplazamiento (mLDC)	10950	Kg
Categoría de diseño	B	

Se trata de una embarcación planeadora

### 2.6.2-Hoja 2

En esta hoja se calculan las presiones de diseño de paneles de fondo, costado, cubiertas y las de los refuerzos en sus respectivas zonas.

Para el cálculo de las presiones es necesario hallar gran cantidad de factores que también están calculados.

En esta hoja no se introducen datos sino que se usan los de las hojas 1, 3, 4 y 5 para los cálculos.

El aspecto de esta hoja es el siguiente:

Factor de categoría de diseño

$K_{dc}$

0,8

### Modo Planeador

### Modo Desplazamiento

#### Factor de carga dinámica

#### Factor de carga dinámica

$n_{cg} (1)$	2,27
$n_{cg} (2)$	2,57
$n_{cg} \text{ final}$	2,27
$n_{cg} \text{ para KL}$	3,00

$n_{cg} (1)$	0,88
$n_{cg} \text{ final}$	3,00
$n_{cg} \text{ para KL}$	3,00

#### Factor de distribución de presión

#### Factor de distribución de presión

$K_{lplancha}$	0,86
$K_{lrefuerzo}$	1,00
$K_{lfinalplancha}$	0,86
$K_{lfinalrefuerzo}$	1,00

$K_{lplancha}$	0,86
$K_{lrefuerzo}$	1,00
$K_{lfinalplancha}$	0,86
$K_{lfinalrefuerzo}$	1,00

#### Factor de reducción de presión

#### Factor de reducción de presión

##### Planchas

$K_R$	1,00
$A_D$	0,51
$K_{AR}$	0,49
$K_{ARfinal}$	0,49

##### Planchas

$K_R$	1,37
$A_D$	0,51
$K_{AR}$	0,68
$K_{ARfinal}$	0,68

##### Refuerzos

$K_R$	1,00
$A_D$	0,79
$K_{AR}$	0,43
$K_{ARfinal}$	0,43

##### Refuerzos

$K_R$	0,65
$A_D$	0,79
$K_{AR}$	0,28
$K_{ARfinal}$	0,28

**Presiones de diseño****Modo Planeador**PlanchasPresión fondo

P <sub>bmpbase</sub>	108,36 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmp</sub>	45,99 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bm min</sub>	16,74 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmpfinal</sub>	45,99 kN/m <sup>2</sup>

Presión en costado

P <sub>smin</sub>	7,06 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>smp</sub>	8,49 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>smpfinal</sub>	8,49 kN/m <sup>2</sup>

Presión en cubierta

P <sub>dmbase</sub>	18,03 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dm</sub>	6,12 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dm min</sub>	5,00 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dmfinal</sub>	6,12 kN/m <sup>2</sup>

**Presiones de diseño****Modo Planeador**RefuerzosPresión fondo

P <sub>bmpbase</sub>	108,36 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmp</sub>	46,98 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bm min</sub>	16,74 kN/m <sup>2</sup>

**Modo desplazamiento**PlanchasPresión fondo

P <sub>bmdbase</sub>	71,67 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmd</sub>	33,22 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bm min</sub>	16,74 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmdfinal</sub>	33,22 kN/m <sup>2</sup>

Presión en costado

P <sub>smin</sub>	7,06 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>smd</sub>	27,48 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>smdfinal</sub>	27,48 kN/m <sup>2</sup>

Presión en cubierta

P <sub>dmbase</sub>	18,03 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dm</sub>	8,36 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dm min</sub>	5,00 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>dmfinal</sub>	8,36 kN/m <sup>2</sup>

**Modo desplazamiento**RefuerzosPresión fondo

P <sub>bmdbase</sub>	71,67 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bmd</sub>	16,16 kN/m <sup>2</sup>
P <sub>bm min</sub>	16,74 kN/m <sup>2</sup>

$$P_{b\text{mpfinal}} = 46,98 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{b\text{mdfinal}} = 16,74 \text{ kN/m}^2$$

#### Presión en costado

$$P_{s\text{mmin}} = 7,06 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{s\text{mp}} = 7,82 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{s\text{mfinal}} = 7,82 \text{ kN/m}^2$$

#### Presión en costado

$$P_{s\text{mmin}} = 7,06 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{s\text{md}} = 10,11 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{s\text{mdfinal}} = 10,11 \text{ kN/m}^2$$

#### Presión en cubierta

$$P_{d\text{mbase}} = 18,03 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{m}} = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{m min}} = 5,00 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{mfinal}} = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

#### Presión en cubierta

$$P_{d\text{mbase}} = 18,03 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{m}} = 4,06 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{m min}} = 5,00 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{d\text{mfinal}} = 5,00 \text{ kN/m}^2$$

#### Presión desfavorable

Plancha fondo	45,99	kN/m <sup>2</sup>
Plancha costado	27,48	kN/m <sup>2</sup>
Plancha cubierta	8,36	kN/m <sup>2</sup>

Refuerzo fondo	46,98	kN/m <sup>2</sup>
Refuerzo costado	10,11	kN/m <sup>2</sup>
Refuerzo cubierta	6,25	kN/m <sup>2</sup>

Todas las presiones usadas en la sección 2.7 provienen de esta Hoja, una vez introducidos los datos adecuados en las Hojas 3, 4 o 5. Según se trate de un laminado monolítico, un refuerzo o un laminado sándwich respectivamente.

### 2.6.3-Hoja 3

Esta hoja está dedicada al cálculo del espesor mínimo y real de un panel monolítico, así como la masa de reforzado mínima y real de este. Los datos de entrada son las dimensiones del panel, la zona, la posición longitudinal y el laminado.

El aspecto de esta hoja es el siguiente:

### Análisis de un panel

Zona	Fondo
------	-------

l	1750	mm
b	450	mm
x	4,2	mm

Laminado	gr fibra/m <sup>2</sup>	ψ	espesor (mm)		g/m <sup>2</sup>
MAT450	450	0,3	1,05		1500,00
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
	0	0	0,00		0,00
	0	0	0,00		0,00
Mref real=>	5,25	t real=>	9,76	mm	14500 g/m <sup>2</sup>
	(kg/m <sup>2</sup> ) ↓				
Mref min=>	2,36	t min=>	8,21	mm	

Una vez introducidos los datos lo único que se debe verificar para que el panel sea válido en cuanto a diseño es que los valores reales sean mayores que los mínimos exigidos por la norma.

#### 2.6.4-Hoja 4

Esta hoja está dedicada al cálculo de las propiedades mínimas y reales del refuerzo en cuanto a área transversal, módulo de inercia y momento de inercia. Los datos de entrada son la zona, separación y luz entre refuerzos, la distancia longitudinal, las dimensiones del refuerzo y su secuencia de laminado.

El aspecto de la hoja es el siguiente:

### Refuerzos

Zona	Fondo
------	-------

l	1750	mm
b	450	mm
x	10	m

base	11	cm
ala	11	cm
altura	11	cm

	ancho (cm)	alto (cm)	área (cm <sup>2</sup> )	altura cdg (cm)	Mestatejex (cm <sup>3</sup> )	lpropia (cm <sup>4</sup> )	Steiner (cm <sup>4</sup> )	ltotal (cm <sup>4</sup> )
plancha asociada	30,52	0,98	29,78	0,49	14,53	2,36	422,87	425,23
ala	11,00	0,91	9,98	12,43	124,07	0,69	666,89	667,57
alma 1	0,63	11,00	6,90	6,48	44,68	69,57	34,00	103,58
alma2	0,63	11,00	6,90	6,48	44,68	69,57	34,00	103,58

53,56

227,97

1299,96

Laminado alma	gr fibra/m <sup>2</sup>	ψ	espesor (mm)		g/m <sup>2</sup>
MAT600	600	0,30	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,30	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,30	1,40		2000,00
	0	0,00	0,00		0,00
	3400	gr/m <sup>2</sup>	6,27	mm	9333,33 g/m <sup>2</sup>

### Extra ala

MAT600	600	0,30	1,40		2000,00
MAT600	600	0,30	1,40		2000,00
			2,80		13333,33 g/m <sup>2</sup>

9,07	mm
------	----

	Mínimos	Reales	
Aw (cm <sup>2</sup> )	6,89	23,78	Cumple
SM (cm <sup>3</sup> )	118,30	150,68	Cumple
I (cm <sup>4</sup> )	832,86	1299,96	Cumple

Una vez introducidos los datos lo único que se debe verificar para que el refuerzo sea válido en cuanto a diseño es que los valores reales de área transversal, módulo de inercia y momento de inercia sean mayores que los mínimos exigidos por la norma.

### 2.6.5.-Hoja 5

Esta hoja está dedicada al cálculo de las propiedades mínimas de un panel laminado tipo sándwich, es decir, espesor mínimo y real, módulo mínimo y real, inercia mínima y real y masa de reforzado mínima y real.

Los datos de entrada son la densidad y tipo de núcleo, la zona, las dimensiones del panel, la posición longitudinal, el laminado y el espesor del núcleo.

La hoja tiene el aspecto siguiente:

#### Análisis de un panel sándwich simétrico

Zona	Cubierta
------	----------

l	2820	mm
b	1950	mm
x	10	m

núcleo PVC LINEAL	densidad	60	kg/m <sup>3</sup>
-------------------	----------	----	-------------------

Laminado	gr fibra/m <sup>2</sup>	$\psi$	espesor (mm)		g/m <sup>2</sup>
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
ROV800	800	0,48	1,03		1666,67
MAT600	600	0,3	1,40		2000,00
	0	0	0,00		0,00
wreal	2	kg/m <sup>2</sup>	3,84	mm	5666,67 g/m <sup>2</sup>
wmin	0,63	kg/m <sup>2</sup>			

espesor núcleo	15	mm
----------------	----	----

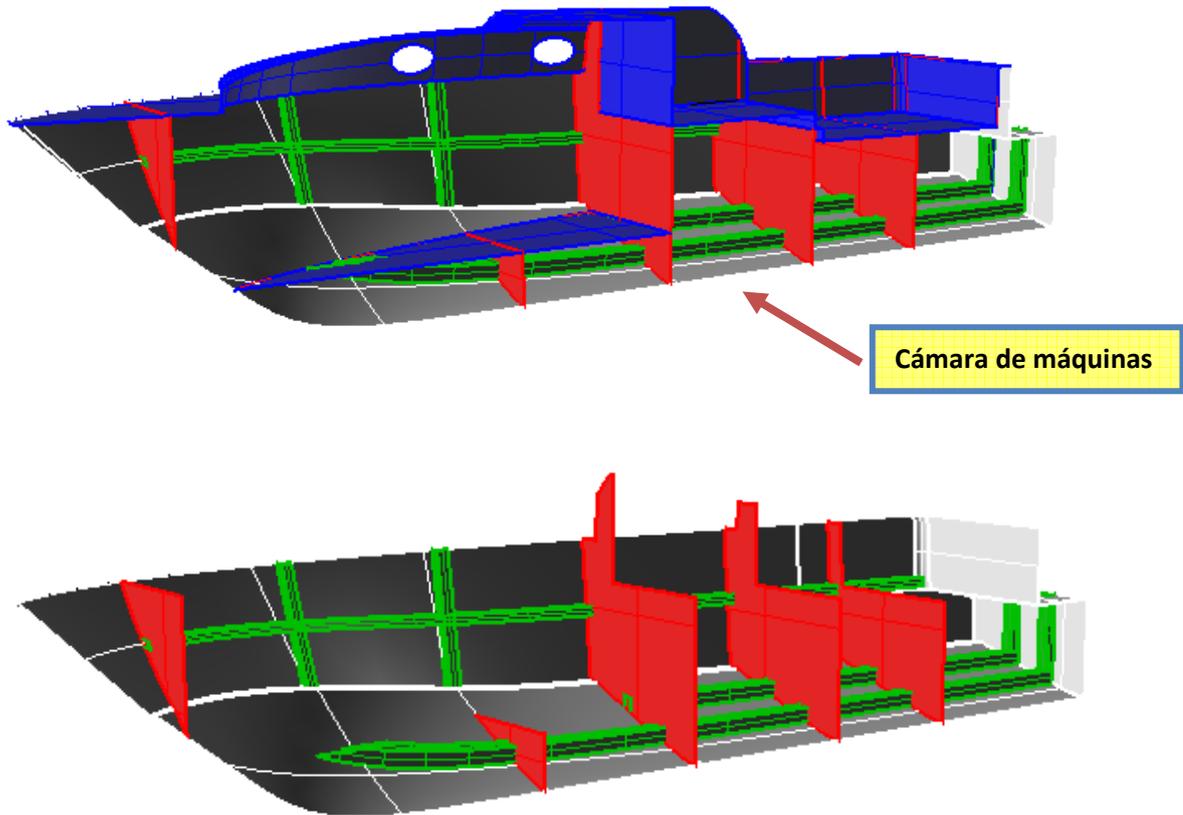
ts	18,84	mm
tsmin	7,74	mm

SMmin/1cm	0,34330944	cm <sup>3</sup> /cm
lmin/1cm	0,63621517	cm <sup>4</sup> /cm

SMreal/1cm	0,57552083	cm <sup>3</sup> /cm
lreal/1cm	0,68069773	cm <sup>4</sup> /cm

Una vez introducidos los datos lo único que se debe verificar para que el panel tipo sándwich sea válido en cuanto a diseño es que los valores reales sean mayores que los mínimos exigidos por la norma.

## 2.7.-Resultados de escantillonado



En color rojo están modelados los mamparos y la varenga profunda bajo la cubierta interior.

En color verde están modelados los refuerzos longitudinales de costado y fondo y las cuadernas de proa.

En color azul está modelada la cubierta exterior e interior.

En color gris está modelado el casco.

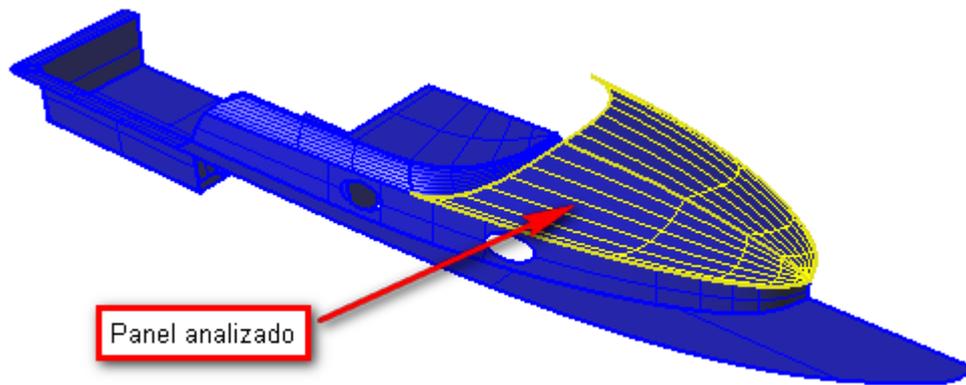
Se ha señalado la cámara de máquinas por que posteriormente se hará referencia a ella.

El Anexo I contiene un plano de disposición estructural y laminado.

### 2.7.1-Cubierta

En la zona de cubierta la presión de diseño es constante en toda la eslora y su valor es de 5 kN/m<sup>2</sup>. Este valor es una salida de la *Hoja de cálculo 2*.

En esta zona se ha decidido utilizar un laminado tipo sándwich con núcleo de PVC lineal de 60 kg/m<sup>3</sup>. El motivo es la reducción de peso de la estructura, además de que permite eliminar refuerzos y debido a ello ganar altura en la zona de interior.



El área del panel, que tiene una forma compleja, es de 5,5 m<sup>2</sup>. Este panel se transformará en uno rectangular de área semejante. Su dimensión máxima (D) es 2900 mm en la dirección de la eslora.

Las dimensiones de este panel rectangular equivalente serán tales que una de las dimensiones (A) del nuevo panel sea 2/3 de la dimensión máxima del panel real, y la otra dimensión (B) será tal que multiplicada por el largo dé el área de 5,5 m<sup>2</sup>.

$$A = \frac{2}{3} \cdot D = 1950 \text{ mm}$$

$$B = \text{Área}/L = 2820 \text{ mm}$$

Esta es la zona más desfavorable debido a sus grandes dimensiones, y cumpliendo esta cumplen las demás zonas de cubierta.

La secuencia de laminado es M600-R800-M600-NÚCLEO DE PVC-M600-R800-M600.

Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 5*.

Este laminado tiene un espesor total de 22,67 mm, siendo el espesor de las capas interior y exterior de 3,84 mm y el espesor del núcleo de 15 mm.

