UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2017/18

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE LA CUADERNA MAESTRA DE UN QUIMIQUERO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

David Moreno Sánchez

TUTORAS/ES

Fernando Lago Rodríguez

FECHA

JUNIO 2018

1 TÍTULO Y RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es aplicar los conocimientos adquiridos en las distintas asignaturas de estructuras cursadas a lo largo de la carrera, profundizando en la utilización de herramientas de cálculo numérico en el campo de las de estructuras marinas.

El estudio y análisis del comportamiento de la estructura diseñada mediante cálculo directo (Método de los Elementos Finitos) figura como uno de los principales objetivos de este trabajo.

En base a los criterios fijados por la SSCC del DNV (Det Norske Veritas), se modelizará adecuadamente la estructura del buque definiendo las condiciones de contorno del modelo al igual que las distintas condiciones de carga a estudiar mediante el análisis por elementos finitos, obteniendo los resultados y realizando la discusión pertinente de ésos resultados

AGRADECIMIENTOS

Tengo tantas cosas que agradecer que no sabría cómo comenzar.

En primer lugar, Sergio y Antonio, por esas noches de estudio, fines de semana y por no volvernos locos encerrados en el piso. Hace no mucho empezamos esta gran etapa desde Cartagena hasta Ferrol, lo unico que puedo decir es que me llevo dos grandisimos amigos.

En segundo lugar, mi familia, lo mejor que me ha podido pasar. Gracias por el apoyo constante que me habeis dado cada día. Por esos días que me he cabreado y constantemente me habeis animado.Despues de 8 años, termino esta etapa. No sé cómo agradeceros todo esto. Os quiero mucho.

He conocido mucha gente en Ferrol, posiblemente, una de las mejores decisiones que he tomado al venir aquí. Si tuviese que resumir esta etapa (que aun no ha terminado) seria :"*Caerse 7 veces, levantarse 8*"

Simplemente, Gracias

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escola Politécnica Superior

TRABAJO FIN DE GRADO/MÁSTER

CURSO 2017/18

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE LA CUADERNA MAESTRA DE UN QUIMIQUERO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

2 INDICE

1 TÍTULO Y RESUMEN 2
2 INDICE 5
3 DESCRIPCIÓN DEL BUQUE 8
3.1 HISTORIA DE LOS BUQUES QUIMIQUEROS 8
3.2 CARGAS EN LOS BUQUES TANQUE QUIMIQUEROS 9
3.3 DISEÑO TIPO DE UN BUQUE QUIMIQUERO Y CONTENCIÓN DEL CARGAMENTO 11
3.3.1 REQUERIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO 11
3.3.2 DISPOSICIÓN GENERAL ESTÁNDAR DE UN QUIMIQUERO 11
3.3.3 CONTENCIÓN DEL CARGAMENTO 12
3.4 TIPOS DE BUQUES Y CAPACIDAD DE SUPERVIVENCIA 13
3.5 MATERIALES Y REVESTIMIENTOS DE LOS TANQUES DE CARGA 16
3.6 BOMBAS Y SISTEMAS DE DESCARGA 16
3.7 MANIPULACIÓN DE LA CARGA Y OPERACIONES DE LASTRE 17
3.8 OPERACIONES PARA LA CARGA Y DESCARGA 18
3.8.1 OPERACIONES PARA LA CARGA 18
3.8.2 OPERACIONES PARA LA DESCARGA 18
3.9 OPERACIONES DE LASTRE Y DESLASTRE 19
3.10 OPERACIONES DE LAVADO DE TANQUES 19
3.11 DESGASIFICADO Y VENTILACIÓN DE TANQUES DE CARGA 22
3.12 INTERCAMBIO BUQUE/TERMINAL 23
3.13 BUQUE PROYECTO 24
3.14 BIBLIOGRAFÍA 25
4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA CUADERNA MAESTRA POR DNV 26
4.1 INTRODUCCIÓN 26
4.2 CRITERIOS DE CÁLCULO 26
4.2.1 MATERIALES EMPLEADOS 26
4.3 CÁLCULO ESTRUCTURAL 26
4.3.1 PARÁMETROS PRINCIPALES 26
4.3.2 MOMENTOS FLECTORES. VALORES MÍNIMOS DADOS POR EL REGLAMENTO. 27

4.3.3 MÓDULO RESISTENTE Y MOMENTO DE INERCIA....30
4.4 CÁLCULO DE LA CUADERNA MAESTRA....30
4.4.1 ESTRUCTURA DEL FONDO Y DOBLE FONDO....30
4.4.2 ESTRUCTURA DEL FORRO....38
4.4.3 ESTRUCTURA DE CUBIERTA....43
4.4.4 MAMPAROS....47
4.5 OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA....50
4.5.1 DOBLE FONDO....50
4.5.2 FONDO....52
4.5.3 CUBIERTA....54
4.5.4 COSTADO....55
4.5.5 DOBLE COSTADO....58
4.6 CONCLUSIONES....60
4.7 BIBLIOGRAFÍA....61
5 MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL....62
5.1 INTRODUCCIÓN....62
5.2 MODELIZACIÓN EN 2D....62
5.3 MODELIZACIÓN ESTRUCTURA EXTERNA....64
5.4 MODELIZACIÓN ESTRUCTURA INTERNA....66
5.5 MODELIZACIÓN DE LOS MAMPAROS....67
5.6 MODELIZACIÓN REFUERZOS PRIMARIOS....69
5.7 MODELIZACIÓN REFUERZOS SECUNDARIOS....71
6 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS APLICADOS EN LA INGENIERÍA NAVAL....74
6.1 INTRODUCCIÓN....74
6.2 TIPOS DE ANÁLISIS....74
6.2.1 ANÁLISIS GLOBAL....74
6.2.2 ANÁLISIS PARCIAL....81
6.2.3 ANÁLISIS LOCAL....86
6.3 APLICACIÓN DEL M.E.F. SEGÚN LOS REGLAMENTOS....93
6.3.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS....93
6.3.2 MODELO ESTRUCTURAL....94
6.3.3 CARGAS Y CONDICIONES DE CARGA....94
6.3.4 CÁLCULOS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS....95
6.4 ANÁLISIS GLOBAL 3D SEGÚN LAS SOCIEDADES DE CLASIFICACIÓN....96
6.4.1 IDEALIZACIÓN ESTRUCTURAL....96
6.4.2 CONDICIONES DE CONTORNO....101

6.4.3 CONDICIONES DE CARGA PARA EL ANÁLISIS GLOBAL 103
6.4.4 COMPROBACIÓN DEL MODELO 104
6.4.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS 105
6.5 ANÁLISIS PARCIAL 3D SEGÚN LAS SOCIEDADES DE CLASIFICACIÓN 106
6.5.1 IDEALIZACIÓN ESTRUCTURAL 107
6.5.2 CONDICIONES DE CONTORNO 114
6.5.3 CARGAS Y CONDICIONES DE CARGA 116
6.5.4 EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS PARCIAL 118
6.5.5 ÁREAS CRÍTICAS 119
6.6 ANÁLISIS LOCAL SEGÚN LAS SOCIEDADES DE CLASIFICACIÓN 121
6.6.1 EXTENSIÓN DEL MODELO LOCAL 122
6.6.2 DEFINICIÓN DE LA MALLA 124
6.6.3 CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO 125
6.7 BIBLIOGRAFÍA 125
7 CÁLCULO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEM) 127
7.1 INTRODUCCIÓN GEOMETRÍA 127
7.2 MATERIALES 137
7.3 UNIONES 148
7.4 MALLADO 149
7.5 CONDICIONES DE CONTORNO Y CARGA 150
7.5.1 BULÁRCAMA 153
7.5.2 MAMPARO 156
7.5.3 VARENGA 158
8 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS 160
8.1 RESULTADOS OBTENIDOS Y PROPUESTAS 160
8.1.1 PROPUESTA 1: BULÁRCAMA 160
8.1.2 PROPUESTA 2: MAMPARO 171
8.1.3 PROPUESTA 3: VARENGA 178
8.2 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 184
8.3 TRABAJOS REALIZADOS 184
ANEXOS 186

3 DESCRIPCIÓN DEL BUQUE

3.1 Historia de los buques quimiqueros

El buque quimiquero es básicamente un desarrollo de los últimos cuarenta años. El crecimiento de la industria química en los Estados Unidos que luego del final de la Segunda Guerra Mundial condujo a una demanda para los buques en los cuales llevar los productos de la industria. Un número de petroleros de la clase T2 (producidos en masa durante la guerra) fueron convertidos instalando tanques especiales, fondos dobles y arreglos estructurales y aflautados convenientes.

Durante más de una década después de finalizada la segunda guerra mundial, se utilizaron buques convertidos para dicho propósito.

Ilustración 1. Primer gasero de la historia Methane Pioneer.

Mientras que el comercio se convirtió, estos buques se tornaron más complejos, con la adición de guarniciones del tanque, los cofferdams y otras características. La gama de productos llevados dentro de los primeros quimiqueros era relativamente limitada, y no requería un gran desarrollo técnico.

Por los años 60 el comercio del producto químico se tornaba más complejo. El número de las sustancias que eran transportadas en el mar aumentaba rápidamente - al igual que el tonelaje total - y los productos eran técnicamente más complejos. En el mismo tiempo un número creciente de buques quimiqueros especializados. Éstos eran buques tanque diseñados para llevar una gama de los productos químicos para un número de diversos dueños.

Ilustración 2. Buque quimiquero Laietá, construido en Astano en 1970.

Estas naves estaban para satisfacer la necesidad más compleja que se hacía presente, que los quimiqueros de primera generación originales. Por los mediados de los años sesenta el buque químiquero se había convertido en una nave que era diferente de cualquier otro tipo, incluyendo otros buques para carga a granel (ej: petroleros). Las cargas llevadas por los buques quimiqueros eran potencialmente las sustancias más peligrosas a flote, tanto para las naves, como para sus equipos y para el medio ambiente. Todo el esto hizo imprescindible que se hiciese algo para asegurarse de que las naves mismas eran idóneas, o siquiera convenientes para la tarea.

Exteriormente, algunos buques quimiqueros pueden asemejarse a otros buques tanque, pero el hecho es que son más complicados por mucho (y también más costosos). Un buque de carga petrolífera, o crudo puede permitirse ser grande y laborioso, porque lleva normalmente un tipo de aceite desde un puerto de carga a un destino a nombre de un expedidor, o desde una monoboya a otra. Un quimiquero, por el contrario lleva muchas cargas diversas para un número de clientes diferentes. Por lo tanto tiene que ser muy versátil.

A pesar de su tamaño relativamente chico (la mayoría están por debajo de las 50.000 DWT) los químiqueros tienen normalmente muchos más tanques que un petrolero de crudo, o un buque de carga a granel - treinta o más es común. Esto da una mayor flexibilidad, y puesto que la cantidad de cargas individuales llevada es generalmente pequeña (la mayoría está debajo 500m3), el pequeño tamaño del tanque no es una desventaja.

3.2 Cargas en los buques tanque quimiqueros

Los buques tanque quimiqueros están designados primariamente para el transporte de químicos peligrosos a granel; estos químicos están listados en los códigos de quimiqueros de la IMO, pudiendo también transportar una amplia variedad de otros productos líquidos que normalmente se consideran no relacionados a los químicos. Algunos de estos pueden ser el jugo de fruta, el agua, las melazas, aceites animales y vegetales, productos derivados del petróleo y aceites lubricantes.

Los productos limpios derivados del petróleo son aquellos que han sido producidos en refinerías.

Las cargas en los quimiqueros pueden ser divididas en cuatro grandes grupos:

- **Petroquímicos**: es el nombre colectivo para químicos orgánicos derivados del petróleo crudo, el gas natural y el carbón.
- **Alcoholes y carbohidratos**: pueden ser derivados de hidrocarbonos o producidos por fermentación
- **Aceite animal, vegetal y grasas**: son productos derivados de semillas de plantas y de la grasa de animales y pescados.
- **Químicos inorgánicos y ácidos**: son aquellos compuestos que carecen de carbono en su estructura. Los ácidos pueden ser orgánicos o inorgánicos, dependiendo también de la existencia de carbono en su estructura.

GRUPOS REACTIVOS	01 ACIDOS MINER. NO OX	02 ACIDO SULFURICO	03 ACIDO NITRICO	04 ACIDOS ORGANICOS	05 SUST. CAUSTICAS	06 AMONIACO	07 AMINAS ALIFATICAS	08 ALCANOLAMINAS	09 AMINAS AROMATICAS	10 AMIDAS	11 ANHIDRIDOS ORGI	12 ISOCIANATOS	13 ACETATO DE VINILO	14 ACRILATOS	15 ALILOS SUSTITUIDOS	16 OXIDO DE ALKILENO	17 EPICLORHIDRINA	18 ACETONAS	19 ALDEHIDOS	20 ALCOHOLES, GLICOLES	21 FENOLES, CRESOLES	22 CAPROLACTAMA EN S
01 ACIDOS MINER. NO OXID.		x			x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x					
02 ACIDO SULFURICO	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
03 ACIDO NITRICO		x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
04 ACIDOS ORGANICOS		x			x	x	x	x				x				x	x					
05 SUST. CAUSTICAS	x	x	x	x							x	x				x	x		x	x	x	x
06 AMONIACO	x	x	x	x						x	x	x	x			x	x		x			
07 AMINAS ALIFATICAS	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
08 ALCANOLAMINAS	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	x		x			
09 AMINAS AROMATICAS	x	x	x								x	x							x			
10 AMIDAS	x	x	x			x						x									x	
11 ANHIDRIDOS ORGANICOS	x	x	x		x	x	x	x	x													
12 ISOCIANATOS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										x		x
13 ACETATO DE VINILO	x	x	x			x	x	x														
14 ACRILATOS		x	x				x	x														
15 ALILOS SUSTITUIDOS		x	x				x	x														
16 OXIDO DE ALKILENO	x	x	x	x	x	x	x	x														
17 EPICLORHIDRINA	x	x	x	x	x	x	x	x														
18 ACETONAS		x	x				x															
19 ALDEHIDOS		x	x		x	x	x	x	x													
20 ALCOHOLES, GLICOLES		x	x		x		x					x										
21 FENOLES, CRESOLES		x	x		x		x			x												
22 CAPROLACTAMA EN SOLUC.		x			x		x					x										
GRUPOS DE CARGA																						
30 OLEFINAS		x	x																			
31 PARAFINAS																						
32 HIDROC. ACROMÁTICOS			x																			
33 MEZCLA DE HIDROCARB.			x																			
34 ESTERES		x	x																			
36 HIDROCARB ALOGENADOS			x																			x
37 NITRILOS																						
38 DISOLFURO DE CARBONO		x																				
39 SULFOLANO							x	x														
40 ESTERES DE GLICOL																						
41 ESTERES		x										x										
42 COMPUESTOS DE NITROG.		x	x																			
					x	x	x	x	x													
43 SOLUC. ACUOSAS VARIAS		x										x										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Ilustración 3. Compatibilidad entre cargas.

3.3 Diseño tipo de un buque quimiquero y contención del cargamento

3.3.1 Requerimientos de construcción y equipamiento

Los códigos de químicos a granel establecen normas internacionales para el diseño, construcción y equipamiento de los buques tanque quimiqueros, para minimizar el riesgo del propio buque, a su tripulación y al medio ambiente.

3.3.2 Disposición general estándar de un quimiquero

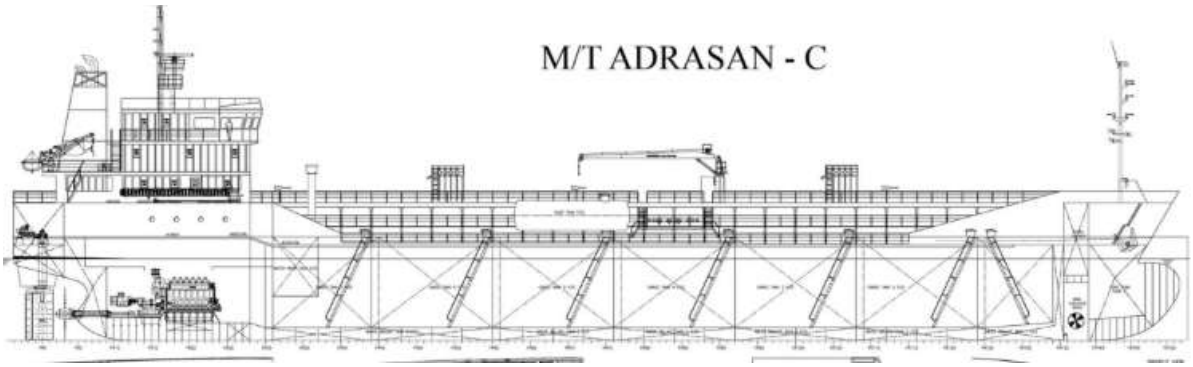


Ilustración 4. Disposición general estándar (perfil).

La segregación y separación de cargas y espacios son fundamentales para la seguridad en un buque que transporte sustancias nocivas, siendo que las mismas representan un riesgo para la vida humana, al buque y al medio ambiente.

Los tanques que contienen cargas, sujetas a los códigos, deberán ser segregados de los espacios de alojamiento, de servicio y de los espacios de máquinas, como también de los tanques de agua potable.

Los tanques de carga y slops están segregados del resto del buque mediante cofferdams, espacios vacíos, salas de bombas de carga y otros servicios, tanques vacíos o tanques de combustible, u otros espacios similares.

Las cargas, residuos de carga y mezclas que contengan cargas que reaccionan en forma peligrosa con otras cargas deberán:

Ser segregadas de aquellas otras cargas por medio cofferdam, espacio vacío, sala de bombas, tanques vacíos o tanques que contengan cargas que no se vean reactivas.

Tener un sistema de tuberías y bombeo separado.

Tener un sistema de venteo separado.

Las tomas de aire de habitabilidad, servicios y espacios de máquinas y las estaciones de control deben considerar distancias mínimas de seguridad, con respecto a las salidas de ventilación de los tanques de carga y espacios de manipulación del cargamento.

Los accesos al casillaje y a la sala de máquinas deben también cumplir con una distancia mínima de seguridad de 3 metros con respecto al mamparo de proa del casillaje.

Las ventanas y ojos de buey lindantes al área de carga y en las bandas de las estructuras de cubierta dentro de los 3 metros deberán ser de tipo fijo (no con apertura).

Las ventanas y puertas de la timonera pueden ser ubicadas dentro de los 3 metros desde el extremo de la superestructura o casillaje de cubierta, en la medida que su diseño asegure una rápida y eficiente estanqueidad a los vapores y gases.

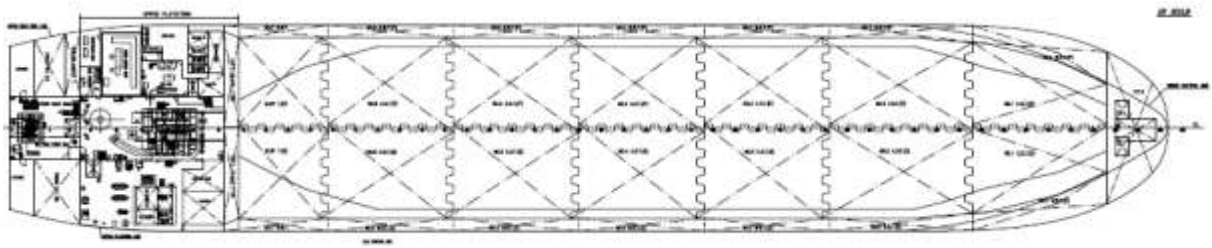


Ilustración 5. Distribución de tanques en buque proyecto.

Las salas de bombas o espacios similares normalmente transitados durante las operaciones, deberán tener un dispositivo de ventilación permanente que asegure suficiente movimiento de aire a través del espacio, a los fines de evitar la acumulación de vapores tóxicos o inflamables.

Estos sistemas son normalmente de extractores y lo mismos posibilitan la extracción desde todos los niveles del (alto, medio y bajo) del espacio.

Los motores eléctricos que impulsan los ventiladores deben estar situados fuera de los ductos de ventilación; Los mismos deben ser de construcción anti-chispas y deben tenerse suficiente repuestos a bordo para cada tipo de ventilador.

Deben montarse además, protecciones de no más de 13 mm de reticulado, en las aberturas exteriores de los ductos de ventilación.

Los espacios normalmente no transitados (doble fondos, cofferdams, túneles de tuberías), deben tener capacidad de ser ventilados para un ingreso seguro, y debe estar claramente señalizada la prohibición de ingreso sin la autorización de un oficial que certifique una atmósfera segura.

Los espacios en área de carga, deben tener accesos de dimensiones suficientes que permitan a una persona usando respirador autónomo y ropa de protección personal, ascender y descender cualquier escala sin obstrucciones. Inclusive poder elevar a una persona accidentada desde el fondo del espacio.

3.3.3 Contención del cargamento

El diseño de los tanques de carga debe asegurar el buen drenaje y la fácil limpieza del tanque, fundamentalmente por las siguientes razones:

- La reducción de los residuos y por lo tanto la protección del medio ambiente marino.
- Disminuir los remanentes de carga y evitar los reclamos comerciales y legales.

- Prevenir la contaminación en los cambios de producto.

Los tanques de cargamento, reciben diferentes denominaciones en cuanto a su ubicación estructural y en cuanto a la presión para la cual se encuentran diseñados:

- **Tanque independiente**: es el recipiente o contenedor de carga que no forma parte de la estructura del casco; el mismo está construido e instalado de manera de eliminar o minimizar los esfuerzos absorbidos como resultado del esfuerzo o movimiento de la estructura del casco. De esto se desprende que un tanque independiente no es esencial a la perfección estructural del casco del buque.

- **Tanque integral**: es recipiente o contenedor de la carga, el cual forma parte del casco y que recibe el esfuerzo en forma solidaria con la estructura del mismo, formando parte de la perfección estructural de la viga buque.

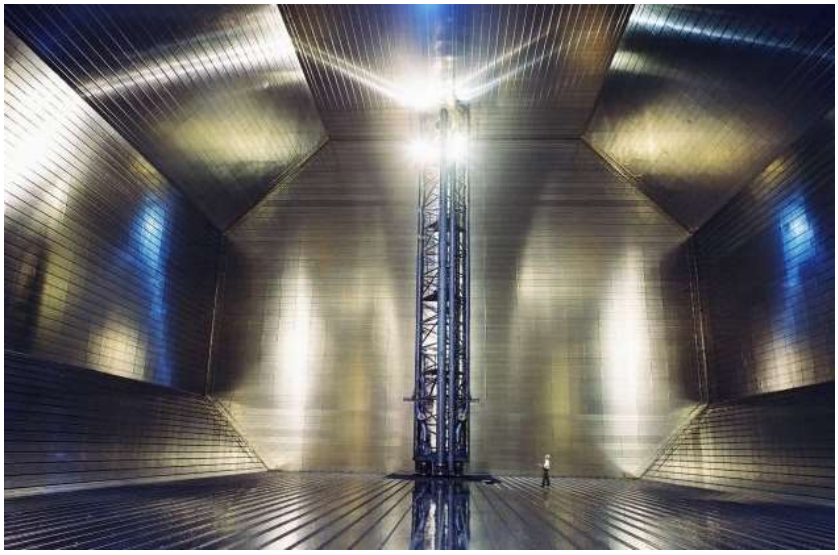


Ilustración 6. Tanque de carga.

