



8- CÁLCULO ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)

8.1- Peculiaridades para el modelado

8.1.1-General

8.1.2-Propiedades de lámina

8.1.3-Referente a las cargas

8.1.4-Condiciones de contorno

8.1.5- Postproceso

8.2- Análisis estructural del MY110

8.2.1- Modelado

8.2.2- Unidades

8.2.3- Propiedades de los materiales

8.2.4- Prescripciones de desplazamiento

8.2.5- Cargas

8.2.6- Mallado

8.2.7- Coeficientes de seguridad

8.2.8- Análisis de resultados

8.2.9- Visualización de resultados

8.2.10- Comparación FEM-sociedades de clasificación

8.2.11- Fly-britge



8- CÁLCULO ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)

8.1- Peculiaridades para el modelado

Este apartado se ha realizado con el objetivo de dejar constancia de todos los consejos que el Sr. Julio García Espinosa, al cual quiero agradecer muchísimo la amabilidad y ayuda prestada para la realización de esta parte del proyecto, así como para plasmar los problemas que nos hemos encontrado a lo largo de todo el proceso de cálculo, en definitiva que sirva en ocasiones futuras como guía tanto para nosotros como para las personas interesadas en el tema.

8.1.1-General

No se deben modelar sólidos, todo deben ser superficies y a estas se le dan las propiedades físicas (laminado)

No se deben representar elementos de detalle (solo geometría principal)

Las propiedades de los laminados se calculan mediante el módulo *laminated shell*, incorporado en el propio programa. Introduciendo la secuencia de laminación, junto con las propiedades de fibra, resina y porcentaje en huecos se obtienen todas las propiedades de los composites.

Los refuerzos se representan como líneas y a estas líneas le daremos, mediante el módulo *Naval stiffener* las propiedades físicas (definiendo las dimensiones y la secuencia de laminación)

Todos los elementos deben estar perfectamente unidos y trimados para que el programa entienda que físicamente los elementos están unidos (cada panel debe ser una superficie independiente del resto y a la línea divisora entre las placas le damos las propiedades físicas del refuerzo tal y como hemos comentado anteriormente)

8.1.2-Propiedades de lámina

Para simplificar el problema con la asignación de las propiedades a las superficies y para agilizar la visualización de las propiedades, hemos organizado el modelo en capas, (Casco, cubierta y mamparos, refuerzos etc).



8.1.3-Referente a las cargas

Se pueden definir diferentes casos de carga “*Load case*”, los más habituales son el de arrufo y el de quebranto (generalmente las sociedades de clasificación se conforman con estos dos casos), en las embarcaciones de alta velocidad se exige un tercer caso de carga que sería el de slamming en proa.

Para la definición del arrufo y quebranto: *Data>Loads>wave loads*, aparece una ventana en la cual introducimos la amplitud de ola (según zona de navegación) y hay que introducir también los puntos en proa y popa que representan la línea de flotación *ship-wave-reference*

El programa en su última versión nos ofrece también la posibilidad de hacer un balance (equilibrado) de fuerzas entre el desplazamiento y los pesos *Data>advanced>advanced problem data> Naval settings* y en la ventana que aparece seleccionamos la opción “Ship balance”. Cabe resaltar que este balance no nos va a librar de imponer condiciones de sólido rígido a la embarcación.

Existe la posibilidad de hacer combinaciones de cargas (por ejemplo combinar una carga dinámica con una estática), *Data>Loads>load case> use combined loadcases* y en la ventana que aparece introducimos el factor de amplificación de cada carga que queramos analizar.

8.1.4-Condiciones de contorno

Como modelamos medio barco, en la línea de crujía restringiremos 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 impondremos un empotramiento en popa y un apoyo en proa.



8.1.5- Postproceso

Es bastante habitual que se produzcan concentraciones locales de esfuerzos cerca de los puntos de prescripciones (apoyos) o cerca de las fuerzas nodales (fuerzas puntuales). En estos casos, la escala de color no tiene suficiente contraste, es posible cambiar los límites de los valores de contour fill para que la escala de color sea más adecuada.

Las zonas de la lámina que tienen valores más altos que el límite máximo ó menores que el mínimo, aparecerán en negro o el color que defina el usuario.

Para definir el límite máximo y mínimo, seleccione:

Options > Contours > Define limits

Para ver el valor numérico de los resultados que se han visualizado, seleccione:

Label > All in > Results

Unidades: por defecto el sistema de unidades para Rambshell® y ramsolid® es el Sistema Internacional (SI)

Fuerzas en Newton [N]

Longitudes en metros [m]

La unidad derivada es Pascal [Pa], donde $\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$

Estas unidades deben cambiarse en varias partes del programa. Cada ventana que pregunta por los datos de las prescripciones, cargas o propiedades tiene un campo para seleccionar las unidades para esta ventana. Las unidades seleccionadas sólo son aplicables en los datos adjuntos en la misma ventana.

Las unidades en las que están expresadas las coordenadas del modelo geométrico se seleccionan en la ventana de Problema:

Data > Problem data-> Units > Mesh units

Las unidades en las que están expresados los resultados del análisis se pueden seleccionar en:

Data > Problem data > Units > Results units

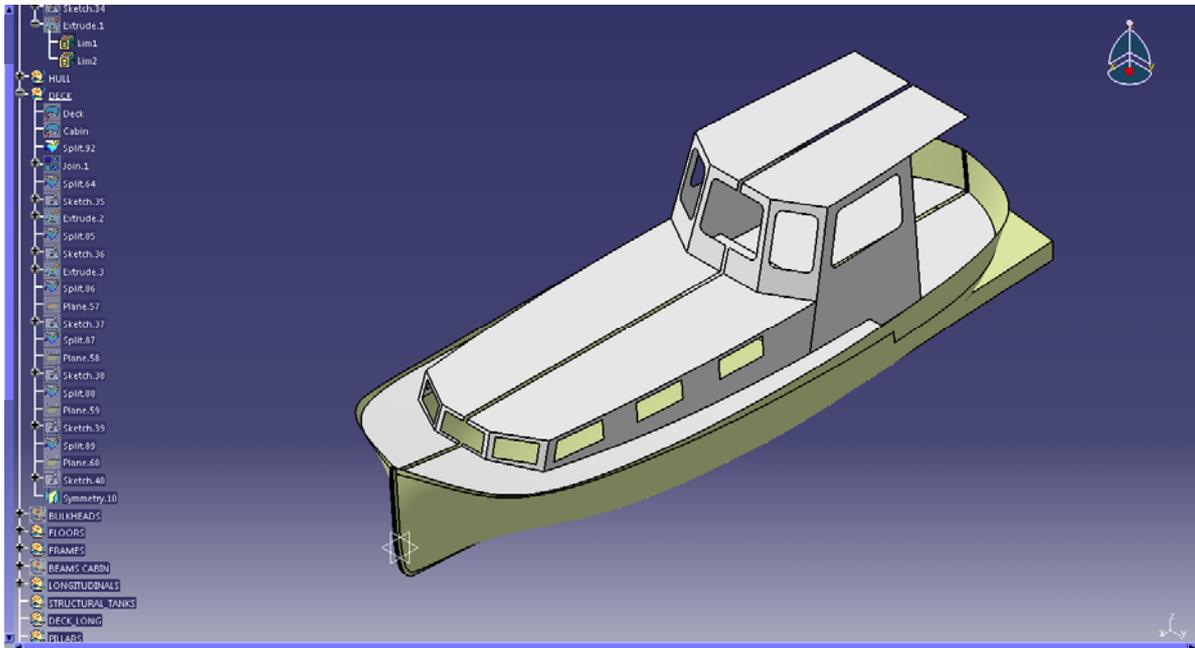


8.2- Análisis estructural del MY110

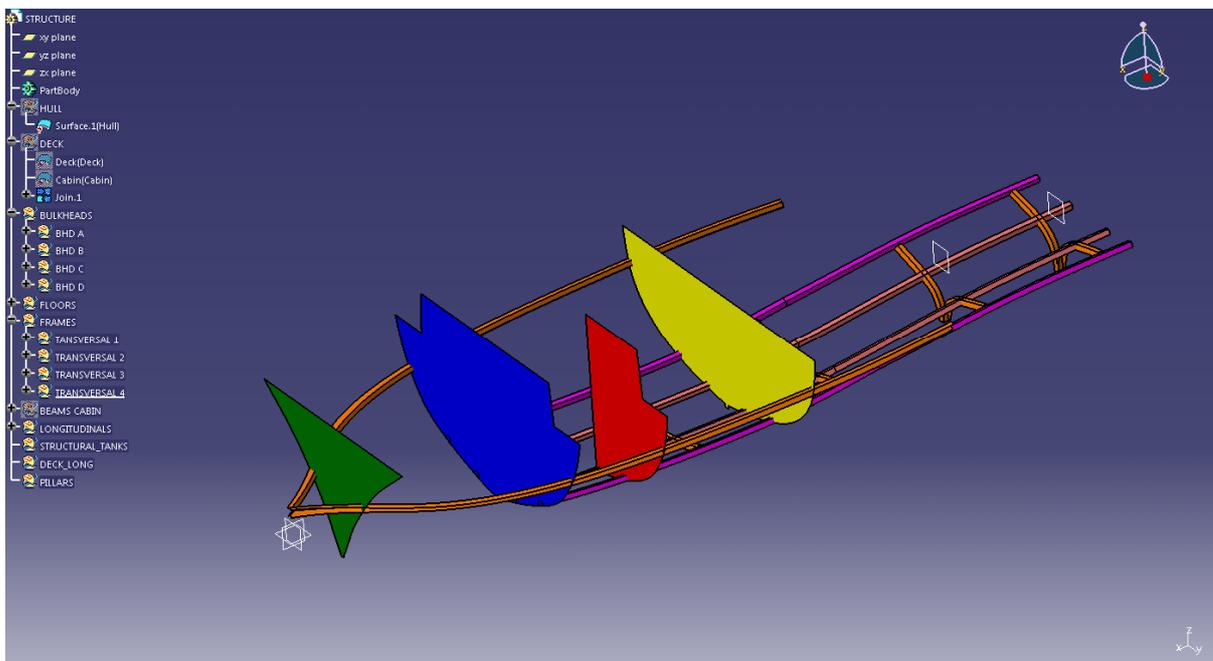
8.2.1- Modelado

El modelo de CATIA que nos ha servido como base para el cálculo es el siguiente

Casco y cubierta

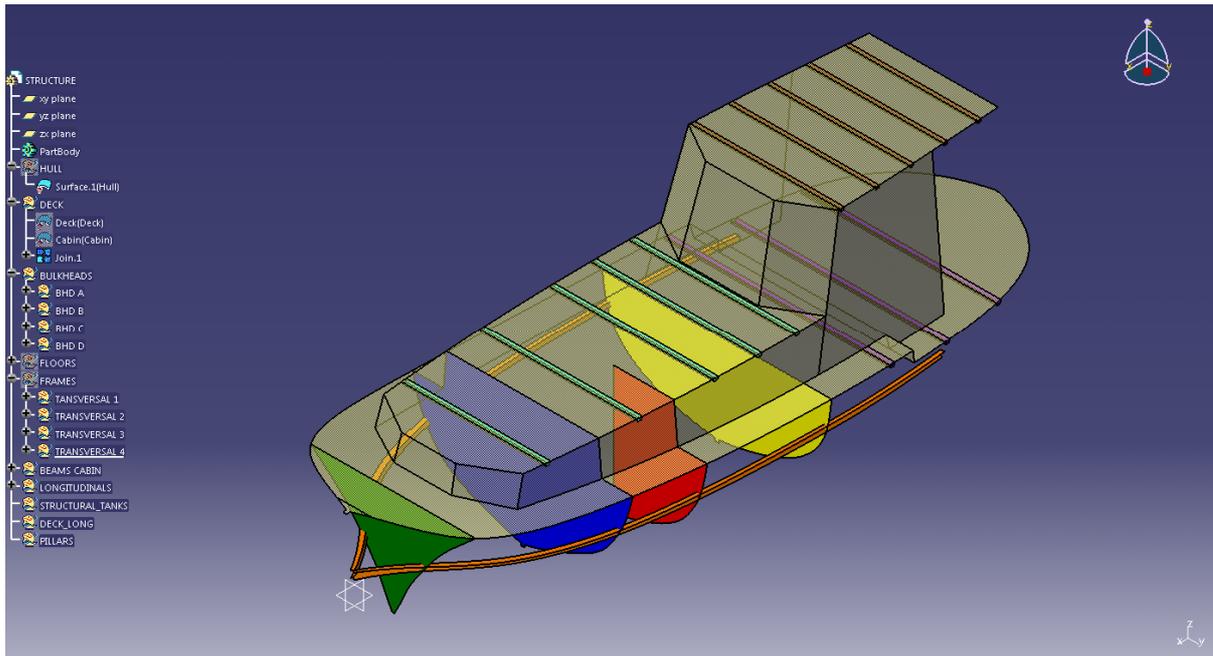


Refuerzos del casco



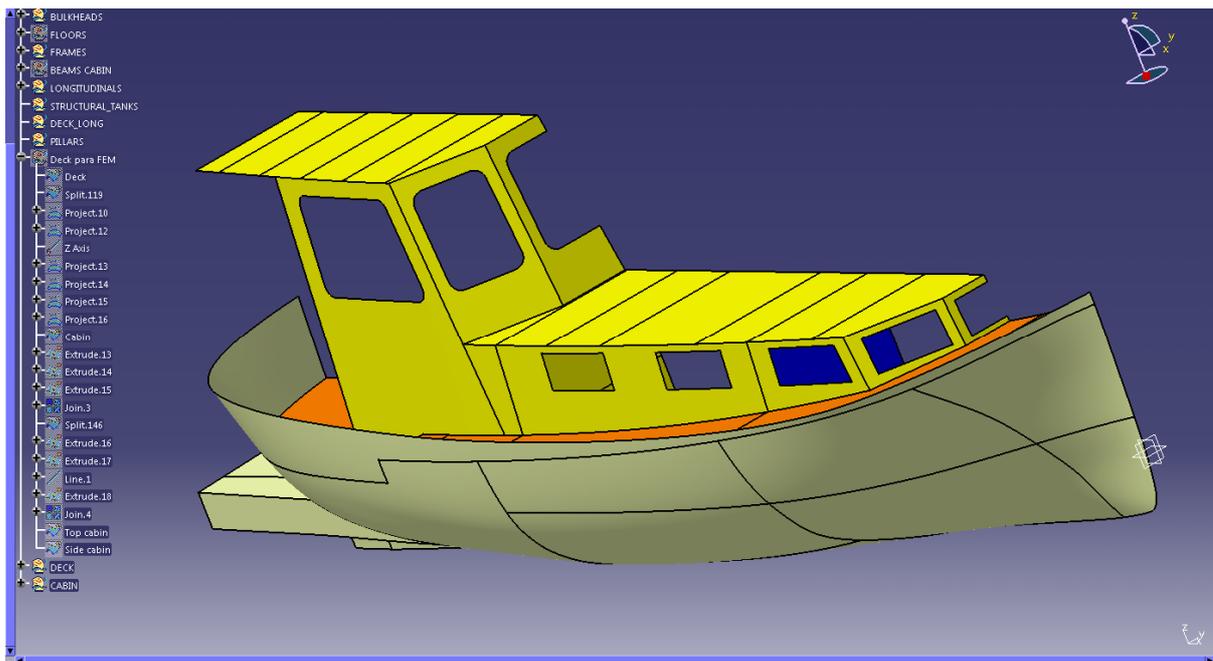


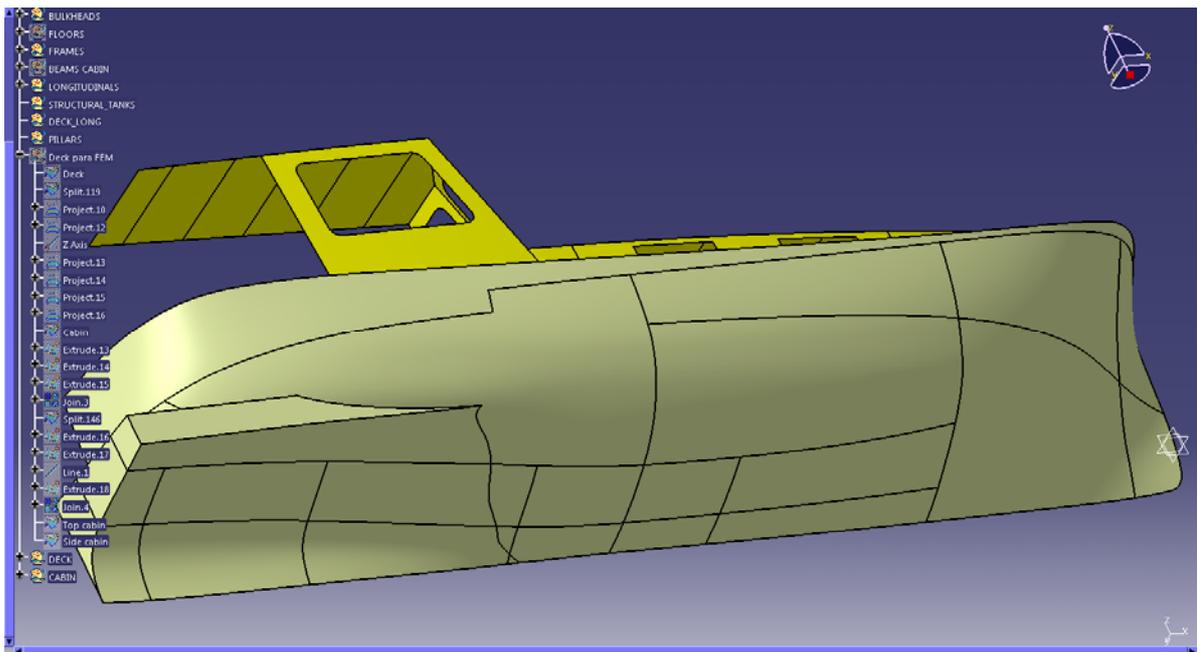
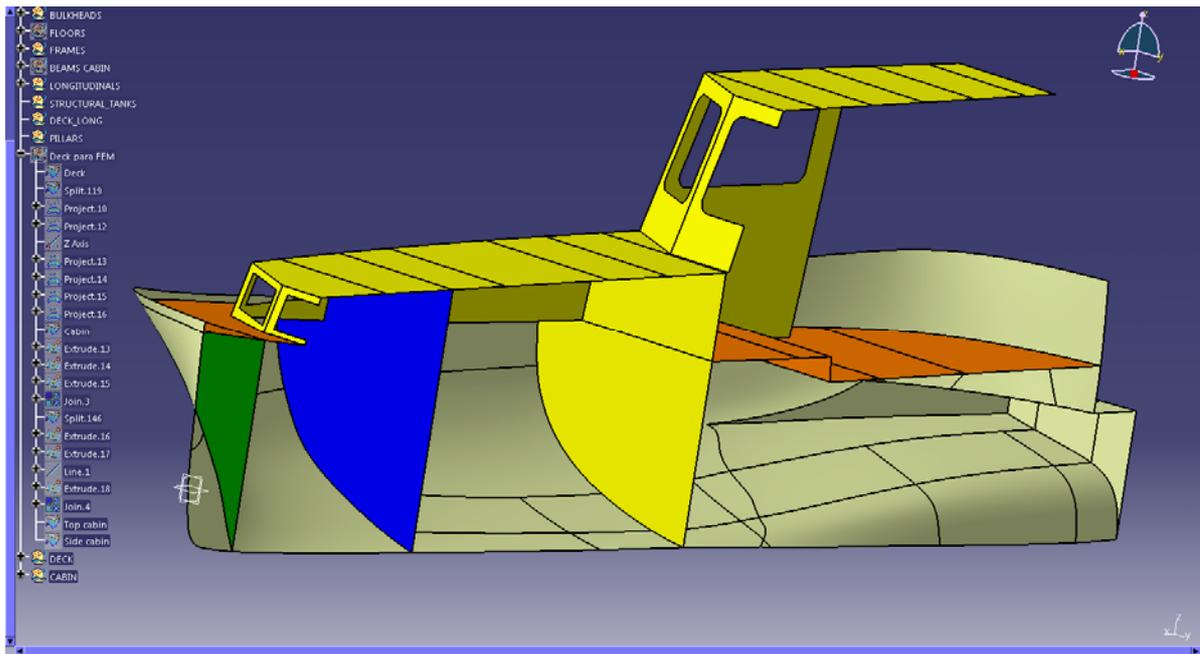
Refuerzos de cubierta



Este modelo se ha simplificado para reducir al máximo el tiempo de cálculo del programa, es decir, se han eliminado todos los detalles que no constituyan parte estructural del casco o cubierta, los refuerzos se han transformado en líneas a las cuales les daremos propiedades físicas y finalmente le hemos eliminado un costado para aprovechar la simetría.

El modelo que hemos exportado de CATIA en formato .igs para efectuar los cálculos es el siguiente







8.2.2- Unidades

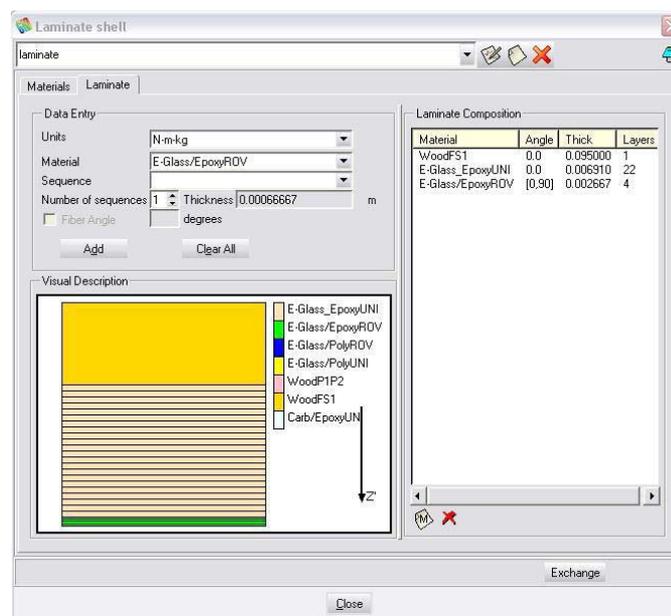
Antes de empezar los cálculos vamos a establecer las unidades con las que vamos a trabajar

[N-m-Kg]

8.2.3- Propiedades de los materiales

El siguiente paso para el cálculo es el de asignar las propiedades, tenemos dos tipos de propiedades, por un lado hay que asignar propiedades tipo lámina y por otro lado las propiedades tipo línea (refuerzos)

Como punto de partida para el cálculo, le daremos a cada chapa las propiedades exigidas por la sociedad de clasificación, (5.2.3- *Secuencias de laminación*) y al final de este apartado haremos una comparativa para comprobar si realmente hemos conseguido reducir escantillón o no.



Lo mismo vamos a hacer con los refuerzos y los mamparos, es decir, como punto de partida tomaremos los resultados obtenidos con la aplicación de las fórmulas empíricas de la sociedad de clasificación y al final del apartado realizaremos una comparativa.

Para homogeneizar el resultado, tomaremos las mismas propiedades de los materiales utilizados en el cálculo de RINA

· Porcentaje de fibra en peso

Mat 0.3

Tejido 0.55



· Porcentaje de huecos

10%

· Densidad de los materiales

Fibra $2.56 \text{ g/cm}^3 = 2560 \text{ Kg/m}^3$

Resina $1.2 \text{ g/cm}^3 = 1200 \text{ Kg/m}^3$

· Propiedades mecánicas

Módulo de Young resina = $3000 \text{ N/mm}^2 = 3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Módulo de Young fibra = $73000 \text{ N/mm}^2 = 73 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Coefficiente Poisson resina = 0.3

Coefficiente Poisson fibra = 0.25

Módulo a cortante fibra = $1731 \text{ N/mm}^2 = 1.731 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Módulo a cortante resina = $1530 \text{ N/mm}^2 = 1.153 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Laminación inicial del casco:

Nº Capa	Tipo	Ángulo dirección fibras	Peso gr/m ²	Densidad fibra	Porcentaje de fibra en Peso	Porcentaje huecos	Espesor e (mm)
1	MAT 300	0	300	2,56	0,30	0,10	0,778
2	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
3	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
4	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
5	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
6	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
7	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
8	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
9	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
10	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
11	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
12	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
13	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
14	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
15	MAT 450	1	450	2,56	0,30	0,10	1,168
16	WR 800	2	800	2,56	0,55	0,10	0,953
17	MAT 450	3	450	2,56	0,30	0,10	1,168
18	WR 800	4	800	2,56	0,55	0,10	0,953
19	MAT 450	5	450	2,56	0,30	0,10	1,168

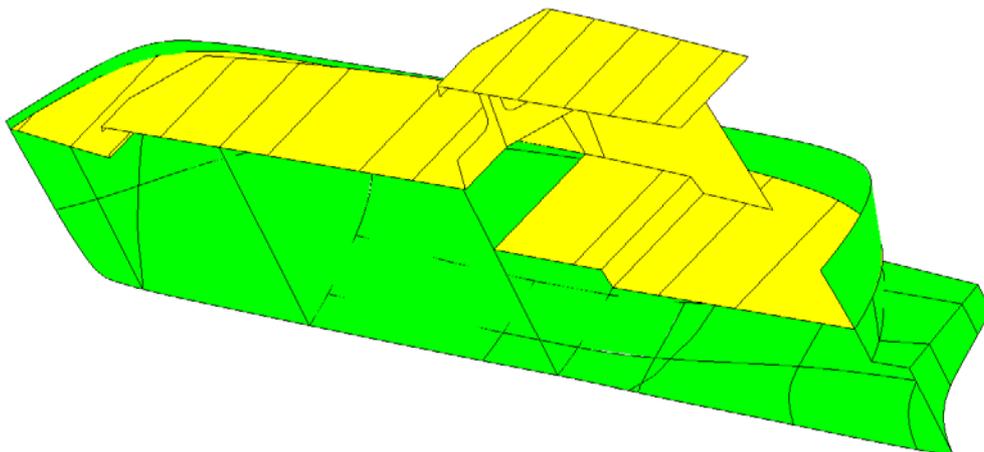
Espesor lam.=	20,72	mm	197355	2156287
Distancia eje neutro a borde laminado =			10,93	mm
Distancia eje neutro al otro borde laminado =			9,80	mm
Modulo young del laminado	E =		9524	N/mm2
Rigidez del laminado	E*I =		6716467	N*mm ² /mm
Inercia del laminado	I =		705,24	mm ⁴
Peso el laminado =			27,77	Kg/m ²
Porcentaje en fibra del laminado =			0,365	



Laminación inicial cubierta:

Nº Capa	Tipo	Ángulo dirección fibras	Peso gr/m ²	Densidad fibra	Porcentaje de fibra en Peso	Porcentaje huecos	Espesor e (mm)
1	MAT 300	0	300	2,56	0,30	0,10	0,778
2	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
3	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
4	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
5	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
6	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
7	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
8	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168

Espesor lam.=	8,52 mm	80724	368409
Distancia eje neutro a borde laminado =		4,56 mm	
Distancia eje neutro al otro borde laminado =		3,96 mm	
Modulo young del laminado	E =	9472 N/mm ²	
Rigidez del laminado	E*I =	443118 N*mm ² /mm	
Inercia del laminado	I =	46,78 mm ⁴	
Peso el laminado =		11,41 Kg/m ²	
Porcentaje en fibra del laminado =		0,364	