A un panel tipo sándwich se le exige:

1 Un valor mínimo del modulo de inercia

$$SM/1cm anchura = \frac{b^2 \cdot k_c^2 \cdot P \cdot k_2}{6 \cdot 10^5 \cdot \sigma_d} \quad cm^3/cm$$

2 Un valor mínimo del segundo momento

$$I/1 cm anchura = \frac{b^3 \cdot k_c^3 \cdot P \cdot k_3}{12 \cdot 10^6 \cdot k_1 \cdot E} \quad cm^4/cm$$

3 Un espesor mínimo para soportar el esfuerzo cortante

$$t_s \geq \sqrt{k_c} \frac{k_{SHC} \cdot P \cdot b}{1000 \cdot \tau_d} \quad mm$$

4 Masa mínima de fibra

$$w = k_{DC} \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot (0,1L_{WL} + 0,15) \quad kg/m^2$$

donde

- $b$  es la dimensión menor del panel en mm. (1950 mm)
- $k_c$  es el factor de corrección de curvatura. (1)
- $P$  es la presión de diseño. (5 kN/m<sup>2</sup>)
- $k_2$  es un factor de alargamiento del panel por resistencia a flexión. (0,44)
- $k_3$  es un factor de alargamiento del panel por rigidez a flexión. (0,024)
- $k_1$  es el factor de deformación por flexión de un panel tipo sándwich. (0,017)
- $\sigma_d$  es la tensión de diseño. (41,02 N/mm<sup>2</sup>)
- $E$  es el módulo de elasticidad. (6729 N/mm<sup>2</sup>)
- $k_{SHC}$  es el factor de alargamiento de tensión de cizalla. (0,417)
- $\tau_d$  es la tensión de cizalla de diseño del núcleo. (0,525 N/mm<sup>2</sup>)
- $k_{DC}$  es el factor de categoría de diseño (0,8)
- $k_4$  es el factor de colocación. (0,7)
- $k_5$  es el factor de tipo de fibra. (1)
- $k_6$  es el factor de cuidado. (1)

Para esta zona y con este laminado:

$$t_{\min} = 7,74 \text{ mm.} \quad t_{\text{real}} = 18,84 \text{ mm.}$$

$$SM/1\text{cm}_{\min} = 0,34 \text{ cm}^3/\text{cm.} \quad SM/1\text{cm}_{\text{real}} = 0,58 \text{ cm}^3/\text{cm.}$$

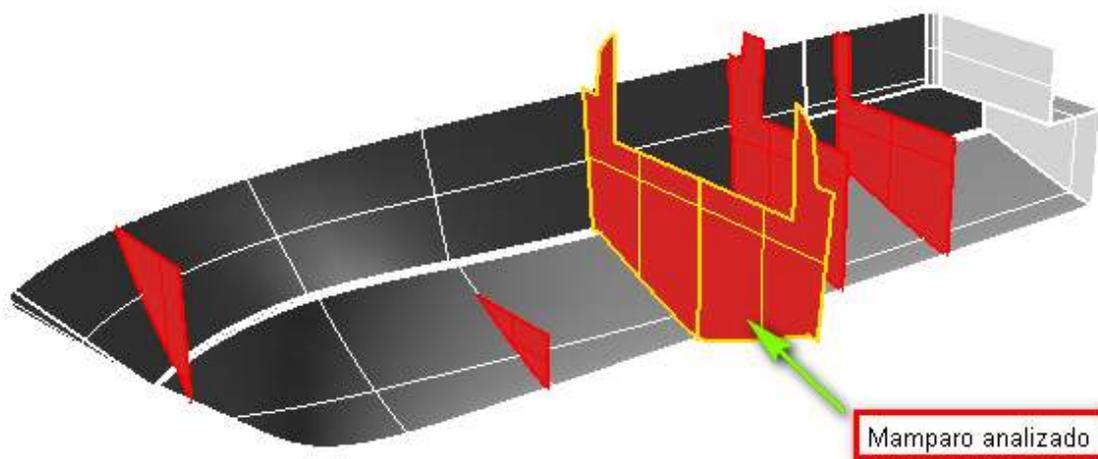
$$I/1\text{cm}_{\min} = 0,64 \text{ cm}^4/\text{cm.} \quad I/1\text{cm}_{\text{real}} = 0,68 \text{ cm}^4/\text{cm.}$$

$$w_{\min} = 0,63 \text{ Kg/m}^2. \quad w_{\text{real}} = 2 \text{ Kg/m}^2.$$

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

### 2.7.2.-Mamparos

El mamparo más desfavorable en cuanto a escantillonado es el mamparo de proa de la cámara de maquinas. Todos los mamparos tienen aproximadamente la misma manga, pero este mamparo es el que tiene mayor puntal.



En esta zona se ha decidido utilizar un laminado tipo sándwich con núcleo de PVC lineal de  $60 \text{ Kg/m}^3$ . El motivo es la reducción de peso de la estructura y además de que permite eliminar refuerzos.

Sus dimensiones son  $1515 \times 3265 \text{ mm}$ .

La secuencia de laminado es M600-R800-M600-M600-NÚCLEO DE PVC-M600-M600-R800-M600. Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 5*.

Este laminado tiene un espesor total de  $25,48 \text{ mm}$ , siendo el espesor de las capas interior y exterior de  $5,24 \text{ mm}$  y el espesor del núcleo de  $15 \text{ mm}$ .

A un panel tipo sándwich se le exige:

1 Un valor mínimo del modulo de inercia

$$SM/1cm anchura = \frac{b^2 \cdot k_c^2 \cdot P \cdot k_2}{6 \cdot 10^5 \cdot \sigma_d} \quad cm^3/cm$$

2 Un valor mínimo del segundo momento

$$I/1 cm anchura = \frac{b^3 \cdot k_c^3 \cdot P \cdot k_3}{12 \cdot 10^6 \cdot k_1 \cdot E} \quad cm^4/cm$$

3 Un espesor mínimo para soportar el esfuerzo cortante

$$t_s \geq \sqrt{k_c \frac{k_{SHC} \cdot P \cdot b}{1000 \cdot \tau_d}} \quad mm$$

4 Masa mínima de fibra

$$w = k_{DC} \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot (0,1L_{WL} + 0,15) \quad kg/m^2$$

donde

b es la dimensión menor del panel en mm. (1515 mm)

$k_c$  es al factor de corrección de curvatura. (1)

P es la presión de diseño. (10,1 kN/m<sup>2</sup>)

$k_2$  es un factor de alargamiento del panel por resistencia a flexión. (0,5)

$k_3$  es un factor de alargamiento del panel por rigidez a flexión. (0,028)

$k_1$  es el factor de deformación por flexión de un panel tipo sándwich. (0,017)

$\sigma_d$  es la tensión de diseño. (40,15 N/mm<sup>2</sup>)

E es el módulo de elasticidad. (6309 N/mm<sup>2</sup>)

$k_{SHC}$  es el factor de alargamiento de tensión de cizalla. (0,5)

$\tau_d$  es la tensión de cizalla de diseño del núcleo. (0,524 N/mm<sup>2</sup>)

$k_{DC}$  es el factor de categoría de diseño (0,8)

$k_4$  es el factor de colocación. (1)

$k_5$  es el factor de tipo de fibra. (1)

$k_6$  es el factor de cuidado. (1)

Para esta zona y con este laminado:

$t_{smin} = 14,59$  mm.

$t_{sreal} = 20,24$  mm.

$SM/1cm_{min} = 0,48$  cm<sup>3</sup>/cm.

$SM/1cm_{real} = 0,79$  cm<sup>3</sup>/cm.

$I/1cm_{min} = 0,76$  cm<sup>4</sup>/cm.

$I/1cm_{real} = 1,07$  cm<sup>4</sup>/cm.

$w_{min} = 0,91$  kg/m<sup>2</sup>.

$w_{real} = 2,6$  kg/m<sup>2</sup>.

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

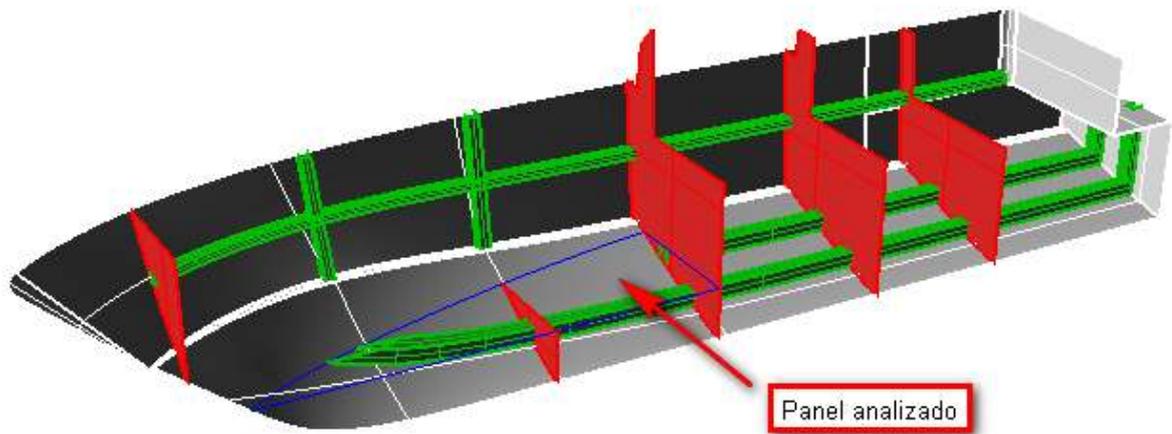
### 2.7.3.-Fondo

#### 2.7.3.1.-Paneles

Para el escantillonado del fondo se ha optado por un laminado monolítico.

El panel más desfavorable para el escantillonado, por su posición y sus formas, es el panel triangular situado bajo la cubierta interior de proa. Esta plancha está delimitada

por el mamparo de proa de la cámara de máquinas, la cubierta interior de proa, un refuerzo longitudinal y una varenga profunda.



La presión de diseño utilizada ha sido  $42,2 \text{ kN/m}^2$ . Este valor es una salida de la *Hoja de cálculo 2*.

Las dimensiones del panel, que es trapezoidal, son  $1650 \times 830 \times 530 \text{ mm}$ , de base (B) y alturas (C y D) respectivamente. Este panel trapezoidal se transforma en uno rectangular equivalente para su cálculo.

Las dimensiones de este panel rectangular equivalente son:

$$b = \frac{A_1 + A_2}{2} = 680 \text{ mm}$$

$$l = B = 1650 \text{ mm}$$

Para un panel monolítico se le exige:

1 Un espesor mínimo

$$t_{min} = b \cdot k_c \cdot \sqrt{\frac{P \cdot k_2}{1000 \cdot \sigma_d}} \quad \text{mm}$$

## 2 Una masa mínima de fibra seca

$$w_{min} = 0,43 \cdot k_5 \cdot (A + k_7 \cdot V + k_8 \cdot m_{LDC}^{0,33}) \quad \text{Kg/m}^2$$

donde

$b$  es la dimensión menor del panel en mm. (680mm)

$k_c$  es el factor de corrección de curvatura. (1)

$P$  es la presión de diseño en kN/m<sup>2</sup>. (42,2 kN/m<sup>2</sup>)

$k_2$  es un factor de alargamiento del panel por resistencia a flexión. (0,5)

$\sigma_d$  es la tensión de diseño en N/mm<sup>2</sup>. (69,7 N/mm<sup>2</sup>)

$A, k_5, k_7, k_8$  son los factores de espesor mínimo. (1,5; 1; 0,03; 0,15)

$V$  es la velocidad máxima en nudos. (25 nudos)

$m_{LDC}$  es la masa de desplazamiento en carga en Kg. (10950 kg)

La secuencia de laminado ha sido la siguiente:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600. Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 3*.

Es decir, un total de 10 capas, con un espesor total de 12,19 mm.

Para este panel:

$t_{min} = 11,84 \text{ mm}$

$t_{real} = 12,19 \text{ mm}$

PFC

Escantillonado y AEF de una embarcación de recreo

$$w_{\min} = 2,35 \text{ kg/m}^2$$

$$w_{\text{real}} = 6,65 \text{ kg/m}^2$$

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

Este escantillonado se usará para todo el fondo situado a proa del mamparo de popa de la cámara de máquinas.

Para toda la zona de fondo a popa del mamparo de popa de la cámara de máquinas se admite un laminado del tipo:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600. Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 3*.

Es decir, un total de 8 capas, con un espesor total de 9,76 mm.

La presión de diseño utilizada para esta zona es de 45,9 kN/m<sup>2</sup>. (*Hoja de cálculo 2*)

Las medidas del panel analizado son 1740x450 mm.

Los resultados obtenidos son:

$$t_{\min} = 8,21 \text{ mm}$$

$$t_{\text{real}} = 9,76 \text{ mm}$$

$$w_{\min} = 2,4 \text{ kg/m}^2$$

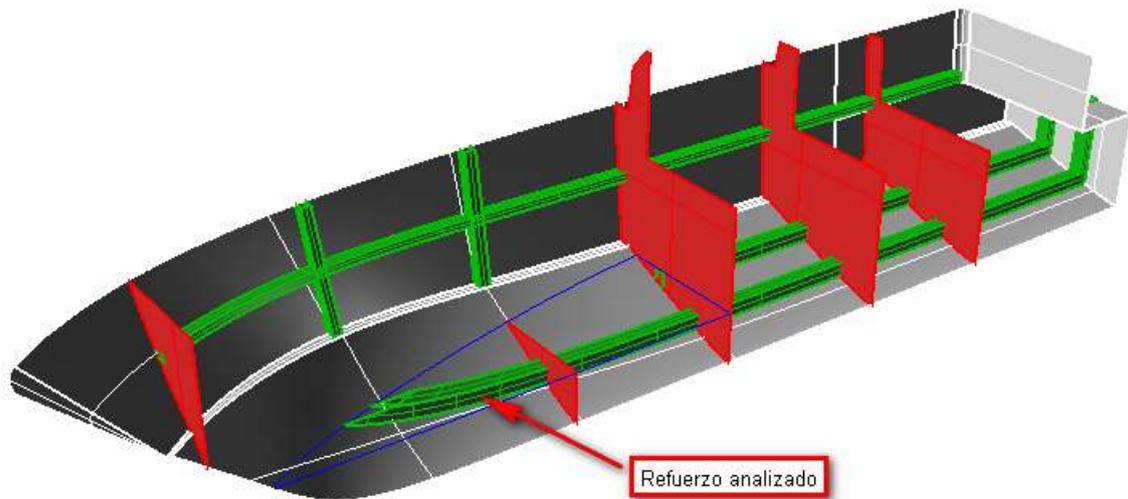
$$w_{\text{real}} = 5,3 \text{ kg/m}^2$$

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

### **2.7.3.2.-Refuerzos**

Los refuerzos utilizados han sido tipo omega con núcleo de PVC lineal de 60 kg/m<sup>3</sup>.

El refuerzo más desfavorable en cuanto a diseño es el situado bajo la cubierta interior de proa, a proa de la varenga profunda, debido a que esta es una zona de altas presiones y además tiene una luz mayor que la del resto de refuerzos.



La luz del refuerzo es de 1850mm y la separación entre refuerzos es de 550 mm.

La presión de diseño es de 43,5 kN/m<sup>2</sup>. Este valor es una salida de la *Hoja de cálculo 2*.

Para un refuerzo se pide:

1 Una superficie mínima de alma

$$A_W = \frac{k_{SA} \cdot P \cdot s \cdot l_u}{\tau_d} \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$$

2 Un módulo de inercia mínimo del refuerzo, incluyendo su chapa asociada

$$SM = \frac{83,33 \cdot k_{CS} \cdot P \cdot s \cdot l_u^2}{\sigma_d} \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$$

3 Un segundo momento de área mínimo

$$I = \frac{26 \cdot k_{CS}^{1,5} \cdot P \cdot s \cdot l_u^3}{k_{1S} \cdot E_{tc}} \cdot 10^{-10} \text{ cm}^4$$

donde

$k_{SA}$  es el factor de superficie de cizalla del refuerzo. (5)

$P$  es la presión de diseño en  $\text{kN/m}^2$ . (43,5  $\text{kN/m}^2$ )

$s$  es la separación entre refuerzos en mm. (550 mm)

$l_u$  es la longitud del refuerzo en mm. (1850mm)

$\tau_d$  es a tensión de diseño de cizalla del alma del refuerzo en  $\text{N/mm}^2$ . (26,9  $\text{N/mm}^2$ )

$k_{CS}$  es el factor de curvatura del refuerzo. (1)

$\sigma_d$  es la tensión de diseño del refuerzo en  $\text{N/mm}^2$ . (45,6  $\text{N/mm}^2$ )

$k_{1S}$  es el factor de deflexión (flecha) para los refuerzos. (0,05)

$E_{tc}$  es al media en los módulos de elasticidad de tracción y compresión en  $\text{N/mm}^2$ . (7074  $\text{N/mm}^2$ )

Para un refuerzo de 11x11cm con la secuencia de laminado M600-R800-M600-R800-M600 en todo el refuerzo más un laminado extra en el ala de M600-M600 (Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 4*) se obtienen unos valores de:

$$A_{wmin}=8,2 \text{ cm}^2$$

$$A_{wreal}=23,8 \text{ cm}^2$$

$$SM_{min}=149,6 \text{ cm}^3$$

$$SM_{real}=157,2 \text{ cm}^3$$

$$I_{min}=1113,6 \text{ cm}^4$$

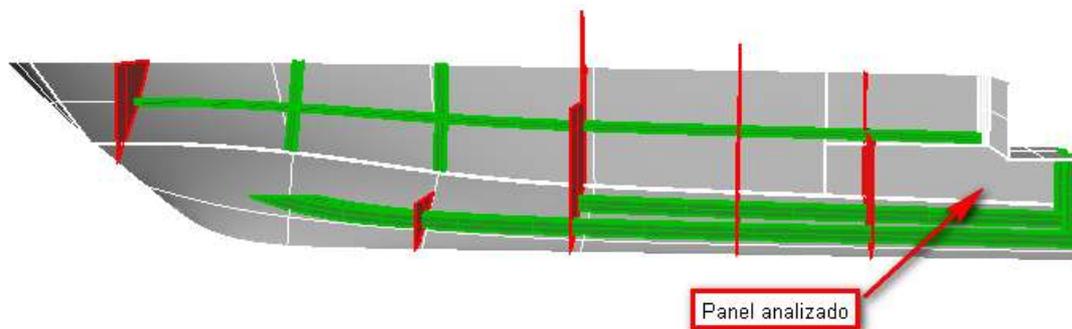
$$I_{real}=1486,8 \text{ cm}^4$$

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

## 2.7.4.-Costado

### 2.7.4.1.-Paneles

El panel de costado más desfavorable en cuanto a diseño es el situado más a popa, sobre el codillo, debido a sus dimensiones y a que se encuentra bajo la línea de flotación aproximadamente un 50%. Este panel se analizará como si estuviera en la proa, ya que en esa zona las presiones de diseño son mayores, de esta manera queda asegurado que ningún panel trabajará en condiciones más desfavorables.