- **Tanque de gravedad**: es aquel cuya presión de diseño no supera los 0.7 bar medida al tope del mismo. Un tanque de gravedad, puede ser independiente ó estructural. Su construcción y testeo están de acuerdo a las normas de Administración interviniente, tomándose en cuenta la temperatura de transporte y densidad relativa de la carga a contener.

- **Tanque de presión**: es aquel cuya presión de diseño supera los 0.7 bar. El mismo debe ser un tanque independiente y tendrá una configuración acorde a los diseños de buques para carga presurizadas según las normas de la Administración interviniente.

3.4 Tipos de buques y capacidad de supervivencia

Según el código IBC, su principio fundamental es indicar el tipo de barco adecuado según el grado de peligrosidad de los productos que transporte, para ello el riesgo definitivo de clasificación, es la contaminación ambiental que este pueda causar en caso de algún accidente. El código IBC establece los siguientes tipos de buques químicos:

- **Tipo 1:** Buque tanque químico que transporta productos que comprendan riesgos muy graves y exijan la adopción de medidas preventivas de rigor máximo. Características del Buque Tanque Químico tipo 1:

- Tanques independientes.
- Capacidad máxima de estanques de 1250 metros cúbicos.
- Carga de sustancias tipo A.
- 0 metros cúbicos de residuos.
- Distancia del tanque al costado en la línea de flotación de B/5. Distancia del tanque al plan de B/15.

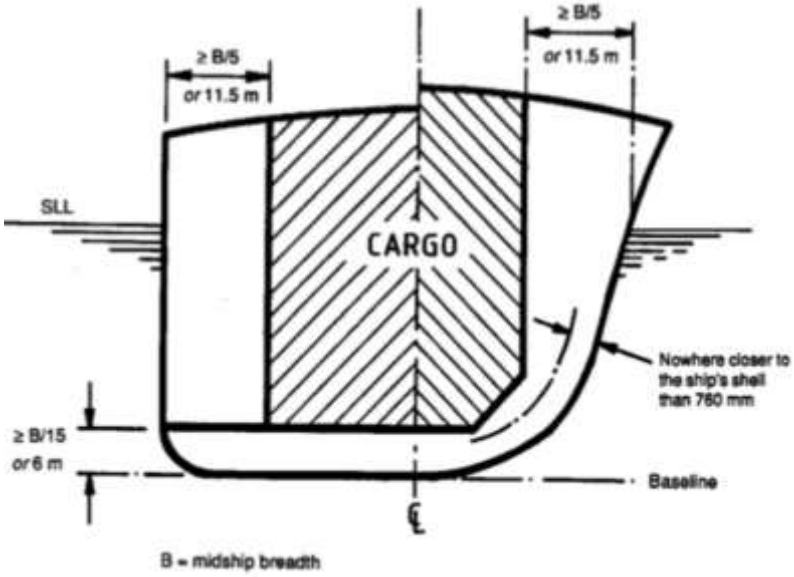


Ilustración 7. Dimensiones del doble casco exigido a buques de tipo 1.

- **Tipo 2:** Buque tanque químico destinado al transporte de productos que representen riesgos considerablemente graves y exijan la adopción de importantes medidas preventivas. Características del Buque Tanque Químico tipo 2:

  - Capacidad máxima de estanques de 3000 metros cúbicos.
  - Carga de sustancias tipo B y C.
  - 0.1 a 0.3 metros cúbicos de residuos.
  - Distancia del tanque al costado de 760 mm.
  - Distancia del tanque al plan de B/15.

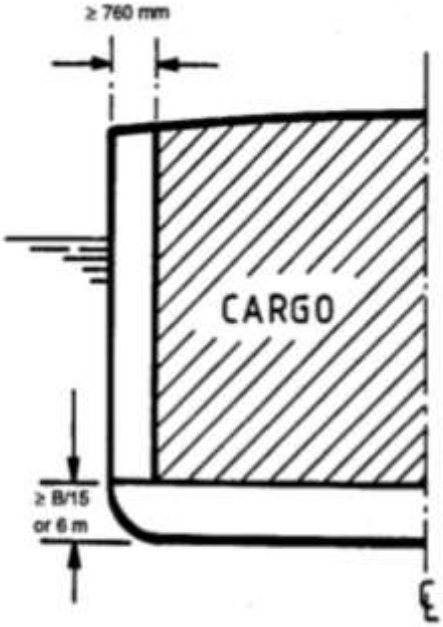


Ilustración 8. Dimensiones del doble casco exigido a buques de tipo 2.

- **Tipo 3:** Buque tanque químico que transporta productos que encierren riesgos suficientemente graves y requieran la adopción de medidas de contención moderadas. Características del buque químico tipo 3:

  - Dada la falta de prescripción, en el código IBC, en cuanto a la ubicación de los estanques de carga y limitación de su capacidad, se suelen utilizar petroleros para hidrocarburos.
  - Se pueden definir del tipo 3 a los petroleros convencionales, por consiguiente de un solo forro, pero con la diferencia de que tienen en general un grado de subdivisión de ciclo mayor.

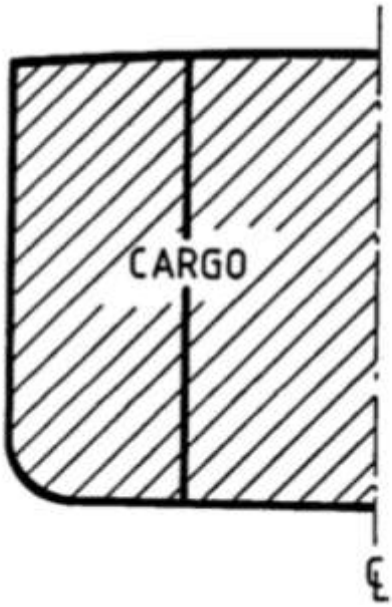


Ilustración 9. Casco simple exigido a los buques tipo 3

3.5 Materiales y revestimientos de los tanques de carga

Todos los materiales utilizados para la construcción de tanques, tuberías, válvulas y bombas del sistema de manipulación del cargamento deben ser resistentes a las cargas transportadas.

El acero dúctil es el material normal utilizado para la construcción de los B/T Quimiqueros (Mild Steel). El mismo es resistente a muchos de los químicos, pero como es propenso a la formación de herrumbre, no resulta adecuado para algunas cargas específicas, ya que las formaciones de óxido, dificultan el lavado de tanques y pueden contaminar la carga.

En orden de evitar la contaminación y obtener una superficie uniforme en las estructuras, los tanques de acero de los Quimiqueros, están siempre revestidos internamente con pinturas resistentes a diferentes tipos de químicos.

El revestimiento de los tanques de carga puede consistir en:

- Epoxy
- Resinas fenólicas
- Silicato de zinc
- Poliuretano
- Gomas de alta densidad
- Acero inoxidable

Actualmente no existen revestimientos (Coatings) adecuados para todas las cargas transportadas, por ello existen tablas de resistencia de revestimiento "Coating Resistance Tables", las cuales deben ser estrictamente respetadas al seleccionar el revestimiento del tanque a alojar el cargamento.

La mayoría de los quimiqueros modernos tienen en su sección de tanques dividida en tanques revestidos "Coated Tanks" y tanques de acero inoxidables "Stainless Steel Tanks".

Los tanques de acero inoxidable (Stainless Steel o S.S.) pueden ser:

- Sólidos: la pared del tanque es completamente de acero inoxidable
- Laminados: Consisten en una chapa de acero ductil
- Con un revestimiento de inoxidable de aproximadamente 2 mm de grosor.

El acero inoxidable es resistente a casi todos los químicos, pero indudablemente encarece la construcción de la nave, por lo que actualmente inclina la tendencia a la construcción de tanques laminados en lugar de sólidos.

El acero inoxidable puede no ser "inoxidable" o sufrir corrosión si no es mantenido correctamente; es por ello que tanto las instrucciones de mantenimiento de los tanques, indicadas por el constructor o armador, deben ser estrictamente seguidas por el personal del buque.

3.6 Bombas y sistemas de descarga

Los tipos de bombas más frecuentes utilizados a bordo de los quimiqueros son:

1. Cinéticas
2. Centrifugas
3. Especiales

De desplazamiento positivo:

1. Alternativas a pistón
2. Rotativas a tornillo

Las centrifugas pueden ser accionadas con motores eléctricos blindados si están en zonas de carga, o accionadas hidráulicamente, como por ejemplo, el caso de las bombas Framo.

Las ventajas que brindan las bombas centrifugas son:

- La simplicidad de su construcción
- No posee válvula interna en su estructura
- Su tamaño es relativamente pequeño, ya que la misma puede operar a alta velocidad.
- El bombeo es continuo, no existiendo pulsaciones.

Las desventajas son:

- La dificultad de construir una bomba con una alta presión diferencial por etapa. Para compensar se construyen bombas con varias etapas.
- Tienen una alta eficiencia solamente dentro de un campo limitado.
- Por lo general no tienen circuitos de auto cebado.
- Presentan dificultad para el bombeo de líquidos de alta viscosidad, excepto las que son de tipo sumergido.
- Las bombas de desplazamiento positivo, son efectivas, especialmente en el reachique de los tanques.
- Para ciertos cargamentos delicados, la limpieza de las bombas alternativas se torna complejo, llegando a ser necesario, desmontar accesorios para eliminar residuos de la carga transportada anteriormente.

Las principales bombas de carga emplazadas a bordo de los buques quimiqueros son en su mayoría del tipo centrifuga. Las mismas pueden ser de pocete profundo " Deepwell Type" (sumergidas) o estar situadas en sala de bombas.

La velocidad de descarga depende básicamente de:

- La presión en el tanque de tierra
- La contrapresión estática
- La contrapresión dinámica

Los sistemas de descarga de estos buques están designados para minimizar los remanentes de productos luego de descargar, razón por la cual el chupón de aspiración de las bombas se encuentra dentro de un pocete que asegura un reachique del tanque prácticamente completo.

En adición a las bombas principales, existen sistemas alternativos, como por ejemplo bombas portátiles hidráulicas.

3.7 Manipulación de la carga y operaciones de lastre

- El capitán y el oficial a calificado son los responsables por la seguridad del buque y todas las operaciones de carga y lastre.
- Todo el equipamiento de carga debe estar debidamente testeado previo al inicio de las operaciones.
- Los detalles de las operaciones de emergencia para la carga a ser manipulada debe estar disponible para los involucrados en las operaciones.

- El equipamiento de protección personal, de seguridad y de primeros auxilios debe estar alistado previo al inicio de las operaciones.
- Debe haber una correcta comunicación previa y durante las operaciones de transferencia de la carga.
- Se debe contar con una información completa y precisa de los datos del cargamento y de la secuencia operativa a desarrollar.
- En la ICS Data Sheet se encuentra a la información específica para cada uno de los productos a cargar, como así también los datos de seguridad en manipulación y transporte.
- No se iniciaran las operaciones hasta no contar con la información completa de todos los cargamentos a manipular.

3.8 Operaciones para la carga y descarga

3.8.1 Operaciones para la carga

Una vez conocido él o los productos a cargar es necesario conocer los criterios mencionados entre otros, tales como compatibilidad de las pinturas, compatibilidad de la carga, cargas reactivas con el aire, agua y auto-reactivas, compatibilidad con la última carga, calentamiento de la carga, además es común que en los buques tanque químicos se realicen operaciones simultaneas (carga, descarga, lastre, etc.), por lo que deberá estar por escrito y a la mano contenida la siguiente información:

- Legislación y reglamento.
- Rotación de puertos.
- Procedimientos de lavado previos a la carga.
- Propiedades de la carga.
- Revestimientos de los estanques.
- Mantención de carga durante el viaje.
- Cantidad y estanques a cargar
- Ullage de remate de los estanques.
- Secuencias de carga y descarga.
- Condición de estabilidad (movimiento de lastres).
- Manifold y circuitos.
- Sellado de válvulas y segregaciones.
- Temperatura de embarque y descarga.
- Frecuencias de comunicación internas y externas.
- Flujos de presión y remates.
- Medidas generales de seguridad.

3.8.2 Operaciones para la descarga

Estas son de mayor delicadeza que las operaciones de carga, pues requieren de mayor personal y equipo de la nave.

Una vez tomadas las muestras y aprobadas por la empresa contratada para el desembarque, se procede a alinear el circuito de descarga (planificación realizada por el primer oficial), a continuación se coordina con el terminal para comenzar la descarga.

Se debe tomar en cuenta en todo momento la presión de descarga, debiendo dejar en claro en la bitácora las presiones de descarga del manifold en forma horaria.

En el transporte de químicos el barrido eficiente de las sustancias es una de las condiciones esenciales, tanto en el aspecto operativo como en el reglamentario, teniendo en cuenta que cuando se van a descargar productos con un riesgo mayor de inflamabilidad, será necesario inertizar previamente los espacios de carga destinado al producto, de forma tal que se mantenga la presión positiva de gas inerte durante toda la faena con el fin de evitar que entre aire (oxígeno) al estanque.

Ilustración 10. Operación de transferencia de cargas (carga/descarga).

3.9 Operaciones de lastre y deslastre

Durante las operaciones el buque deberá mantenerse estable y con un trimado favorable. Para permitir en caso de que sea necesario una zarpada de emergencia.

En este tipo de buques por lo general la estabilidad es buena en condiciones normales debido al gran número de pequeños tanques de carga.

Los mismos pueden necesitar tomar lastre o deslastrar durante las operaciones para prevenir una escora excesiva. Para tal fin pueden estar equipados con tanques de lastre segregado (SBT). Los mismos tienen sus líneas, bombas y equipamiento independiente del sistema de carga.

Los tanques de carga se podrán usar como tanques de lastre, cumpliendo con los requerimientos del anexo II del MARPOL.

El oficial a cargo deberá contemplar que la distribución del lastre y de la carga no genere un esfuerzo al buque y no genere efecto de superficies libres que comprometan a la estabilidad del buque.

3.10 Operaciones de lavado de tanques

El objetivo principal del lavado de un estanque, es obtener el mejor resultado de limpieza en el menor tiempo posible, siempre manteniendo el control y evitando poner en riesgo la infraestructura de la embarcación y al mismo personal.

Se conoce a esta labor como una de las etapas más delicadas y riesgosa dentro de las operaciones de buque tanque químico, por la diversidad de productos y el peligro que implica no conocer los procedimientos de limpieza de cada una de ellas.

Existen publicaciones establecidas de organismos internacionales como la OMI, las cuales se deben tener de referencia y a la mano como la guía de limpieza “Taankcleaning Guide, Dr Verweys”, en la cual se puede determinar el tipo de limpieza que se debe hacer tomando en cuenta el producto descargado y el producto que se ha de cargar.

Antes de proceder a la eliminación de los residuos o sustancias, se deben de considerar los riesgos que comprometan la seguridad, en cuanto a su toxicidad, inflamabilidad, etc.

También se tendrán en cuenta las prescripciones del código en cuanto a las aberturas de los tanques y el procedimiento de ventilación. En general para limpiar el estanque de un buque tanque químico, primero se tratará de eliminar los residuos del último cargamento.

Una vez finalizada esta labor se procede a lavar el estanque aplicando los detergentes pertinentes para lograr el grado de limpieza que se desea, para después eliminar los detergentes utilizados en el lavado usando agua dulce. Esta también utilizada para eliminar los restos de agua de mar en caso de que se haya utilizado.

Finalmente se procede a secar el estanque teniendo en cuenta que no deben quedar residuos ni de agua ni de cualquier fibra que se haya utilizado durante el procedimiento, ya que esto podría estropear la próxima carga.

Los materiales más comunes con los que cuenta un buque tanque químico para realizar las faenas de limpieza son:

- Agua de mar (fría o caliente, con el uso de equipo butterworth).
- Agua dulce (fría o caliente, con el uso de maquina butterworth).
- Vapor de agua.
- Disolventes.
- Vapores de gases (tolueno, acetona, etc).

Habiendo finalizado el lavado de los tanques, se procederá también con las líneas de circuitos y las bombas.

Es imprescindible que cuando se utilicen agentes químicos para el lavado, se debe tomar la precaución de utilizarlos bajo las instrucciones del fabricante y teniendo conocimiento de su naturaleza (compatibilidad con la pintura del estanque, compatibilidad con la próxima carga, cantidad a utilizar, etc.).

Ilustración 11. Equipo butterworth, empleado para el lavado de tanques

Existen varios tipos de procesos de lavado de tanques utilizando productos químicos como son:

- Añadiendo directamente el producto al agua de lavado.
- Recirculación (se hace la mezcla con agua y el porcentaje de químico requerido para poder calentar la mezcla mediante el sistema de calefacción para posteriormente ser utilizada).
- Agente químico utilizado directamente sobre las paredes del estanque, por medio de bombas portátiles y con el uso de un equipo de protección apropiado.
- Método de flotación (consta de verter el agente químico sobre cierta cantidad de agua en el tanque, se procede a llenar los estanques hasta el techo y vaciarlos lentamente para que el agente químico quede adherido a las paredes y así posteriormente se procede a enjuagar y lavar con agua dulce cuando se requiera).
- Vaporización con solvente (del mismo modo anterior se vierte el agente químico en el agua para luego llenar los tanques hasta los serpentines con la finalidad de que se vaporice y adhiera a las paredes para finalmente proceder a enjuagar).

Hay otras consideraciones que se deben tomar en cuenta como por ejemplo que la temperatura del agua empleada para el lavado de tanques, la presión de vapor de los residuos y si es que podrán ser eliminados por los medios propios del buque, o cuando la autoridad no lo permita, deberán enviarse a tierra.

Se define como slop la mezcla de agua y residuos de la carga, (producto de las operaciones de lavado de los estanques), cualquier mezcla con residuos de las sentinas, de la sala de bombas ó de la sala de máquinas.

Los Slop son compartimentos que se emplean para transportar residuos de lavado y remanentes de carga, puede ser un estanque dedicado o u estanque cualquiera que se utiliza para estos fines de forma transitoria, sin embargo los buques tanques modernos están construidos con estanques dedicados para slop.

Un factor muy importante que se debe tener en cuenta es que los slops provenientes de distintos productos, pueden ser incompatibles, por lo tanto durante las operaciones de lavado y de acumulación de residuos se debe consultar la hoja de datos de seguridad de los productos proporcionada por la empresa y aprobada por los cuerpos legales pertinentes.

En cuanto a los residuos de las cargas, las aguas procedentes de la limpieza de los estanques que hayan contenido sustancias de las categorías A, B, C, D, no se pueden descargar al mar, mientras su concentración no sea la prescrita en el anexo II de MARPOL y se haya vaciado previamente a una estación en tierra.

El agua añadida posteriormente, podrá descargarse bajo condiciones específicas:

- Buque en ruta con velocidad de 7 Nudos.
- Efectuar descarga bajo línea de flotación.
- A 12 millas de la costa más próxima.
- Profundidad del agua mayor a 25 m.

Las bocas de descarga sumergidas han de estar situadas en la zona de los tanques de carga, cerca de la curva del pantoque y dispuestas de tal modo que se evite la entrada de residuos por las tomas de mar del buque.

Excepto en “Zonas Especiales” las que se entienden como extensiones de mar en las que por razones técnicas reconocidas internacionalmente por sus condiciones oceanográficas y ecológicas, y el carácter particular de su tráfico marítimo, se hacen adoptar procedimientos especiales obligatorios para prevenir la contaminación del mar por sustancias nocivas líquidas.

Son zonas especiales:

- La zona del mar Báltico

- La zona del mar Negro
- La zona de la Antártida

Todas las operaciones relacionadas con residuos de carga y slop deben quedar registradas en el Libro de Registro de Carga (Cargo Record Book).

3.11 Desgasificado y ventilación de tanques de carga

Los buques tanque químicos cuentan con una planta para la ventilación de los estanques, donde generalmente los ventiladores aspiran aire a través de una válvula y lo envían al manifold de cubierta a través de otra válvula de seguridad.

Para poder iniciar un proceso de ventilación se requieren las siguientes cuatro condiciones:

- Drenaje de todas las líneas del tanque.
- Escora y asiento del buque adecuados.
- Equipo de ventilación situado lo más cerca posible del pozo de aspiración.
- La ventilación continuará hasta que el oficial a cargo lo considere pertinente.

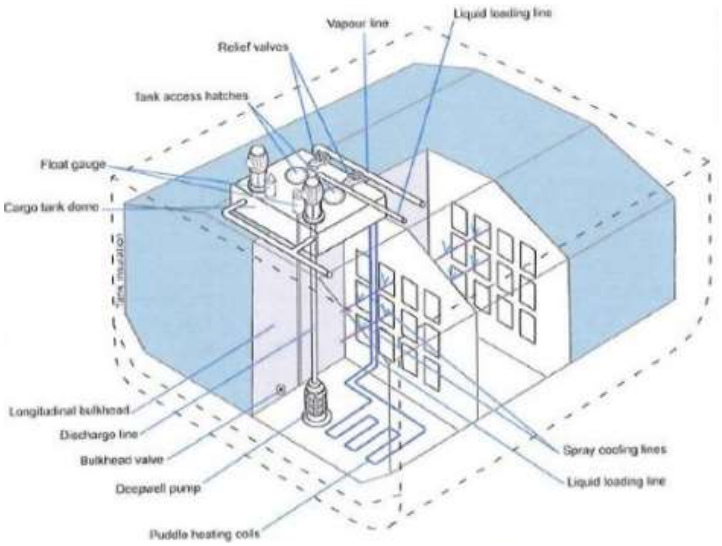


Ilustración 12. Elementos de un tanque de carga.