■ -Automatic- Casco
■ -Automatic- Cubierta



Mamparos

El material utilizado en el astillero para los mamparos es el contrachapado marino, que tiene las siguientes propiedades mecánicas

$$\rho = 50 \text{ Kg/m}^3$$

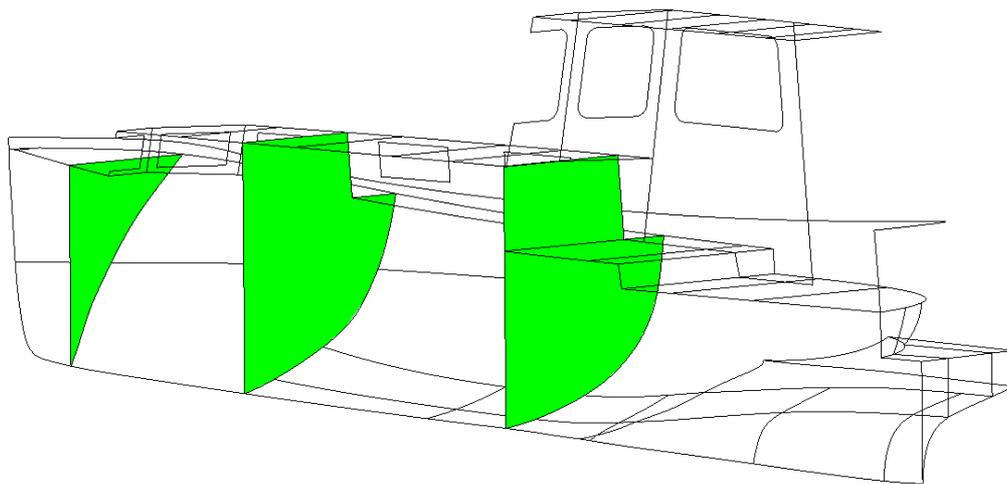
$$E = 9.3 \text{ GPa} = 93000 \text{ N/mm}^2 = 9.3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$t = 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{compresion}} = 31 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{tracción}} = 31 \text{ MPa}$$

$$\tau = 6.2 \text{ Mpa}$$



■ -Default- N-mm-kg
20 Linear Elastic
J2 Plasticity

Refuerzos:

Para que al mallar el programa tenga en cuenta estos refuerzos hay que definirlo en el criterio de mallado

Mesh->Mesh Criteria->Mesh->Line. Tiene que hacerse SÓLO con las líneas que tienen rigidizadores

Quilla

	longitud [cm]	espesor [cm]
chapa	37	2,10
alma	18,00	4,20
ala	14,00	2,10



Fijación refuerzos al fondo con dos capas de Mat 450 g/m²

Material del núcleo del refuerzo es madera de pino con un módulo a cortante de
 $G = 1.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

*Nota: Como estamos modelando medio barco, la dimensión transversal de la quilla la dividiremos por dos, es decir que la base tendrá una anchura de 18'5 cm y el ala una anchura de 7 cm, mientras que la dimensión vertical la mantendremos, es decir la altura del ala seguirá siendo 18 cm

Longitudinal interior y exterior

	longitud [cm]	espesor [cm]
chapa	35,00	1,50
alma	8,00	0,40
ala	8,00	0,40

Fijación refuerzos al fondo con dos capas de Mat 450 g/m²

Material del núcleo del refuerzo es madera de pino con un módulo a cortante de
 $G = 1.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Longitudinal de costado

	longitud [cm]	espesor [cm]
chapa	25,80	1,10
alma	6,00	0,40
ala	6,00	0,40

Fijación refuerzos al fondo con dos capas de Mat 450 g/m²

Material del núcleo del refuerzo es madera de pino con un módulo a cortante de
 $G = 1.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$



Transversales casco (transversal 1, 2, 3, 4)

	longitud [cm]	espesor [cm]
chapa	33,00	1,50
alma	6,00	0,40
ala	6,00	0,40

Fijación refuerzos al fondo con dos capas de Mat 450 g/m²

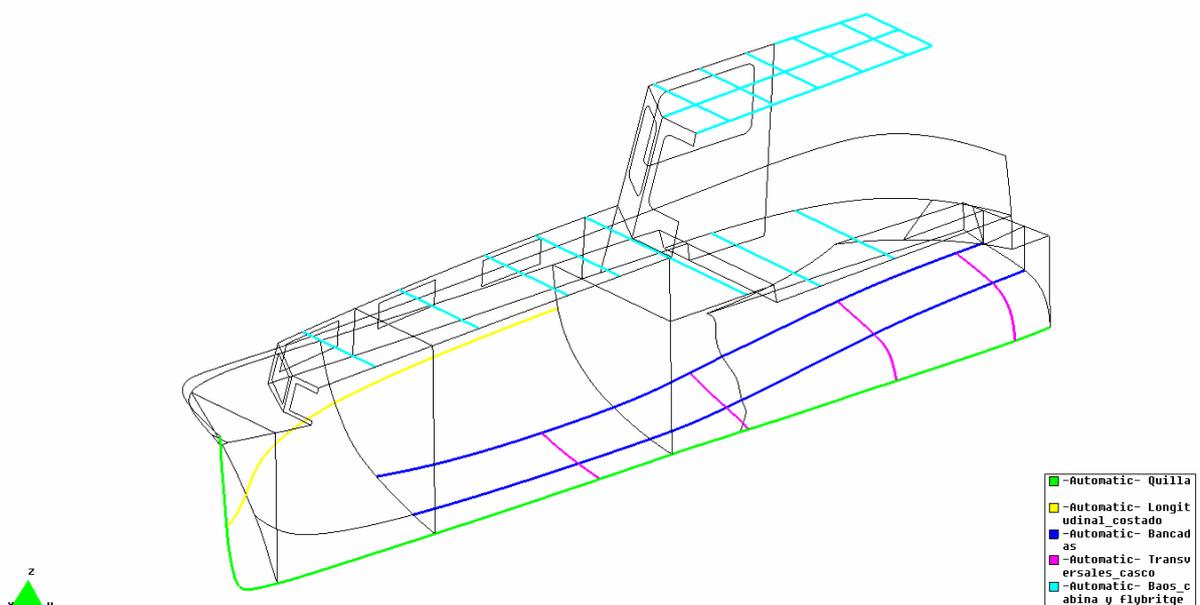
Material del núcleo del refuerzo es madera de pino con un módulo a cortante de
 $G = 1.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Baos de cabina y Fly-bridge

	longitud [cm]	espesor [cm]
chapa	20,40	0,80
alma	4,00	0,40
ala	6,00	0,40

Fijación refuerzos al fondo con dos capas de Mat 450 g/m²

Material del núcleo del refuerzo es madera de pino con un módulo a cortante de
 $G = 1.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

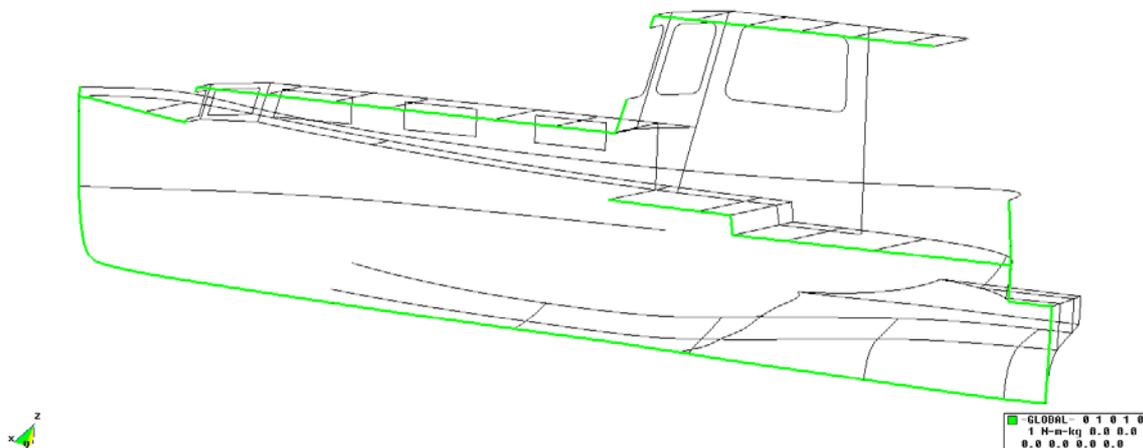




8.2.4- Prescripciones de desplazamiento

Como modelamos medio barco, en la línea de crujía restringiremos 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 impondremos un empotramiento en popa y un apoyo en proa.



8.2.5- Cargas

Los cálculos se harán con cargas estáticas y según la teoría de la linealidad geométrica de la contribución de las fuerzas

Del cálculo de pesos obtenemos las cargas, que vamos a distribuir de la siguiente manera (dividimos los pesos por dos porque estamos modelando medio barco)

- Carga repartida en cámara de máquinas $2000 / 2 = 1100 \text{ Kg}$
Área de los paneles de cámara de máquinas = $6,47 \text{ m}^2$
Le aplicamos una presión tipo *Global shell load* = $1100 * 9.81 / 6,47 = 1700 \text{ N/m}^2$
- Carga repartida sobre cubierta y cabina = $2000 / 2 = 1000 \text{ Kg}$
Área de cabina y cubierta = $16,5 \text{ m}^2$
Le aplicamos una presión tipo *Global shell load* = $1000 * 9.81 / 16.5 = 600 \text{ N/m}^2$



- Interiores como carga repartida = $180 / 2 = 2000 \text{ Kg}$
Área de los paneles de interior = 10.44 m^2
Le aplicamos una presión tipo *Global shell load* = $2000 * 9.81 / 10.44 = \mathbf{1850 \text{ N/m}^2}$

- Carga repartida sobre plataforma de baño = $440 / 2 = 220 \text{ Kg}$
Área de cabina y cubierta = $1,1 \text{ m}^2$
Le aplicamos una presión tipo *Global shell load* = $220 * 9.81 / 1,1 = \mathbf{2000 \text{ N/m}^2}$

- Peso propio de la estructura (al introducir las propiedades del laminado, una de las variables que introducimos es la densidad del material, así que el propio programa calcula el peso de la estructura)
 - Peso propio de las chapas
 - Peso propio de los refuerzos

- Lastre fijo en la quilla = $500 / 2 = 250 \text{ Kg}$
Longitud de la quilla = 10.44 m
Aplicamos fuerza repartida tipo *Global beam load* = $250 * 9.81 / 10.44 = 234 \text{ N/m}$

· Cargas hidrostáticas

La última edición de Ram series tiene un módulo que nos permite representar la presión hidrostática, simulando una ola real.

Data>Loads>wave loads

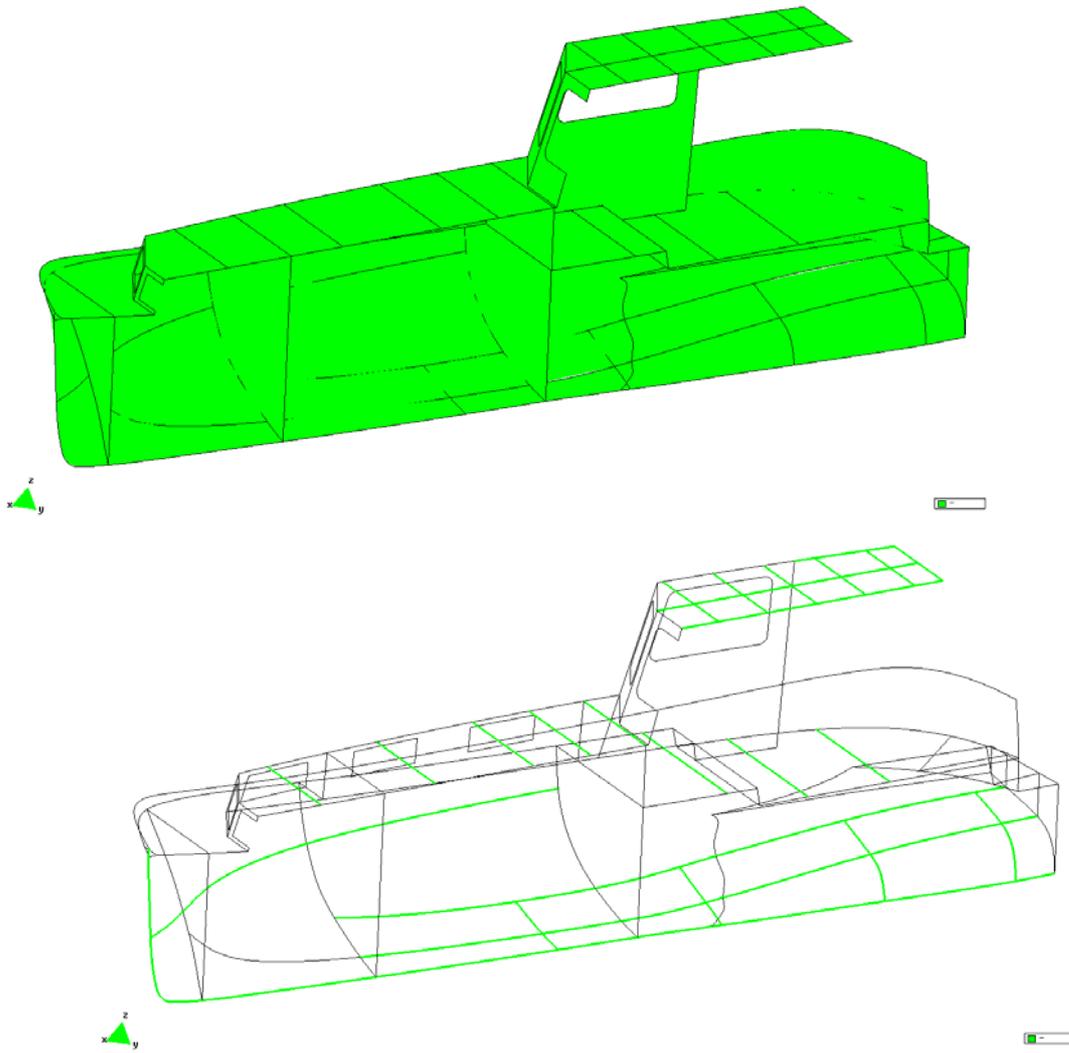
A esta ola hay que asignarle las siguientes propiedades