Las medidas de este panel son 2650x650 mm.

La presión de diseño utilizada ha sido de 29,7 kN/m<sup>2</sup>. Este valor es una salida de la *Hoja de cálculo 2*.

Para un panel monolítico se exige:

1.- Un espesor mínimo

$$t_{min} = b \cdot k_c \cdot \sqrt{\frac{P \cdot k_2}{1000 \cdot \sigma_d}} \quad \text{mm}$$

2.- Una masa mínima de fibra seca

$$w_{min} = 0,43 \cdot k_5 \cdot (A + k_7 \cdot V + k_8 \cdot m_{LDC}^{0,33}) \quad \text{Kg/m}^2$$

donde

b es la dimensión menor del panel en mm. (650mm)

$k_c$  es el factor de corrección de curvatura. (1)

P es la presión de diseño en KN/m<sup>2</sup>. (29,7 kN/m<sup>2</sup>)

$k_2$  es un factor de alargamiento del panel por resistencia a flexión. (0,5)

$\sigma_d$  es la tensión de diseño en N/mm<sup>2</sup>. (69,1 N/mm<sup>2</sup>)

A,  $k_5$ ,  $k_7$ ,  $k_8$  son los factores de espesor mínimo. (1,5; 1; 0; 0,15)

V es la velocidad máxima en nudos. (25 nudos)

$m_{LDC}$  es la masa de desplazamiento en carga en Kg. (10950 Kg)

La secuencia de laminado ha sido la siguiente:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600. Esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 3*.

Es decir, un total de 8 capas, con un espesor total de 9,76 mm.

Para este panel:

tmin= 9,53 mm

treal= 9,76 mm

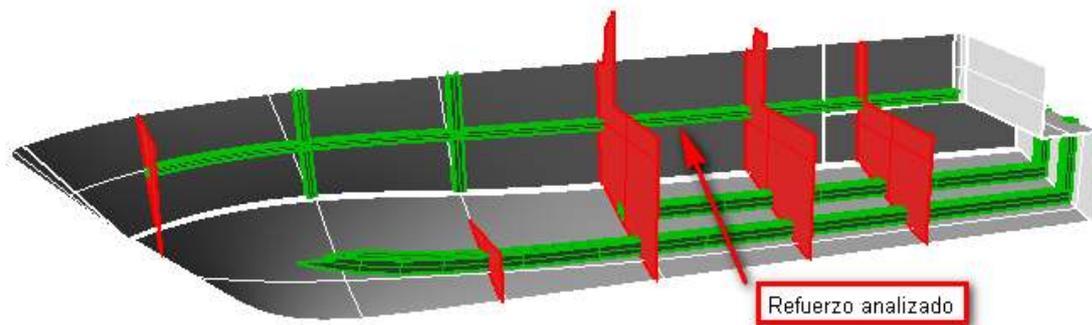
wmin=2 kg/m<sup>2</sup>

wreal=5,25 kg/m<sup>2</sup>

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requerido.

### 2.7.4.2.-Refuerzos

El refuerzo de costado más desfavorable es el situado entre los mamparos de la cámara de máquinas debido a su mayor luz, además lo analizaremos como si estuviera en la zona más a proa posible para asegurarnos de que ningún refuerzo operará en condiciones más desfavorables.



La luz del refuerzo es de 1760mm y la separación entre refuerzos es de 660 mm, consideramos el codillo y la unión costado-cubierta como refuerzos naturales.

La presión de diseño utilizada ha sido de 24 kN/m<sup>2</sup> y es una media entre la presión de fondo y la de costado, ya que una de las planchas que soporta el refuerzo está parcialmente bajo la línea de flotación. Este valor proviene de la *Hoja de cálculo 2*.

Para un refuerzo se pide:

1 Una superficie mínima de alma

$$A_W = \frac{k_{SA} \cdot P \cdot S \cdot l_u}{\tau_d} \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$$

2 Un módulo de inercia mínimo del refuerzo, incluyendo su chapa asociada

$$SM = \frac{83,33 \cdot k_{CS} \cdot P \cdot s \cdot l_u^2}{\sigma_d} \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$$

3 Un segundo momento de área mínimo

$$I = \frac{26 \cdot k_{CS}^{1,5} \cdot P \cdot s \cdot l_u^3}{k_{1S} \cdot E_{tc}} \cdot 10^{-10} \text{ cm}^4$$

donde

$k_{SA}$  es el factor de superficie de cizalla del refuerzo. (5)

$P$  es la presión de diseño en KN/m<sup>2</sup>. (24 KN/m<sup>2</sup>)

$s$  es la separación entre refuerzos en mm. (660 mm)

$l_u$  es la longitud del refuerzo en mm. (1760 mm)

$\tau_d$  es a tensión de diseño de cizalla del alma del refuerzo en N/mm<sup>2</sup>. (26,9 N/mm<sup>2</sup>)

$k_{CS}$  es el factor de curvatura del refuerzo. (1)

$\sigma_d$  es la tensión de diseño del refuerzo en N/mm<sup>2</sup>. (45,6 N/mm<sup>2</sup>)

$k_{1S}$  es el factor de deflexión (flecha) para los refuerzos. (0,05)

$E_{tc}$  es al media en los módulos de elasticidad de tracción y compresión en N/mm<sup>2</sup>. (7074 N/mm<sup>2</sup>)

Para un refuerzo de 9x9 cm con la secuencia de laminado M600-R800-M600-R800-M600 en todo el refuerzo más un laminado extra en el ala de M600-M600 (esta secuencia ha sido calculada usando la *Hoja de cálculo 4*) se obtienen unos valores de:

$A_{wmin} = 5,1 \text{ cm}^2$

$A_{wreal} = 19,5 \text{ cm}^2$

$SM_{min} = 88,3 \text{ cm}^3$

$SM_{real} = 102,5 \text{ cm}^3$

PFC

Escantillado y AEF de una embarcación de recreo

$I_{min} = 625,1 \text{cm}^4$

$I_{real} = 767,2 \text{cm}^4$

Se observa que los valores reales son mayores que los mayores que los mínimos requeridos.

## 2.8.-Resumen de resultados

### Mamparos:

M600-R800-M600-M600-NÚCLEO DE PVC (15mm)-M600-M600-R800-M600.

### Cubiertas:

M600-R800-M600-NÚCLEO DE PVC (15mm)-M600-R800-M600.

### Fondo:

#### Paneles:

##### A popa de mamparo de popa de cámara de máquinas:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

##### A proa del mamparo de popa de cámara de máquinas:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

#### Refuerzos:

11x11 cm      M600-R800-M600-R800-M600 en todo el refuerzo más un laminado extra en el ala de M600-M600

### Costado:

#### Paneles:

M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

#### Refuerzos:

9x9 cm      M600-R800-M600-R800-M600 en todo el refuerzo más un laminado extra en el ala de M600-M600

## 2.9.-Cálculo del peso de la estructura

	$\psi$	Peso fibra (g)	Peso total (kg)
M600	0,30	600,00	2,00
M450	0,30	450,00	1,50
R800	0,48	800,00	1,67
<b>Paneles</b>			

Elementos	Superficie (m <sup>2</sup> )	Capas M600	Capas M450	Capas R800	Densidad PVC (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (Kg)
Mamparos	13,73	6	0	2	60	222,97
Cubiertas	59,8	4	0	2	60	731,95
Fondo paneles a popa de m.popa.cm	14,04	4	1	3	0	203,58
Fondo paneles a proa de m.popa.cm	19,79	5	1	4	0	359,52
Costado	27,39	4	1	3	0	397,16
<b>TOTAL</b>						
<b>PANELES</b>						<b>1915,18</b>

### Refuerzos

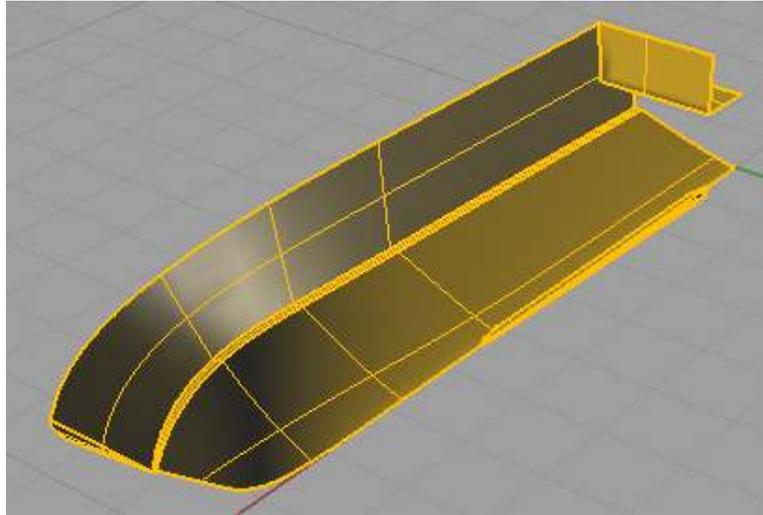
Zona	Longitud (m)	Ala y Alma (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Capas M600	Capas R800	Capas extra ala M600	Densidad PVC (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Costado	23,40	0,09	8,66	3	2	2	60	100,60
Fondo	31,20	0,11	13,42	3	2	2	60	161,60
<b>TOTAL</b>								
<b>REFUERZOS</b>								<b>262,20</b>

PESO TOTAL PANELES	1915,18	kg
PESO TOTAL REFUERZOS	262,20	kg
PESO TOTAL ESTRUCTURA	2177,38	kg

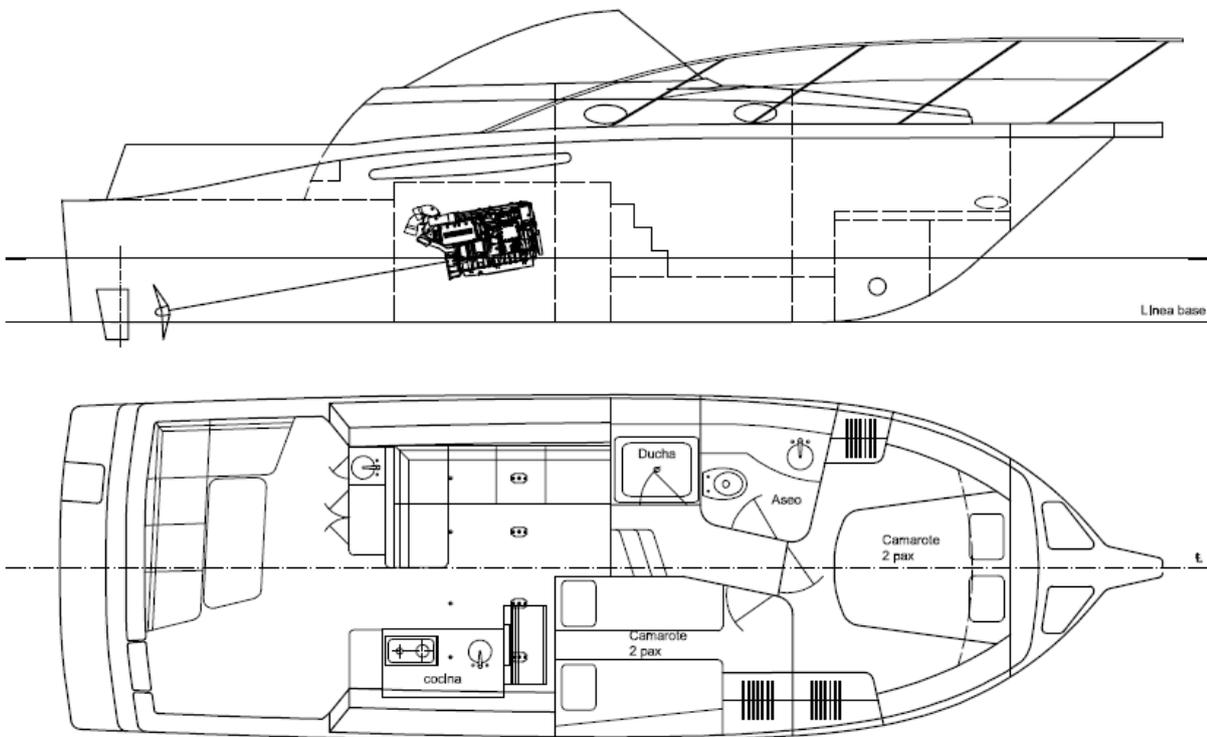
Estos resultados serán usados en el apartado de cargas, en el análisis por elementos finitos. No se han tenido en cuenta los solapes de las distintas capas de laminado ni el peso del gel coat. En el caso de los refuerzos, además de sus dimensiones, se ha tenido en cuenta un laminado extra de 5 cm a cada lado del refuerzo, necesario para unir al panel.

### 3.-Modelado 3D para AEF

Los datos de partida para realizar el modelado en 3D de la embarcación son: el archivo IGES del casco de la embarcación y los planos de disposición general. A continuación se muestran ambos:



Archivo IGES



Planos de disposición general

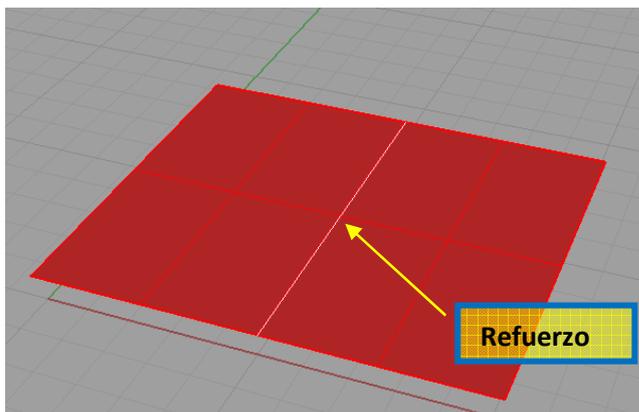
Con estos datos hay que realizar el modelado de la cubierta y los mamparos. En este tipo de embarcaciones se cuida al máximo la estética, y el modelado de cubiertas e interiores lleva una buena carga de trabajo. Debido a que no es este el objeto de este proyecto, se ha realizado un modelado 3D de la cubierta válido desde todos los puntos de vista, incluido un análisis por elementos finitos, pero quizá no lo debidamente cuidado para una embarcación de estas características.

El programa informático elegido para el modelado 3D de la embarcación ha sido Rhinoceros, los motivos son los siguientes:

1. Familiarización con él, ya que se utiliza en la asignatura de Dibujo Naval.
2. Trabaja con superficies y eso es precisamente lo que interesa para el FEA.
3. Es totalmente compatible con el módulo de preproceso GID que usa el programa de análisis estructural por elementos finitos Ramseries.

En este modelado 3D no se deben representar elementos de detalle que no aportan nada estructuralmente, sólo geometría principal.

Los refuerzos no se modelan, sino que serán simples líneas que unen superficies independientes. Se puede observar en la siguiente figura.