Para los procesos de desgasificación se debe tomar en cuenta:

- Mantener las tapas de los estanques cerradas hasta el momento de comenzar la ventilación.
- Los ventiladores deben ser capaces de dejar la atmósfera fuera de rango inflamable en el menor tiempo posible (esto de acuerdo a cada tipo de sustancia que estuvo cargada en el estanque), haciendo las mediciones de niveles de gas con el equipo adecuado cada breve periodo de tiempo.
- Las tomas de aire acondicionado y ventilación del caserío deben estar cerradas.
- Las válvulas de los sistemas que no se usen deben estar cerradas y aseguradas.
- En caso de usar ventiladores automáticos deben conectarse a cubierta para asegurar su continuidad eléctrica y situarse lo más lejos de la abertura de descarga.
- Se deben hacer mediciones de vapores cada cierto tiempo, en diferentes niveles.

- Al finalizar el desgasificado, se deben cerrar todas las aberturas, excepto la tapa del estanque.
- Finalmente se debe inspeccionar todo el sistema, tubos, válvulas y drenajes de los tubos.

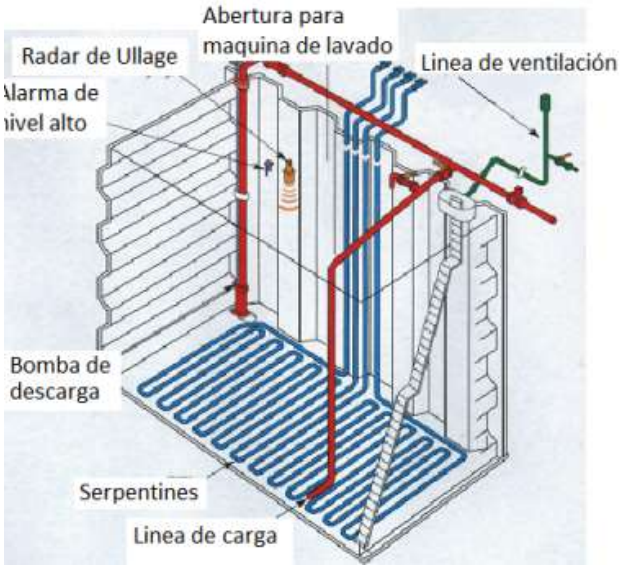


Ilustración 13. Sistemas de limpieza y lavado.

3.12 Intercambio buque/terminal

Para mantener una condición segura en la terminal es necesario:

- Cumplir con las reglas de seguridad
- Mantener una buena comunicación
- Lograr una buena cooperación entre el buque y la terminal
- El buque y la terminal tienen un trabajo mutuo de intercambiar la información necesaria y preparar las operaciones del muelle.

Entre las precauciones, procedimientos e información de seguridad que deben manejarse en las operaciones podemos citar:

1. *Mantener una comunicación clara y permanente con la terminal y autoridades portuarias.*
2. *Manejar una información precisa de la carga que se está manipulando.*
3. *Mantener actualizada la información inherente a la terminal.*
4. *Verificar regularmente estado de amarras.*
5. *Verificar el arreglo de los remolques de emergencia.*
6. *Mantener el equipo de incendio aislado. Bomba en marcha y Toma internacional aislada.*
7. *Mantener la planchada y /o escala real en condiciones seguras.*
8. *Mantener la iluminación y la señalización adecuada a las operaciones.*
9. *Prohibir el ingreso de personas no autorizadas.*
10. *Mantener y exigir regulaciones para fumar y políticas de alcohol y drogas*
11. *Mantener las notificaciones eventuales de seguridad y operativas.*
12. *Mantener las precauciones con respecto a embarcaciones acoderadas (luces-fuegos abiertos, operaciones de búnker, etc.).*

13. *Mantener sellados imbornales.*
14. *Atender las previsiones de tiempo, vientos fuertes, tormentas eléctricas, etc.*
15. *Mantener las condiciones de seguridad durante las maniobras de conexión de mangueras de carga, slop, lastre, etc*.

La responsabilidad de una operación se reparte entre el capitán del buque, el capitán de puerto y el responsable de la terminal

3.13 Buque proyecto

Las características principales del buque proyecto se muestran en la tabla siguiente:

Tipo de buque	Oil/Chemical tanker
Nombre	Forever Glory
Bandera	Hong Kong
Astillero	GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL
Tonelaje (GT)	29684
Desplazamiento (DWT)	50500
Eslora (m)	183.20
Manga (m)	32.20
Calado (m)	11.00
Puntal (m)	18.20
Motor principal	B&W 6S50MC-C MCR 9480 Kw 127 rpm
Velocidad	14.8 Kn
Nota de clase	CST Tanker for Chemicals and Oil ESP, SPM, EO, VCS-2, BWM, BIS, TMON
Año	2017

Ilustración 14. Buque proyecto (Forever FGlory).

Al ser un buque de nueva construcción, de menos de un año, ha resultado complejo describir el buque, no se obtuvo la información de sus equipos de cubierta, sistemas de carga y descarga, sistemas de navegación, instalación propulsora, línea de ejes, maquinaria auxiliar en cámara maquinas, otros servicios, equipos de fondeo, amarre y remolque, servicio contraincendios, instalaciones eléctricas, alumbrado, alarmas, habilitación, equipos de gobierno y maniobra, medios de salvamento, pintura, galvanizado, protección catódica y hélice.

Sin embargo, la decisión de elegir este tipo de buque ha sido por la gran cantidad de información obtenida y mínima necesaria para poder realizar este trabajo final de master, por otro lado, el estudio de estos buques son bastante interesantes debido a la complejidad de optimización a nivel estructural.

Por último, se incluirán como anexo los planos de disposición general, de la cuaderna maestra y disposición de tanques. Todo esto proporcionado en la página web del astillero GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL.

3.14 Bibliografía

[1] B. Tanque, “Capitulo iii: clasificación de buques gaseros. 5.-,” vol. 1, pp. 39–64, 1950.

[2] T. Y. T. D. E. Lucha and T. Marítimo, “Trabajo Fin de Grado FIREFIGHTING TECHNIQUES ABOARD VESSELS FOR LAND BASED FIRE,” 2012.

[3] Nino, “Gaseros.” .

[4] M. Mercante and D. D. E. L. Trámite, “COORDINACION GENERAL DE PUERTOS Y VENTANILLA UNICA Modalidad : Familiarización con Buque Tanque (Petrolero , Gasero y Quimiquero) CLAVE DE COFEMER :,” pp. 8–9, 2012.

[5] M. Mercante, “Ingenieria naval,” 2002.

[6] P. La, S. D. E. La, V. Humana, E. N. El, C. P. O. R. L. O. S. Buques, and Y. S. U. P. De, “No Title,” 2009.

[7] J. Rodrigo, D. L. Profesor, and D. D. Marítimo, “SEGURIDAD BUQUES QUIMIQUEROS (Maritime Safety at Chemical Tanks),” 2003.

[8] M. Ventura, “Tankers MSc in Marine Engineering and Naval Architecture Main Types of Tankers (1) Main Types of Tankers (2) Main Types of Tankers (3),” no. 1, pp. 1–43.

[9] P. Lic, G. Ricardo, and A. N. S. A, “tanque y su clasificación,” 2004.

[10] M. Belgrano, “Escuela nacional de nautica manuel belgrano,” 2007.

4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA CUADERNA MAESTRA POR DNV

4.1 Introducción

El objetivo consiste en realizar el escantillonado de la cuaderna maestra que hace referencia a la estructura del buque.

Será necesario escantillonar todos los elementos que participan en la resistencia longitudinal del buque, que serán todos aquellos que son continuos en el 40% de la eslora del buque de proa y popa de la sección media. Sólo se realizará el escantillonado de los elementos situados en la cuaderna maestra del buque que es la sección que corresponde con mayor área.

Una vez realizado el cálculo de los escantillones de los diferentes elementos, se realizará el cálculo del módulo resistente de la cuaderna maestra, comprobándose que los valores obtenidos en modulo e inercia son mayores que los exigidos por la Sociedad de Clasificación (Det Norske Veritas).

Por último, se procederá a comprobar que el buque cumple en cuanto a resistencia longitudinal, no superando los momentos flectores y fuerzas cortantes, en las diferentes condiciones de carga, a los máximos permitidos por la Sociedad de Clasificación.

4.2 Criterios de cálculo

4.2.1 Materiales empleados

Todo acero empleado en este buque es acero comercial Grado AH. Todos los elementos son de dimensiones y espesores comerciales, es decir no deberán hacerse a medida del astillero, dato especialmente importante a la hora de buscar suministradores e intentar conseguir los precios más ajustados. Toda la estructura del buque, es de acero de alta resistencia a la tracción y de calidad naval homologado por el DNV. Los materiales que se van a emplear en nuestro buque así como las características de los mismos se muestran a continuación

Características del acero	Símbolo	Valor
Limite elástico	σy	355 N/mm^2
Módulo de Young	E	206000 N/mm^2

4.3 Cálculo estructural

Todos los cálculos de la cuaderna maestra se han realizado siguiendo el reglamento de la sociedad de clasificación Det Norske Veritas.

4.3.1 Parámetros principales

Los parámetros principales del buque vienen determinados por la disposición general del buque.

4.3.1.1 Eslora de escantillonado

Tal y como se define en el Det Norske Veritas, correspondiente al Pt.3 Ch.1 Sec.1, B101), la eslora de reglamento (L), es la distancia, en metros, medida en

la flotación de carga de verano, desde la cara de proel de la roda hasta el extremo de popa del codaste.

Por tanto, la eslora de reglamento es:

$$L_{escantillonado} = 174{,}00\ m$$

4.3.1.2 Calado de escantillonado

Se dota al buque de un margen estructural para prevenir casos en los que en algún momento de la vida útil del mismo, este necesite de un mayor calado, bien sea por necesidades operativas o por accidente.

El calado de reglamento es:

$$T_{escantillonado} = 12{,}60\ m$$

4.3.1.3 Manga de escantillonado

En las características principales del buque no hace referencia a una manga de escantillonado, por tanto, la manga de trazado será el valor que adopte la manga de escantillonado.

$$B_{escantillonado} = 32{,}20\ m$$

4.3.1.4 Puntal de escantillonado

Del mismo modo que sucede en la manga de escantillonado, en las características principales del buque no hace referencia a un puntal de escantillonado.

$$D_{escantillonado} = 18{,}20\ m$$

4.3.1.5 Desplazamiento de escantillonado

Otro parámetro que proporciona las características principales del buque es el desplazamiento de escantillonado.

$$\Delta_{escantillonado} = 50500\ \mathrm{t}$$

4.3.1.6 Coeficiente de bloque

Correspondiente a las dimensiones de escantillonado. Se podría realizar el cálculo correspondiente, sin embargo, las características del buque nos aporta el valor del coeficiente de bloque.

$$Cb_{escantillonado} = 0.86$$

4.3.2 Momentos flectores. Valores mínimos dados por el reglamento.

Los momentos de flexión en aguas tranquilas, M_s, y las fuerzas cortantes en aguas tranquilas, Q_s, se calcularan a lo largo de la eslora del buque para las condiciones de carga de diseño.

Para estos cálculos, se toman que las cargas hacia abajo son valores positivos. La convención de signos de los momentos y las fuerzas cortantes son las que se muestran en la ilustración 1.

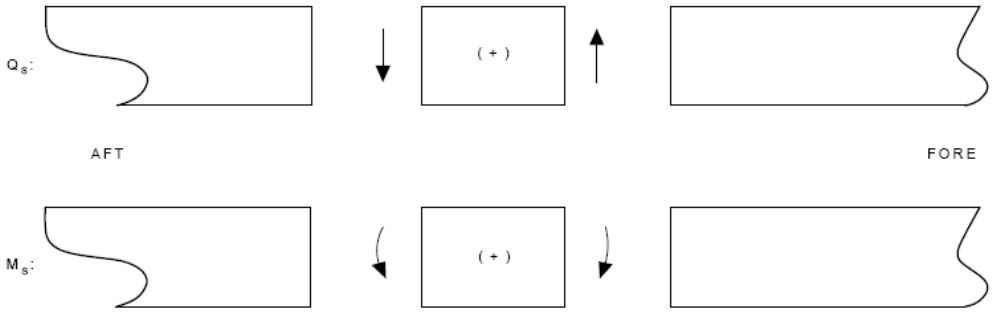


Ilustración 15. Criterio signos.

Fuente: DNV

https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/rulesship/2015-01/ts301.pdf

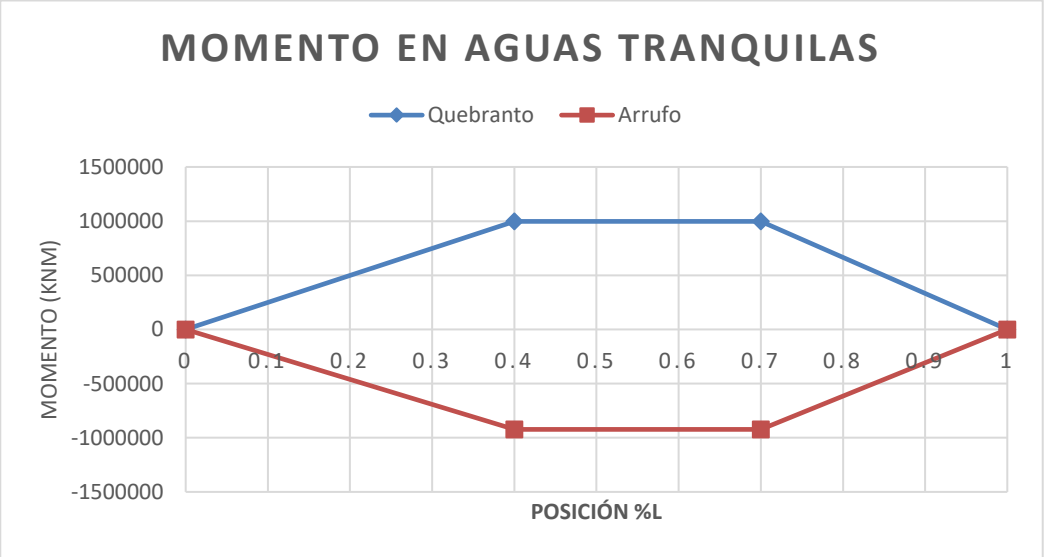
4.3.2.1 Momento flector en aguas tranquilas

Para buques de esloras entre 150 y 300 metros.

$$C_{WU} = 10{,}75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{\frac{3}{2}} = 10{,}75 - \left(\frac{300 - 174}{100}\right)^{\frac{3}{2}} = 9{,}336$$

$$M_{SO}(Hogging) = C_{WU} * L^2 * B * (0{,}1225 - 0{,}015 * C_b)$$
$$M_{SO}(Hogging) = 9{,}336 * 174^2 * 32{,}20 * (0{,}1225 - 0{,}015 * 0{,}86) = 997493\ KNm$$

$$M_{SO}(Sagging) = -0{,}065 * C_{WU} * L^2 * B * (C_b + 0{,}7)$$
$$M_{SO}(Sagging) = -0{,}065 * 9{,}336 * 174^2 * 32{,}2 * (0{,}86 + 0{,}7) = -922863\ KNm$$



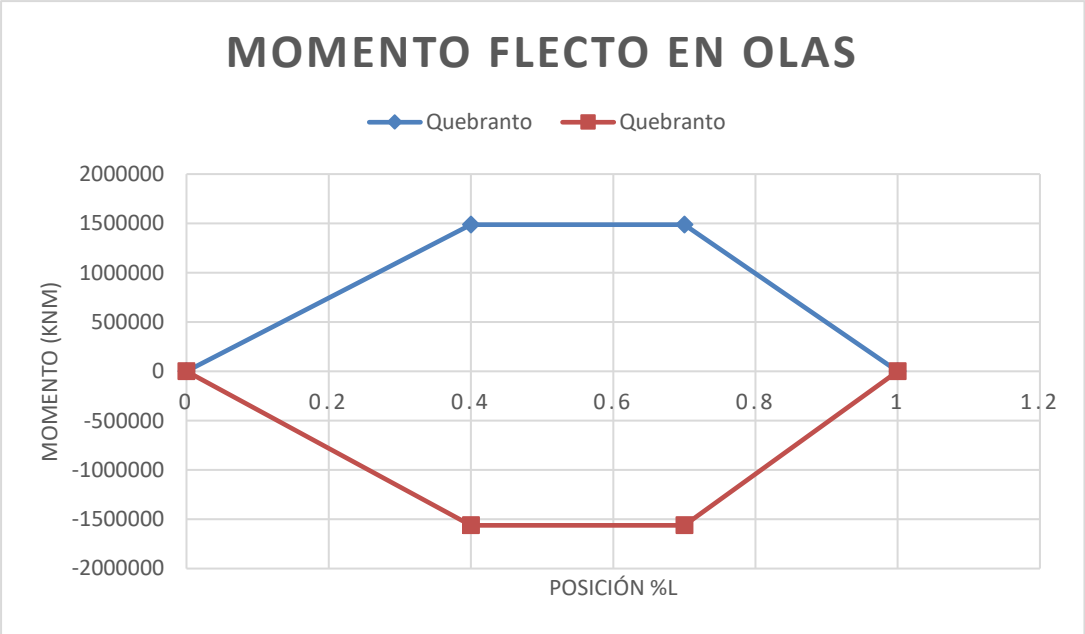
4.3.2.2 Momento flector en olas

$$M_{WO}(Hogging) = 0{,}19 * \alpha * C_{WU} * L^2 * B * C_b$$

$$M_{WO}(Hogging) = 0{,}19 * 1 * 9{,}336 * 174^2 * 32{,}20 * 0{,}86 = 1487138\ KNm$$

$$M_{WO}(Sagging) = -0{,}11 * \alpha * C_{WU} * L^2 * B * (C_b + 0{,}7)$$

$$M_{WO}(Sagging) = -0{,}11 * 1 * 9{,}336 * 174^2 * 32{,}2 * (0{,}86 + 0{,}7) = -1561767\ KNm$$



4.3.2.3 Fuerza cortante en aguas tranquilas

La fuerza cortante en aguas tranquilas dado en Pt. 3 Ch. 1 Sec. 5 B107 se calcula en función del momento flector de diseño en arrufo y quebranto y la eslora reglamentaria del buque L en metros mediante la siguiente expresión:

$$Q_{SO} = 5 * \frac{M_{SO}}{L}$$

Para conocer la fuerza cortante en aguas tranquilas en kN se debe multiplicar esta fuerza recién calculada por un coeficiente k_{sq}, según la distribución en eslora:

$$Q_S = k_{sq} * Q_{SO}$$

4.3.2.4 Fuerza cortante en olas

$$Q_{WN} = -0{,}3 * \beta * C_W * k_{qwn} * L * B * (C_b + 0{,}7)$$

$$Q_{WN} = 0{,}3 * \beta * C_W * k_{qwn} * L * B * (C_b + 0{,}7)$$

4.3.3 Módulo resistente y momento de inercia

El módulo mínimo (Pt. 3 Ch.1 Sec.5, C303) de la cuaderna maestra que tiene que cumplir con los requisitos de la resistencia longitudinal viene definido por la siguiente formula:

$$Z_O = \frac{C_{WO}}{f_1} * L^2 * B * (C_b + 0{,}7)$$

$$Z_O = \frac{9{,}336}{1} * 174^2 * 32{,}2 * (0{,}86 + 0{,}7) = 14{,}20\ m^3$$

No obstante, los requerimientos sobre el eje neutro transversal en condiciones de carga y lastre se calculan de este modo:

$$Z = \frac{|M_S + M_W|}{\sigma_1} * 10^3$$

$$Z = \frac{|997493 + 1561767|}{175} * 10^3 = 14.62\ m^3$$

Por otra parte, la inercia según el Pt.3 Ch.1. Sec.5, C401, se calcula:

$$I = 3 * C_W * L^3 * B * (C_b + 0{,}7)$$

$$I = (3 * 9{,}336 * 174^3 * 32{,}2 * (0{,}86 + 0{,}7))/100000000 = 74{,}11 m^4$$

4.4 Cálculo de la cuaderna maestra

Las cuadernas en la sección media, están espaciadas 700 mm, para conseguir así dar una adecuada resistencia estructural.

Y por otra parte la clara entre refuerzos primarios es de 2800 mm.

4.4.1 Estructura del fondo y doble fondo

- <u>Presión ejercida por el mar (Pt 3. Ch.1 Sec.4, C201)</u>

$$p_{dp} = p_l + 135 * \frac{y}{B * 75} - 1{,}2 * (T - z)$$

Donde:

- $k_s = 2\ entre\ 0{,}2L\ y\ 0{,}7, L$
- $k_f = \min(T; f) = \min(12{,}60; 6{,}2) = 6{,}2$

Siendo f, la distancia vertical desde la flotación a la cubierta medida en el costado de la sección transversal considerada.

- $y = \frac{16{,}10}{2} = 8{,}05\ m.$

Siendo y, la distancia horizontal desde crujía al punto de carga.

- $z = 0\ m.$
  Siendo z, la distancia entre el punto de carga y la línea base.
- $\rho = 1{,}025\ \frac{tn}{m^3}$
- $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$
- $p_l = k_s * C_W + k_f$

Por tanto, p_{dp}, es:

$$p_{dp} = (2 * 9{,}336 + 6{,}2) + 135 * \frac{8{,}05}{32{,}20 * 75} - 1{,}2 * (12{,}60 - 0) = 12{,}12\ \frac{kN}{m^3}$$

- <u>Aceleración vertical combinada (Pt 3. Ch.1 Sec.4, B600)</u>

$$a_v = \frac{k_v * g * a_0}{C_b}$$

Donde:

- $k_v = 0{,}7\ entre\ 0{,}3L\ y\ 0{,}6L$
- $C_v = 0{,}2. Minimo\ entre\ (\frac{\sqrt{L}}{50}, 2)$
- $C_{v1} = 1{,}09. Maximo\ entre\ (\frac{V}{\sqrt{L}}, 0{,}8)$
- $a_0 = 3 * \frac{C_W}{L} + C_v * C_{v1} = 0{,}385$
- $T_M = 2 + 0{,}02 * L = 5{,}48\ m$
- $p_0 = 25\ \frac{kN}{m^3}$

Por tanto, a_v, es:

$$a_v = \frac{0{,}7 * 9{,}81 * 0{,}385}{0{,}86} = 3{,}08\ \frac{m}{s^2}$$

- <u>Ángulo de balance</u>

$$\theta = \frac{50 * c}{B + 75}$$

- $k_r = 0{,}39 * B = 12{,}56$
- $GM = 0{,}12 * B = 3{,}86$

- $T_R = \frac{2*k_r}{\sqrt{GM}} = 12{,}77\ s$

- $c = (1{,}25 - 0{,}025 * T_R) = 1{,}12$

Por tanto, θ, es:

$$\theta = \frac{50 * 1{,}12}{32{,}2 + 75} = 0{,}52\ rad$$

- <u>Resultados presiones en el fondo y doble fondo, Pt 3. Ch.1 Sec.6, B200</u>

Siendo:

- $h_0 = 12{,}6\ m$, es la distancia vertical desde el calado hasta el punto de cálculo.