- Amplitud (la mitad de la altura), en nuestro caso tomaremos 1.5 m (Categoría de diseño B requiere una altura significativa de ola de 4 m)
- Tipo de ola (sinusoidal o trocoidal), nosotros tomaremos ola sinusoidal
- Es necesario asignar a la ola dos puntos de referencia (en proa y en popa)

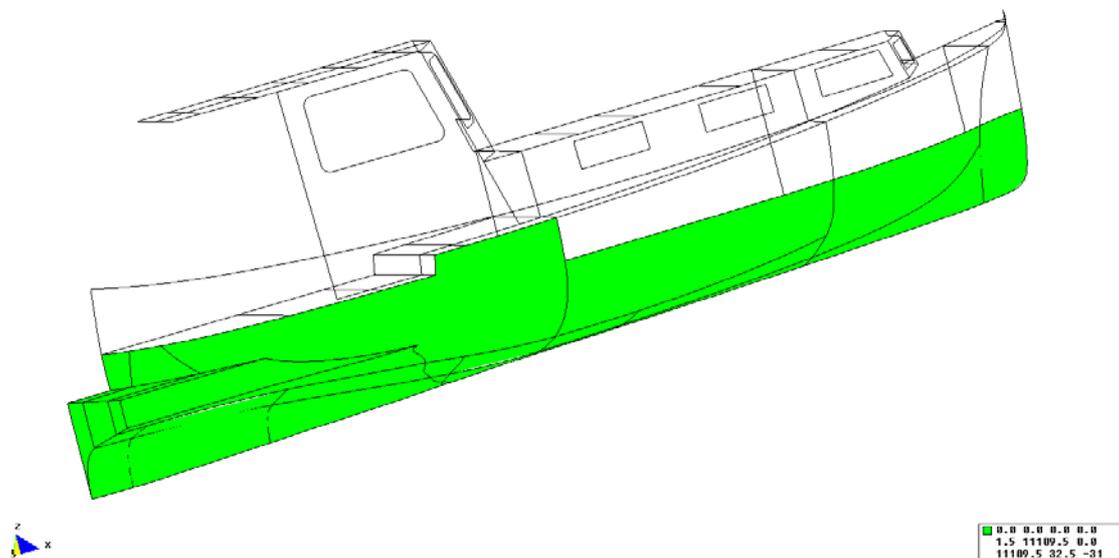
***Nota:** En un principio habíamos puesto una carga sobre el Fly-bridge, pero esta opción se ha desestimado, porque al tener un voladizo tan grande, nos distorsionaba los resultados. El Fly-bridge debería estudiarse en un problema a parte.



Peso propio de la estructura



Cargas hidrostáticas





Vamos a definir dos casos de carga:

LOAD CASE 1: Arrufo

Es decir a la carga hidrostática anteriormente expuesta, será una ola sinusoidal de 2 m de amplitud con un pico en proa y otro en popa.

Una vez hemos introducido la ola, acudimos a

Data>Advanced>Advanced problem data

Escogemos la pestaña *de Naval settings* y activamos *el Ship balance*, esta opción sirve para que el programa iguale los pesos y los desplazamientos (corrige el asiento y la línea de flotación)

Para tener en cuenta el efecto de las cargas dinámicas multiplicamos la carga por un **factor de 1.5**

LOAD CASE 2: Quebranto

Es decir a las cargas anteriormente expuestas, le introduciremos una ola sinusoidal de 2 m de amplitud con un pico en la mitad de la eslora

Una vez hemos introducido la ola, acudimos a

Data>Advanced>Advanced problem data

Escogemos la pestaña *de Naval settings* y activamos *el Ship balance*, esta opción sirve para que el programa iguale los pesos y los desplazamientos (corrige el asiento y la línea de flotación)

Para tener en cuenta el efecto de las cargas dinámicas multiplicamos la carga por un **factor de 1.5**

8.2.6- Mallado

Para la realización de los cálculos se han hecho infinidad de pruebas con una malla muy basta (tamaño 300 mm) con la cual obteníamos

Num. of linear elements=301

Num. of Triangle elements=3304

Num. of nodes=1754

Estos cálculos se ejecutaban en apenas unos segundos lo cual par las fases iniciales de cálculo nos iba muy bien, pero evidentemente carecen de precisión.

Una vez hemos tenido el modelo completamente definido hemos reducido la malla paulatinamente hasta un tamaño de 75 mm con la cual obteníamos

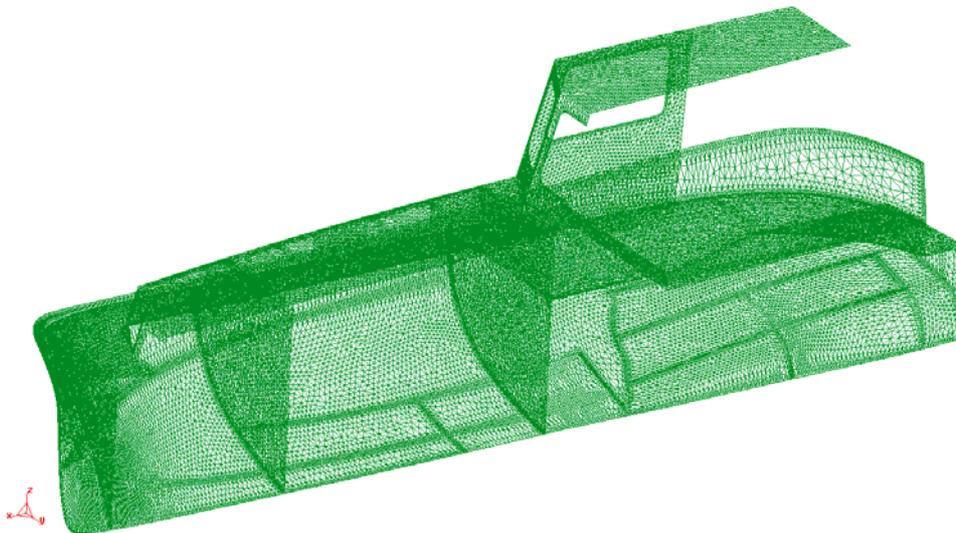


Num. of linear elements=1995

Num. of Triangle elements=67958

Num. of nodes=34615

Este cálculo tiene una duración de varias horas



8.2.7- Coeficientes de seguridad

Los coeficientes de seguridad, también llamados factores de ignorancia sirven para determinar si la estructura tiene un escantillón suficiente para soportar las cargas a las que suponemos que va a estar sometida.

Los coeficientes de seguridad son necesarios por el desconocimiento de

- a- Desconocimiento de las cargas
- b- Desconocimiento del material (especialmente en materiales compuestos)
- c- Aproximaciones geométricas (en el cálculo FEM este factor es prácticamente 1)
- d- Aproximación del modelo matemático (en el cálculo FEM este factor es prácticamente 1)
- e- Otros efectos (fatiga, agrietamiento, tensiones internas etc.)

Por tanto la elección de un buen factor de seguridad es primordial para asegurar que la estructura es suficientemente rígida y fuerte para soportar las cargas a las que va a estar sometida a lo largo de su vida, pero sin que esté sobredimensionada.

En algunos sectores como el aeroespacial, los ingenieros analizan las consecuencias de un fallo estructural, llegando a un número aceptable de fallos por persona y milla.



Tenemos dos formas de aplicar los coeficientes de seguridad:

- 1- FACTORES DE SEGURIDAD GLOBALES que normalmente varían entre 2 y 6, estos coeficientes pueden aplicarse tanto a las cargas (coeficiente de carga) como a los materiales (método de la tensión permisible)
- 2- FACTORES DE SEGURIDAD PARCIALES, este método, que será el que utilizaremos, se aplica de la siguiente manera
 - a. Definimos cargas de trabajo estáticas (arrufo quebranto)
 - b. Definimos las cargas dinámicas (Combinación de arrufo y quebranto)
 - c. Definimos carga límite del material(carga límite de trabajo)
 - d. Definimos la carga última del material (carga de rotura)

Nosotros para calcular los coeficientes de seguridad, aplicaremos la **teoría de Tsai-Wu**. Para ello introduciremos en el propio programa Ramseries® las propiedades mecánicas del material: tensión máxima de compresión (S_c) y tracción (S_t) en las direcciones 1 y 2, así como la tensión máxima cortante (T).

Para los coeficientes de seguridad de los laminados, nos basaremos en la norma *ISO-122158-5*. Esta norma nos especifica la tensión máxima admisible de diseño σ_d (**Carga límite de trabajo**).

Material	Structural members	Maximum design stress σ_d N/mm ²
FRP single skin	Bottom and side	$0,5 \cdot \sigma_{ut}$
	Deck	$0,33 \cdot \sigma_{ut}$
	Structural bulkheads	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$
	Watertight bulkheads	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$
	Tank bulkheads	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$
	Superstructures	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$
FRP sandwich ^a	Bottom and side	$0,5 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,5 \cdot \sigma_{uc}$
	Deck	$0,33 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,33 \cdot \sigma_{uc}$
	Structural bulkheads	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,625 \cdot \sigma_{uc}$
	Watertight bulkheads	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,625 \cdot \sigma_{uc}$
	Tank bulkheads	$0,5 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,5 \cdot \sigma_{uc}$
	Superstructures	$0,625 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,625 \cdot \sigma_{uc}$
Aluminium alloys ^a	All members	$0,9 \cdot \sigma_{yw}$ or $0,6 \cdot \sigma_{utw}$
Steel ^a	All members	$0,9 \cdot \sigma_y$ or $0,6 \cdot \sigma_{ut}$

^a The lesser value shall apply.

Resumiendo

- CS = 2 Para el casco**
CS = 3 Para la cubierta



Para calcular las propiedades de los laminados, también aplicaremos la norma ISO-122158-5.

La tabla se refiere a fibra E y para capas casi isotrópicas

Property	Requirement, N/mm ²	
Chopped strand mat (CSM) reinforcement		
	<u>Hand lay-up</u>	<u>Spray-up</u>
Ultimate tensile strength, σ_{ut}	$200 \cdot \psi + 25$	$150 \cdot \psi + 25$
Tensile modulus, E_t	$(15 \cdot \psi + 2) \cdot 10^3$	
Ultimate flexural strength, σ_{uf}	$502 \cdot \psi^2 + 106.8$	$300 \cdot \psi^2 + 106.8$
Flexural modulus, E_f	$(33.4 \cdot \psi^2 + 2.2) \cdot 10^3$	
Ultimate compressive strength, σ_{uc}	$150 \cdot \psi + 72$	same
Compressive Modulus, E_c	$(40 \cdot \psi - 6) \cdot 10^3$	
Ultimate shear strength, τ_u	$80 \cdot \psi + 38$	same
Shear modulus	$(1.7 \cdot \psi + 2.24) \cdot 10^3$	
Woven roving (WR) and crossplied (CP) reinforcement		
Ultimate tensile strength, σ_{ut}	$400 \cdot \psi - 10$	
Tensile modulus, E_t	$(30 \cdot \psi - 0.5) \cdot 10^3$	
Ultimate flexural strength, σ_{uf}	$502 \cdot \psi^2 + 106.8$	
Flexural modulus, E_f	$(33.4 \cdot \psi^2 + 2.2) \cdot 10^3$	
Ultimate compressive strength, σ_{uc}	$150 \cdot \psi + 72$	
Compressive Modulus, E_c	$(40 \cdot \psi - 6) \cdot 10^3$	
Ultimate shear strength, τ_u	$80 \cdot \psi + 38$	
Shear modulus	$(1.7 \cdot \psi + 2.24) \cdot 10^3$	
Uni-directional (UD) reinforcement		
Ultimate tensile strength, σ_{ut}	$1800 \cdot \psi^2 - 1400 \cdot \psi + 510$	
Tensile modulus, E_t	$(130 \cdot \psi^2 - 104 \cdot \psi + 39) \cdot 10^3$	

Ψ = contenido en fibra de la capa de laminado

	Mat	WR
Tensión de compresión	117 N/mm ²	117 N/mm ²
$Sc_1 = Sc_2$	$117 \cdot 10^6$ N/m ²	$117 \cdot 10^6$ N/m ²
Tensión de tracción	85 N/mm ²	130 N/mm ²
$St_1 = St_2$	$85 \cdot 10^6$ N/m ²	$130 \cdot 10^6$ N/m ²
Tensión cortante	62 N/mm ²	62 N/mm ²
T	$62 \cdot 10^6$ N/m ²	$62 \cdot 10^6$ N/m ²



8.2.8- Análisis de resultados

En el apartado 8.2.3-*Propiedades de los materiales*, hemos definido una secuencia de laminación inicial (la misma obtenido con el escantillonado RINA), durante el proceso de optimización estructural hemos ido ajustando este laminado.

1-Deformación de la estructura

Siguiendo el consejo de Julio García Espinosa, tomaremos como valor admisible de deformación 1:100

Desplazamiento en el eje X

Desplazamiento en el eje Y

Desplazamiento en el eje Z

2-Visualización de las tensiones

Todas las fuerzas están representadas en relación con el sistema del eje local de cada lámina (exceptuando las fuerzas en el eje principal). La visualización será con Contour Fill.