La línea blanca es un refuerzo y separa dos superficies independientes

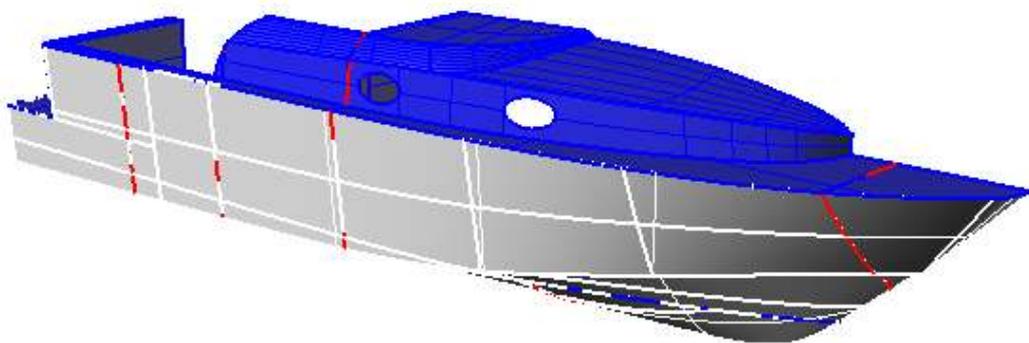
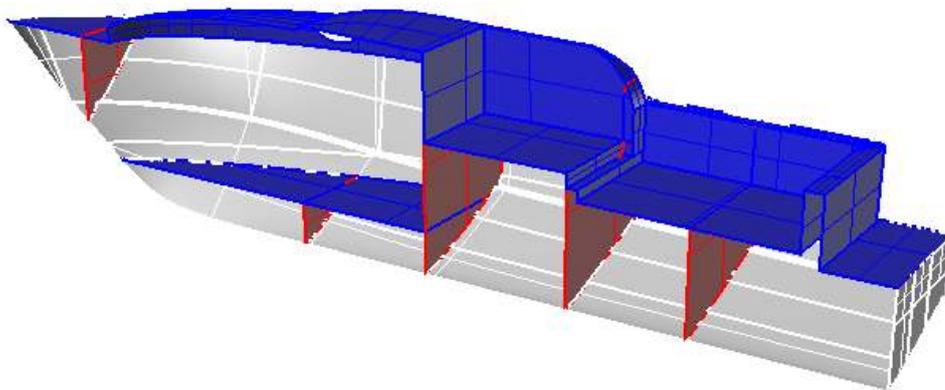
Esto quiere decir que para modelar los longitudinales del fondo, por ejemplo, solo será necesario partir el fondo en el número de varengas adecuado.

A estas líneas se les asignará posteriormente las propiedades físicas del refuerzo.

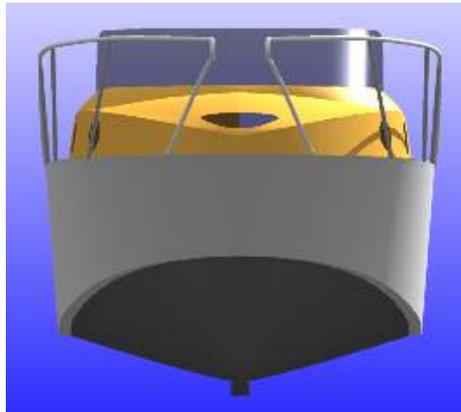
El modelo se ha separado en capas para un mejor manejo posterior de superficies y asignación de propiedades.

A continuación se muestra el modelo 3D que se va a exportar al módulo de preproceso GID que usa Ramseries y un modelo de la embarcación más completo y renderizado, que no se usará.

Modelo a exportar



Modelo renderizado y más completo



### **3.1.-Exportación**

Es importante asegurarnos antes de realizar el modelo que el programa que usamos para el modelado permite exportar el modelo (en un formato determinado) al programa de análisis, y que en esta exportación no se pierden propiedades de las superficies. También conviene asegurarse de que el tipo de superficies (recortadas, barrido por carril...) que usamos para el modelado son compatibles con el programa de análisis y se exportan correctamente.

El formato de exportación será el \*.3dm (Rhinoceros), ya que se ha comprobado que cumple satisfactoriamente todo lo anterior, y GID lo acepta perfectamente.

## **4.-Método de los elementos finitos (MEF)**

### **4.1.-Breve introducción al MEF.**

Las limitaciones de la mente humana son tales que no puede captar el comportamiento del complejo mundo que le rodea en una sola operación global. Por ello una forma habitual de proceder de los ingenieros consiste en separar los sistemas complejos en sus componentes individuales o “elementos”, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, y seguidamente reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes.

En muchos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos. Tales problemas se denominan discretos. En otros la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema solo puede resolverse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimo. Ello conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicado. Tales sistemas se denominan continuos.

Con ayuda de las computadoras, los problemas discretos pueden resolverse sin excesiva dificultad, aún cuando el número de elementos sea muy elevado. Como la capacidad de las computadoras es finita los problemas continuos solo pueden

resolverse de forma exacta mediante manipulaciones matemáticas. Las técnicas matemáticas disponibles suelen limitar las posibilidades a casos extremadamente simplificados.

Para vencer la dificultad de dar solución a problemas continuos reales ingenieros y matemáticos han ido proponiendo diversos métodos de discretización. La utilización de estos métodos hace necesario efectuar alguna aproximación de manera que quepa esperar que la misma se acerque, en el límite, a la solución continua verdadera a medida que crezca el número de variables discretas

La discretización de problemas continuos ha sido abordada por los ingenieros de una forma muy intuitiva creando una analogía entre los elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo. En el campo de la mecánica de sólidos se demostró que pueden obtenerse soluciones razonablemente buenas sustituyendo porciones del continuo por barras elásticas simples. Además también se demostró que se se pueden sustituir las propiedades del continuo suponiendo que los “elementos” que lo constituyen se comportan de una cierta forma simplificada.

Con el transcurso de los años se han ido desarrollando métodos generales para analizar problemas de naturaleza discreta. El ingeniero que trabaja con estructuras, calcula primero las relaciones entre fuerzas y desplazamiento para cada miembro de la estructura y después procede al ensamblaje del conjunto siguiendo un procedimiento bien definido que consiste en establecer el equilibrio local en cada “nudo” o punto de unión de la estructura. A partir de tales ecuaciones se pueden obtener los desplazamientos desconocidos.

#### **4.2.-Historia del MEF**

La aparición del computador en la década de los cincuenta ha supuesto una revolución tanto en el aspecto científico como en la vida cotidiana. En Teoría de Estructuras el computador ha cambiado radicalmente los métodos de resolución de problemas, provocando un empleo masivo de los métodos numéricos, de los que el más importante es el método de los elementos finitos.

La denominación de “Método de los elementos finitos” aparece por primera vez en 1960 en un artículo de Clough sobre problemas de elasticidad plana, pero las ideas del método son muy anteriores.

En ingeniería el MEF tuvo un marcado carácter intuitivo. Cuando un ingeniero se encontraba con una estructura discreta<sup>4</sup>, se daba cuenta de que esta estaba formada por un conjunto de elementos o piezas que poseían unas características individuales de acuerdo con las condiciones de equilibrio y compatibilidad, y resolvía el sistema de ecuaciones resultante. El problema aparecía cuando el ingeniero se encontraba con una estructura continua<sup>5</sup>, sin nudos ni barras. Hrenikoff propuso resolver este problema dividiendo la estructura continua en un conjunto de elementos lineales conectados en un número finito de puntos, con lo que el problema se convertía en uno convencional, que podía ser resuelto por procedimientos matriciales normales.

El avance importante se produce cuando Argyris y sus colaboradores publican una serie de artículos que cubrían todo el análisis lineal y las técnicas de resolución adecuadas a las computadoras. La solución a los problemas de tensión plana por medio de elementos triangulares, cuyas propiedades se determinan a partir de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad apareció en el artículo de Turner, Clough, Martin y Topp “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures”, publicado en 1956. Estos investigadores introdujeron el Método Directo de las Rigideces, con lo que quedaba establecida la formulación del MEF.

En 1963, Besseling, Melosh, Fraeijs de Veubeke y Jones, reconocieron que el M.E.F. era una forma del método de Ritz, lo que lo confirmaba como un método general para el tratamiento de problemas elásticos.

---

<sup>4</sup> Las estructuras discretas son aquellas que consisten en uno o más elementos con una dimensión mucho más grande que las otras, pudiendo considerarse que las cargas o los esfuerzos varían sólo a lo largo de la dimensión mayor. Ejemplos de estructuras discretas son las vigas, estructuras de barras de nudos articulados o los pórticos.

<sup>5</sup> Las estructuras continuas son aquellas en las que dos o tres dimensiones del elemento son comparables y las cargas y los esfuerzos varían a lo largo de estas dimensiones. Ejemplos de estructuras continuas son las placas, láminas, recipientes a presión o una embarcación.

En 1965 Zienkiewicz y Cheung dieron una interpretación más general al método, señalando la posibilidad de aplicación a todos los problemas de campos que pueden ponerse en forma variacional.

Actualmente es considerado una técnica de análisis y ha llegado a un punto en el que no se producen cambios espectaculares, estando marcada su evolución por la aplicación a otros campos, el mayor entendimiento de los aspectos más importantes y el refinamiento de las técnicas que utiliza. Entre los campos en que se están trabajando actualmente, se pueden señalar los que incluyen fallos de materiales, tales como figuración o fractura, así como los que exigen un modelado de las propiedades no lineales de los materiales.

#### **4.3.-Definición del MEF**

En el método de los elementos finitos:

- a) El continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros.
- b) La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos.

De una forma algo más detallada:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, que se denominan nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal como ocurre en análisis simple de estructuras.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada "elemento finito" y sobre sus contornos en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.

4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las deformaciones iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y, por consiguiente, también en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así, una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma :

$$q^1 = K^1 a^1 + f_p^1 + f_{\varepsilon_0}^1$$

en donde  $q^1$  representa las fuerzas que actúan sobre los nodos,  $K^1 a^1$  las fuerzas inducidas por los desplazamientos de los nodos,  $f_p^1$  las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento y  $f_{\varepsilon_0}^1$  las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial.

#### **4.4.-Funcionamiento básico de un paquete de elementos finitos**

Las tareas básicas a realizar son:

- 1.-Definición de la geometría
- 2.-Definición del comportamiento
- 3.-Establecimiento de las condiciones de funcionamiento
- 4.-Aplicación de las solicitaciones
- 5.-Cálculo
- 6.-Revisión de los resultados

Estas seis tareas básicas se pueden agrupar en tres módulos de trabajo. Algunos paquetes comerciales incorporan los tres, otros sin embargo suministran sólo uno o dos de ellos.

A) Módulo de Preproceso

B) Módulo de Cálculo

C) Módulo de Postproceso

Se comentará brevemente el contenido de cada uno de los módulos y las etapas que incluyen cada uno de ellos

A) Módulo de Preproceso

Compuesto por el preprocesador. Se incluyen en este módulo las cuatro primeras etapas:

1.-Definición de la geometría y modelización de esta con elementos que se asemejen lo más posible al modelo. Es la tarea que supone mayor dedicación de tiempo y lleva consigo bastante complejidad. Actualmente los preprocesadores permiten agilizar el proceso pues incorporan herramientas potentes de definición de la geometría y generadores automáticos de mallas que simplifican la tarea y supone un ahorro considerable de tiempo.

2.-Definición de las hipótesis de comportamiento. Una vez establecido tipo de material se va a usar y la composición de éste se definen sus características. Con los medios actuales se pueden definir curvas de comportamiento del material de manera sencilla, ofreciendo la posibilidad de representar todo tipo de comportamiento del material, desde al comportamiento elástico hasta el plástico pasando por muchas otras posibilidades.

3.-Establecimiento de las condiciones de contorno. Es decir, las restricciones del problema, que implican un conocimiento profundo del funcionamiento del sistema. Los movimientos de determinados puntos del sistema, las condiciones de trabajo, etc.

Con los medios actuales es posible definir estas d manera rápida con ayuda de las herramientas que posee el preprocesador.

4.-Aplicación de las acciones que actúan sobre el sistema. Ocurre lo mismo que en el caso anterior. Los paquetes actuales permiten simular la aplicación de toda clase de acciones y establecerlas d forma sencilla.

#### B) Módulo de Cálculo

Compuesto por el programa de cálculo. Se incluye en este modulo la quinta etapa:

5.-El cálculo. Para ello el método a utilizar el de la teoría de los elementos finitos. Una vez establecidas todas las hipótesis del problema y definida la geometría este modulo se encarga de resolver las ecuaciones establecidas según el tipo de problema y de determinar las incógnitas básicas mediante el método de cálculo que se escoja y que sea más apropiado, ya sea por obtener mejores resultados o por ser el más económico computacionalmente hablando. Implica un conocimiento profundo del problema a tratar y la elección acertada del procedimiento adecuado para cada tipo d problema.

#### C) Módulo de Postproceso

Compuesto por el postprocesador. Se incluye en este módulo la sexta etapa:

6.-En este modulo se incluye la última etapa que es la de revisión y presentación de los resultados obtenidos en el cálculo. Es necesario conocer a priori qué resultados vamos a comprobar principalmente, pues la cantidad de resultados va a ser bastante grande, esto también supone un amplio conocimiento del comportamiento del sistema. Para ello el postprocesador nos proporciona las herramientas necesarias para que de forma gráfica podamos acceder a los resultados de forma sencilla y rápida.

## 5.-Análisis por elementos finitos (AEF)

El programa seleccionado para llevar a cabo el análisis por elementos finitos ha sido Ramseries en su versión 10.3.1, desarrollado por la compañía Compass, los motivos han sido los siguientes:

- 1.-Dispone de gran información a modo de tutoriales.
- 2.-Hay disponible una versión de prueba en la página web [www.compassis.com](http://www.compassis.com) totalmente gratuita y renovable a través de códigos. Esta versión se puede usar a modo de prueba y nunca para trabajos profesionales.
- 3.-Contiene módulos de cálculo específicamente navales.
- 4.-La definición de refuerzos es muy simple y disminuye notablemente el tiempo de modelado.
- 5.-Permite introducir cargas de ola de una manera sencilla, lo cual es muy útil para el ámbito naval.
- 6.-Su compatibilidad con el programa de modelado Rhinoceros.

Además de estos puntos debo añadir una vez finalizado el proyecto que Compass dispone de un gran equipo, dispuesto en todo momento a solventar cualquier tipo de duda en relación al funcionamiento del programa.

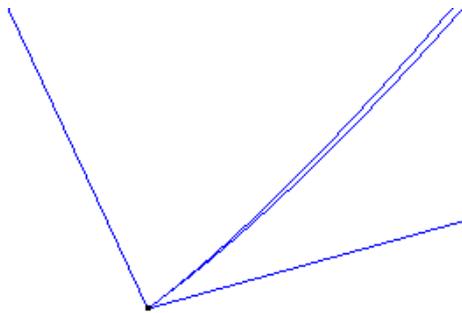
### 5.1.-Preparación de modelo para la asignación de propiedades.

Una vez importado el modelo en formato IGES desde el módulo de preproceso GID que usa Ramseries, hay dos aspectos importantes antes de empezar a asignar propiedades al modelo:

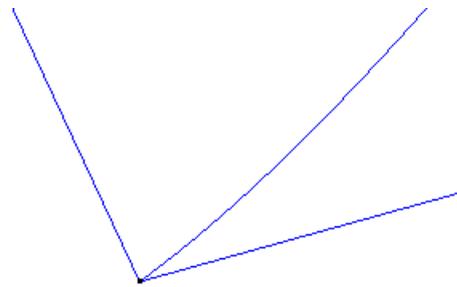
1. Ejecutar el comando *Collapse Geometry* , que lo que hace es considerar como uno el segmento divisorio entre dos superficies, en Rhinoceros se generan en ocasiones segmentos duplicados entre superficies recortadas o

barridas por carril que el programa de elementos finitos no entendería. Este comando se puede ajustar a conveniencia en Utilities>Preferentes>Exchange>Import tolerante, en este caso se ha usado un valor de 0.01. Esto significa que todos los segmentos que compartan un punto inicial y final, y que estén separados menos de 1 centímetro, serán considerados como uno, al igual que todos los puntos que estén separados menos de 1 centímetro. Esto se puede observar en las siguientes figuras:

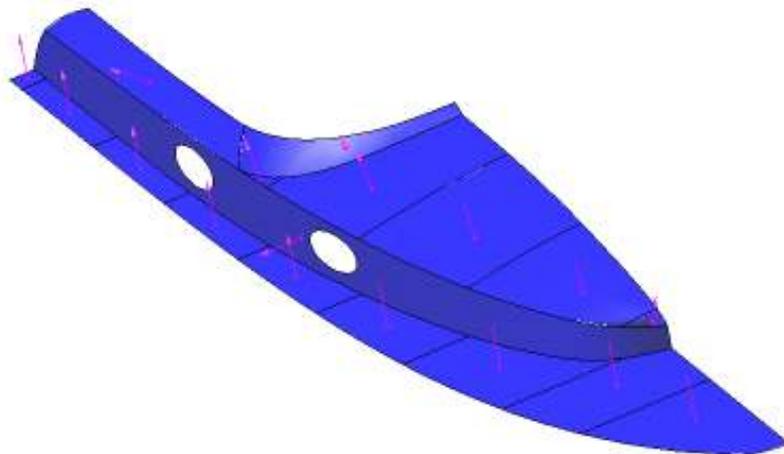
Con tolerancia 0.0001 metros



Con tolerancia 0.01 metros



2. Comprobar la dirección normal de las superficies importadas, en ocasiones superficies que comparten un mismo lado tienen normales opuestas y esto puede hacer que los resultados nos sean confusos. Mediante el comando  podemos visualizar la normal, y en Utilities>Swap normals>Surfaces>Select se pueden cambiar.