- $h_p = 19{,}28\ m$, es la distancia vertical desde el extremo del atmosférico hasta el punto de carga considerado.
- $h_b = 12{,}25\ m$, es la distancia vertical desde el punto de cálculo a la flotación de equilibrio en averías más alta.
- $b_t = 16{,}1\ m$, es la manga del tanque.
- $H = 18.33\ m$, es la altura del tanque.
- $\Delta p_{dyn} = 1{,}15$.
- $h_s = 16{,}06\ m$, es la distancia vertical desde el punto de carga hasta el techo del tanque excluyendo brazolas.

ESTRUCTURA	TIPO DE CARGA	PRESIONES	P ($\frac{kN}{m^3}$)
Fondo	Presión del mar	$p_1 = 10 * h_0 + p_{dp}$	138,12
	Presión neta en el tanque de carga o tanque profundo	$p_2 = \rho * (g + 0{,}5 * a_v) * h_s - 10 * T_M$	132,01
		$p_3 = \rho * g * h_s + p_0 - 10 * T_M$	153,21
Techo Doble Fondo	Carga líquida en el tanque superior	$p_9 = \rho * (g + 0{,}5 * a_v) * h_s$	186,81
		$p_{10} = \rho * g(0{,}67 * (h_s + \theta * b) - 0{,}12 * \sqrt{H * \theta * b_t})$	151,40
		$p_{11} = 0{,}67 * (10 * h_p + \Delta p_{dyn})$	115,32
		$p_{12} = \rho * g * h_s + p_0$	208,11
Pisos y Refuerzos	Presión en tanque limite Doble Fondo	$p_{13} = 0{,}67 * (10 * h_p + \Delta p_{dyn})$	130,04
		$p_{14} = \rho * g * h_s + h$	186,49
	Condición de Inundación	$p_{15} = 10 * h_b$	122,50

4.4.1.1 Altura del doble fondo

Según el DNV dado en Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 D101, la altura mínima no será menor de:

$$h = 1000 * \frac{B}{20} = 1000 * \frac{32{,}20}{20} = 1610\ mm$$

Como se puede comprobar, se diseñó una altura mínima de doble fondo de 2140 mm, por tanto, cumple según lo indicado por el reglamento.

4.4.1.2 Espesor de la traca de quilla

Para el cálculo del espesor de la traca de quilla, el DNV nos da una expresión dado en Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C200:

$$t = 6 + \frac{0{,}04 * L}{\sqrt{f_1}} + t_k$$

$$t = 6 + \frac{0{,}04 * 174}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 13{,}65\ mm$$

- $L = 174\ m$
- $f_1 = 1{,}28$, factor del material.
- $t_k = 1{,}5\ mm$, factor de corrección por corrosión.

Por tanto, tomamos un espesor de 14 mm.

Lo mismo sucede según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C200, que el ancho de la plancha no deberá ser menor que:

$$b = 800 + 5 * L = 800 + 5 * 174 = 1670\, mm$$

4.4.1.3 Espesor chapa de fondo

Para el cálculo del espesor de la traca de quilla, el DNV nos da una expresión dado en Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C301:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{153{,}21}}{\sqrt{153{,}6}} + 1{,}5 = 13{,}15\, mm$$

- $k_a = \left(1{,}1 - 0{,}25 * \frac{s}{l}\right)^2 = 1{,}05$
- $s = 0{,}70\, mm$, espacio entre refuerzos.
- $l = 2{,}8\, m$, clara entre refuerzos.
- $p = 153{,}51 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1 y\, p_3$.
- $\sigma = 120 * f_1\, \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $f_1 = 1{,}28$, factor del material.
- $t_k = 1{,}5\, mm$ factor de corrección por corrosión.

Por tanto, tomamos un espesor de 14 mm.

Lo mismo sucede según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C200, que el ancho de la plancha no deberá ser menor que

$$b = 800 + 5 * L = 800 + 5 * 174 = 1670\, mm$$

4.4.1.4 Espesor chapa pantoque

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C307, el espesor de las chapas de pantoque viene dado por:

$$t = \frac{\sqrt[3]{R^2 * l * p}}{900} + t_k$$

$$t = \frac{\sqrt[3]{2300^2 * 2800 * 150{,}24}}{900} + 1{,}5 = 15.28\, mm$$

Por tanto, tomamos un espesor de 16 mm.

- $p = 2 * p_1 - 10 * h_0 = 150{,}24 \frac{kN}{m^3}$
- $R = 2300\, mm$, radio de curvatura.
- $l = 2{,}8\, m$, clara entre refuerzos.

4.4.1.5 Espesor chapa techo del doble fondo

Para el cálculo del espesor la chapa del techo del doble fondo, el DNV nos da una expresión dado en Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C401:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{208{,}01}}{\sqrt{179{,}2}} + t_k = 14{,}07\, mm$$

- $k_a = \left(1{,}1 - 0{,}25 * \frac{s}{l}\right)^2 = 1{,}05$
- $s = 0{,}70\, mm$, espacio entre refuerzos.
- $l = 2{,}8\, m$, clara entre refuerzos.
- $p = 208{,}01 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_9\ y\ p_{15}$.
- $\sigma = 120 * f_1\ \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $f_1 = 1{,}28$, factor del material.
- $t_k = 1{,}5\, mm$ factor de corrección por corrosión.

Por tanto, tomamos un espesor de 15 mm.

4.4.1.6 Espesor quilla vertical

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C502, el espesor de la chapa de quilla vertical viene dado por:

$$t = 6 + \frac{0{,}04 * L}{\sqrt{f_1}} + t_k$$

$$t = 6 + \frac{0{,}04 * 174}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 13{,}65\ mm$$

Por tanto, el espesor que se considera es de 14 mm.

4.4.1.7 Longitudinales de fondo y pantoque

El DNV nos proporciona en el Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C701, una expresión para el cálculo del módulo mínimo:

- $w_k = 1$
- $s = 0{,}70\ mm$, espacio entre refuerzos.
- $l = 2{,}8\ m$, clara entre refuerzos.
- $p = 153{,}21 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1\ y\ p_3$.
- $f_{2b} = \frac{5{,}7 * |M_S + M_W|}{Z_O} * 10^3 = 1{,}02$
- $\sigma = 225 * f_1 - 130 * f_{2b} - 0.7 * \sigma_{db} = 136{,}51\ \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $\sigma_{db} = 20 * f_1 = 25{,}6 \frac{N}{mm^2}$, para buque de carga.
- $t_k = 1{,}5\ mm$ factor de corrección por corrosión.

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w_k}{\sigma}$$

$$Z = \frac{83 * 2{,}8^2 * 0{,}7 * 153{,}21 * 1}{136{,}51} = 511{,}21\ cm^3$$

Con estos datos, obtenemos un perfil de HP 280*11, en cambio el buque tiene en su diseño un perfil de 320*12.

4.4.1.8 Longitudinales de doble fondo

El DNV nos proporciona en el Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C801, una expresión para el cálculo del módulo mínimo:

- $w_k = 1$
- $s = 0{,}70\ mm$, espacio entre refuerzos.
- $l = 2{,}8\ m$, clara entre refuerzos.
- $p = 186{,}49 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_9\ y\ p_{15}$.
- $f_{2b} = \frac{5{,}7 * |M_S + M_W|}{Z_O} * 10^3 = 1{,}02$
- $\sigma = 225 * f_1 - 130 * f_{2b} - 0.7 * \sigma_{db} = 164{,}40 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $\sigma_{db} = 20 * f_1 = 25{,}6 \frac{N}{mm^2}$, para buque de carga.
- $t_k = 1{,}5\ mm$ factor de corrección por corrosión.

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w_k}{\sigma}$$

$$Z = \frac{83 * 2{,}8^2 * 0{,}7 * 186{,}49 * 1}{164{,}40} = 516{,}72\ cm^3$$

Con estos datos, obtenemos un perfil de HP 280*11, en cambio el buque tiene en su diseño un perfil de 300*12.

4.4.1.9 Espesor de las vagras

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C501, el espesor de las vagras viene dado por:

- $\sigma = 130 * f_1 = 166{,}4 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.

- $p = 186{,}49\ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_{13}\ y\ p_{15}$.

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}70 * \sqrt{186{,}49}}{\sqrt{166{,}4}} + 1{,}5 = 13{,}85\ mm$$

Por tanto, tomamos un espesor de 14 mm.

$$t = t_0 + \frac{k}{\sqrt{f_1}} + t_k$$

L altura mínima de las vagras y de la quilla vertical según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C301, el espesor de las vagras viene dado por:

$$h = 1000 * \frac{B}{20} = 1000 * \frac{32{,}20}{20} = 1610\ mm$$

Como la altura es de 2140 mm, cumplimos esa condición.

4.4.1.10 Espesor de las varengas

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 6 C502, el espesor de las varengas viene dado por:

$$t = t_0 + \frac{k}{\sqrt{f_1}} + t_k$$

$$t = 6 + \frac{0{,}02 * 174}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 10{,}60\ mm$$

Por tanto, tomamos un espesor de 11 mm.

4.4.2 Estructura del forro

- <u>Presión ejercida por el mar (Pt 3. Ch.1 Sec.4, C201)</u>

$$p_{dp} = p_l + 135 * \frac{y}{B * 75} - 1{,}2 * (T - z)$$

Donde:

- $k_s = 2\ entre\ 0{,}2L\ y\ 0{,}7, L$
- $k_f\ = \min(T; f) = \min(12{,}60; 6{,}2) = 6{,}2$

Siendo f, la distancia vertical desde la flotación a la cubierta medida en el costado de la sección transversal considerada.

- $y = 16{,}10\ m.$

  Siendo y, la distancia horizontal desde crujía al punto de carga.

- $z\ (por\ debajo\ de\ T) = 6{,}305\ m.\ \ y\ z\ (por\ encima\ de\ T) = 15{,}714\ m$
  Siendo z, la distancia entre el punto de carga y la línea base.

- $\rho = 1{,}025\ \frac{tn}{m^3}$

- $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$

- $p_l = k_s * C_W + k_f$

Por tanto, p_{dp}, es:

$$p_{dp} = (2 * 9{,}336 + 6{,}4) + \ 135 * \frac{16{,}10}{32{,}20 * 75} - 1{,}2 * (12{,}60 - 6{,}305) = 37{,}79\ \frac{kN}{m^3}$$

- <u>Aceleración vertical combinada (Pt 3. Ch.1 Sec.4, B600)</u>

$$a_v = \frac{k_v * g * a_0}{C_b}$$

Donde:

- $k_v = 0{,}7\ entre\ 0{,}3L\ y\ 0{,}6L$

- $C_v = 0{,}2. Minimo\ entre\ \ (\frac{\sqrt{L}}{50}, 2)$

- $C_{v1} = 1{,}09. Maximo\ entre\ \ (\frac{V}{\sqrt{L}}, 0{,}8)$

- $a_0\ = 3 * \frac{C_W}{L} + C_v * C_{v1} = 0{,}385$

- $T_M = 2 + 0{,}02 * L = 5{,}48\ m$

- $p_0 = 25\ \frac{kN}{m^3}$

Por tanto, a_v, es:

$$a_v = \frac{0{,}7 * 9{,}81 * 0{,}377}{0{,}86} = 3{,}00\ \frac{m}{s^2}$$

- Ángulo de balance

$$\theta = \frac{50 * c}{B + 75}$$

- $k_r = 0{,}39 * B = 12{,}56$
- $GM = 0{,}12 * B = 3{,}86$
- $T_R = \frac{2*k_r}{\sqrt{GM}} = 12{,}77\ s$
- $c = (1{,}25 - 0{,}025 * T_R) = 1{,}12$

Por tanto, θ, es:

$$\theta = \frac{50 * 1{,}12}{32{,}2 + 75} = 0{,}52\ rad$$

- Resultados presiones en el fondo y doble fondo, Pt 3. Ch.1 Sec.6, B200

Siendo:

- $h_0\ (por\ debajo\ de\ T) = 6{,}305\ m.,\ y\ h_0\ (por\ encima\ de\ T) = 3{,}104\ m$ es la distancia vertical desde el calado hasta el punto de cálculo.
- $h_p = 10{,}15\ m$, es la distancia vertical desde el extremo del atmosférico.
- $h_b = 5{,}84\ m$, es la distancia vertical desde el punto de cálculo al calado.
- $b_t = 16{,}1\ m$, es la manga del tanque.
- $H = 16{,}06\ m$, es la altura del tanque.
- $\Delta p_{dyn} = 1{,}15$.
- $h_s = 9{,}5\ m$, es la distancia vertical desde el punto de carga hasta el techo del tanque excluyendo brazolas.

ESTRUCTURA	TIPO DE CARGA	PRESIONES	P ($\frac{kN}{m^3}$)
Externas	Presión del mar por debajo del calado de verano	$p_1 = 10 * h_0 + p_{dp}$	100,84
Internas	Presión del mar por encima del calado de verano	$p_2 = (p_{dp} - (4 + 0{,}2 * k_s) * h_0)$ *Mínimo* $6{,}25 + 0{,}025 * L$	32,55
	Lastre, bunker o carga liquida en tanques laterales en general	$p_3 = \rho * g * h_s + p_0$	51,78
		$p_4 = \rho * g * h_s - 10 * h_b + p_0$	62,12
		$p_5 = 0{,}67 * (\rho * g * h_p + \Delta p_{dyn}) - 10 * h_b$	10,72
	Sobre el calado en lastre. Tanques b>0,48	$p_6 = \rho * g(0{,}67 * (h_s + \theta * b) - 0{,}12 * \sqrt{H * \theta * b_t})$	56,93

4.4.2.1 Espesor del forro exterior

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C101, el espesor mínimo de la plancha de costado viene dado por:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

- $\sigma = 140 * f_1 = 179{,}20 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 100{,}84 \ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1 \ y \ p_6$.

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{100{,}84}}{\sqrt{179{,}20}} + 1{,}5 = 10{,}25 \ mm$$

- $k = 0{,}02$

Y el espesor no será en ninguna región del buque menor que (Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C102):

$$t = 5 + \frac{0{,}02}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 9{,}58 \ mm$$

Y tampoco será menor que (Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C103):

$$t = 31 * (s + 0{,}7) * \left(\frac{B * T}{\sigma_f^2}\right)^{\frac{1}{4}} + t_k = 31 * (0{,}7 + 0{,}7) * \left(\frac{32{,}20 * 12{,}60}{315^2}\right)^{\frac{1}{4}} + 1{,}5 = 12{,}10 \ mm$$

Por tanto, tomaremos un espesor de la plancha de costado de 13 mm.

4.4.2.2 Longitudinales del forro externo

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C301, el módulo mínimo de los longitudinales del forro externo viene dado por:

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w_k}{\sigma}$$

- $\sigma = 160 * f_1 = 204{,}80 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 100{,}84 \ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de p_{13} y p_{15}.

$$Z = \frac{83 * 2{,}8^2 * 0{,}7 * 100{,}84 \ * 1{,}09}{204{,}80} = 244{,}48 \ cm^3$$

$$t = 4{,}5 + 5 + 1{,}5 = 11 \ mm$$

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C302; el espesor de la llanta no será inferior al valor anteriormente calculado.

Con estos datos, obtenemos un perfil de HP 200*11, en cambio el buque tiene en su diseño un perfil de 240*10.

4.4.2.3 Espesor de los longitudinales primarios del forro

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 D101, el espesor mínimo viene dado por:

- $k = 0{,}02$

$$t = 5 + \frac{k}{\sqrt{f_1}} + t_k = 5 + \frac{0{,}02}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 9{,}57 \ mm$$

Tomaremos un valor de 10 mm de espesor.

4.4.3 Estructura de cubierta

- $\rho = 1{,}025\ \frac{tn}{m^3}$
- $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$
- $q = 1{,}3$

- <u>Aceleración vertical combinada (Pt 3. Ch.1 Sec.4, B600)</u>

$$a_v = \frac{k_v * g * a_0}{C_b}$$

Donde:

- $k_v = 0{,}7\ entre\ 0{,}3L\ y\ 0{,}6L$
- $C_v = 0{,}2. Minimo\ entre\ \left(\frac{\sqrt{L}}{50}, 2\right)$
- $C_{v1} = 1{,}08. Maximo\ entre\ \left(\frac{V}{\sqrt{L}}, 0{,}8\right)$
- $a_0 = 3 * \frac{C_W}{L} + C_v * C_{v1} = 0{,}377$
- $p_0 = 25\ \frac{kN}{m^3}$

Por tanto, a_v, es:

$$a_v = \frac{0{,}7 * 9{,}81 * 0{,}377}{0{,}86} = 3{,}00\ \frac{m}{s^2}$$

- <u>Ángulo de balance</u>

$$\theta = \frac{50 * c}{B + 75}$$

- $k_r = 0{,}39 * B = 12{,}56$
- $GM = 0{,}12 * B = 3{,}86$
- $T_R = \frac{2 * k_r}{\sqrt{GM}} = 12{,}77\ s$

- $c = (1{,}25 - 0{,}025 * T_R) = 1{,}12$

Por tanto, θ, es:

$$\theta = \frac{50 * 1{,}12}{32{,}2 + 75} = 0{,}52\, rad$$

- <u>Resultados presiones en el fondo y doble fondo, Pt 3. Ch.1 Sec.8, B100</u>

Siendo:

- $h_0 = 0{,}76\, m$, es la distancia vertical desde el extremo del atmosférico hasta el punto de carga considerado.

- $b = 8{,}05\, m$, es la mayor distancia transversal entre el punto de carga y la esquina superior del tanque más distante de dicho punto b.
- $l_b = 24\, m$, distancia entre mamparos transversales.
- $b_t = 14{,}1\, m$, es la manga del tanque.
- $H = 17{,}4\, m$, es la altura del tanque.
- $\Delta p_{dyn} = 1{,}15$.
- $h_s = 0\, m$, es la distancia vertical desde el punto de carga hasta el techo del tanque excluyendo brazolas.

ESTRUCTURA	TIPO DE CARGA	PRESIONES	P ($\frac{kN}{m^3}$)
Cubierta intemperie	Cubierta de carga	$p_2 = (p_{dp} - (4 + 0{,}2 * k_s) * h_0)$	14,71
Cubierta como techo de tanque	Lastre, bunker o carga liquida	$p_7 = 0{,}67 * (\rho * g * h_p + \Delta p_{dyn})$	5,80
		$p_8 = \rho * g * h_s - p_0$	25,00
Cubierta entre tanques b> 0,4B	Equipo y maquinaria	$p_9 = \rho * g(0{,}67 * (h_s + \theta * b) - 0{,}12 * \sqrt{H * \theta * b_t})$	14,61
Cubierta en extremos de tanques con l> 0,1L	Acomodación en general	$p_{12} = \rho * \left(4 - \frac{L}{200}\right) * l_b$	77,00

4.4.3.1 Espesor de cubierta

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 D102, el espesor mínimo de la plancha de cubierta viene dado por:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

- $\sigma = 120 * f_1 = 153{,}60 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 77\ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1\ y\ p_6$.

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{77}}{\sqrt{153{,}60}} + 1{,}5 = 9{,}76\ mm$$

- $k = 0{,}02$, para buques con cubierta continua.

Y el espesor no será en ninguna región del buque menor que (Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 C104):

$$t = 5{,}5 + \frac{0{,}02}{\sqrt{1{,}28}} + 1{,}5 = 10{,}07\ mm$$

Por tanto, tomaremos un espesor de la plancha de costado de 11 mm

4.4.3.2 Espesor de la traca de trancanil

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C201, el ancho mínimo viene dado por:

$$b = 800 + 5 * L = 1670\ mm$$

Y el espesor no será menor que, Pt. 3 Ch. 1 Sec. 7 C202

- $t_1 = 13\ mm.$
- $t_2 = 14\ mm.$

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{13 + 14}{2} = 13{,}5\ mm$$

Luego tomaremos un espesor de 14 mm.

4.4.3.3 Longitudinales de cubierta

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 C300, el módulo mínimo de los longitudinales del forro externo viene dado por:

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w_k}{\sigma}$$

- $\sigma = 120 * f_1 = 153{,}60 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 77\ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1\ y\ p_{13}$.

$$Z = \frac{83 * 2{,}8^2 * 0{,}7 * 77\ * 1{,}09}{153{,}60} = 248{,}88\ cm^3$$

$$t = 4{,}5 + 5 + 1{,}5 = 11\ mm$$

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 C303; el espesor de la llanta no será inferior al valor anteriormente calculado.

Con estos datos, obtenemos un perfil de HP 200*12, en cambio el buque tiene en su diseño un perfil de 220*12.

4.4.3.4 Bao de la cubierta

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 C401, el módulo mínimo de los longitudinales del forro externo viene dado por:

$$Z = \frac{0{,}63 * l^2 * s * p * w_k}{f_1}$$

- $p = 77\ \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de $p_1\ y\ p_{13}$.

$$Z = \frac{0{,}63 * 2{,}8^2 * 0{,}7 * 77\ * 1{,}09}{1{,}28} = 226{,}70\ cm^3$$

$$t = 4{,}5 + 5 + 1{,}5 = 11\ mm$$

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 8 C303; el espesor de la llanta no será inferior al valor anteriormente calculado.

Con estos datos, obtenemos un perfil de HP 200*11.

4.4.4 Mamparos

- $\rho = 1{,}025\ \frac{tn}{m^3}$

- $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$

- <u>Aceleración vertical combinada (Pt 3. Ch.1 Sec.9, B600)</u>

$$a_v = \frac{k_v * g * a_0}{C_b}$$

Donde:

- $k_v = 0{,}7\ entre\ 0{,}3L\ y\ 0{,}6L$

- $C_v = 0{,}2. Minimo\ entre\ (\frac{\sqrt{L}}{50}, 2)$

- $C_{v1} = 1{,}09. Maximo\ entre\ (\frac{V}{\sqrt{L}}, 0{,}8)$

- $a_0 = 3 * \frac{C_W}{L} + C_v * C_{v1} = 0{,}377$

- $p_0 = 25\ \frac{kN}{m^3}$

Por tanto, a_v, es:

$$a_v = \frac{0{,}7 * 9{,}81 * 0{,}377}{0{,}86} = 3{,}00\frac{m}{s^2}$$

- <u>Ángulo de balance</u>

$$\theta = \frac{50 * c}{B + 75}$$

- $k_r = 0{,}39 * B = 12{,}56$

- $GM = 0{,}12 * B = 3{,}86$

- $T_R = \frac{2*k_r}{\sqrt{GM}} = 12{,}77\ s$

- $c = (1{,}25 - 0{,}025 * T_R) = 1{,}12$

Por tanto, θ, es:

$$\theta = \frac{50 * 1{,}12}{32{,}2 + 75} = 0{,}52\ rad$$

- <u>Resultados presiones en el fondo y doble fondo, Pt 3. Ch.1 Sec.9, B100</u>

Siendo:

- $h_p = 10{,}46\ m$, es la distancia vertical desde el extremo del atmosférico hasta el punto de carga considerado.