El resultado que el programa Ramseries® nos da es un valor característico de la tensión de todas las capas que forman el laminado

Fuerza axial [N/m]	N_x, N_y, N_{xy}	Fuerza axial en todo el espesor de la lámina por unidad de anchura de la lámina
Momento [N·m/m]	M_x, M_y, M_{xy}	Momento por unidad de anchura de la lámina
Cortante [N/m]	$Q_x, Q_y,$	Fuerza cortante por unidad de ancho de lámina

3- Coeficientes de seguridad

El resultado que nos da el programa es el coeficiente de seguridad menor de todas las capas que forman el laminado (la capa que primero rompe)

4- Respuesta dinámica

Por último analizaremos la respuesta dinámica de la estructura (3 primeros modos de vibración). Este dato nos servirá para comprobar si hay algún elemento rotativo (hélice, motor, generador) que tenga peligro de entrar en fase con la estructura y por tanto producir ruido.

Data>Problem data>analysis>linerar dinamic (escogemos numero de nodos)



8.2.9- Visualización de resultados

Secuencia de laminado obtenida

Casco

Nº Capa	Tipo	Ángulo dirección fibras	Peso gr/m ²	Densidad fibra	Porcentaje de fibra en Peso	Porcentaje huecos	Espesor e (mm)
1	MAT 300	0	300	2,56	0,30	0,10	0,778
2	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
3	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
5	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
6	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
7	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168

Espesor lam.=	6,40 mm	56696	184531
Distancia eje neutro a borde laminado =		3,25 mm	
Distancia eje neutro al otro borde laminado =		3,15 mm	
Modulo young del laminado E =		8856 N/mm ²	
Rigidez del laminado E*I =		168462 N*mm ² /mm	
Inercia del laminado I =		19,02 mm ⁴	
Peso el laminado =		8,45 Kg/m ²	
Porcentaje en fibra del laminado =		0,343	

Cubierta

Nº Capa	Tipo	Ángulo dirección fibras	Peso gr/m ²	Densidad fibra	Porcentaje de fibra en Peso	Porcentaje huecos	Espesor e (mm)
1	MAT 300	0	300	2,56	0,30	0,10	0,778
2	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
3	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
5	WR 800	0	800	2,56	0,55	0,10	0,953
6	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168
7	MAT 450	0	450	2,56	0,30	0,10	1,168

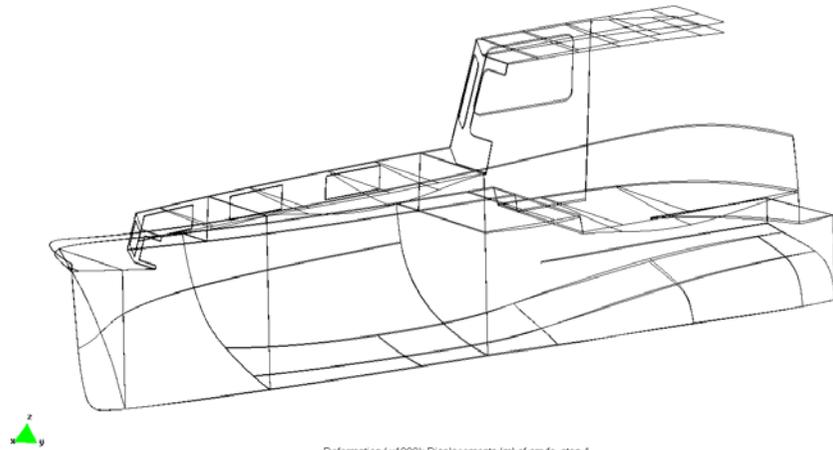
Espesor lam.=	6,40 mm	56696	184531
Distancia eje neutro a borde laminado =		3,25 mm	
Distancia eje neutro al otro borde laminado =		3,15 mm	
Modulo young del laminado E =		8856 N/mm ²	
Rigidez del laminado E*I =		168462 N*mm ² /mm	
Inercia del laminado I =		19,02 mm ⁴	
Peso el laminado =		8,45 Kg/m ²	
Porcentaje en fibra del laminado =		0,343	

Los mamparos y refuerzos son los mismos expuestos en el punto 8



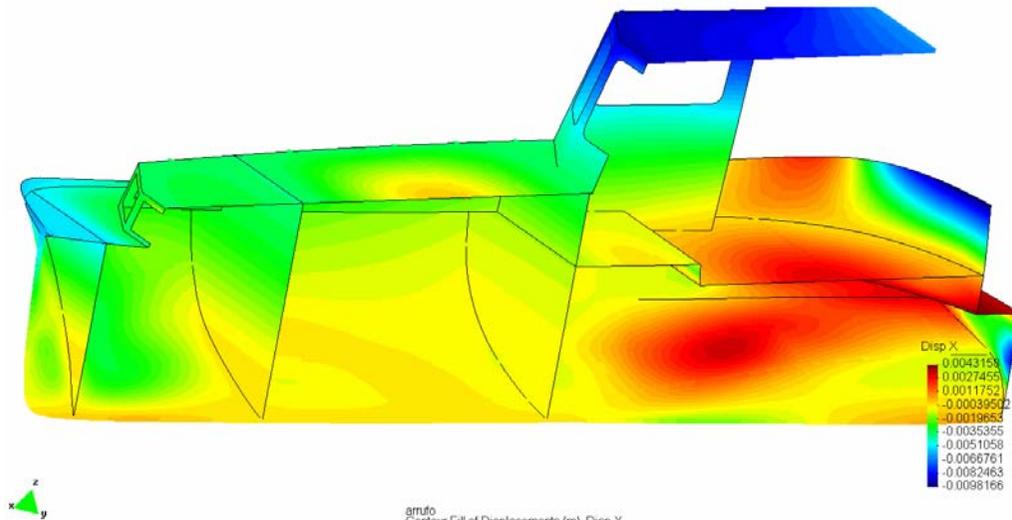
LOAD CASE 1= 1,5*Arrufo

Deformada [$m \cdot 10^{-3}$]



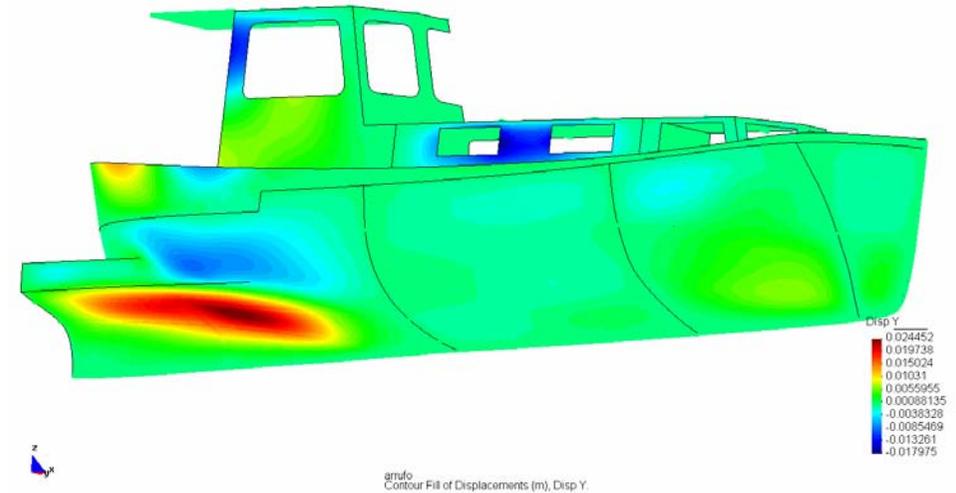
Deformation (x1000) Displacements (m) of arrufo, step 1.

Desplazamiento en X [m]



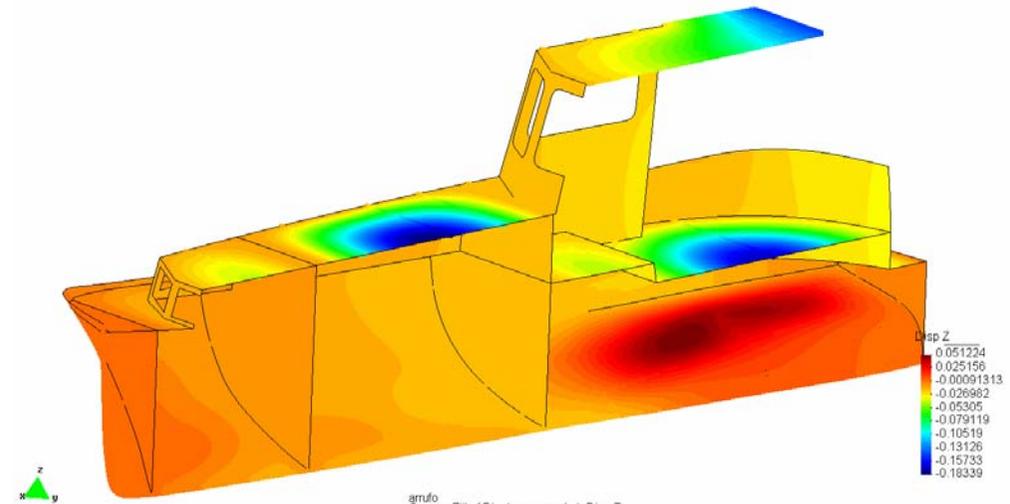
arrufo
Contour Fill of Displacements (m), Disp X.

Desplazamiento en Y [m]



arrufo
Contour Fill of Displacements (m), Disp Y.

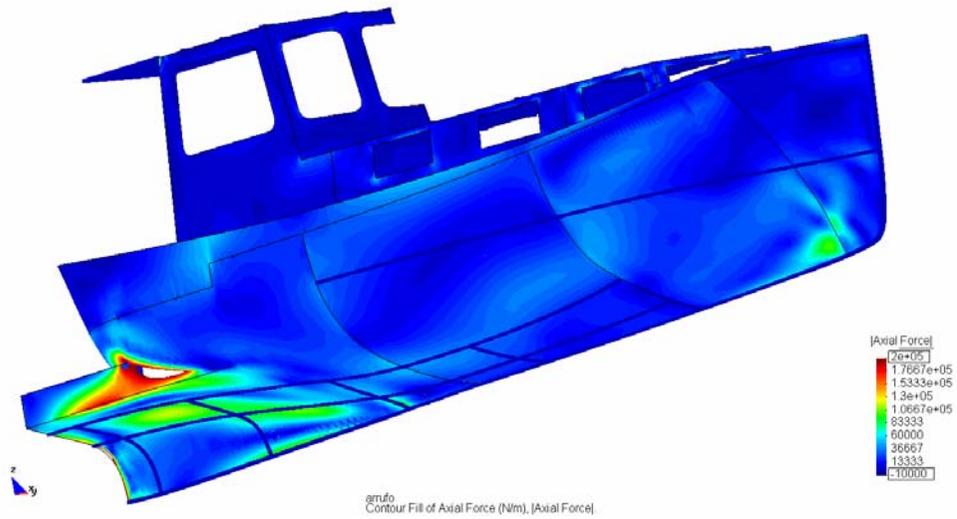
Desplazamiento en Z [m]



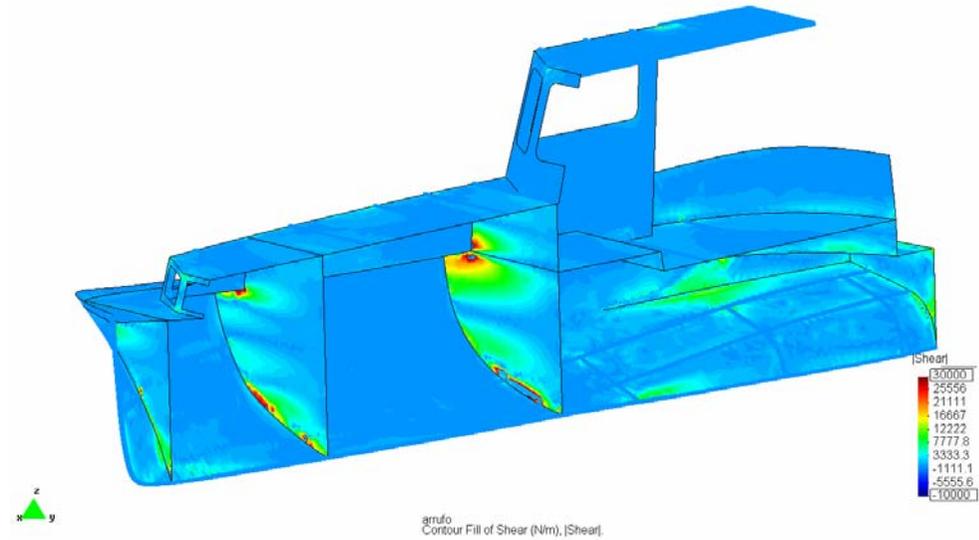
arrufo
Contour Fill of Displacements (m), Disp Z.