A partir de aquí ya se está es disposición de asignar propiedades, cargas, y condiciones de contorno.

## 5.2.-Asignación de propiedades

### 5.2.1.-Creación de materiales, laminados y asignación de estos.

Para la creación de materiales se usa la opción *Properties>Materials>Composites*, y se usa la opción *Fiber-Resin*, en la que se deben introducir los siguientes datos:

#### Fibra

Módulo de Young  
Coeficiente de Poisson  
Módulo cortante  
Densidad

#### Resina

Módulo de Young  
Coeficiente de Poisson  
Módulo cortante  
Densidad

Tipo de tejido (Mat, Roving, Unidireccional), % de refuerzo por unidad de masa, masa de refuerzo por unidad de superficie, índice de vacío.

El programa calcula entonces las características mecánicas del material compuesto.

En este caso se trata de compuestos de PRFV, por lo que se han introducido los siguientes valores:

	Densidad $kg/m^3$	Módulo de tracción $N/m^2$	Módulo de cortante $N/m^2$	Coef. Poisson
Fibra de vidrio E	2540	$69 \cdot 10^9$	$28 \cdot 10^9$	0.22
Resina de poliéster	1200	$34 \cdot 10^8$	$13 \cdot 10^8$	0.32

Para esta embarcación las láminas usadas son el Mat 600, Mat 450 y el Roving 800.

Tipo de tejido: Mat o Roving

Contenido en masa de vidrio por unidad de masa ( $\psi$ ): 0.3 o 0.48 respectivamente

Masa de refuerzo por unidad de superficie: 0.6 y 0.45  $kg/m^2$  para los tejidos Mat y 0.8  $kg/m^2$  para el tejido roving.

Fiber-Resin Composites d...

Material

Unidades: N-m-kg

Tipo de capa: Mat

% de Refuerzo: 30

Índice de vacío: 0.0

Masa de refuerzo: 0.6

Fibra

Módulo de Young: 69e9

Densidad: 2540

Coef. de Poisson: 0.22

Módulo a cortante: 28e9

Resina

Módulo de Young: 34e8

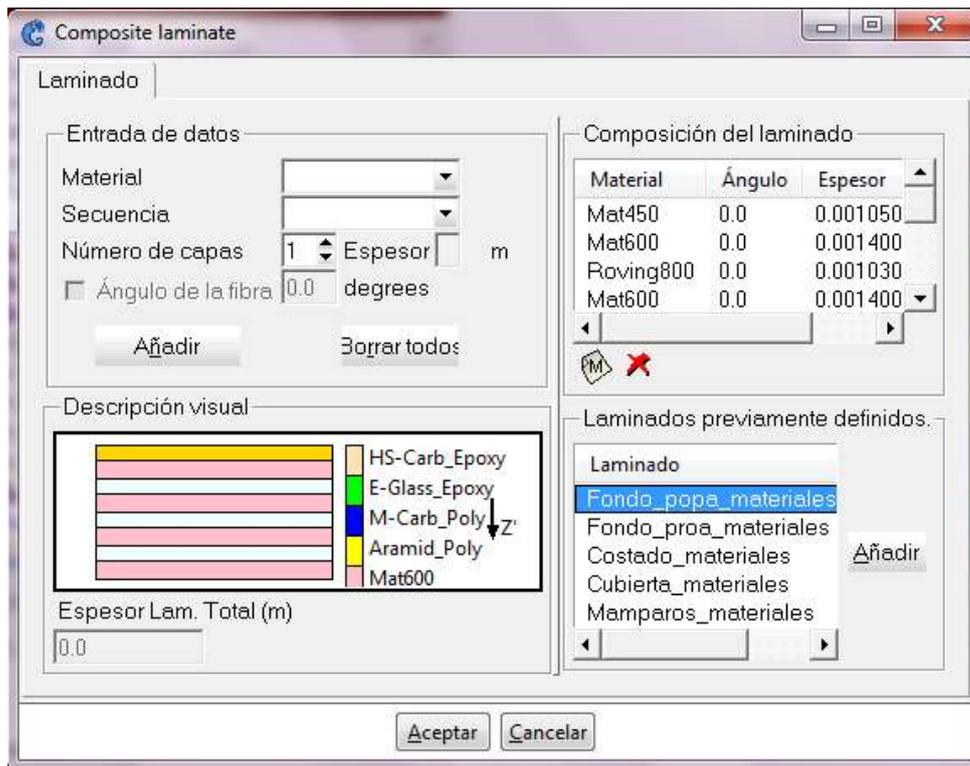
Densidad: 1200

Coef. de Poisson: 0.32

Módulo a cortante: 13e8

Aceptar Cancelar

Para la creación de laminados simplemente es necesario introducir la secuencia de laminado mediante la opción *Properties>Shells>Laminate Shells*. Esta opción permite crear la secuencia de laminado adecuada, siempre que previamente se hayan creado los materiales compuestos que forman parte del laminado.



Para la asignación de laminados solo es necesario seleccionar las partes de la embarcación que tienen una misma secuencia de laminado y asignárselo.

### 5.2.1.1.-Criterio de fallo de Tsai-Wu

Al activar esta opción el programa nos dirá en la fase de post proceso si alguna capa del laminado rompe, y en caso de que no rompa, cual es su factor de seguridad.

Los datos que debemos introducir son la tensión última de compresión, de tracción y la cortante. Para los tejidos mat y roving están calculadas a continuación:

	MAT	WR
Tensión última de compresión $Sc_1 = Sc_2$	$93,6 \cdot 10^6 N/m^2$	$115,2 \cdot 10^6 N/m^2$
Tensión última de tracción $St_1 = St_2$	$68 \cdot 10^6 N/m^2$	$146,3 \cdot 10^6 N/m^2$
Tensión última cortante T	$49,6 \cdot 10^6 N/m^2$	$61,1 \cdot 10^6 N/m^2$

Los tejidos que se han usado en este proyecto son el MAT y el Roving, para ellos el contenido en masa de vidrio ( $\psi$ ) es

$\psi$ mat	0.3
$\psi$ roving	0.48

Las tensiones de rotura vienen dadas por:

Propiedad mecánica	$N/mm^2$
Tensión de rotura a tracción (Sc)	$800\psi^2 - 80\psi + 37$
Tensión de rotura a compresión (St)	$150\psi + 72$
Tensión de rotura a cortante (T)	$80\psi + 38$

Los resultados de esta tabla se multiplicarán por 0,8 por los motivos explicados en la sección 2.5, obteniéndose así  $Sc_1$ ,  $St_1$  y T.

### 5.2.2.-Condiciones de contorno

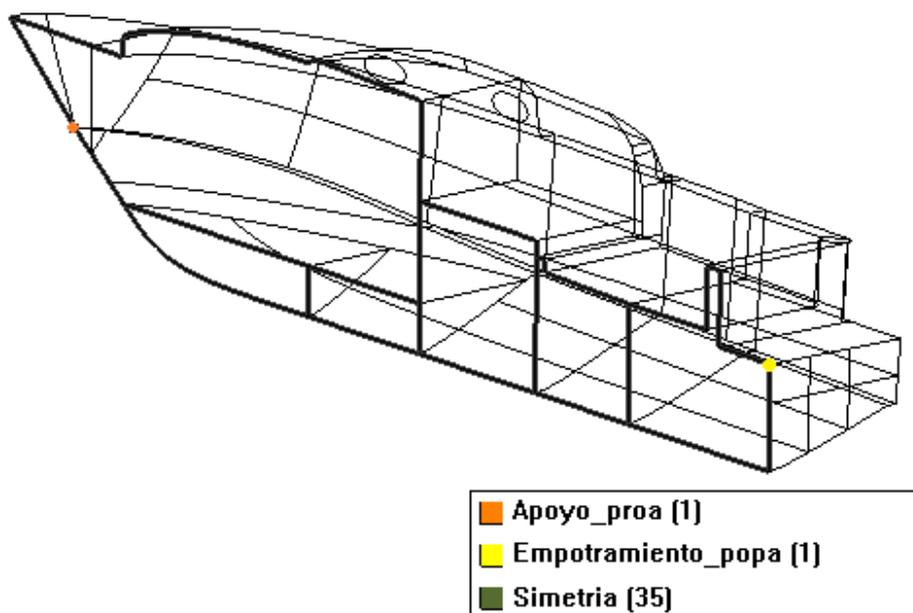
Se modela medio barco, por lo que en la línea de crujía se restringen los movimientos en el eje "Y" (transversal) y los giros a lo largo de los ejes "Z" y "X" (vertical y longitudinal respectivamente).

Como condiciones de sólido rígido se impone un empotramiento en un punto de popa y un apoyo en un punto de proa.

Se activa la opción *Ship Balance*, lo que hace el programa internamente al usar esta opción es desconectar las condiciones de contorno e ir alterando progresivamente el trimado y el calado del modelo hasta que se equilibran los pesos con el empuje hidrostático correspondiente al calado que se introducirá mediante la carga de ola. En este momento las condiciones de contorno ya no son necesarias, ya que hay un equilibrio de momentos y fuerzas, y se realiza el cálculo únicamente con las cargas impuestas, evitando cargas locales ficticias debidas a condiciones de contorno que no son reales, y resultando por tanto un cálculo mucho más realista.

Para que el equilibrado pueda converger fácilmente, el calado que se introduce tiene que ser uno ya calculado previamente para la embarcación para esa condición de carga.

Las condiciones de contorno asignadas son por tanto:



### 5.2.3.-Condiciones de carga.

Se va a estudiar el comportamiento de la embarcación en dos situaciones:

1. Condición de arrufo
2. Condición de quebranto

#### Cargas propias de la embarcación

En los dos casos la distribución de pesos de la embarcación se considerará la misma. Se trata de una embarcación de un desplazamiento máximo de 10950 kg.

El peso de la estructura es de 2178 kg, y el programa permite, una vez asignadas las propiedades de los materiales, aplicar como carga el peso propio de la estructura automáticamente.

Restando al peso correspondiente al desplazamiento máximo el peso de la estructura, nos queda un peso de 8773 kg.

De estos 8773 kg el mayor peso es el de los motores y tanques de combustible y agua dulce.

Considerando el peso de los dos motores de 250 kw cercano a 1400 kg, que consideraremos repartido uniformemente en el fondo de la cámara de máquinas, nos queda un peso de 7373 kg.

Considerando una capacidad de los tanques de combustible cercana a 800 kg y la del tanque de agua dulce a 250 kg, nos queda un peso de 6323 kg.

Estos 6323 kg corresponderían a pesos de baterías, mobiliario, instalación eléctrica, bombas, molinete, cocina, ducha, calentador de agua, pasamanos, escaleras, electrónica de navegación, tripulación...etc. Debido a que no se dispone de una relación de equipos, pesos y situación de estos, se ha hecho una suposición que se sabe que no se corresponde con la realidad, pero que a falta de estos datos es la única opción posible.

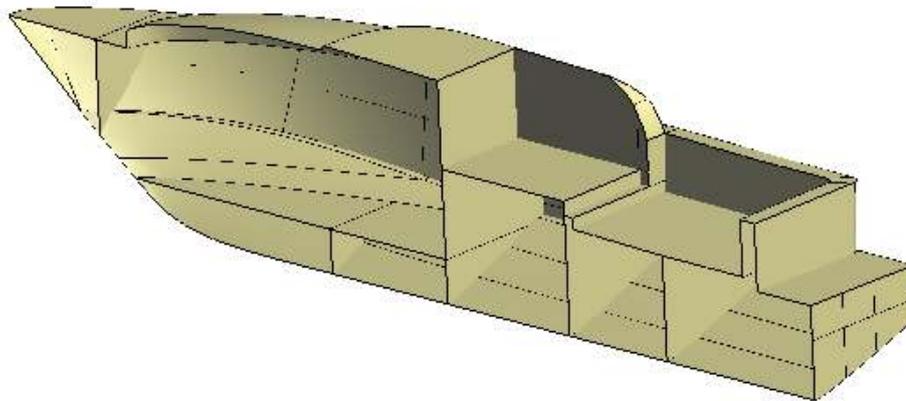
Se va a suponer que estos 6323 kg están uniformemente repartidos en la cubierta exterior y el fondo del casco. Un 20% sobre la cubierta exterior y un 80% sobre el fondo del casco. Sobre la cubierta habrá un peso de 1265 kg y sobre el casco 5059 kg.

Sabiendo que la superficie horizontal de la cubierta es de 33,05 m<sup>2</sup> obtenemos una presión de 38,3 kg/m<sup>2</sup> (375 N/m<sup>2</sup>).

Sabiendo que la superficie del fondo del casco es de 38,25 m<sup>2</sup> obtenemos una presión de 132,3 kg/m<sup>2</sup> (1298 N/m<sup>2</sup>).

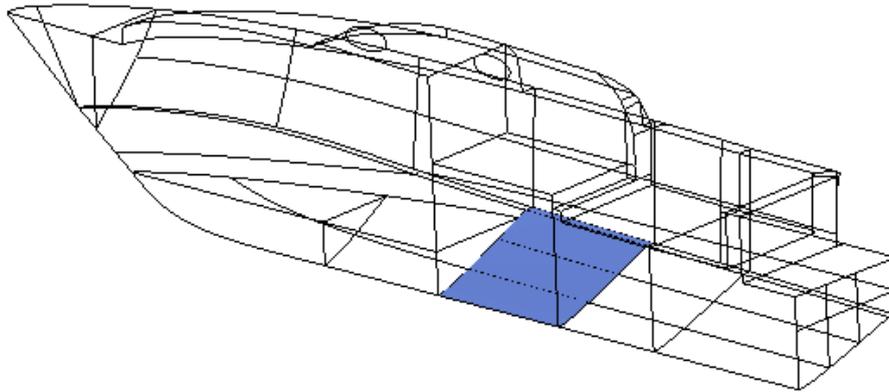
Las cargas propias de la embarcación serán:

1. El peso propio de la estructura. Este lo calcula automáticamente el programa, a partir de las propiedades de los materiales y de sus áreas.



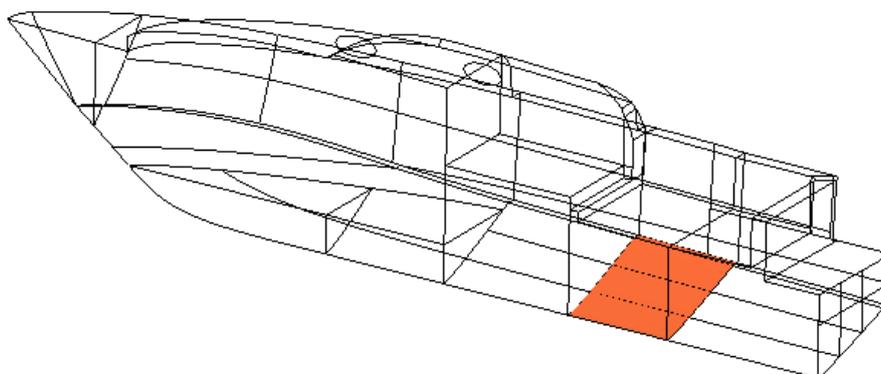
Self weight Auto1 [96]

2. El peso de los motores, como carga uniformemente repartida en la cámara de máquinas. Sabiendo que la superficie de la cámara de máquinas es de  $5,7 \text{ m}^2$ , corresponderá a una presión de  $245,6 \text{ kg/m}^2$  ( $2409 \text{ N/m}^2$ ).



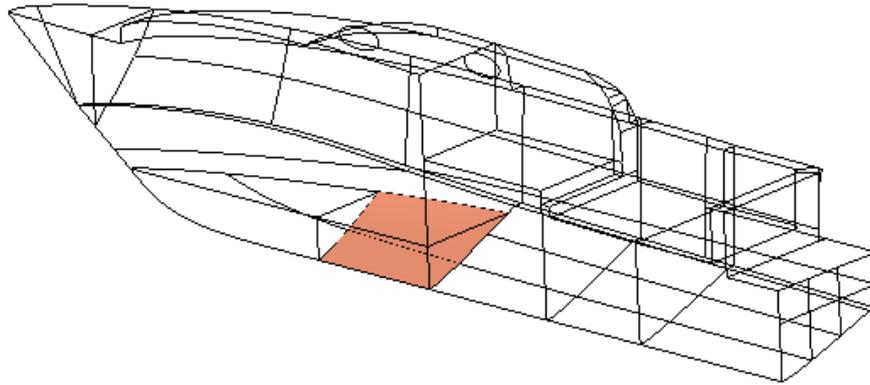
■ Fondo\_Camara\_Maquinas  
(4)

3. El peso de los tanques de combustible, como carga uniformemente repartida a popa del mamparo de popa de cámara de máquinas. Sabiendo que la superficie sobre la que se van a repartir es de  $4,52 \text{ m}^2$ , corresponderá una presión de  $177 \text{ kg/m}^2$  ( $1736 \text{ N/m}^2$ ).