- $h_s = 9{,}7\ m$, es la distancia vertical desde el punto de carga hasta el techo del tanque excluyendo brazolas.

- $b = 16{,}10\ m$, es la mayor distancia transversal entre el punto de carga y la esquina superior del tanque más distante de dicho punto b.

- $l_b = 24\ m$, distancia entre mamparos transversales.

- $b_t = 14{,}1\ m$, es la manga del tanque.

- $H = 17{,}4\ m$, es la altura del tanque.

ESTRUCTURA	TIPO DE CARGA	PRESIONES	P ($\frac{kN}{m^3}$)
Mamparos de tanques en general	Lastre, combustible o carga liquida	$p_3 = \rho * (g + 0{,}5 * a_v) * h_s$	112,50
		$p_4 = 0{,}67 * (\rho * g * h_p + \Delta p_{dyn})$	71,24
		$p_5 = \rho * g * h_s - p_0$	122,54
Mamparos longitudinales así como mamparos transversales en los lados de tanques anchos		$p_6 = \rho * g(0{,}67 * (h_s + \theta * b) - 0{,}12 * \sqrt{H * \theta * b_t})$	108,20
Mamparos longitudinales		$p_7 = \rho * \left(3 - \frac{B}{200}\right) * b_b$	41,03
Mamparos transversales		$p_9 = \rho * \left(4 - \frac{L}{200}\right) * l_b$	77,00

4.4.4.1 Mamparo longitudinal de crujía

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C101, el espesor mínimo del mamparo correspondiente a la presión lateral será de:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

- $\sigma = 160 * f_1 = 204{,}8 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 122{,}54 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de p_1 y p_9.

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{122{,}54}}{\sqrt{204{,}8}} + 1 = 9{,}98\ mm$$

- $k = 0{,}03$, para mamparos longitudinales.

Y el espesor no será en ninguna región del buque menor que (Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C102):

$$t = 5 + \frac{0{,}03}{\sqrt{1{,}28}} + 1 = 10{,}61\ mm$$

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C104, en mamparos que están dentro del área de carga, el espesor no será menor que:

$$t = \frac{1000 * s}{120 - 3 * \sqrt{L}} + t_k = \frac{1000 * 0{,}7}{120 - 3 * \sqrt{174}} + 1 = 9{,}70\ mm$$

Por tanto, tomaremos un espesor de la plancha de costado de 11 mm.

4.4.4.2 Mamparo doble costado

Los mamparos de doble costado, son los que separan la zona de carga de los tanques de lastre laterales. Van situados a dos metros del forro exterior del casco. Se calcularan de igual manera que el mamparo longitudinal de crujía.

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C101, el espesor mínimo del mamparo correspondiente a la presión lateral será de:

$$t = \frac{15{,}8 * k_a * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k$$

- $\sigma = 160 * f_1 = 204{,}8 \frac{N}{mm^2}$, tensión admisible del material.
- $p = 122{,}54 \frac{kN}{m^3}$, mayor presión de p_1 y p_9.

$$t = \frac{15{,}8 * 1{,}05 * 0{,}7 * \sqrt{122{,}54}}{\sqrt{204{,}8}} + 1 = 9{,}98\, mm$$

- $k = 0{,}03$, para mamparos longitudinales.

Y el espesor no será en ninguna región del buque menor que (Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C102):

$$t = 5 + \frac{0{,}03}{\sqrt{1{,}28}} + 1 = 10{,}61\, mm$$

Según Pt. 3 Ch. 1 Sec. 9 C104, en mamparos que están dentro del área de carga, el espesor no será menor que:

$$t = \frac{1000 * s}{120 - 3 * \sqrt{L}} + t_k = \frac{1000 * 0{,}7}{120 - 3 * \sqrt{174}} + 1 = 9{,}70\, mm$$

Por tanto, tomaremos un espesor de la plancha de costado de 11 mm

4.5 Optimización numérica

En este capítulo se optimizará la estructura de la cuaderna maestra mediante el uso de Steiner. Bien por medio de la combinación de reducción de espesor de la plancha de acero, junto con la reducción de la separación de refuerzos inicial y disminuyendo el módulo de los perfiles u otras diversas formas.

Posteriormente se calcula el módulo de plancha asociada resultante y se compara con el modulo inicial mínimo que debe tener la estructura.

4.5.1 Doble fondo

Inicialmente se tiene un perfil HP 300*12 con una plancha de espesor 16 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	532.029

planchas para un perfil 300*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.6	70	0.8	112	89.6	23.8933333	4259.132067	4283.0254	162	1100	17815	**6.80**	**718.37**

$$Z_{min} < Z_{HP300*12} = 532{,}03 < 718{,}37\ cm^3$$

Ahora se van a plantear dos alternativas de optimización:

- HP280*13

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.56	425.623

planchas para un perfil 280*13												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.4	70	0.7	98	68.6	16.0066667	2936.340646	2952.347313	146	969	14212	**6.62**	**573.57**

$$Z_{min} < Z_{HP280*13} = 425{,}62 < 573{,}57\ cm^3$$

- HP300*11

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.6	456.025

planchas para un perfil 300*11												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.5	70	0.75	105	78.75	19.6875	3276.868054	3296.555554	149	976	16271	**6.56**	**652.45**

$$Z_{min} < Z_{HP300*11} = 456{,}02 < 652{,}45\ cm^3$$

De las dos propuestas que cumplen el módulo mínimo, tendremos que elegir la solución más “barata”, es decir, la opción que tiene más porcentaje de reducción de peso. Para eso con la semimanga de la plancha del doble fondo vemos cuantos refuerzos hay que incorporar.

Datos iniciales:

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Semimanga	11.78	m

300*12					
		G (HP300*12)	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.7	16	0.04979	0.016	11.78	2.276208

- HP280*13

280*13					
		G (HP280*13)	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.56	20	0.04828	0.014	11.78	**2.260222**

- HP300*11

300*11					
		G (HP300*11)	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimension V(m)**	**Dimension H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	18	0.04378	0.015	11.78	**2.175135**

HP300*12	**2.276 Tn**	**Peso inicial**
HP280*13	2.260 Tn	0,70% Reducción
HP300*11	2.175 Tn	4,44% Reducción

Por tanto la solución que más porcentaje de reducción o más porcentaje de optimización para el doble fondo es el HP300*11. Con una plancha de espesor de 15 mm y 18 refuerzos de HP 300*11, espaciados 600 mm a lo largo del doble fondo. Este espaciado se mantendrá para optimizar el fondo y la cubierta, eso supone unos cálculos más sencillos.

En cambio, para el costado y doble costado habrá que hacer la misma iteración que en el doble fondo.

4.5.2 Fondo

Inicialmente se tiene un perfil HP 320*12 con una plancha de espesor 14.5 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	556.978

planchas para un perfil 320*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.45	60	0.725	87	63.075	15.243125	4586.341887	4601.585012	141	1233	20138	8.73	886.38

$$Z_{min} < Z_{HP320*12} = 556{,}97 < 886{,}38\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP300*11,

planchas para un perfil 300*11												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.45	60	0.725	87	63.075	15.243125	3042.835228	3058.078353	131	954	15480	7.29	640.87

$$Z_{min} < Z_{HP300*11} = 556{,}97 < 640{,}87\ cm^3$$

Volvemos a comprobar cuanto porcentaje de optimización se ha obtenido con esta solución.

Datos iniciales:

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Semimanga	11.78	m

Inicial 320*12					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimensión V(m)	Dimensión H(m)	Peso total (ton)
0.7	9	0.05425	0.0145	6.65	1.24518625

Inicial 320*13					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimensión V(m)	Dimensión H(m)	Peso total (ton)
0.7	7	0.05745	0.0145	5.13	0.98607225

- HP300*11

300*11					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimensión V(m)	Dimensión H(m)	Peso total (ton)
0.6	18	0.04378	0.015	11.78	2.175135

HP320*12/ HP320*13	**2.231 Tn**	**Peso inicial**
HP300*11	2.175 Tn	2,51% Reducción

4.5.3 Cubierta

Inicialmente se tiene un perfil HP 220*12 con una plancha de espesor 14.5 y13 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	248.890

planchas para un perfil 220*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.45	70	0.725	101.5	73.5875	17.78364583	1315.886507	1333.670153	135	553	6278	4.10	324.39

$$Z_{min} < Z_{HP220*12} = 248{,}89 < 324{,}39\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP200*12,

planchas para un perfil 200*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.45	60	0.725	87	63.075	15.243125	761.4112804	776.6544054	117	448	4510	3.84	256.13

$$Z_{min} < Z_{HP200*12} = 248{,}89 < 256{,}13\ cm^3$$

Volvemos a comprobar cuanto porcentaje de optimización se ha obtenido con esta solución.

Datos iniciales:

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Semimanga	13.9	m

Inicial 220*12					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.7	6	0.0334	0.0145	3.6	**0.61017**

Inicial 220*12					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.7	14	0.0334	0.013	10.3	**1.518715**

- HP200*12

200*12					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	6	0.02328	0.014	3.6	**0.53532**

200*12					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	18	0.02328	0.0125	10.3	**1.4297275**

HP220*12	**2.128 Tn**	**Peso inicial**
HP200*12	1.965 Tn	7.68% Reducción

4.5.4 Costado

En el costado se parte de 3 secciones, la primera inicialmente se tiene un perfil HP 280*11 con una plancha de espesor 14,5 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	**Z mínimo ref. (cm^3)**
0.7	568.145

planchas para un perfil 280*11												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.5	70	0.75	105	78.75	19.6875	3007.815251	3027.502751	148	885	13340	5.99	587.47

$$Z_{min} < Z_{HP300*12} = 568{,}15 < 587{,}47\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP260*12,

planchas para un perfil 260*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.45	60	0.725	87	63.075	15.243125	3042.835228	3058.078353	131	954	15480	7.29	640.87

$$Z_{min} < Z_{HP300*11} = 556{,}97 < 640{,}87\ cm^3$$

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Longitud	2.448	m

260*12					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimensión V(m)	Dimensión H(m)	Peso total (ton)
0.6	3	0.04131	0.013	2.448	0.3737484

La segunda sección inicialmente se tiene un perfil HP 240*10 con una plancha de espesor 15 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	372.88

planchas para un perfil 240*10												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.5	101	0.75	151.5	113.625	28.40625	2037.76109	2066.16734	184	642	8495	3.49	385.99

$$Z_{min} < Z_{HP240*10} = 372{,}88 < 386\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP220*12,

Densidad	7.85	ton/m³
L	1	m
Longitud	7.7	m

220*12					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	11	0.0334	0.014	7.7	1.21363

La última sección inicialmente se tiene un perfil HP 200*11 con una plancha de espesor 14 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	**Z mínimo ref. (cm³)**
0.7	250.13

planchas para un perfil 200*11												
Dimensión V(cm)	**Dimensión H(cm)**	**Yi (cm)**	**Ai (cm²)**	**M=Ai*Yi (cm³)**	**I=Ai*Yi² (cm⁴)**	**I_P=**	**$I_{T.Element}$= I+I_P**	**∑A**	**∑M**	**∑It**	**Y_{EN}**	**Zperfil**
1.4	101	0.7	141.4	98.98	23.09533333	1073.911042	1097.006376	169	465	4825	2.75	258.69

$$Z_{min} < Z_{HP200*11} = 250.13 < 258.7\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP200*11,

Densidad	7.85	ton/m³
L	1	m
Longitud	1.585	m

200*11					
		G	**Plancha**		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	1	0.02566	0.013	1.585	0.18740925

HP280*11/ HP240*12/ HP200*11	**1.807 Tn**	**Peso inicial**
HP260*12/ HP220*12/ HP200*11	1.774 Tn	1.78% Reducción

4.5.5 Doble costado

En el doble costado se parte de 3 secciones, la primera inicialmente se tiene un perfil HP 280*11 con una plancha de espesor 14 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	568.145

planchas para un perfil 280*11												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.5	70	0.75	105	78.75	19.6875	3007.815251	3027.502751	148	885	13340	5.99	587.47

$$Z_{min} < Z_{HP280*11} = 568{,}15 < 587{,}47\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP260*12,

planchas para un perfil 260*12												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.4	60	0.7	84	58.8	13.72	2013.34981	2027.06981	125	770	10373	6.14	487.99

$$Z_{min} < Z_{HP260*11} = 485{,}26 < 488\ cm^3$$

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Longitud	2.1	m

260*12					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimension V(m)	Dimension H(m)	Peso total (ton)
0.6	2	0.04131	0.014	2.1	0.31341

La segunda sección inicialmente se tiene un perfil HP 240*10 con una plancha de espesor 15 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	319,612

planchas para un perfil 240*10												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.4	111	0.7	155.4	108.78	25.382	2147.599782	2172.981782	188	637	8602	3.39	390.88

$$Z_{min} < Z_{HP240*10} = 319{,}612 < 386\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP220*12,

Densidad	7.85	ton/m^3
L	1	m
Longitud	7.7	m

220*12					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	Kg/m	Dimensión V(m)	Dimensión H(m)	Peso total (ton)
0.6	11	0.0334	0.014	7.7	1.21363

La última sección inicialmente se tiene un perfil HP 200*11 con una plancha de espesor 14 mm, mediante Steiner obtenemos como resultante un módulo:

s	Z mínimo ref. (cm^3)
0.7	250.13

planchas para un perfil 200*11												
Dimensión V(cm)	Dimensión H(cm)	Yi (cm)	Ai (cm^2)	M=Ai*Yi (cm^3)	I=Ai*Yi^2 (cm^4)	I_P=	$I_{T.Element}$= I+I_P	∑A	∑M	∑It	Y_{EN}	Zperfil
1.4	101	0.7	141.4	98.98	23.09533333	1073.911042	1097.006376	169	465	4825	2.75	258.69

$$Z_{min} < Z_{HP200*11} = 250.13 < 258.7\ cm^3$$

La alternativa más óptima es el perfil HP200*11,

Densidad	7.85	ton/m³
L	1	m
Longitud	1.585	m

200*11					
		G	Plancha		
s (m)	Nº Ref.	**Kg/m**	**Dimensión V(m)**	**Dimensión H(m)**	**Peso total (ton)**
0.6	1	0.02566	0.013	1.585	0.18740925

HP280*11/ HP240*12/ HP200*11	**1.731 Tn**	**Peso inicial**
HP260*12/ HP220*12/ HP200*11	1.714 Tn	0.99% Reducción

4.6 Conclusiones

De forma conjunta, podemos concluir que el porcentaje de reducción de la propuesta que se consigue en la cuaderna maestra con respecto a la cuaderna inicial es un 3,64 %.

	Peso inicial(Tn)	**Peso final (Tn)**	**%**
	s=0.7 m	s=0.6 m	
Fondo	2.231	2.175	2.52%
Doble fondo	2.276	2.175	4.44%
Cubierta	2.129	1.965	7.70%
Costado	1.807	1.775	1.78%
Doble costado	1.732	1.714	0.99%
Total	10.175	9.805	3.64%

En el capítulo correspondiente, se tendrán dos modelos el inicial y la solución óptima, esta solución se analizará y se comprobara si cumple las tensiones y deformaciones obtenidas y no sobrepasan los límites establecidos por las sociedades de clasificación.

4.7 Bibliografía

[11] O. L. A. Enochsson, P. Dufvenberg, and P. Dufvenberg, “MASTER ’ S THESIS Concrete Slabs Designed,” 2001.
[12] M. Forss, “Workshop 2 New Modelling Managers,” vol. 1, no. 4, pp. 1–4, 2011.
[13] G. N. On, “GUIDANCE NOTES ON SAFEHULL FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HULL STRUCTURES,” vol. 2004, no. DECEMBER 2004, 2014.

5 MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL

5.1 Introducción

En un primer paso se creará la estructura del buque a partir del documento de la cuaderna maestra en el programa RHINOCEROS, creando así la superficie del casco resistente del buque, esta superficie del casco va a limitar todas las demás superficies ya que quedarán confinadas en su interior.

Una vez creada la superficie del casco mediante el plano de distribución general, y el de la cuaderna maestra, se dispone de suficiente información para la modelización de los costados, fondo, doble fondo, vagras por lo que simplemente hay que establecer las superficies mostradas en los planos mencionados para la modelización de las superficies internas del buque.

En última instancia se crearán los perfiles estructurales, también en el programa RHINOCEROS gracias a comandos propios que permiten a partir de poli-líneas ya creadas el desarrollo de superficies. Se asignarán las geometrías correspondientes a cada perfil estableciéndolo perpendicularmente a las poli-líneas creadas donde quedarán totalmente establecidos en la posición, inclinación y forma correcta.

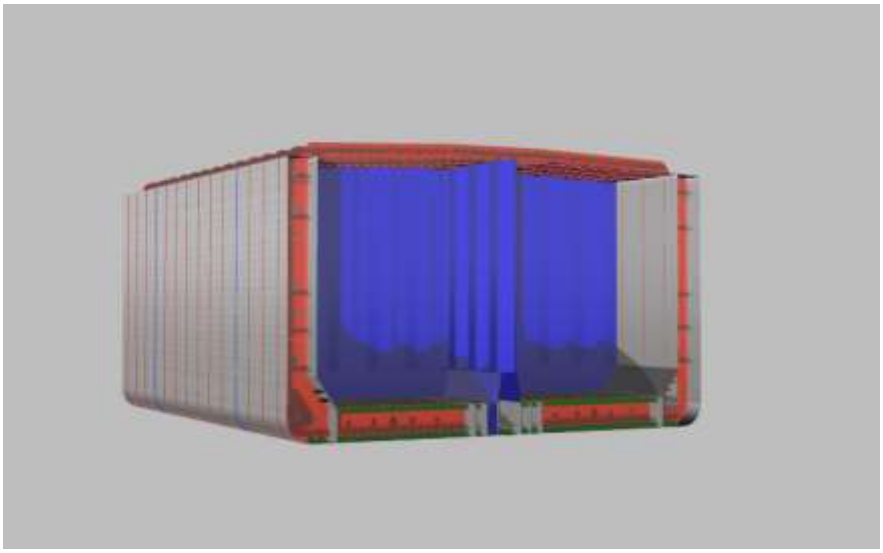


Ilustración 16. Cuaderna Maestra Quimiquero

Finalmente, tanto superficies interiores, casco exterior y perfiles, son exportados al programa ANSYS donde a las superficies se les asignarán las propiedades correspondientes quedando así la estructura del buque quimiquero perfectamente conformada y lista para el cálculo global mediante el análisis con elementos finitos.

5.2 Modelización en 2D

El punto origen se situará en el plano de crujía o plano de simetría del barco, en la línea base y respecto a la ubicación longitudinal. Además, y al tratarse de cascos metálicos, la superficie de trazado viene determinada por el canto exterior de las cuadernas maestras, denominándose trazado fuera de miembros. Se precisará información adicional para establecer los espesores de los distintos tramos a lo largo del casco (Información adjunta en el plano de la cuaderna maestra). Con toda esta información se procede a la inserción del plano de la cuaderna maestra, en este caso, nos interesa la vista frontal, es decir, las cuadernas. La vista se introduce como “bitmap” de fondo, una imagen proyectada en el fondo del programa para que podamos trabajar sobre ella sin que se deforme ni modifique.

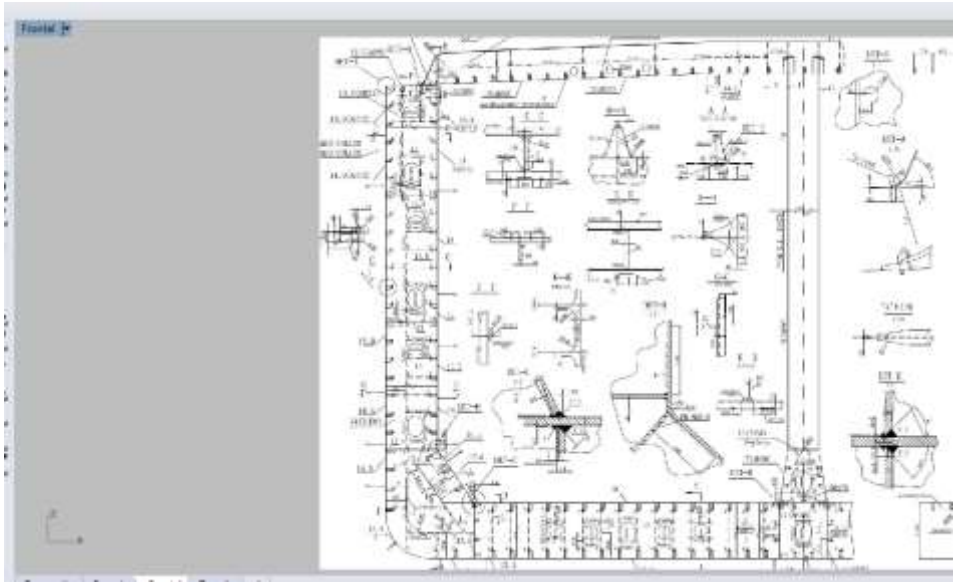


Ilustración 17. Vista frontal cuaderna maestra

Hay que destacar que el "bitmap" debe ser posicionado con gran exactitud desde el punto origen del buque al punto origen del programa para mayor facilidad de modelado, así como realizar un preciso escalado de la imagen para ajustarlo a las medidas exactas definidas en el plano de forma. Este ajuste de vital importancia se realizara con las siguientes funciones propias del RHINOCEROS.

Ilustración 18. Mover bitmap

Ilustración 19. Escalar bitmap

Una vez que está perfectamente establecida en su posición correcta, ya se puede proceder a la creación de poli-líneas en la vista de RHINOCEROS.

Este es uno de los primeros pasos a realizar en la modelización y se deben de introducir las poli-líneas con el menor número de puntos de control para que las definan correctamente y que posteriormente, al generar la superficie, genere las menores distorsiones y discontinuidades en la superficie ahorrando costes de alisamiento de superficies.