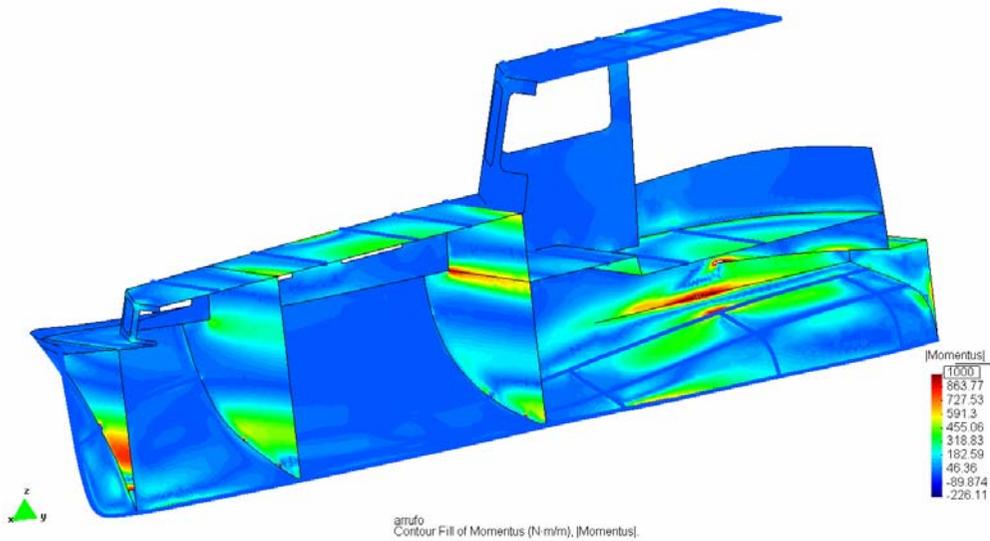
Fuerza axial [N/m]



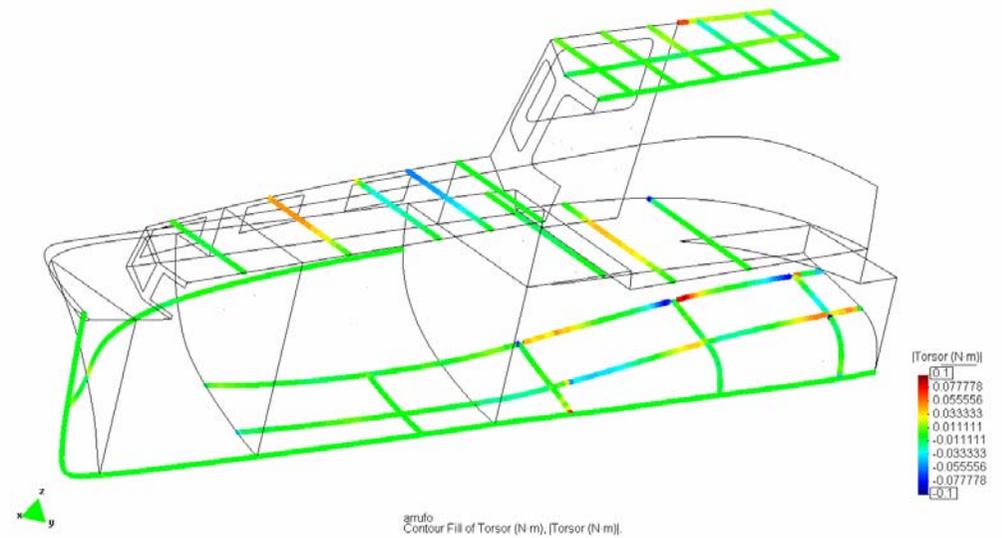
Fuerza cortante [N/m]



Momento [N·m/m]

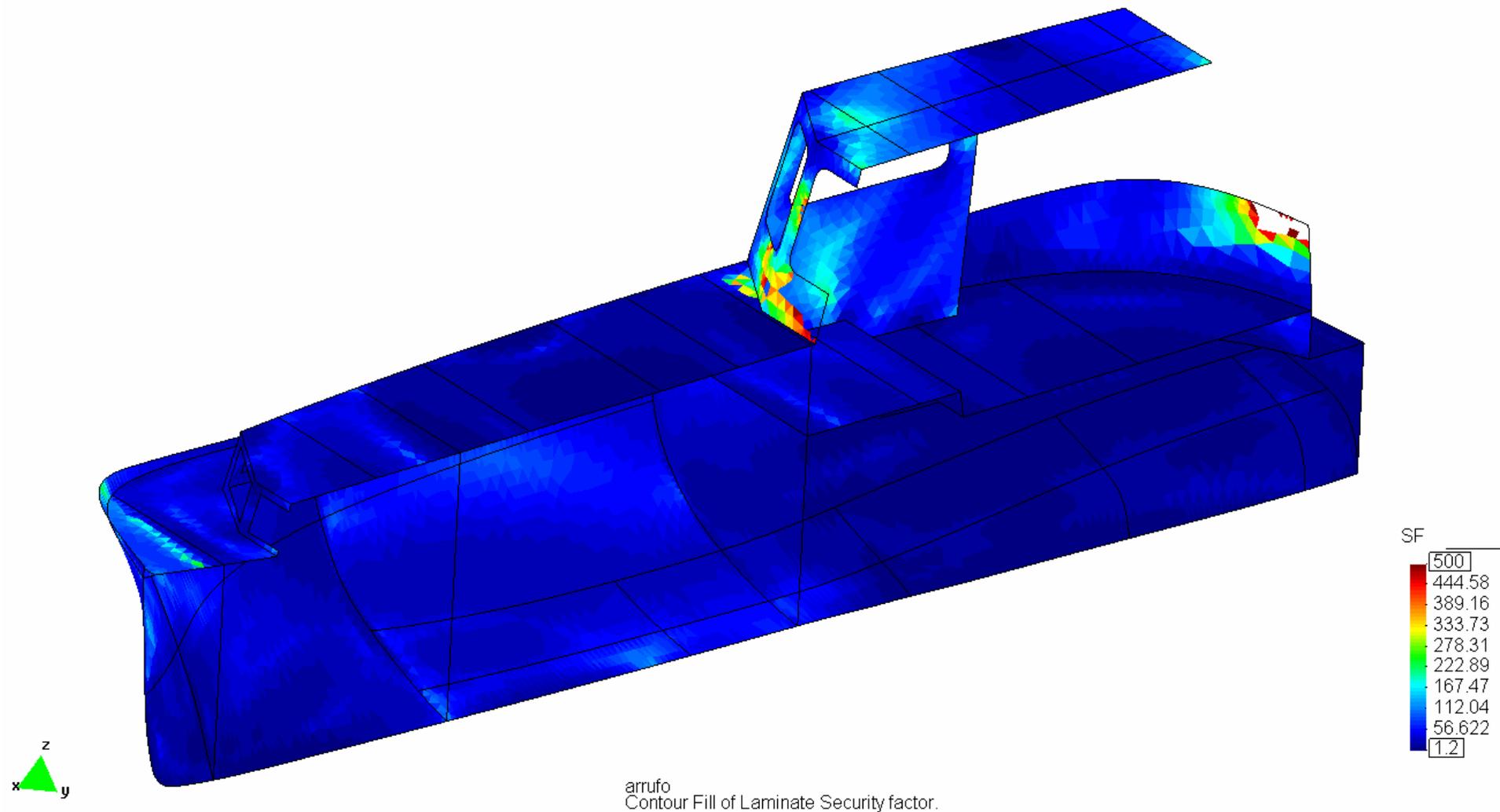


Momento torsor [N·m]





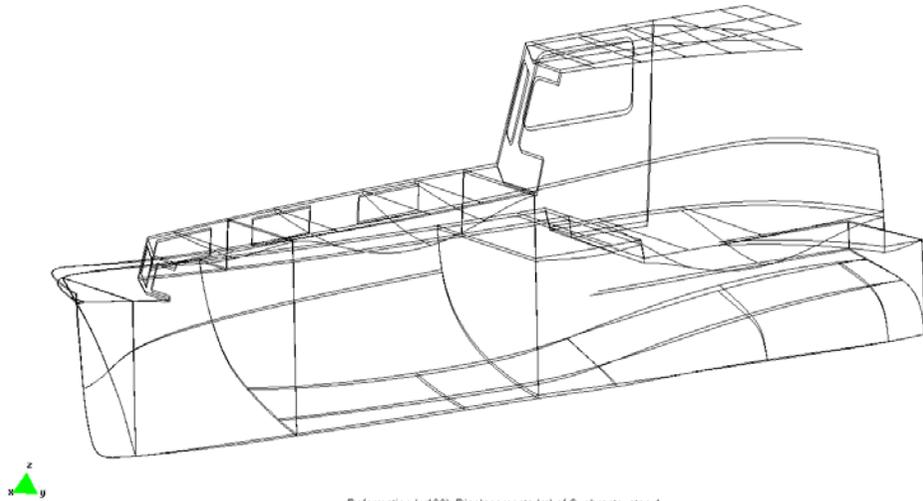
Coefficiente de seguridad del laminado





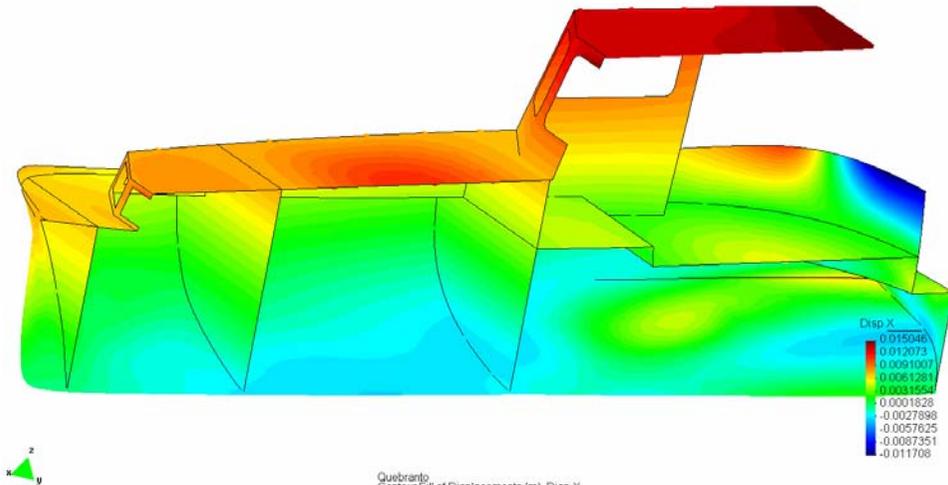
LOAD CASE 2= 1,5*Quebranto

Deformada [m 10⁻³]



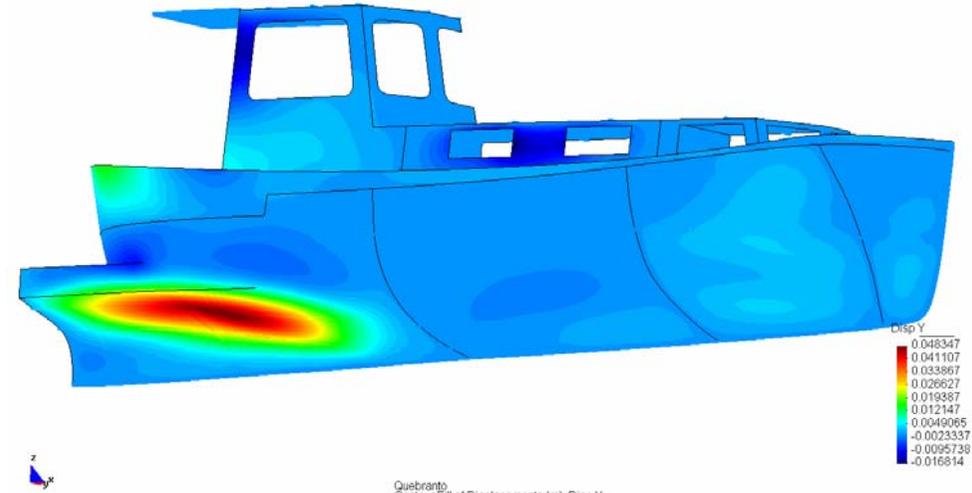
Deformation (x100) Displacements (m) of Quebranto, step 1.

Desplazamiento en X [m]



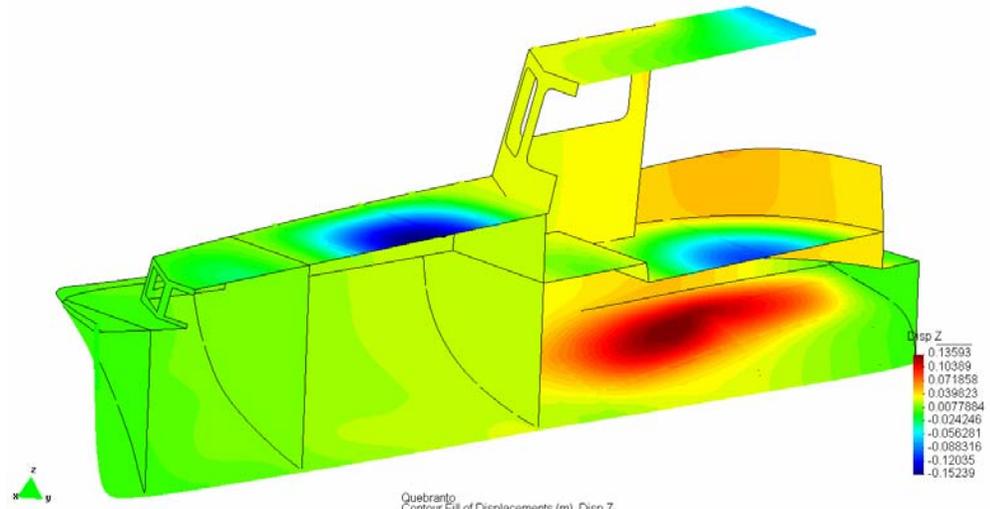
Quebranto
Contour Fill of Displacements (m), Disp X.

Desplazamiento en Y [m]



Quebranto
Contour Fill of Displacements (m), Disp Y.