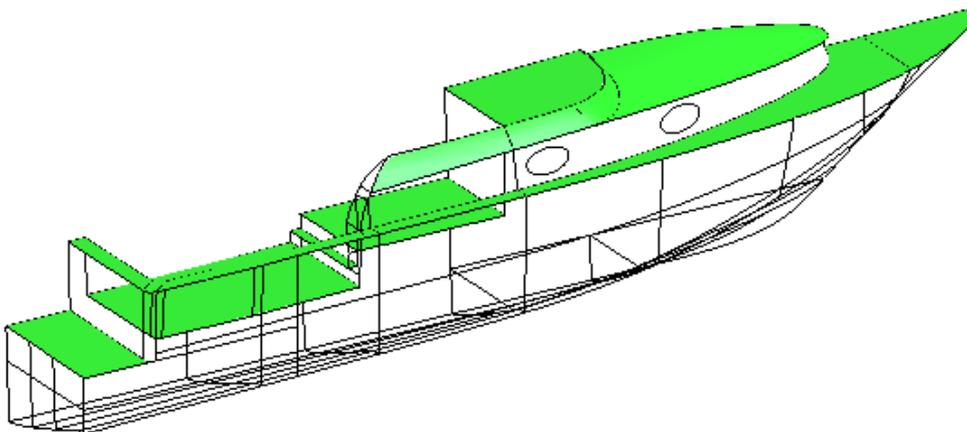
■ Fondo\_tanques\_combustible  
(4)

4. El peso del tanque de agua dulce, como carga uniformemente repartida a proa del mamparo de proa de cámara de máquinas. . Sabiendo que la superficie sobre la que se van a repartir es de  $4,2 \text{ m}^2$ , corresponderá una presión de  $59,5 \text{ kg/m}^2$  ( $584 \text{ N/m}^2$ ).



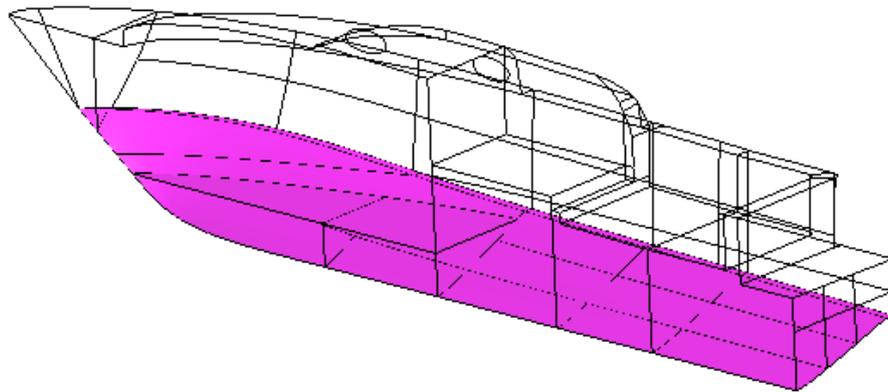
■ Fondo\_tanques\_agua (2)

5. Una presión de  $38,3 \text{ kg/m}^2$  ( $375 \text{ N/m}^2$ ) en cubierta, correspondiente al resto de elementos.



■ Cubierta\_carga\_uni (18)

6. Una presión de  $132,3 \text{ kg/m}^2$  ( $1298 \text{ N/m}^2$ ) en el fondo, correspondiente al resto de elementos.



■ Fondo\_carga\_uni [24]

Estas cargas son comunes a los dos casos de estudio.

Las cargas externas son las que varían de un caso a otro. Se han estudiado las condiciones de arrufo y quebranto, para lo que se ha usado la opción *Wave Load* que ofrece el programa. Para usar esta opción solamente es necesario introducir los datos de ola y los puntos de referencia, estos puntos no son más que los extremos de flotación a proa y popa, y son necesarios para que el programa distribuya la ola entre ellos.

En lo que se refiere a los datos de ola se va a seleccionar una altura de 1,4 metros, ya que los puntos de referencia están separados 9,8 metros (eslora en la flotación). Estos puntos corresponderían a la posición de las crestas en caso de arrufo y a la posición de los senos en caso de quebranto. Por la teoría de Stokes sabemos que la pendiente de una ola no será mayor a  $1/7$ , y sabiendo que la longitud de ola es de 9,8 metros, la altura máxima que le corresponde es de 1,4 metros.

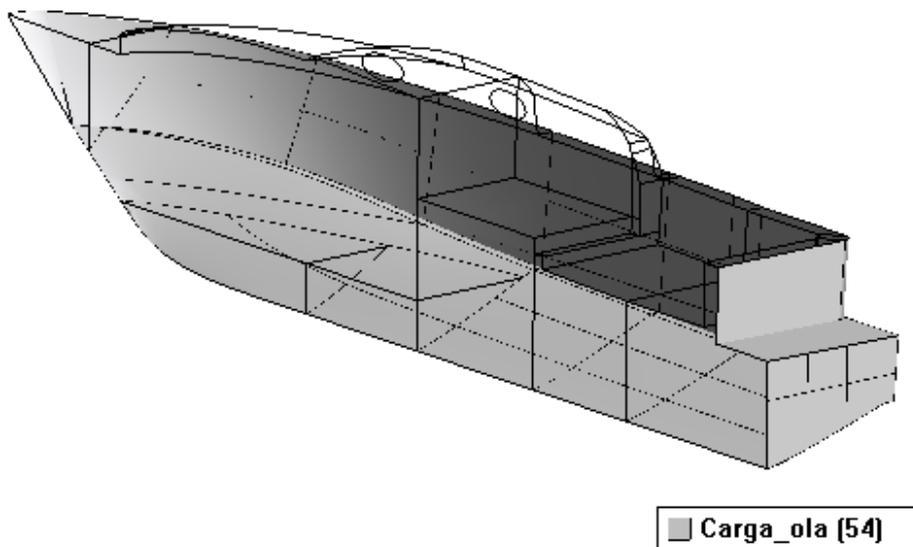
Esta embarcación está diseñada para soportar olas de 4 metros de altura significativa, pero debido a que la embarcación tiene una eslora en la flotación de 9,8 metros no

tendría sentido seleccionar una ola de 4 metros ya que su pendiente sería excesiva (teniendo en cuenta que su longitud sería de 9,8 metros).

Por lo tanto el análisis no será de una condición de carga extrema, que correspondería a una ola de 4 metros, pero será una condición bastante desfavorable. La embarcación será estudiada en el caso de una ola de 1,4 metros con sus crestas en los extremos de la flotación (arrufo) y con sus senos en los extremos de la flotación (quebranto).

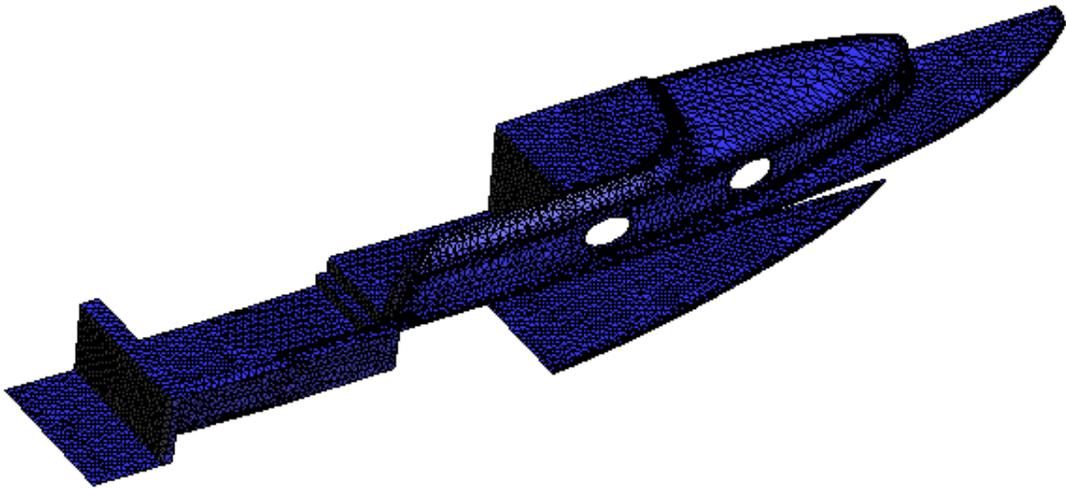
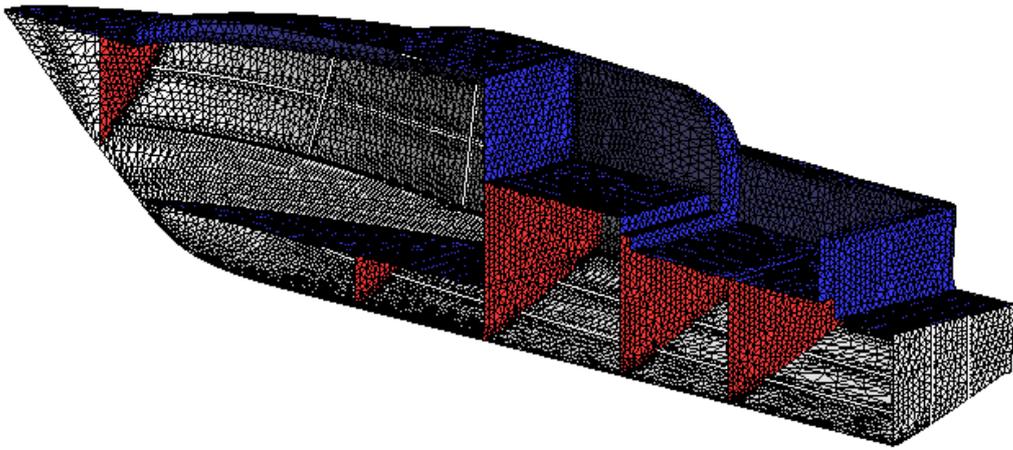
El tipo de ola seleccionada ha sido una senoidal.

Tanto para el caso de arrufo como para el de quebranto la ola se aplicará en las siguientes superficies:



### 5.3.-Generación de la malla

GID permite la generación de diferentes tipos de mallado, en nuestro caso se ha seleccionado un mallado no estructurado de elementos triangulares generado automáticamente, con un tamaño máximo de 0,08 metros. Esto genera una malla de 29723 elementos triangulares y 14955 nodos. Su aspecto es el siguiente:



#### 5.4.-Análisis

Ramseries incorpora varias opciones a la hora de realizar el análisis, se pueden usar diferentes *solvers*:

*Skyline*: mediante este *solver* el almacenamiento de la matriz del sistema es skyline y el *solver* directo.

*Iterative-Sparse*: la matriz es de tipo *sparse*, y el *solver* es iterativo.

Las matrices skyline necesitan reservar mucha más memoria RAM, pero en cambio, para este tipo de problemas, los *solvers* directos son mucho más eficientes, y más rápidos por tanto.

También incorpora el *solver Hybrid-Sparse*, que si bien coge más RAM que el iterativo, no necesita tanta como el directo, y es significativamente más rápido que cualquiera de los otros dos.

En el caso de este proyecto se ha usado el *solver Iterative-Sparse* debido a restricciones de memoria RAM del ordenador.

## 5.5.-Resultados

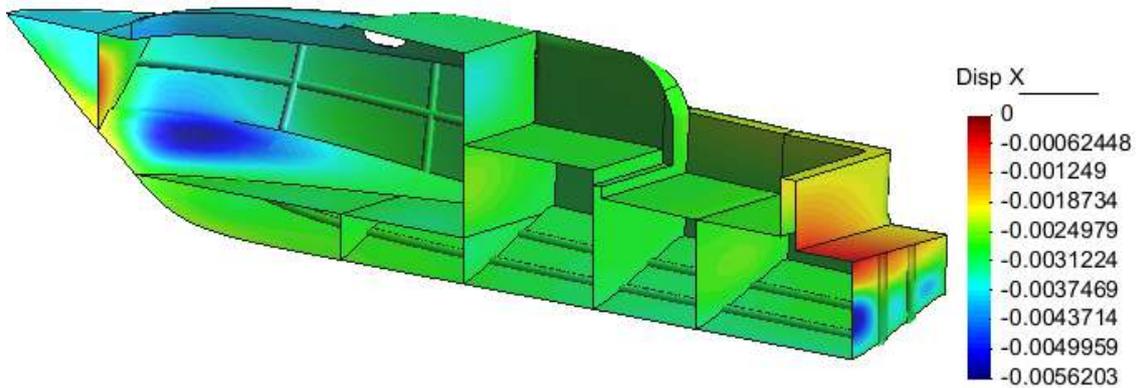
El módulo de postproceso de GID ofrece gran cantidad de resultados, los que se van a presentar en los casos de arrufo y quebranto estudiados son:

- 1.-Desplazamientos en los ejes X, Y y Z.
- 2.- Factor de seguridad de la capa más desfavorable del laminado (SF).
- 3.- Deformada de la estructura.

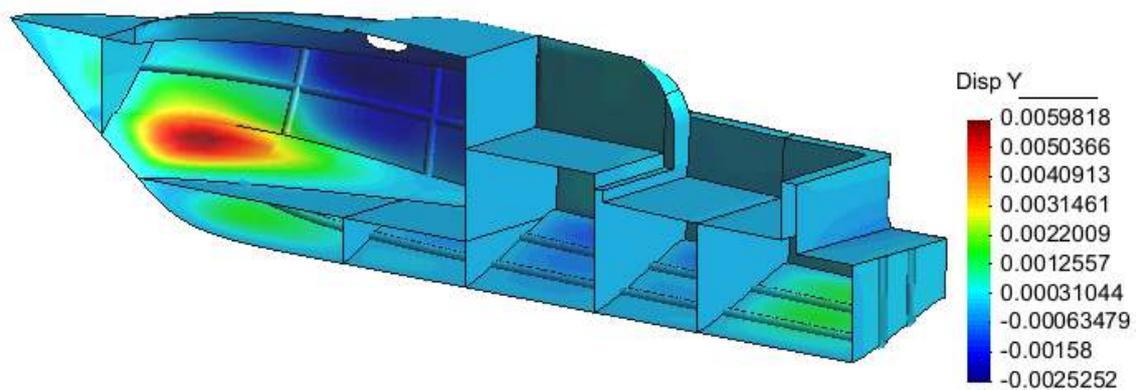
Los resultados se comentarán en el apartado 5.7.