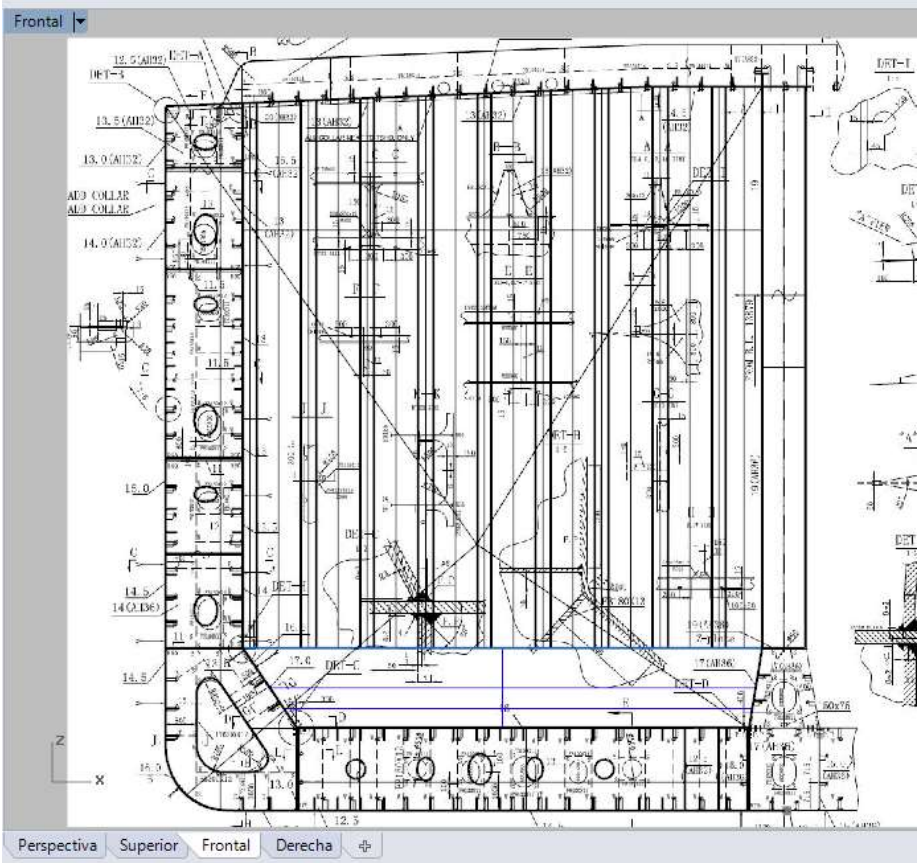


Ilustración 20. Poli-líneas dibujadas sobre la cuaderna maestra

Una vez que tenemos las poli-lineas dibujadas, el siguiente paso es “extruir” e ir dibujando la estructura externa y la modelización de la estructura interna.

5.3 Modelización estructura externa

El forro se modelará en cuatro partes, tal y como se indica en el plano de la cuaderna maestra.

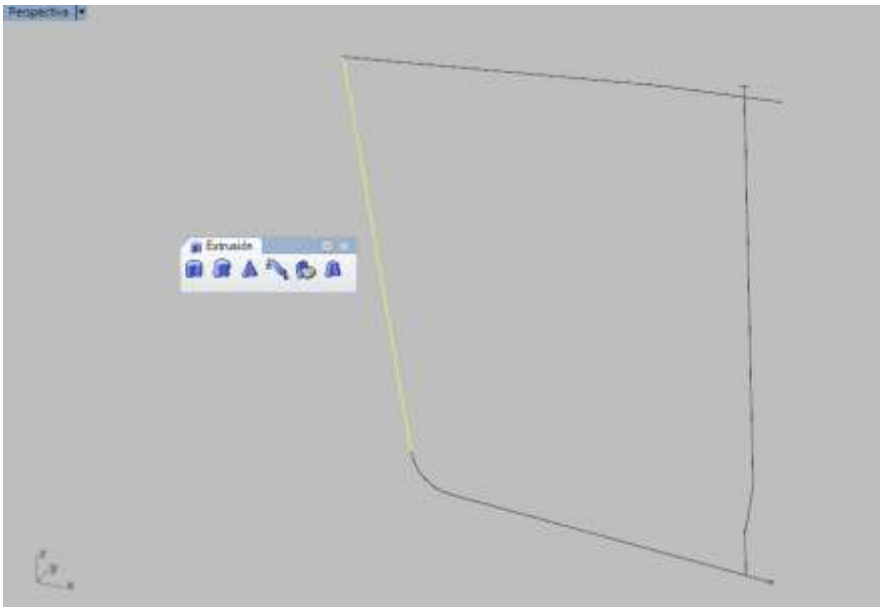


Ilustración 21. Extrusión del forro de costado

La primera traca corresponde con 2530 milímetros, la segunda traca con 4889 milímetros, la tercera traca con 4907 milímetros y la última traca, tiene 4209 milímetros.

Todas estas dimensiones en cuanto a profundidad tiene una dimensión de 39,6 metros o lo que es lo mismo, medio tanque, tanque y medio tanque, según lo que refleja las indicaciones.

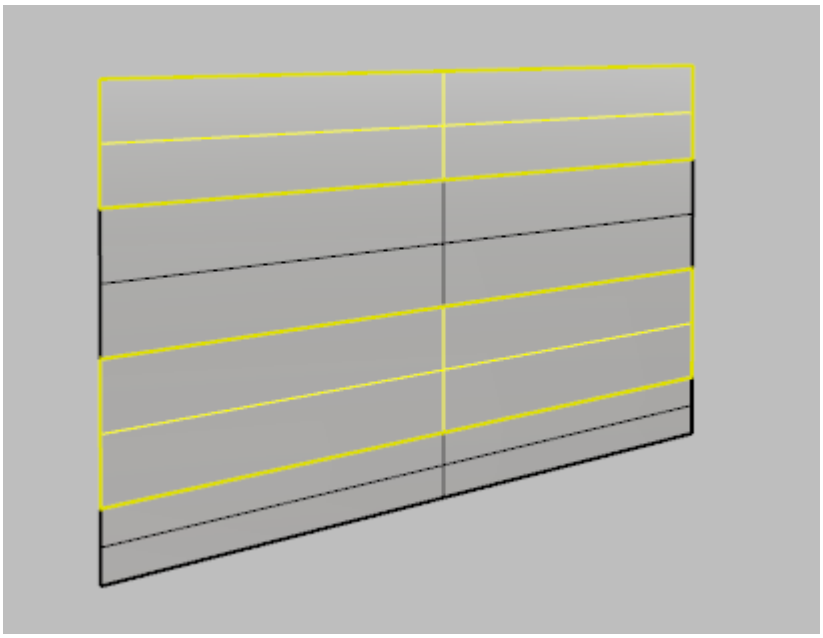


Ilustración 22. Tracas del forro de costado

El siguiente paso a diseñar es el pantoque junto con el fondo, donde el fondo consta de un ancho de 14160 milímetros. Con el contorno dibujado en el “bitmap”, se procede a su extrusión.

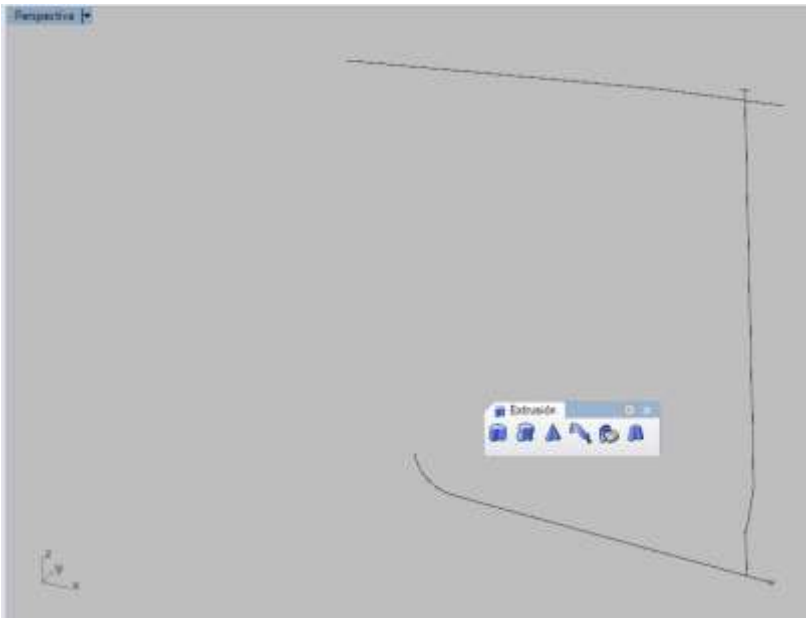


Ilustración 23. Extrusión del pantoque y fondo

De esta manera, extrayendo las poli-líneas, obtiene la siguiente forma como se puede ver en la ilustración 24.

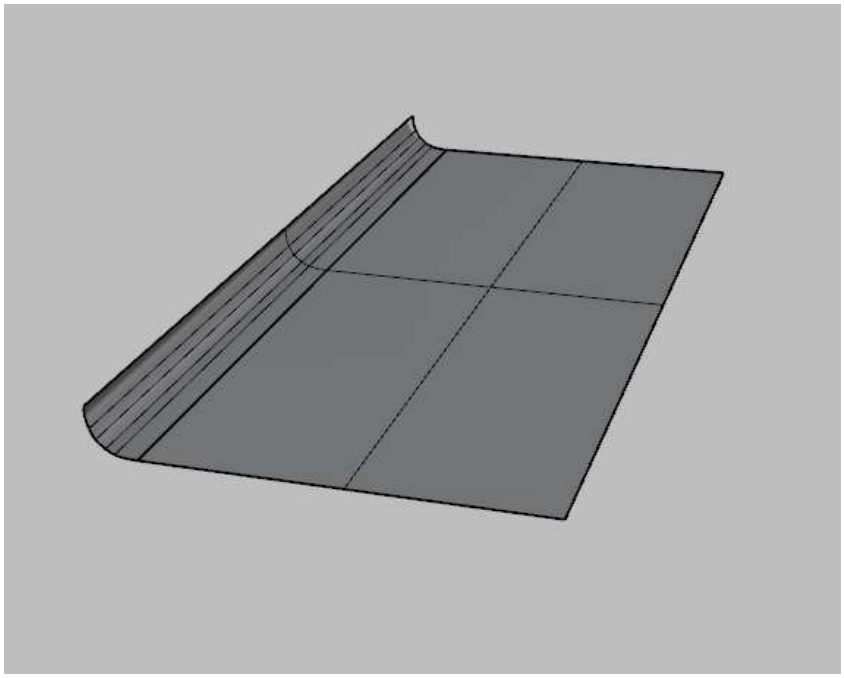


Ilustración 24.Pantoque y fondo

Por último, en cuanto a estructura externa queda por modelar la cubierta, consta de dos planchas de diferente espesor, donde la primera plancha inclinada tiene un ancho de 12565 milímetros y la segunda plancha hasta crujía es de 4140 milímetros. Por tanto, el modelo de la estructura externa es:

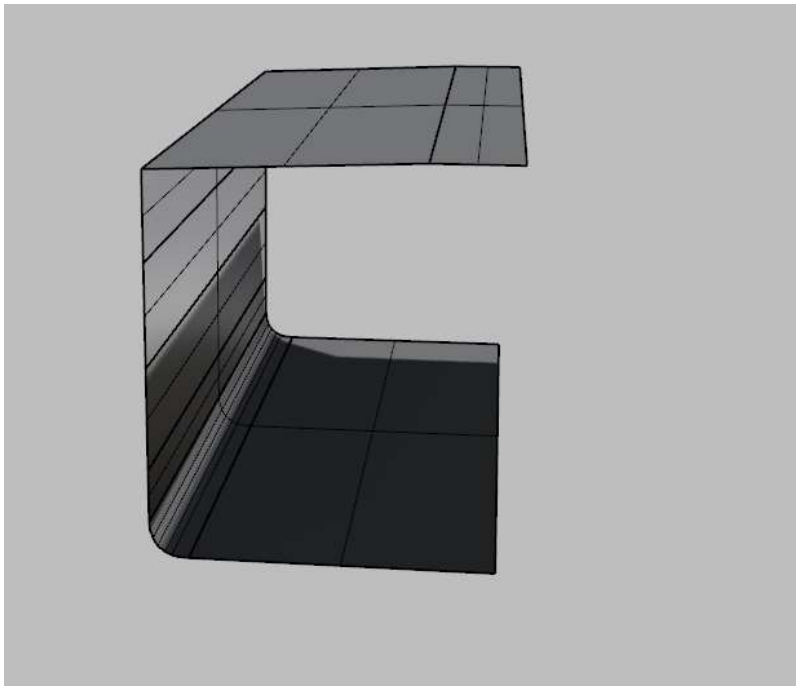


Ilustración 25.Estructura externa final

5.4 Modelización estructura interna

De igual modo, se sigue el mismo proceso que se hizo en la modelización de la estructura externa para el forro interno.

El forro interno se modelará en tres partes, tal y como se indica en el plano de la cuaderna maestra.

La primera traca, la superficie corresponde con 4890 milímetros, la segunda traca con 4907 milímetros, y la tercera traca con 4287 milímetros.

La plancha inclinada que une el doble costado y el doble fondo tiene una dimensión de 2483 milímetros.

Y por último, la dimensión del doble fondo es 11692 milímetros. Tanto el doble fondo y el doble costado están espaciados con respecto al costado y fondo una distancia de 2000 milímetros.

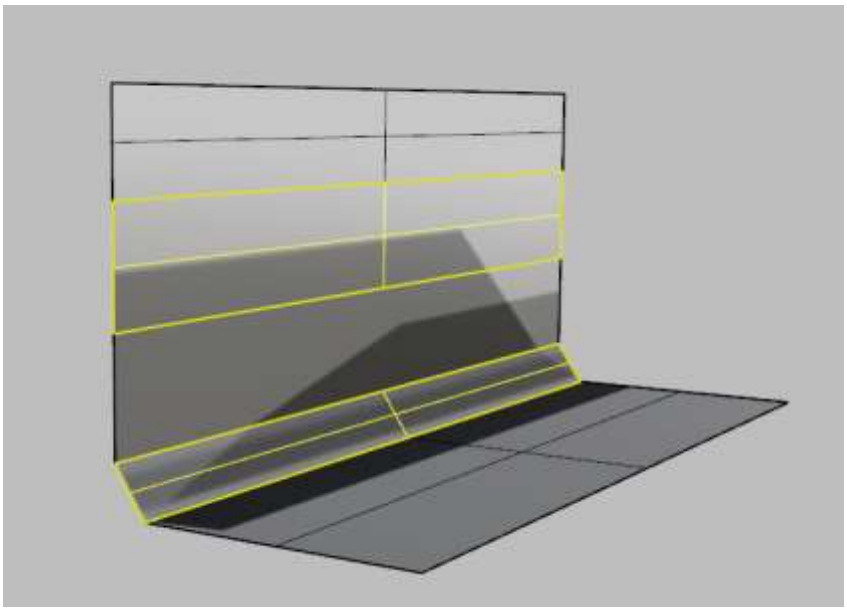


Ilustración 26. Estructura interna final

5.5 Modelización de los mamparos

La modelización de los mamparos sigue el diseño que se indica en el plano de la cuaderna maestra, donde indica el tamaño de la corruga e inclinaciones.

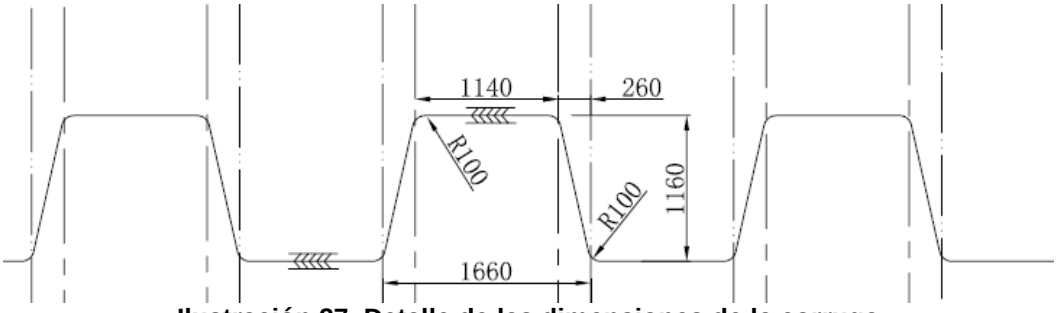


Ilustración 27. Detalle de las dimensiones de la corruga

Tanto los mamparos transversales que limitan los tanques y el mamparo longitudinal siguen el mismo patrón de dimensiones de la corruga.

La distancia absoluta de los mamparos transversales es de 13430 milímetros. Mientras que el mamparo longitudinal, como hemos comentado anteriormente, tiene una distancia de 39600 milímetros.

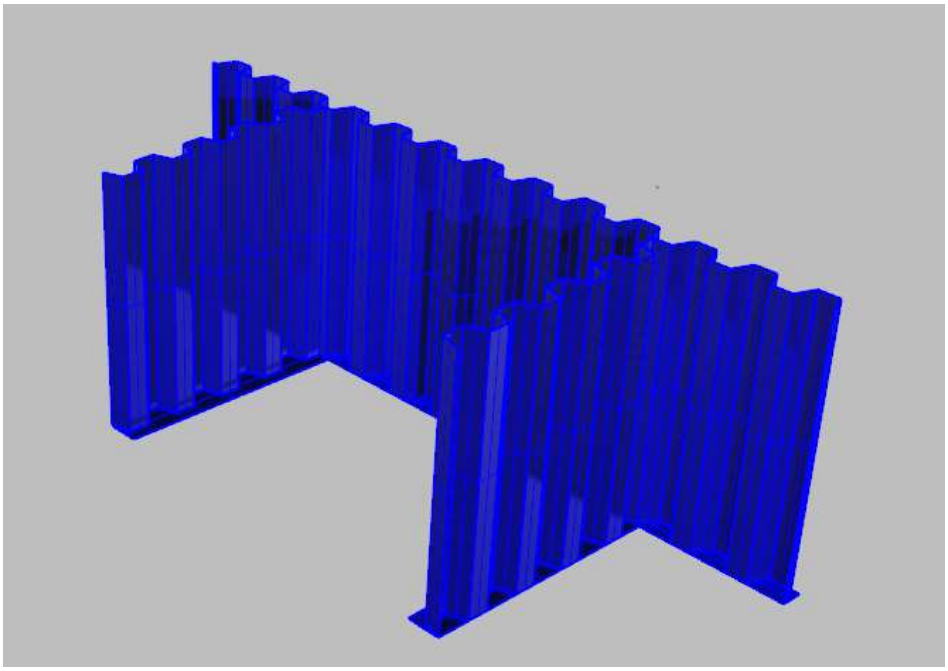


Ilustración 28. Modelo de mamparos corrugados

La transmisión de esfuerzos entre mamparo y el doble fondo se lleva a cabo por medio de las siguientes bases, compuesto por dos planchas verticales y una plancha horizontal para los mamparos transversales. Y una plancha horizontal y una oblicua-vertical para el mamparo longitudinal.

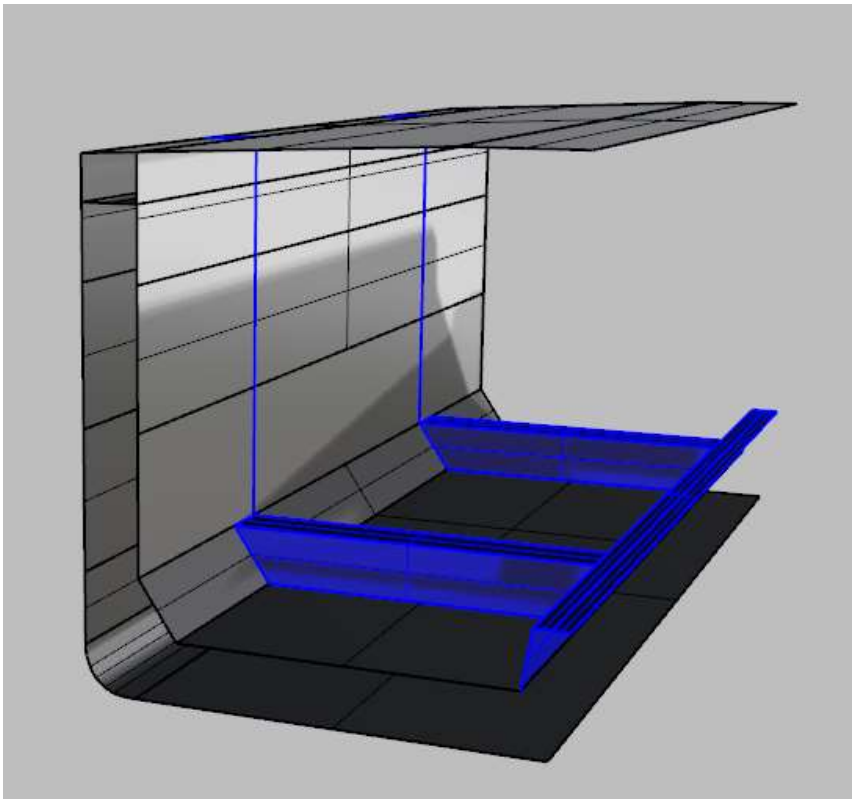


Ilustración 29. Detalle del apoyo de los mamparos corrugados

5.6 Modelización refuerzos primarios

De igual modo, se procede a modelizar los refuerzos primarios de cubierta, el procedimiento fue recortar con el forro de la cubierta los distintos refuerzos primarios para que vayan obteniendo la forma que se ve en la ilustración 30. Después, se recortó los refuerzos para obtener los aligeramientos.