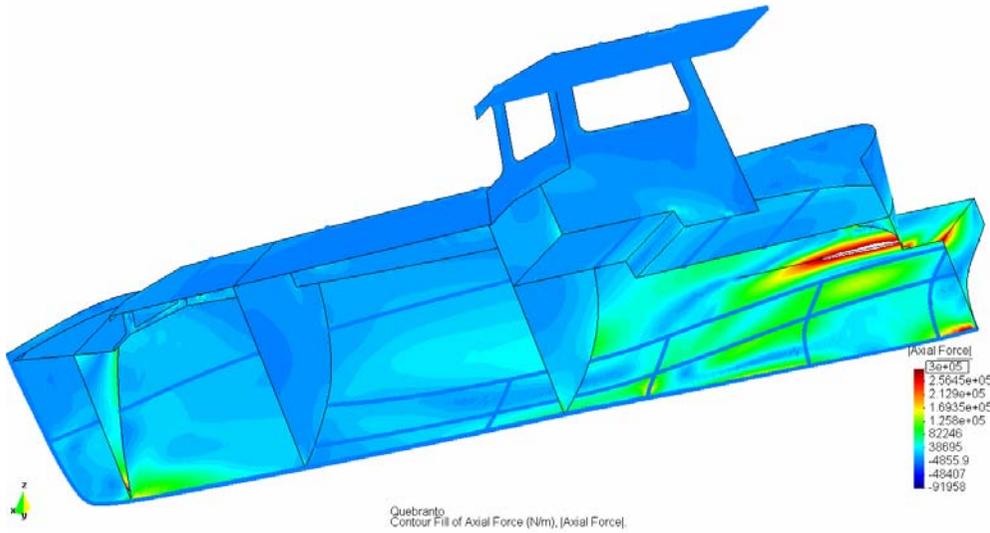
Desplazamiento en Z [m]



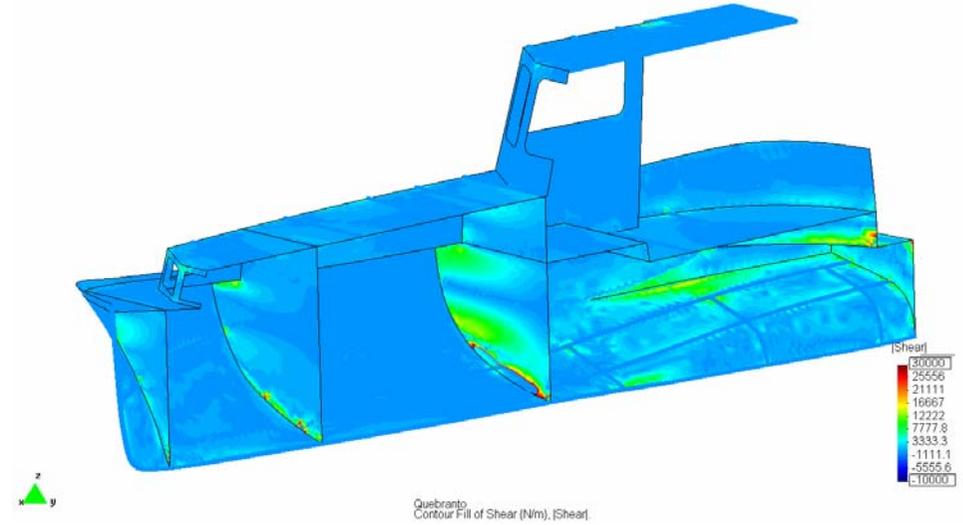
Quebranto
Contour Fill of Displacements (m), Disp Z.



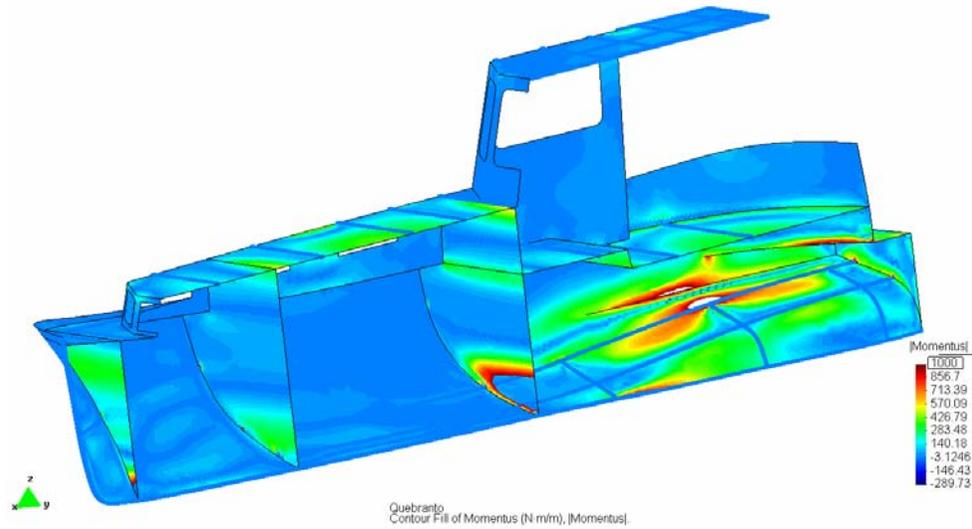
Fuerza axial [N/m]



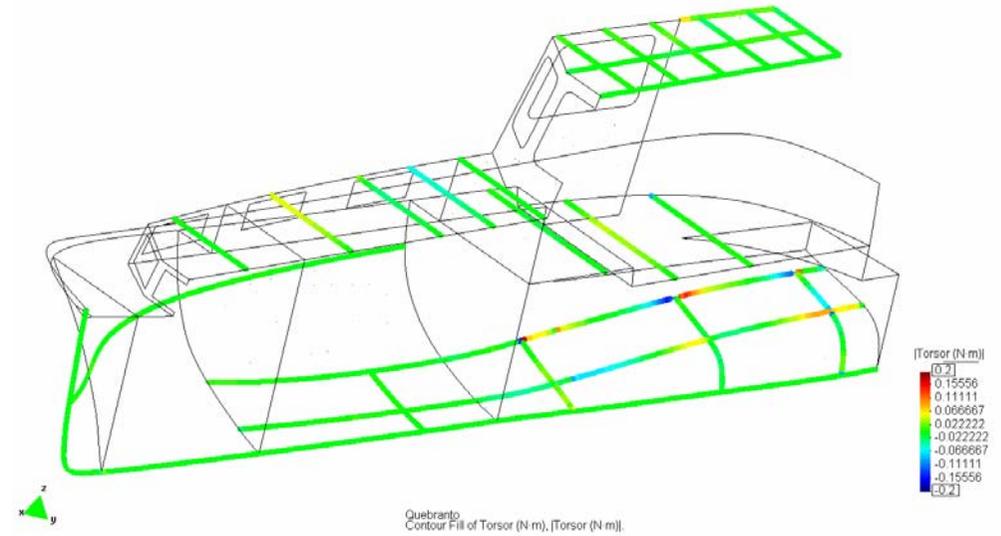
Fuerza cortante [N/m]



Momento [N·m/m]

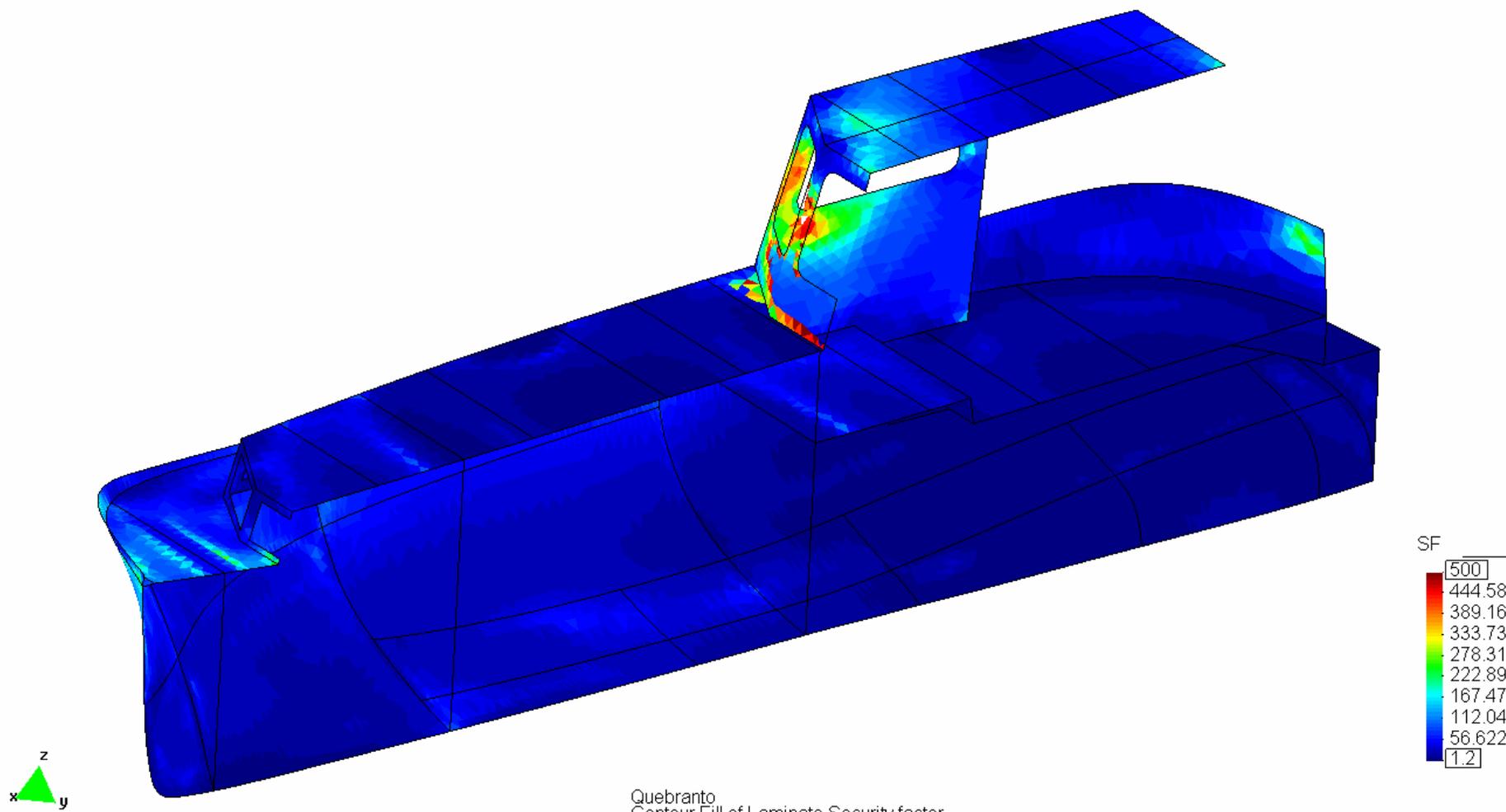


Momento torsor [N·m]





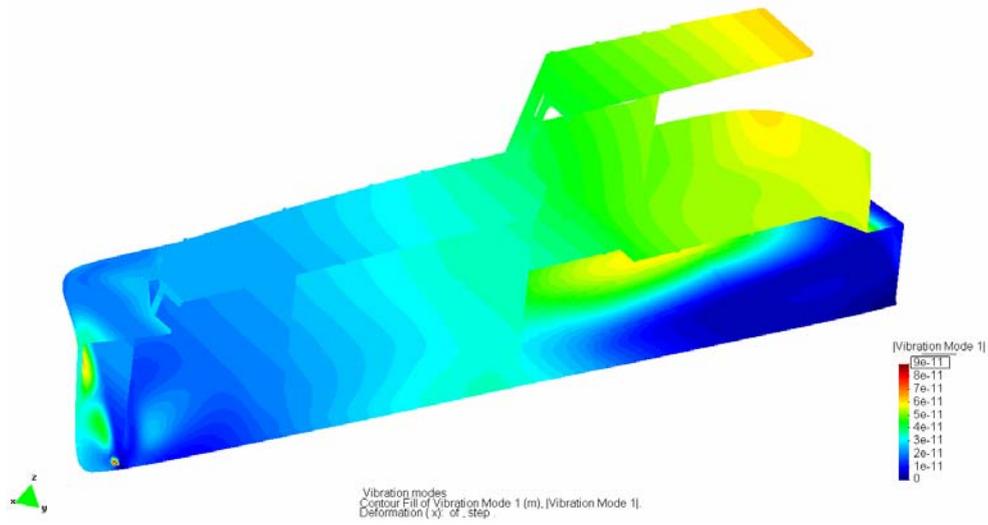
Coefficiente de seguridad del laminado



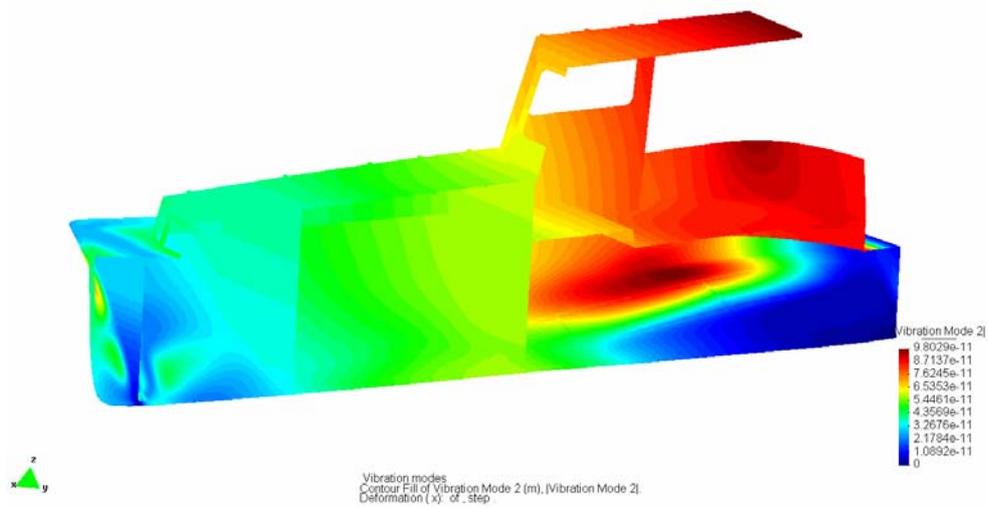


Respuesta dinámica de la estructura

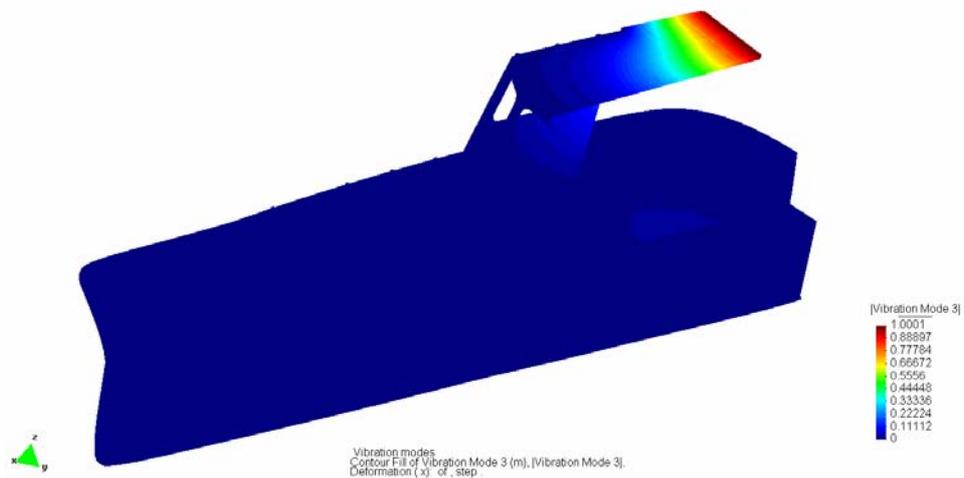
Modo de vibración 1



Modo de vibración 2



Modo de vibración 3





8.2.10- Comparación FEM-sociedades de clasificación

Una vez comprobamos que el coeficiente de seguridad del laminado para los dos casos de carga cumple con los requisitos establecidos, ya podemos comparar los resultados obtenidos en el cálculo directo con los obtenidos aplicando el reglamento.