### 5.5.1.-Arrufo

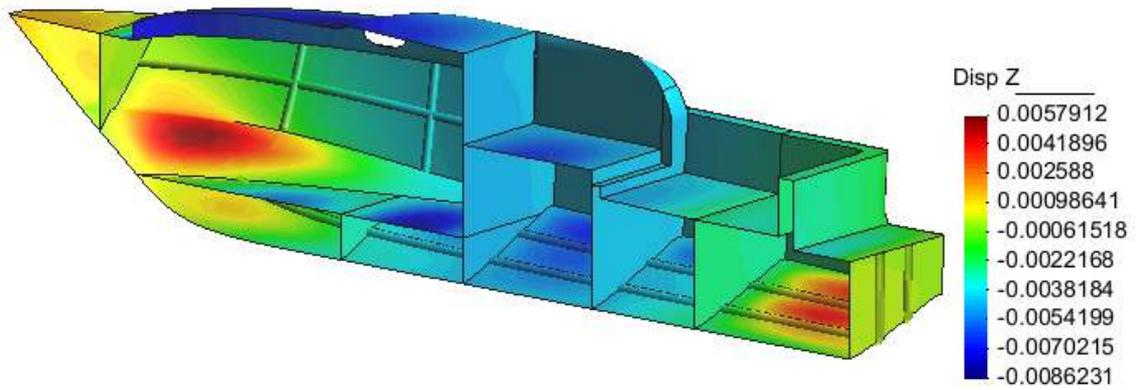
Desplazamientos en eje X



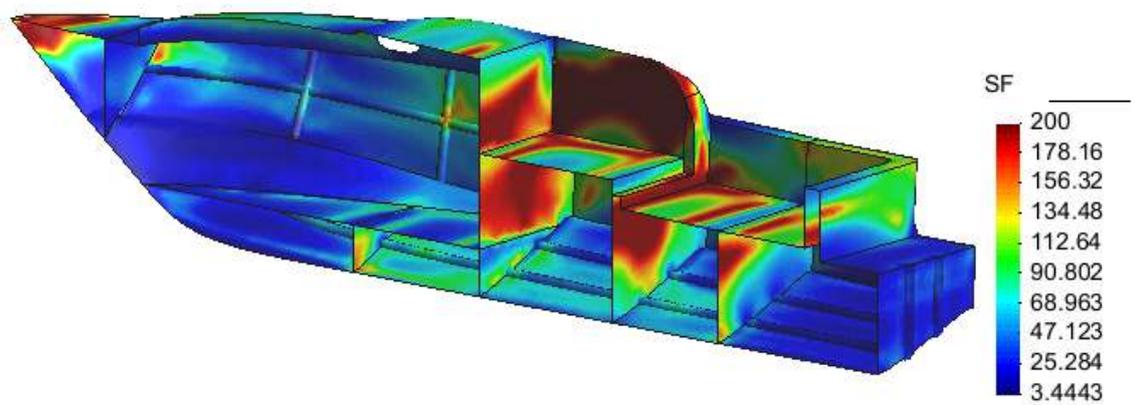
Desplazamientos en eje Y



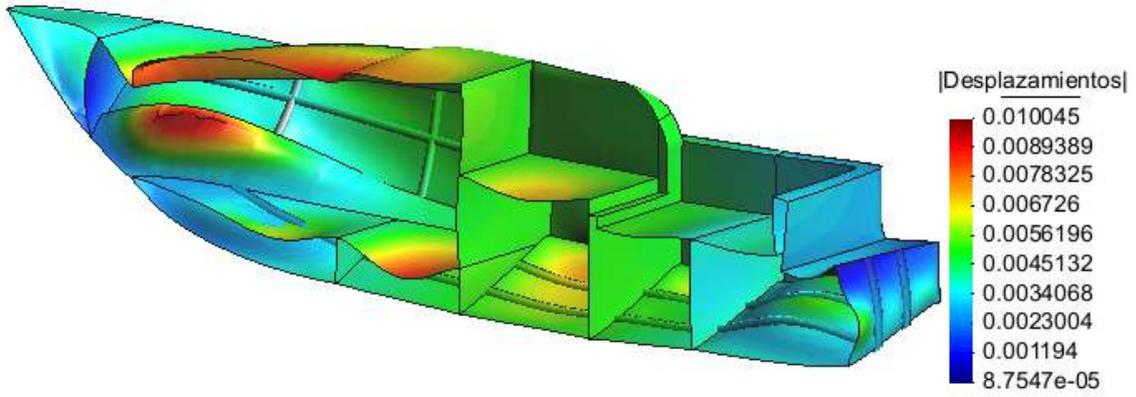
Desplazamientos en eje Z



Factor de seguridad

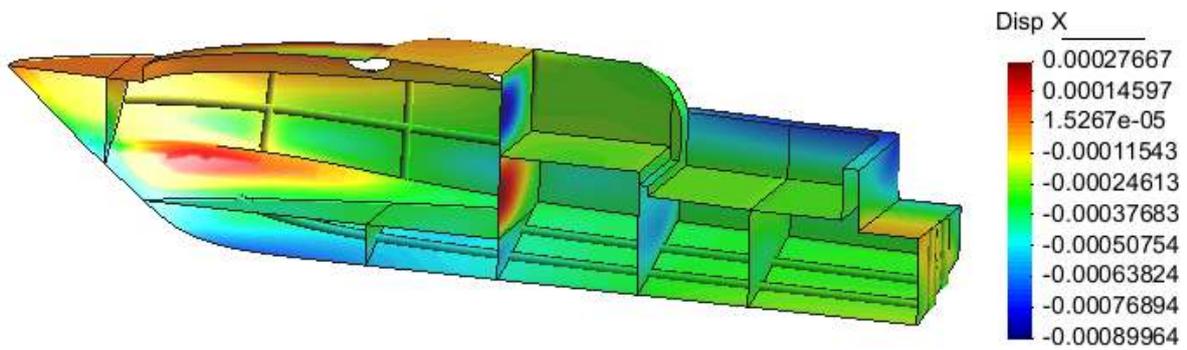


Deformada de la estructura (x60)

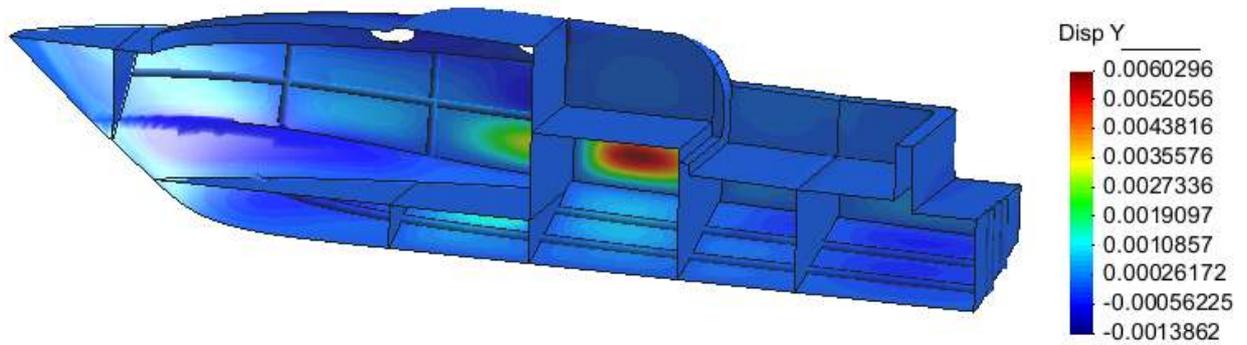


### 5.5.2.-Quebranto

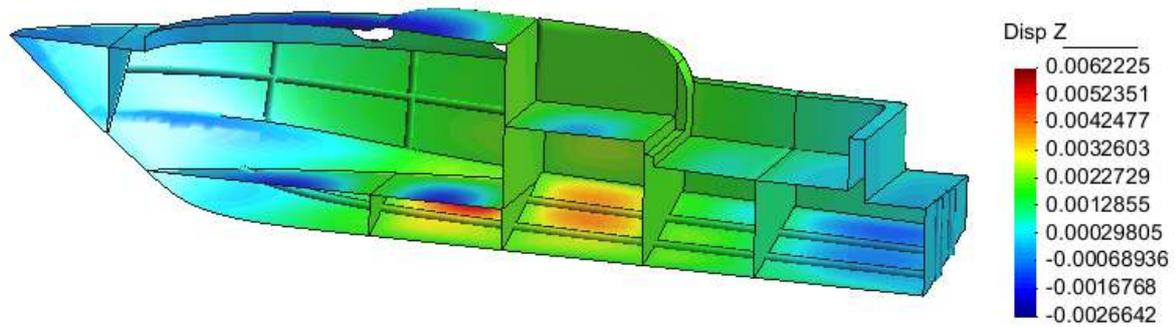
Desplazamientos en eje X



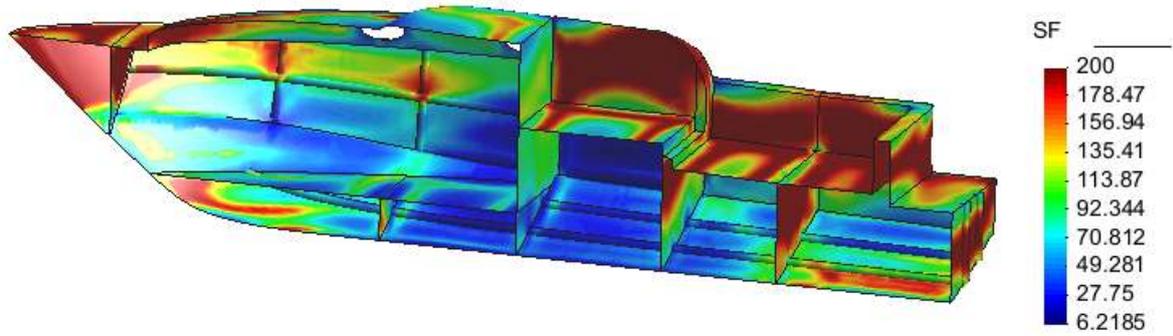
## Desplazamientos en eje Y



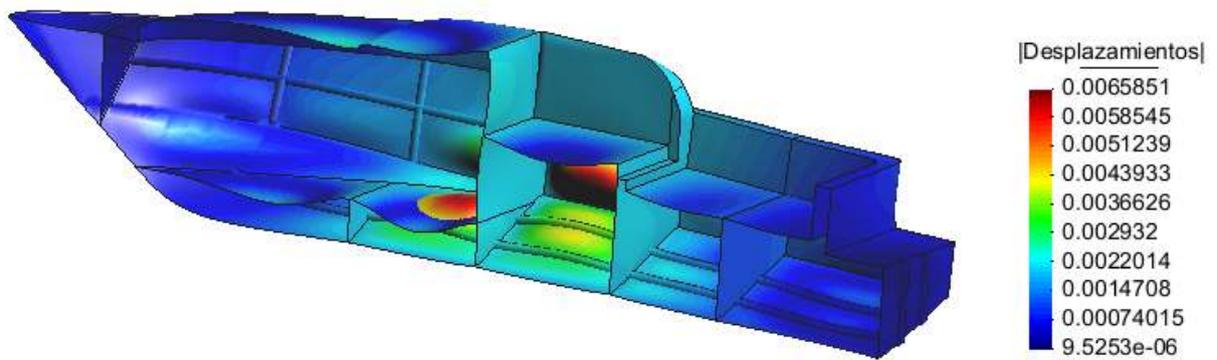
## Desplazamientos en eje Z



Factor de seguridad



Deformada de la estructura (x60)



## 5.6.-Análisis de planchas bajo presiones de diseño

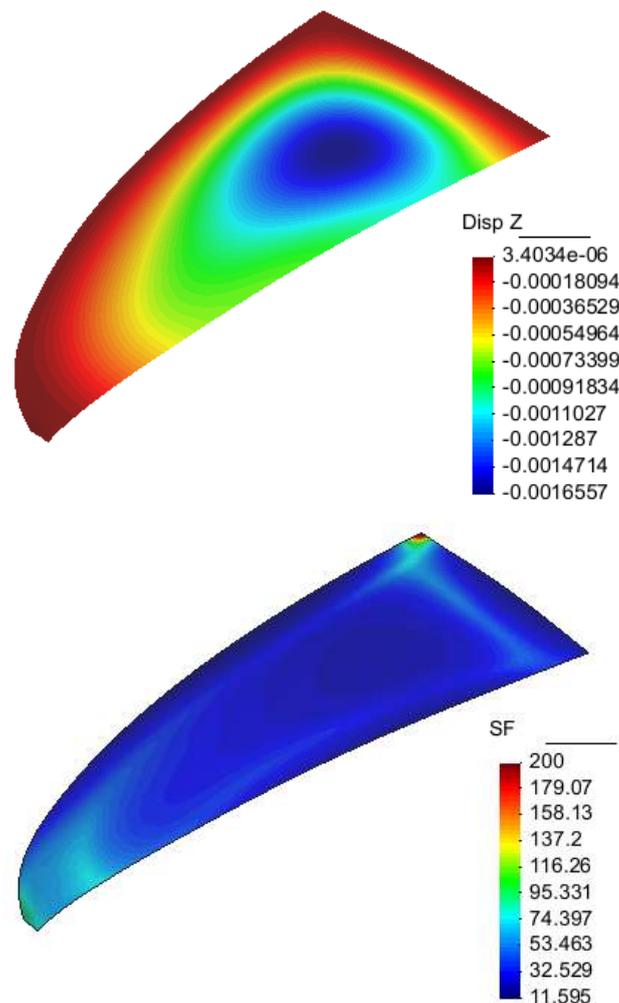
A continuación se darán los resultados de las planchas calculadas en la sección 2.7 para el escantillonado de la estructura. Se darán como resultado los desplazamientos (en metros) en la dirección más desfavorable en cada caso y el factor de seguridad (SF). Las planchas se suponen empotradas en sus aristas.

### 5.6.1.-Plancha de cubierta

En el caso de esta plancha se ha analizado la mitad, aplicando condiciones de contorno adecuadas para que tenga en cuenta la simetría. Es decir, en crujía se restringen los movimientos en el eje "Y" (transversal) y los giros a lo largo de los ejes "Z" y "X" (vertical y longitudinal respectivamente). El resto de aristas son empotradas.

Presión de diseño: 5 kN/m<sup>2</sup>.

Laminado: M600-R800-M600-NÚCLEO DE PVC (15mm)-M600-R800-M600.

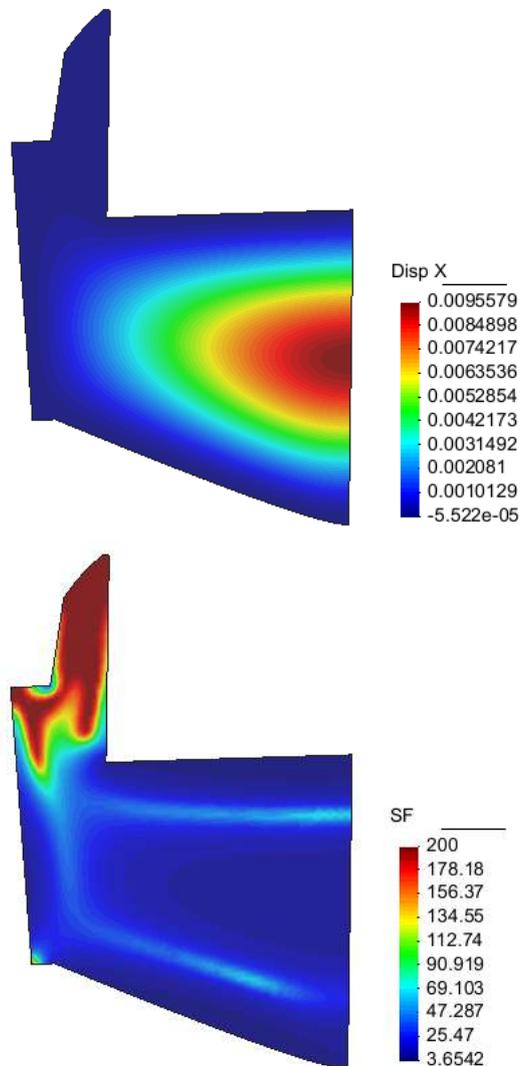


### 5.6.2.-Mamparo

En el caso de este mamparo se ha analizado la mitad, aplicando condiciones de contorno adecuadas para que tenga en cuenta la simetría. Es decir, en crujía se restringen los movimientos en el eje "Y" (transversal) y los giros a lo largo de los ejes "Z" y "X" (vertical y longitudinal respectivamente). El resto de aristas son empotradas.

Presión de diseño: 10,1 kN/m<sup>2</sup>

Laminado: M600-R800-M600-M600-NÚCLEO DE PVC (15mm)-M600-M600-R800-M600.

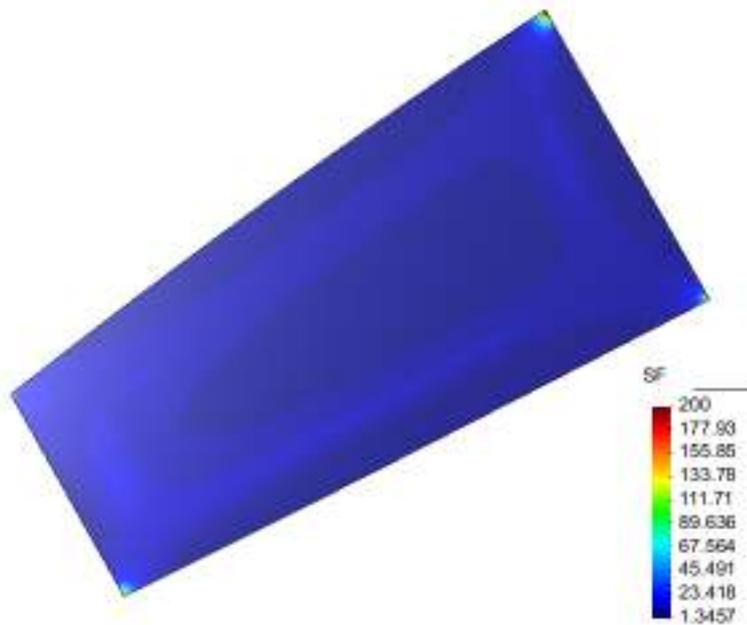
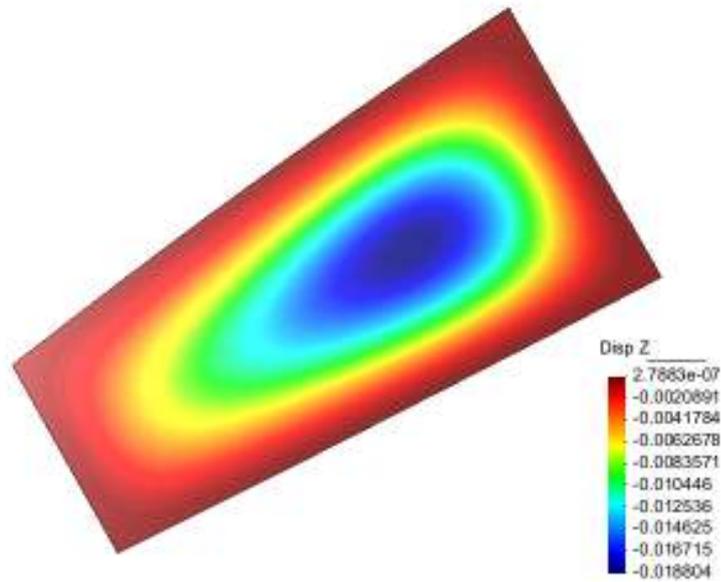


### 5.6.3.-Plancha de fondo en zona de proa.

Presión de diseño: 42,2 kN/m<sup>2</sup>.