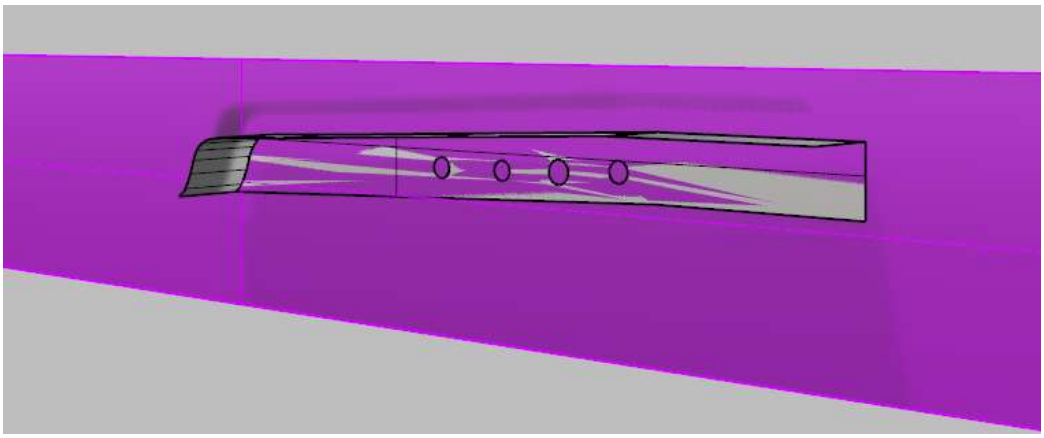


Ilustración 30. Recorte de cubierta con plano

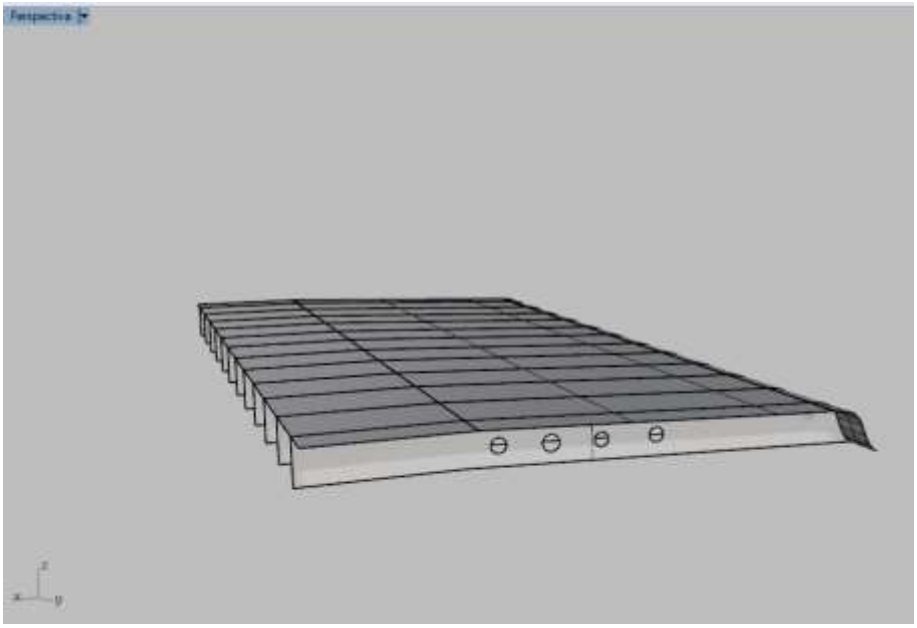


Ilustración 31. Resultado de los refuerzos primarios

Para el caso de las bulárcamas y varengas se realiza el mismo proceso que anteriormente, mediante planos de corte verticales y junto con la estructura externa previamente modelizada se obtendrán las diferentes estructuras, tal y como se puede visualizar en la ilustración 32.

Ilustración 32. Plano de corte vertical

Utilizando el comando de recortes del programa RHINOCEROS, se procede hacer los aligeramientos de los refuerzos tanto de la bulárcama como de las varengas.

Se incluyen también los palmejares y las vagras de la estructura interna del quimiquero quedando una estructura tal y como se refleja en la ilustración 33.

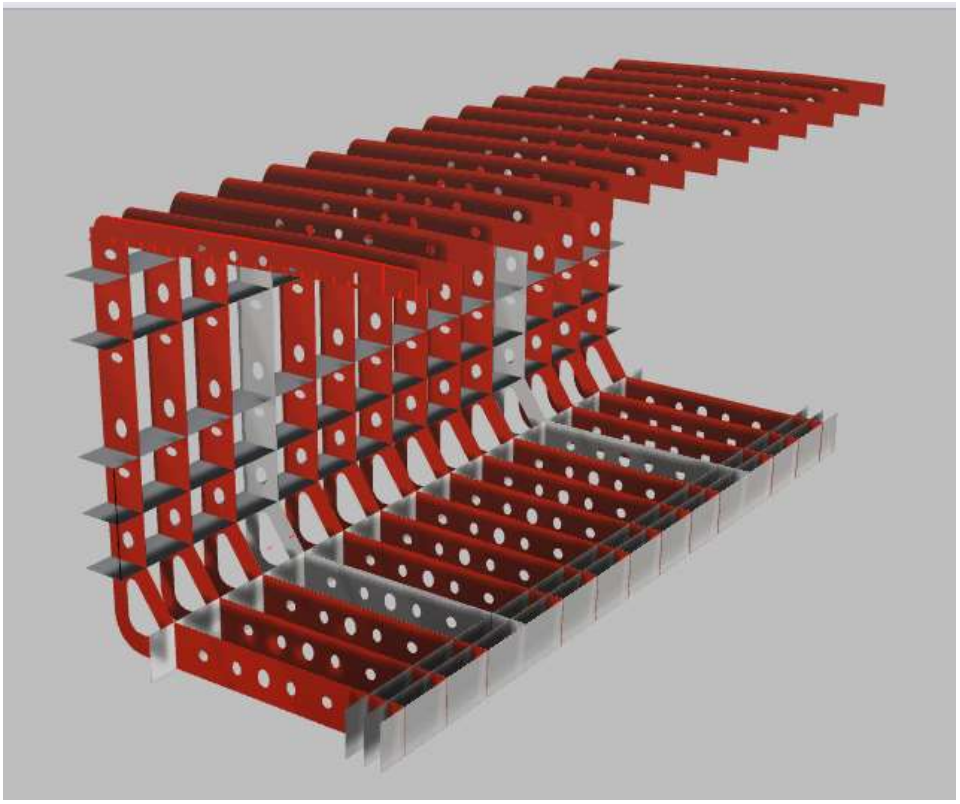


Ilustración 33. Estructura interna modelada

5.7 Modelización refuerzos secundarios

No se considerarán en el análisis global elementos los perfiles secundarios como son los contretes, escuadras… Para la modelización de los perfiles, se remitirá al plano de la cuaderna maestra, donde se muestra cada uno de los distintos tipos de perfiles estructurales que se deben de representar en el análisis global.

Uno de los métodos que se utilizarán para la creación de los perfiles, es el de la intersección de los planos con las superficies correspondientes. Al realizar la línea (como intersección con la superficie) a la que pertenecerá el perfil estructural se asegura el contacto del propio perfil estructural con las superficies. Es una forma de evitar los problemas de contactos y de uniones en un futuro una vez se trabaje con el programa ANSYS. Básicamente hay que crear los planos en la posición de los perfiles y obtener la línea de corte con las superficies que se deseen para obtener así las líneas representativas de los perfiles estructurales.

No se modelizaran en tres dimensiones si no que se realizaran como elementos laminas los cuales se les asignara posteriormente un espesor de malla de acuerdo a las dimensiones del perfil.

Conocidos los perfiles estructurales que se van a instalar en el buque, hay que modelarlos como elementos superficie ya que si fuesen introducidos como elementos estructurales en 3D tendría un coste operacional muy grande aumentando la necesidad de trabajar con grandes servidores de procesado. Es suficiente si se modela como elemento superficies y posteriormente se asigna un espesor al mallado se obtendrán resultados satisfactorios a un menor coste de procesado.

Por tanto, no se va a modelar los bulbos si no que se buscará un perfil equivalente en forma de L o pletina, del mismo modulo o superior que el bulbo determinado.

Para los refuerzos secundarios de cubierta, se dibuja la pletina con una dimensión de 250 milímetros, ya en ANSYS se le dará el espesor correspondiente para que tenga el mismo modulo correspondiente al bulbo.

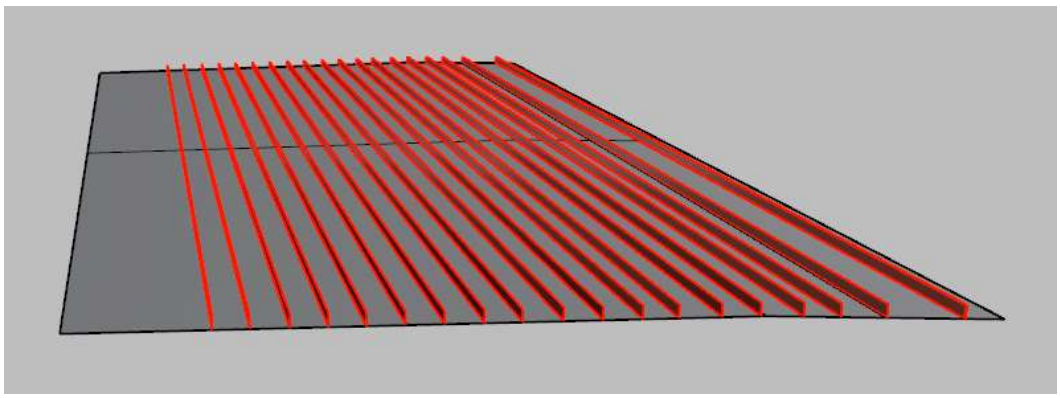


Ilustración 34. Refuerzos secundarios de cubierta

Para los refuerzos secundarios de fondo, se dibuja la pletina con una dimensión de 350 milímetros, al igual que se ha dicho anteriormente, en ANSYS se le dará el espesor correspondiente para que tenga el mismo modulo correspondiente al bulbo.

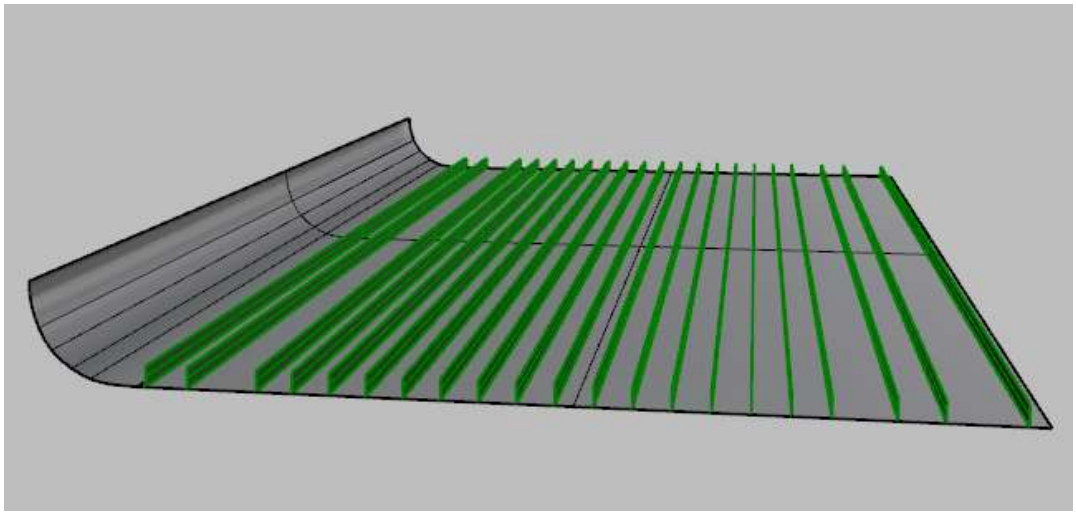


Ilustración 35. Refuerzos secundarios de fondo

Para los refuerzos secundarios de doble fondo, se dibuja la pletina con una dimensión de 350 milímetros.

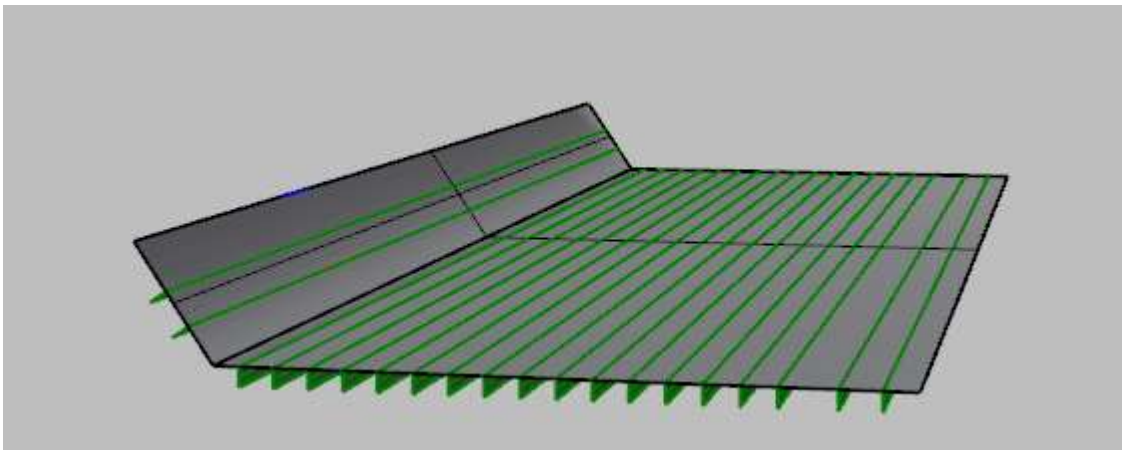


Ilustración 36. Refuerzos secundarios de doble fondo

En la zona del costado, al tener varias tracas de costado de diferente espesor, se modelizan tres tipos de refuerzos de distintos tamaños, el primero de 290 milímetros, el segundo de 240 milímetros y el ultimo de 200 milímetros.

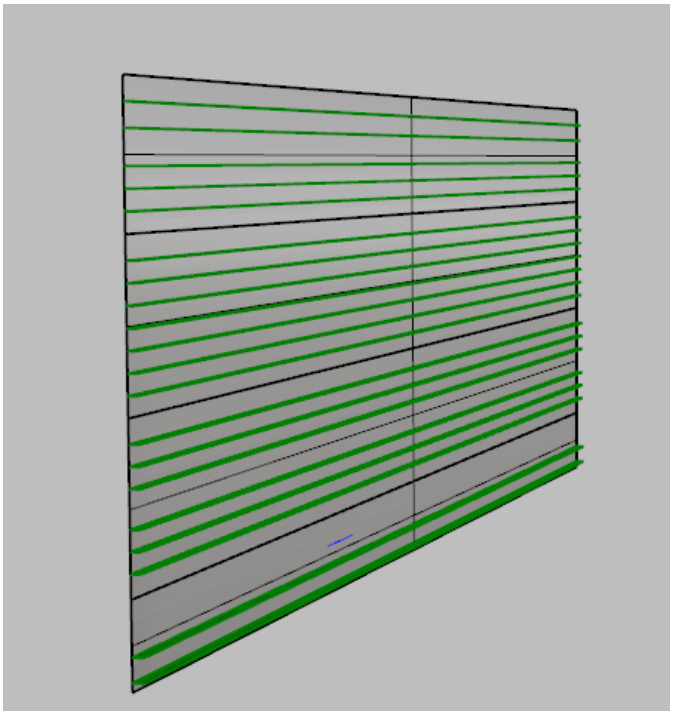


Ilustración 37. Refuerzos secundarios de costado

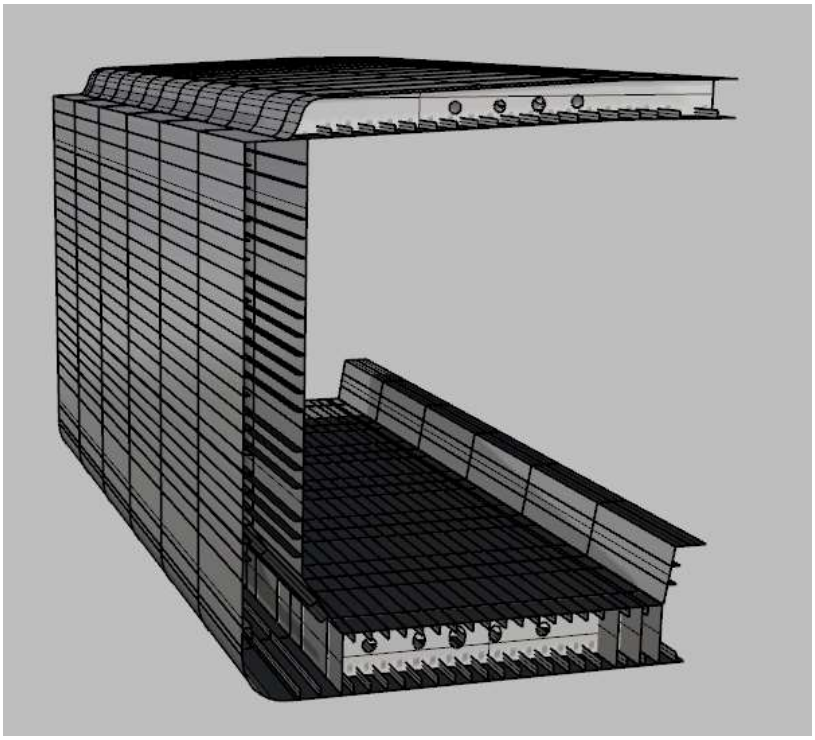


Ilustración 38. Refuerzos secundarios estructura quimiquero

Creados todos los perfiles el siguiente paso es la exportación al programa ANSYS para introducir toda la geometría generada hasta ahora, superficies y perfiles de esta forma quedará finalizada la modelización completada del buque lista para un análisis global en elementos finitos en el programa ANSYS.

6 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS APLICADOS EN LA INGENIERÍA NAVAL

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los principales estudios e investigaciones realizadas por diversos autores en los últimos años, referentes a la aplicación del método de los elementos finitos en la construcción naval. La aparición de los programas de elementos finitos motivó que varios de estos investigadores realizasen estudios y validaciones de modelos numéricos, impulsados cada vez más por el desarrollo de esta potente herramienta.

Se encuentran estudios de distinta índole como; estudios de análisis lineal, análisis no lineales, análisis dinámicos transitorios, térmicos, magnéticos, acústicos… muchos de ellos fuera del rango de alcance de éste proyecto, pero necesario para establecer la extensión que ha alcanzado la aplicación del M.E.F. en el campo de la construcción naval. Hay que destacar la similitud que existe en los estudios y proyectos, pese a ser de diferente ámbito de aplicación, todos ellos quedan definidos en tres grandes grupos, análisis globales, parciales y locales, siendo esta la división a aplicar en la revisión bibliográfica

6.2 Tipos de análisis

6.2.1 Análisis global

En 2005, L. Gilroy, D. Brennan, L. Boroditsky y R. Fischer, desarrollan algoritmos para el cálculo de características estructurales de los buques como la firma acústica, el ruido y la vibración, elementos difíciles de modelar de manera eficiente y con precisión con herramientas F.E.M. Al aplicar metodologías para el análisis con elementos finitos pueden ofrecer una alternativa potencial para eludir estas dificultades durante el diseño estructural del buque.

El estudio, analiza la transmisión de la vibración en la cámara de máquinas del buque, lugar donde se sitúan toda la maquinaria, fuente de vibración y ruido con el objetivo de examinar las capacidades de software y evaluar su potencial de predicción de ruido, revelando sus limitaciones, formular recomendaciones para el perfeccionamiento de sus capacidades, y adaptar el software para dar cabida a la modelización problemas transitorios de alta frecuencia de choque.

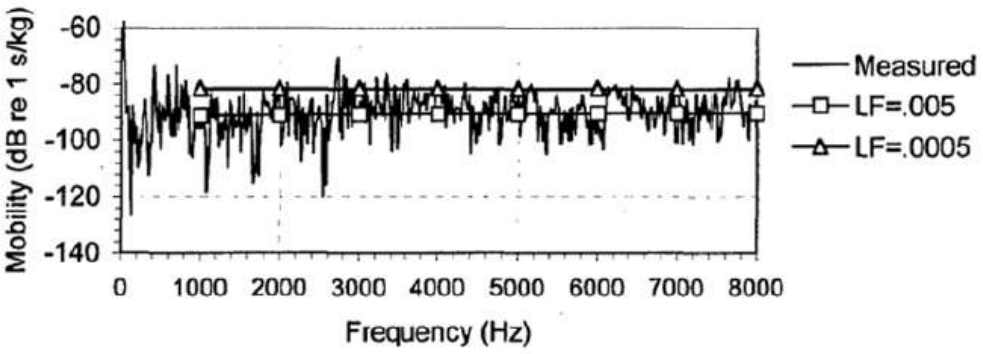


Ilustración 39. Frecuencia en plancha Tipo 1.

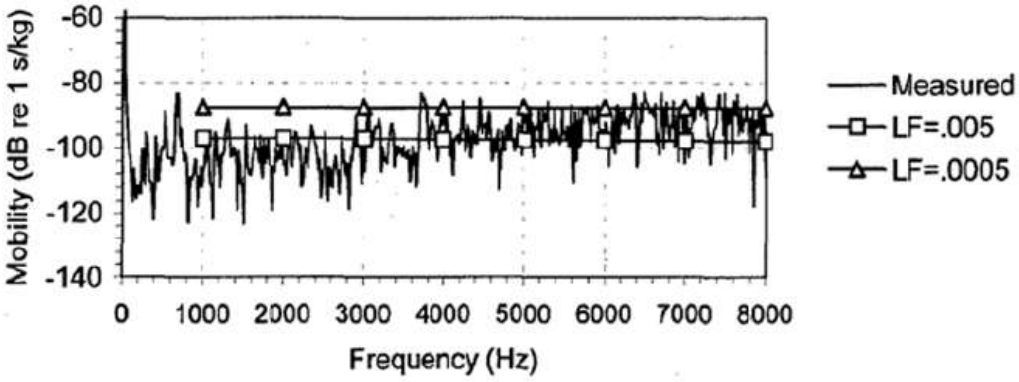


Ilustración 40. Frecuencia en plancha Tipo 2.

Cada vez más, el estudio de transmisión de ruido y vibraciones cobra vital importancia en el mundo naval debido a los requisitos acústicos y el confort de la tripulación además de ser imprescindibles en embarcaciones militares y oceanográficos es necesario realizar este tipo de estudios para garantizar las exigencias de los armadores.

En 2008, W. Armin, M. Davis y G. Thomas, evalúan el uso mediante elementos finitos como herramienta para predecir las cargas producidas por el mar en buques de alta velocidad. La nave estaba equipada con un sistema de sensores y sistema de adquisición de datos para monitorear la respuesta estructural, los movimientos del buque, el rendimiento y las condiciones del mar. Posteriormente, se realizó un modelo de elementos finitos simulando la embarcación monitorizada. El estudio pretende presentar la metodología para investigar las cargas de mar mediante el análisis de los elementos finitos comparándolo con datos de los ensayos físicos de la embarcación donde se encontró una comparación directa de la tensión de ensayo y del análisis de elementos finitos.