Solo estudiaremos los laminados de cubierta y casco, ya que como anteriormente hemos dicho, los refuerzos y mamparos no se han modificado, para su modificación tendríamos que hacer un estudio más detallado.

Casco según reglamento

	Espesor mm	Superficie m ²	Peso laminado Kg/m ²	Peso total Kg
Costado casco	10,86	23,40	14,41	337,2
Fondo casco	15,31	34,01	20,36	692,44
Quilla casco	20,72	8,08	27,77	224,4
TOTAL		65,49		1254,0

Casco por cálculo directo

	Espesor mm	Superficie m ²	Peso laminado Kg/m ²	Peso total Kg
Costado casco	6,4	23,40	8,45	197,73
Fondo casco	6,4	34,01	8,45	287,38
Quilla casco	6,4	8,08	8,45	68,28
TOTAL		65,49		553,38

Hemos conseguido un **ahorro por tanto de 700 Kg**, que en coste (únicamente de material suponiendo un precio aproximado de 5,5 €/Kg) representa **un ahorro de 3853 € para cada casco**.

Cubierta según reglamento

	Espesor mm	Superficie m ²	Peso laminado Kg/m ²	Peso total Kg
Costado casco	8,52	63,10	11,41	719,97

Casco por cálculo directo

	Espesor mm	Superficie m ²	Peso laminado Kg/m ²	Peso total Kg
Costado casco	6,4	63,10	8,45	533,20

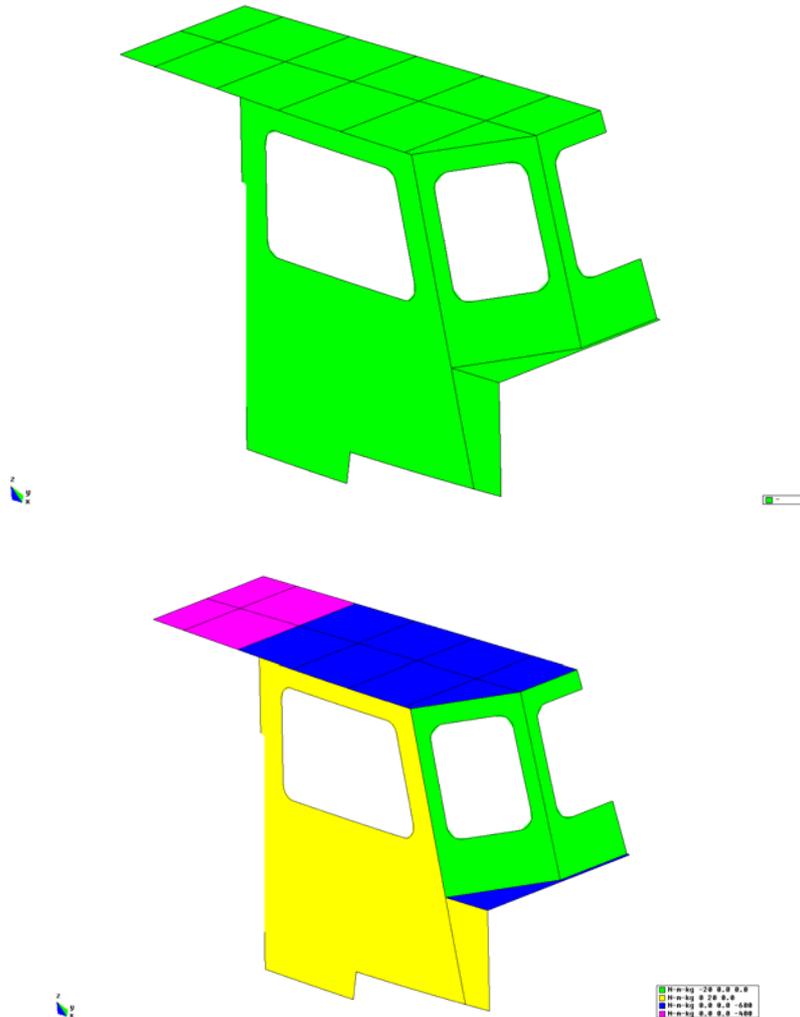
Hemos conseguido un **ahorro por tanto de 186,78 Kg**, que en coste (únicamente de material suponiendo un precio aproximado de 5,5 €/Kg) representa **un ahorro de 1027,2 € para cada cubierta**.



8.2.11- Fly-britge

Una vez hemos estudiado el problema del barco entero, vamos a pasar a estudiar el problema local del Fly-britge.

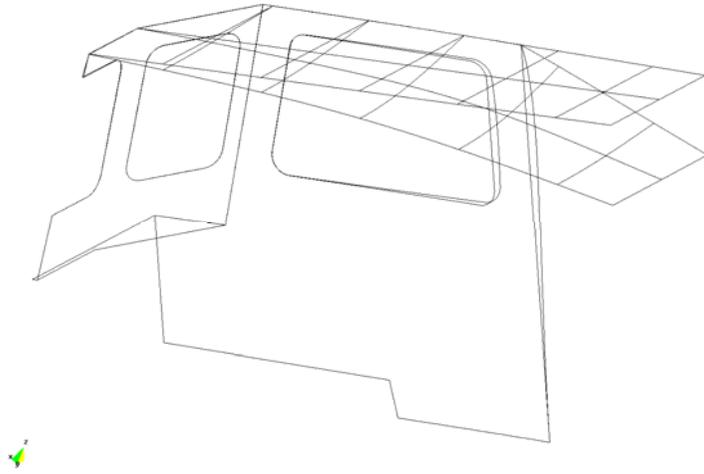
Cargas: Peso propio y repartida sobre Fly-britge más una fuerza lateral de viento



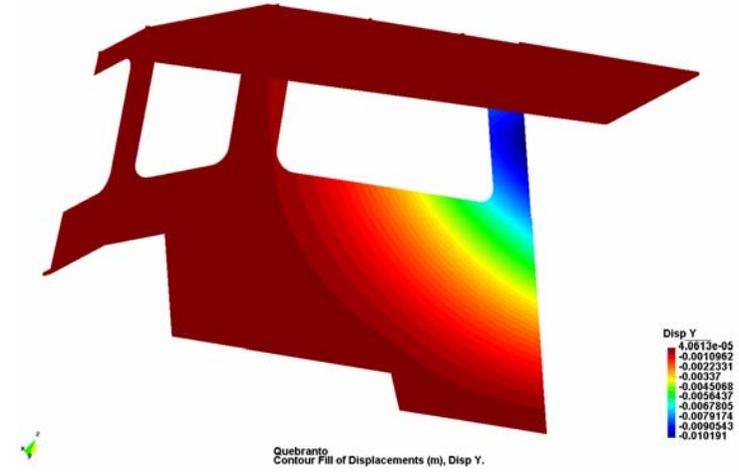
Prescripción de desplazamiento: Seguimos manteniendo la condición de simetría y le ponemos un empotramiento en todo el borde inferior



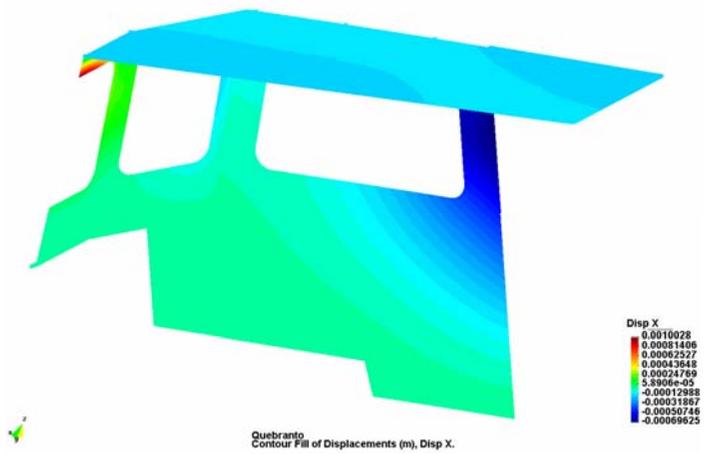
Deformada



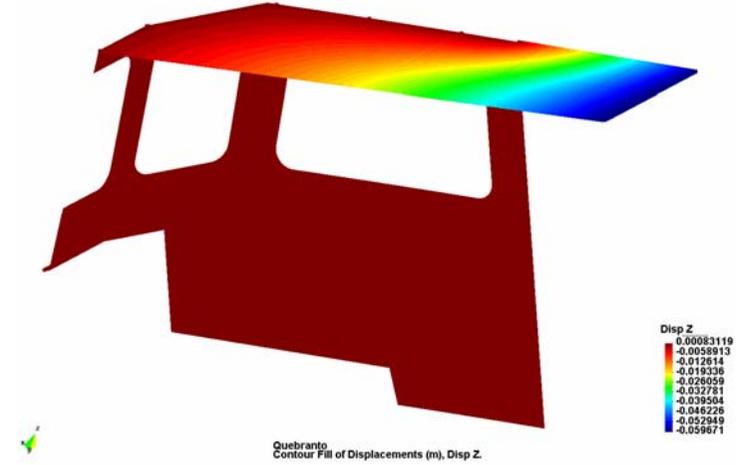
Desplazamiento en Y [m]



Desplazamiento en X [m]

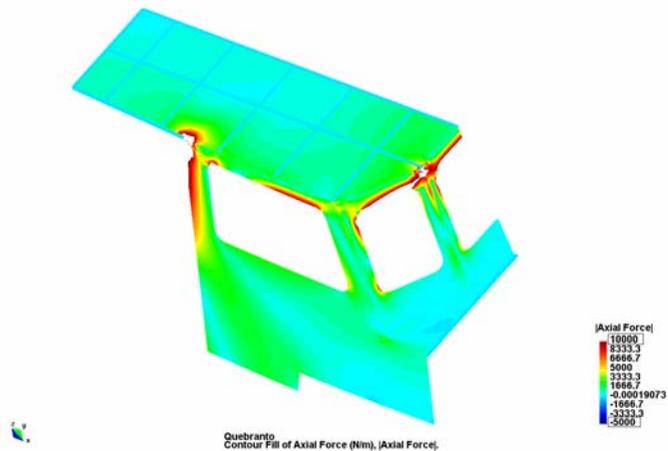


Desplazamiento en Z [m]

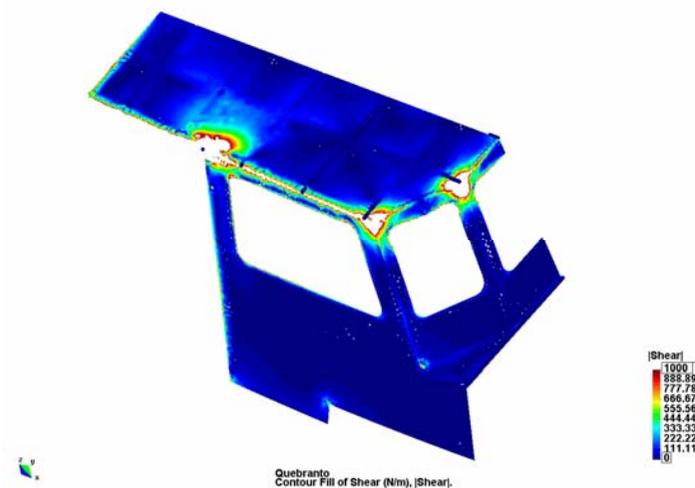




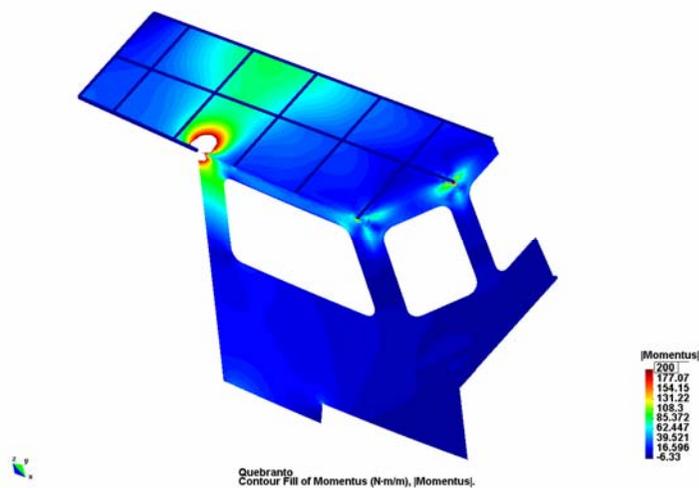
Fuerza Axial [N/m]



Fuerza cortante [N/m]



Momento [N·m/m]



Coefficiente de seguridad del laminado