Laminado: M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

Las aristas son empotradas.

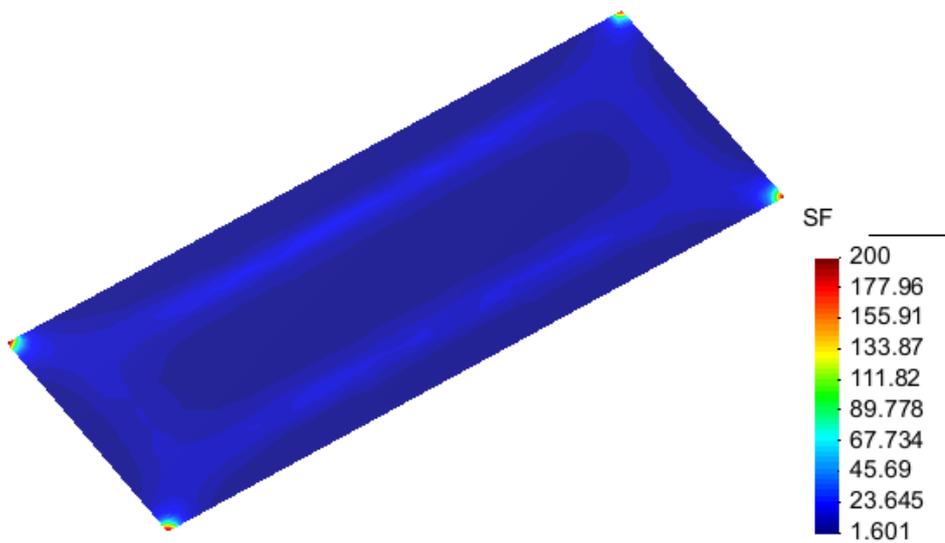
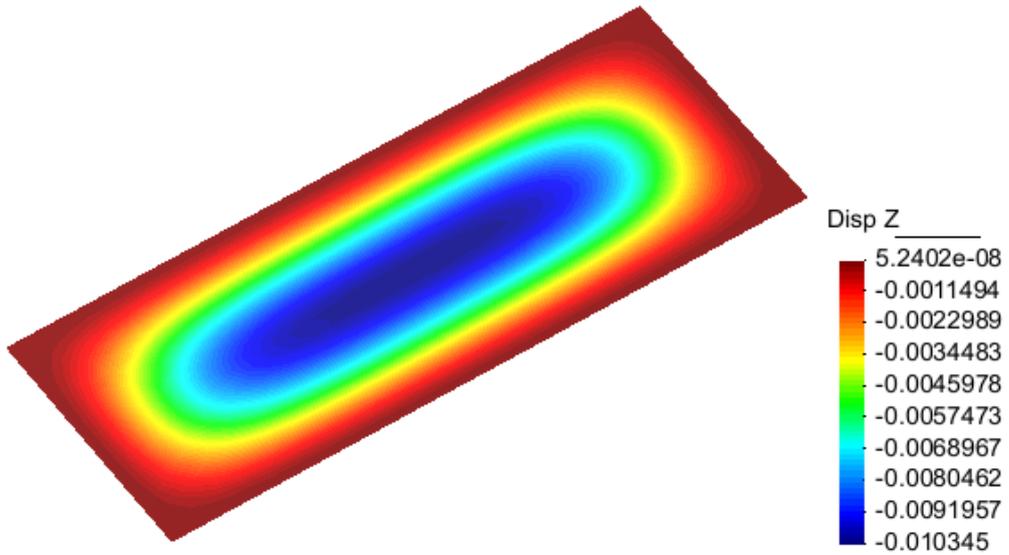


### 5.6.4.-Plancha de fondo en zona de popa

Presión de diseño: 45,9 kN/m<sup>2</sup>.

Laminado: M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

Las aristas son empotradas.

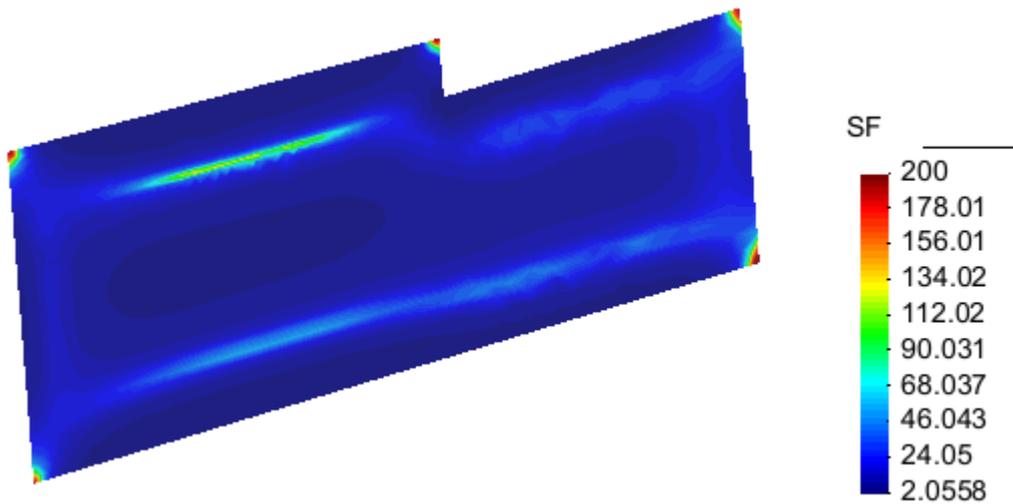
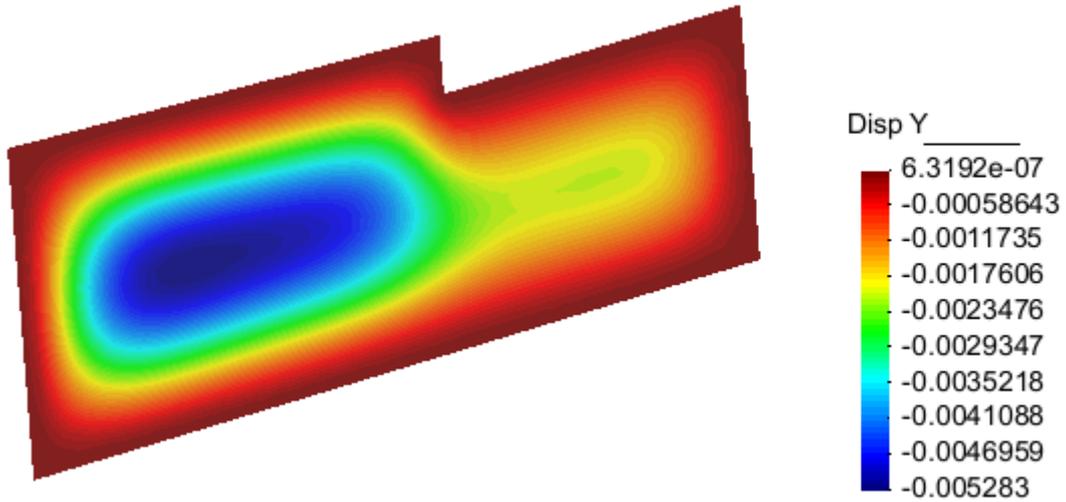


### 5.6.5.-Plancha de costado

Presión de diseño: 29,7 kN/m<sup>2</sup>.

Laminado: M450-M600-R800-M600-R800-M600-R800-M600

Las aristas son empotradas.



## 5.7-Comentarios

A continuación se comentarán los resultados obtenidos tras el análisis por elementos finitos.

En relación al análisis de la embarcación bajo cargas de arrufo y quebranto hay que señalar la coherencia de los resultados obtenidos.

En el caso de arrufo

1. Se puede observar como los desplazamientos en el eje Z son positivos, es decir, hacia arriba, en las zonas de proa y popa. Precisamente en estas zonas es donde actúan las mayores presiones provocadas por la ola. Así mismo se observa un desplazamiento negativo, es decir hacia abajo, en la zona de la sección media de la embarcación. Esto es debido a que en esta zona las cargas superan a la presión ejercida por la ola, ya que la sección media coincide con el seno de la ola. Todo lo comentado en este punto también se puede observar en la deformada de la embarcación
2. El factor de seguridad mínimo es de 3,44. Esto quiere decir que ninguna capa del laminado rompe. En este caso de carga la estructura cumple satisfactoriamente con su objetivo.
3. En la deformada (x60) de la estructura se observa como la embarcación adopta la deformada típica de arrufo.

En el caso de quebranto

- 1, Se puede observar como los desplazamientos en el eje Z son positivos, es decir, hacia arriba, en la zona de la sección media. Precisamente en estas zonas es donde actúan las mayores presiones provocadas por la ola. Así mismo se observa un desplazamiento negativo, es decir hacia abajo, en las zonas de proa y popa de la embarcación. Esto es debido a que en estas zonas las cargas superan las presiones ejercidas por la ola, ya que las zonas de proa y popa coinciden con los senos de la ola.

Todo lo comentado en este punto también se puede observar en la deformada de la embarcación.

2. Se observa un desplazamiento importante en el eje Y en el costado de la cámara de máquinas. Esta zona se corresponde con la cresta de la ola, donde las presiones son mayores.

2. El factor de seguridad mínimo es de 6,2. Esto quiere decir que ninguna capa del laminado rompe. En este caso de carga la estructura cumple satisfactoriamente con su objetivo.

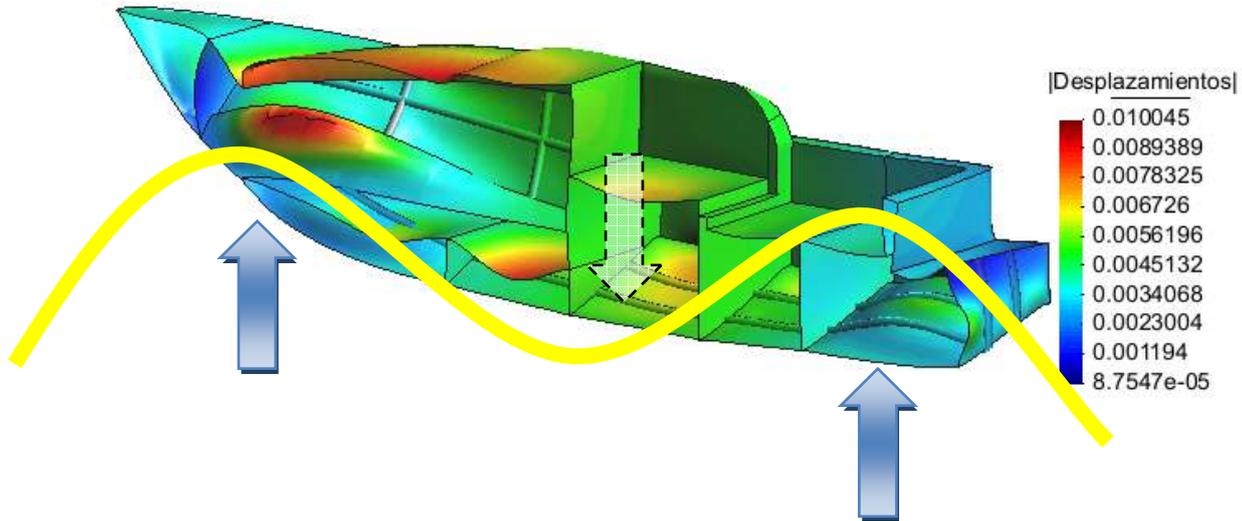
3. En la deformada (x60) de la estructura se observa como la embarcación adopta la deformada típica de quebranto.

Se puede afirmar que para esta embarcación la condición de arrufo es más desfavorable que la de quebranto, ya que el factor de seguridad en arrufo es casi la mitad que en quebranto. Además se puede observar comparando las deformadas y fijándose en los valores de desplazamientos máximos que en la condición de arrufo las deformaciones son apreciablemente mayores que en quebranto.

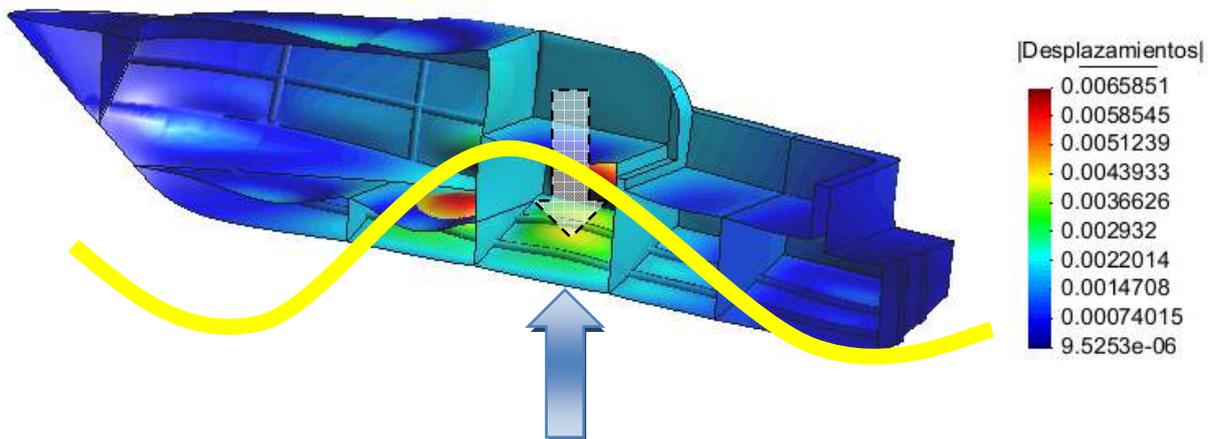
La explicación se puede encontrar en que la disposición de la cámara de máquinas y de los diferentes tanques de combustible y agua dulce hace que haya una gran concentración de pesos en la zona cercana a la sección media. Esto hace que en el caso de quebranto las presiones externas (debidas a la carga de ola) e internas (debidas a los pesos de la embarcación) estén bastante equilibradas a lo largo de la eslora. Sin embargo, en el caso de arrufo las presiones externas e internas están bastante desequilibradas a lo largo de la eslora debido a que las mayores presiones internas están cercanas a la sección media, mientras que las mayores presiones externas están en los extremos de proa y popa.

Esto se representa en las siguientes imágenes de manera meramente esquemática:

### Arrufo



### Quebranto



En relación al análisis de las planchas bajo las presiones de la norma, lo único a destacar es que todas las planchas tienen un factor de seguridad positivo, lo que indica que el escantillado mediante la norma es satisfactorio.

## 6.-Conclusiones

Tras haber realizado el escantillado usando la norma UNE-EN ISO 12215 y el posterior análisis por elementos finitos se ha llegado a una serie de conclusiones:

1.- La norma UNE-EN ISO 12215 es una herramienta eficaz a la hora de determinar el escantillado de las embarcaciones dentro de su rango de aplicación.

2.-Se recomienda el uso de la norma EN ISO 12215-5:2008 hasta que la norma española no esté revisada, ya que se han encontrado errores que se han subsanado acudiendo a la norma mencionada. Así mismo la traducción de ciertos términos no resulta a mi juicio muy acertada.

3.- Un análisis por elementos finitos de la estructura nos ayuda entender el comportamiento de esta bajo cargas reales y mejorar el diseño de la estructura, ya que nos permite conocer cuáles son realmente las zonas sometidas a mayores esfuerzos.

4.- Un análisis por elementos finitos es un buen complemento a la hora de diseñar estructuras de embarcaciones. Conociendo las presiones de diseño se pueden analizar planchas o refuerzos y ver cuáles son sus deformaciones máximas y sus factores de seguridad, permitiendo al proyectista actuar en consecuencia.

5.- Para la embarcación analizada bajo las cargas externas de arrufo y quebranto se observa que la situación se arrufo es bastante más desfavorable que la de quebranto.

6.-Un análisis por elementos finitos puede ayudar al proyectista en la distribución de pesos de la embarcación, para mejorar el comportamiento de la estructura bajo diferentes cargas externas.

## 7.-Bibliografía

Apuntes:

Martinez García, Jose Alfonso. Asignatura: Sistemas de construcción de buques y artefactos. UPCT.

Normas UNE-EN ISO: 12215-5, 12215-6, 8666.

Pablo Antequera. Lorenzo Jiménez. Antonio Miravete. Cálculo y diseño de estructuras en materiales compuestos de fibra de vidrio. 1ª edición.1993.

Pascual Martí Montrull. *Análisis de estructuras. Métodos clásicos y matriciales*. 1ª edición. 2003.

Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L. *El método de los elementos finitos*. 5ª edición. Vol 1 Las bases. 2004.