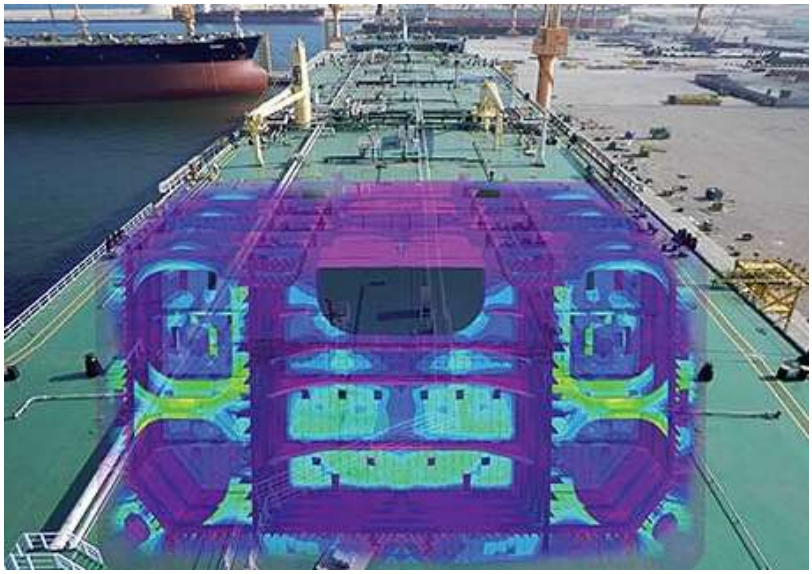


Ilustración 41. Modelo y analisis cuaderna maestra

Es un procedimiento de verificación de los procedimientos de cálculo donde se pretende establecer una metodología de análisis. Destacar que la modelización estructural para el análisis con M.E.F., seguramente no corresponda con la estructura real de la embarcación, esto se realiza de esta forma para ajustar los resultados a la realidad. Gracias a estos estudios se sabe que hay que modificar ciertos aspectos estructurales desviándolos de la estructura real para que la obtención de datos sea verídica.

En 2008, Suman Kar y D.G. Sarangdhar, exponen el uso de un programa de elementos finito, ANSYS, para el cálculo estructural en complejas condiciones de cargas incluyendo las cargas que experimenta el buque durante su navegación. De forma general las cargas de un buque se pueden dividir en cargas lineales estáticas y cargas dinámicas no lineales complejas, en un buque, se dan combinaciones de todas ellas.

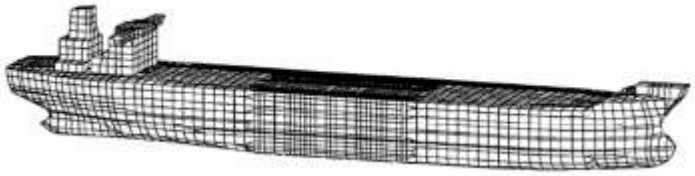


Ilustración 42. Modelo global del buque

Ilustración 43. Modelo parcial bodegas del buque

El buque experimenta condiciones de carga complejas que producen cargas lineales estáticas, dinámicas, es decir, situaciones de cargas complejas por lo que aumenta la complejidad de los cálculos y el coste de procesado de los cálculos. Básicamente se presenta la capacidad de programas como ANSYS como programa M.E.F. capaz de realizar análisis en situaciones de carga complejas.

En 2010, J Parunov, T. Uroda y I. Senjanovic, realizan un estudio global de un buque de carga general mediante el método de elementos finitos describiendo el análisis estructural del buque de carga demostrando que este tipo de estudios pueden ser empleados como herramienta para mejorar la seguridad estructural del buque. Principalmente, calculara la torsión del buque junto con la acumulación de tensiones debido a la gran escotilla.

En el análisis global aplican un mallado grueso abarcando toda la estructura del buque y todos los elementos estructurales principales de donde se obtendrán aquella zona crítica o puntos de acumulación de tensiones que posteriormente se analizarán detenidamente en análisis más minuciosos incorporando elementos secundarios estructurales en la indicada.

En 2010 D Cho, K Kim y B kim, publican la transmisión de vibraciones a través de la estructura del buque mediante el método de elementos finitos en un análisis global para un buque portacontenedores. Este análisis sobre frecuencias de vibración, dan información sobre rutas de transmisión de la vibración a través de la estructura, mostrando qué zonas van a verse realmente afectadas por los focos de vibración, así como su alcance y efectos sobre la estructura del buque.

En 2010, P Piala y T Kalian, utilizan el método de los elementos finitos para ayudar a determinar el comportamiento y la fiabilidad de las estructuras diseñadas a condiciones con tensión, vibración, calor y otras fuerzas. En ese caso, se ha aplicado a una embarcación de

agua dulce que transita por ríos donde analizan la viabilidad de este tipo de estudios con elementos finitos para la reducción de los costes operacionales, reduciendo en tiempo sin necesidad de modelos y gran adaptabilidad a los cambios en caso de que sean necesarios.

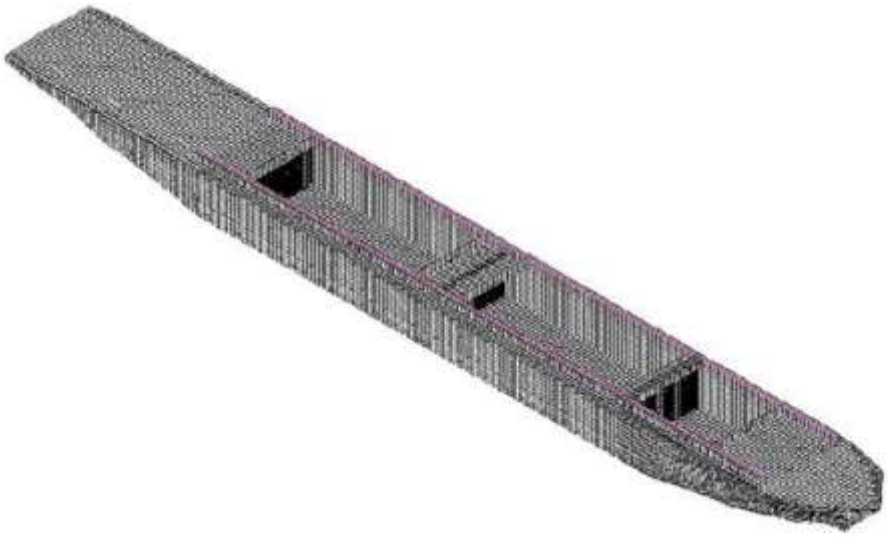


Ilustración 44. Modelo global embarcacion

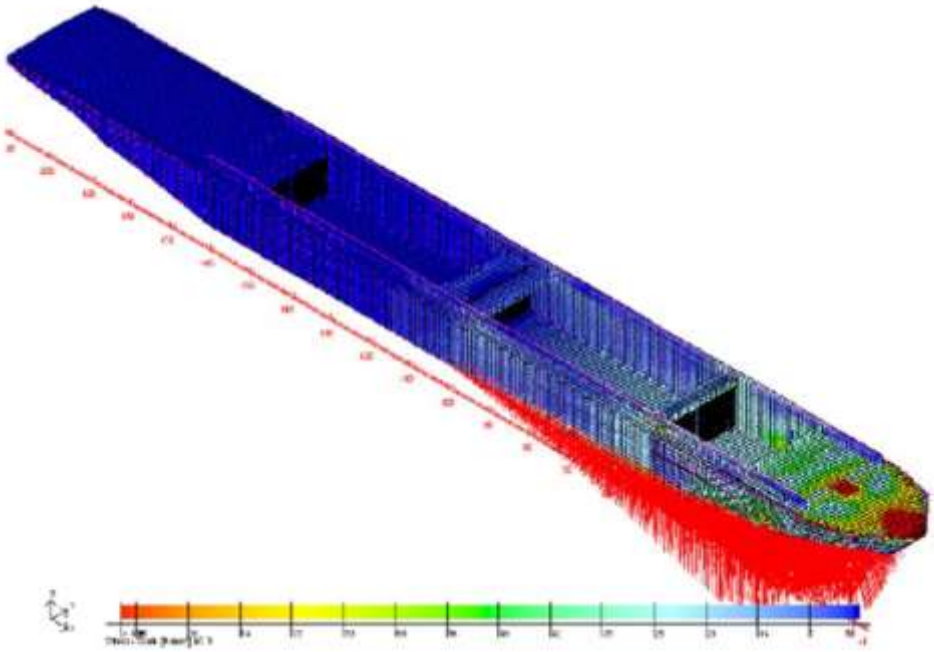


Ilustración 45. Presión efectiva del agua en embarcación

El uso de los elementos finitos se ha incrementado exponencialmente en los últimos años. Este incremento es gracias a los avances computacionales informáticos que junto con programas M.E.F. incrementan notablemente las prestaciones de cálculo.

En 2011, el Germanischer Lloyd Register, reedita el reglamento con una descripción de la aplicación del M.E.F. muy esquematizada en función del tipo de cálculo y/o análisis a realizar por lo que simplemente se debe seguir los puntos. En este caso será la sección nº 2, donde describe el análisis global del buque, así como las condiciones de contorno, cargas y factores a evaluar, así como la documentación necesaria para su presentación y aprobación.

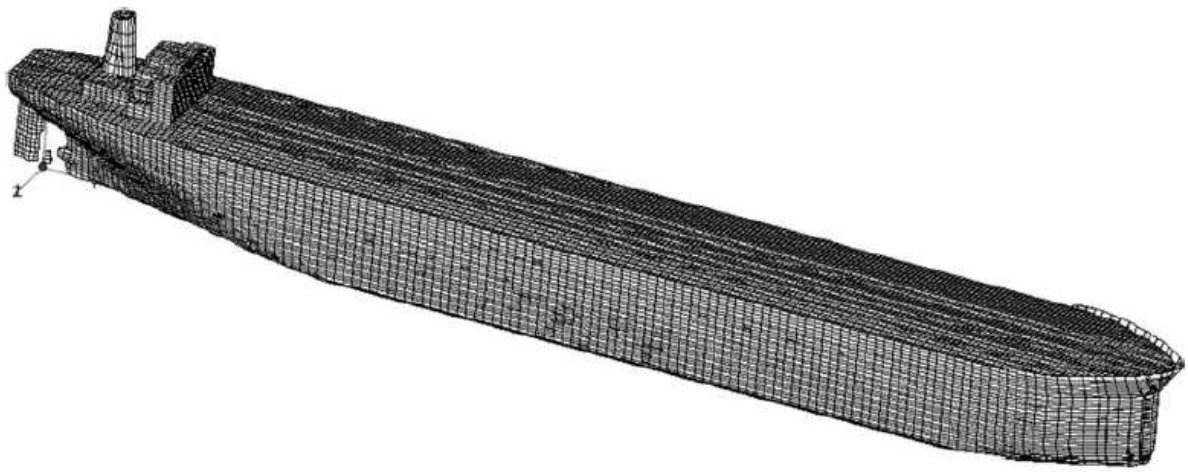


Ilustración 46. Modelo global según Principles of Architecture Naval

Esta publicación del G.L.R. establece como se procede al análisis con M.E.F. en construcción naval siguiendo las recomendaciones indicadas, para asegurarse que el procedimiento y los cálculos realizados son correctos y la estructura pueda ser aprobada con garantías de seguridad por la propia sociedad de clasificación.

En 2013, T. Brito, T. Tenorio, D.A. Mestanza, muestran la necesidad de nuevos procedimientos de análisis, más exactos y veloces, dentro del campo de las estructuras navales son imprescindibles. El impacto de mejores análisis de alta precisión y confiabilidad se hacen día a día más visibles, beneficiando a la seguridad de una embarcación, a su funcionalidad, y al costo de la misma. Se obtiene el valor para los esfuerzos admisibles y se determina el módulo mínimo para la sección maestra, para satisfacer los Reglamentos de las Sociedades Clasificadoras.

En dicho proyecto se orientaron a analizar la estructura de una barcaza fluvial por el método de elementos finitos, considerándolo como buque viga en un análisis global sometido a diferentes condiciones de carga, de acuerdo a las normas de las sociedades clasificadoras.

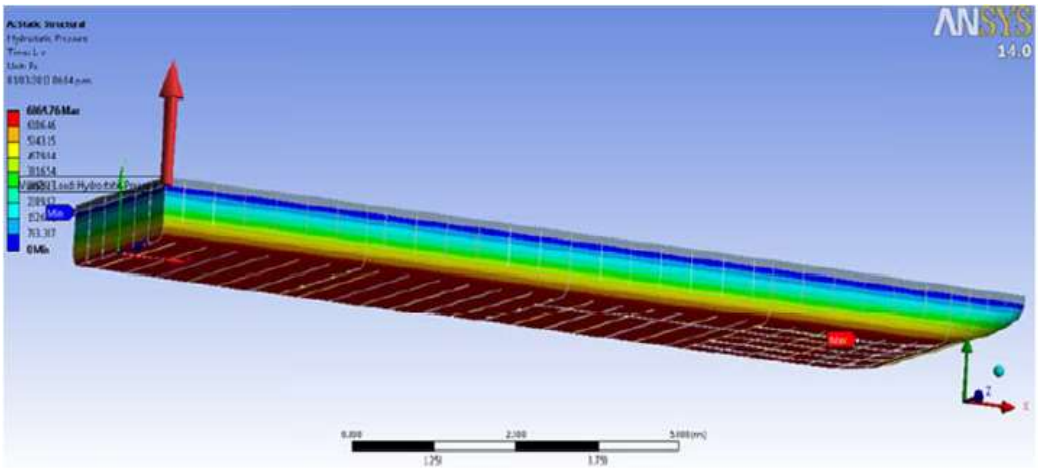


Ilustración 47. Presión agua sobre barcaza fluvial

En este cálculo mediante elementos finitos logro modelar completamente de una manera adecuada la estructura de la barcaza fluvial, analizándola en ANSYS. Se logró optimizar el factor de seguridad dado por las normas. Además, se obtuvo el comportamiento estructural de las embarcaciones fluviales de acuerdo al tipo de carga a transportar. Este proyecto muestra las grandes ventajas de la aplicación del método de los elementos finitos en la construcción naval convirtiéndose en indispensable para la optimización estructural, y el análisis de los puntos de acumulación de tensiones con garantías y fiabilidad.

En 2014, American Bureau of Shipping, proporciona las directrices de análisis de elementos finitos para las estructuras de la construcción de buques de acero. Utiliza un modelo M.E.F. en 3D, con suficiente densidad de malla para evaluar tanto los refuerzos del casco y los principales soportes de la estructura y el pandeo a nivel local.

La malla podrá ser más fina cuando se precise un diseño de detalle o zona estructural crítica tiene que deba ser analizado. Establece la idealización de la estructura, condiciones de contorno, aplicación de la carga, los procedimientos de análisis y evaluación de los resultados de los análisis de una manera coherente, basado en buenas prácticas de ingeniería.

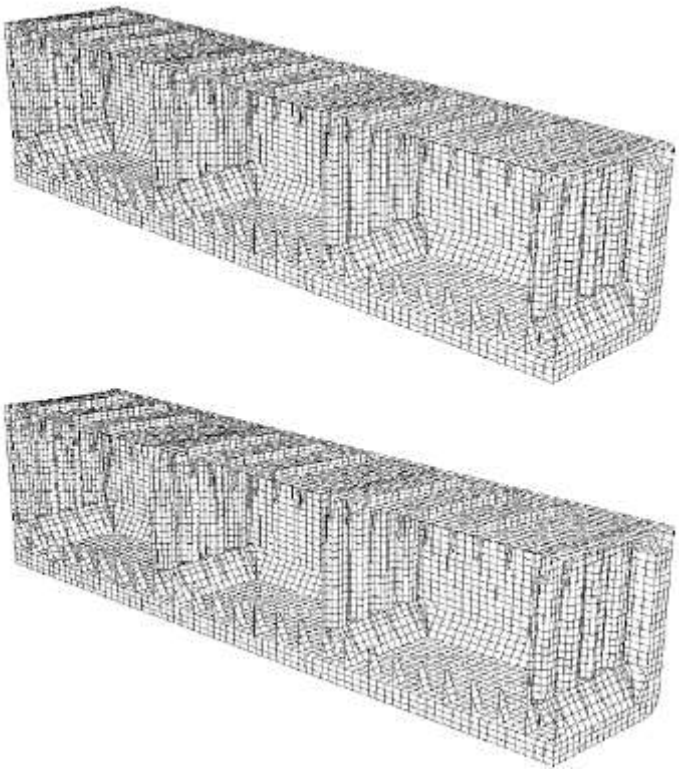


Ilustración 48. Modelo parcial bodegas Bulkcarrier

Estas series de recomendaciones determinadas por el I.A.C.S, establecen como proceder a la realización de un análisis global de toda la estructura del buque y solo tras obtener los resultados se analizan las secciones a través de análisis parciales y locales estableciendo cuidadosamente las condiciones de contorno, las cargas y demás parámetros para conseguir ajustarse a la realidad en los resultados y que puedan ser aceptados por la empresa clasificadora. Los reglamentos han establecido las directrices para analizar y optimizar la estructura, asegurándose así, un buen uso de herramientas de cálculo informáticas como puede ser el M.E.F y conseguir fiabilidad en los cálculos.

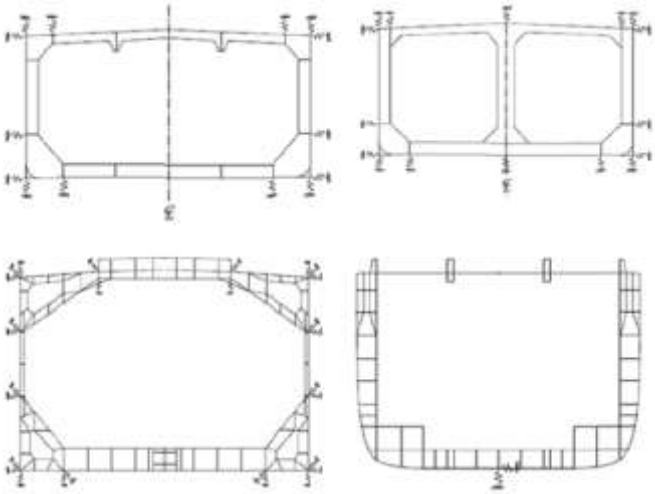


Ilustración 49. Condiciones de contorno para análisis parcial

Si se siguen las recomendaciones, estableciendo los correctos parámetros para el análisis global, junto con las condiciones de contorno y cargas, se obtendrán los resultados de forma

fiable, tal y como se muestran a continuación. El I.AC.S menciona según el tipo de buque las zonas con acumulación de tensiones. Si se sigue el procedimiento establecido, se detectaran esas zonas con acumulación de tensiones a las que se analizaran para que no excedan los valores establecidos y cumpla así todos los parámetros establecidos.

En 2014, M.Costache y G. Jagite, en el orden de incrementar la exactitud de los análisis globales de las estructuras de los buques aplican un análisis de elementos finitos en 3D del modelo global del buque. En este estudio, el análisis global es llevado a acabo sobre un buque de apoyo offshore que opera en el mar negro. Se analizan dos condiciones de carga principales bajo condiciones severas del estado de la mar.

En este caso se obtiene a nivel global del buque todo el pandeo, zonas críticas sometidas a esfuerzos, máxima deformación por la ola, etc. Todos los resultados habituales en un cálculo global por elementos finitos.

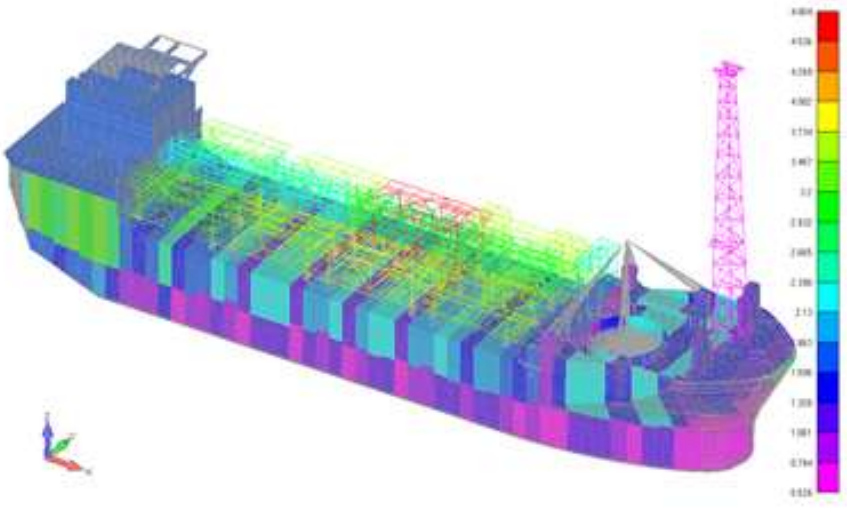


Ilustración 50. Modelo global embarcación offshore

6.2.2 Análisis parcial

En 2001, el Dr. C. Brawn, R. Kapaniay, Dr. O Hughes, realizaron la investigación de los daños producidos en una colisión entre dos buques, aplicando el método de elementos finitos con un análisis no lineal y con un modelo parcial de las dos zonas de contacto de los buques, del primer buque se modela la zona de proa y en el segundo, la zona media. Se realizara una posterior valoración de los datos que se han obtenido y los daños producidos en las embarcaciones.

En este estudio muestra el comportamiento del material durante la colisión de dos buques, uno introduciendo el pique de proa en la bodega del segundo, una situación frecuente cuando se producen colisiones. Al analizar los daños sufridos en ambos buques, se sabe cuál ha sido la deformación real por lo que hay que aplicar el método de los elementos finitos para llegar a estos datos, una vez más sirve como certificación del método de los elementos finitos en el ámbito naval.

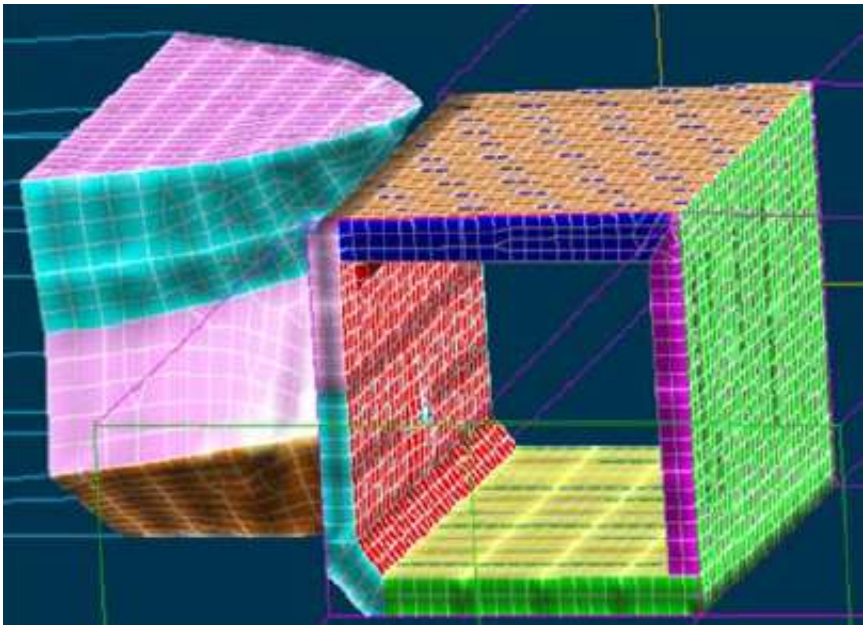


Ilustración 51. Modelos parciales buques

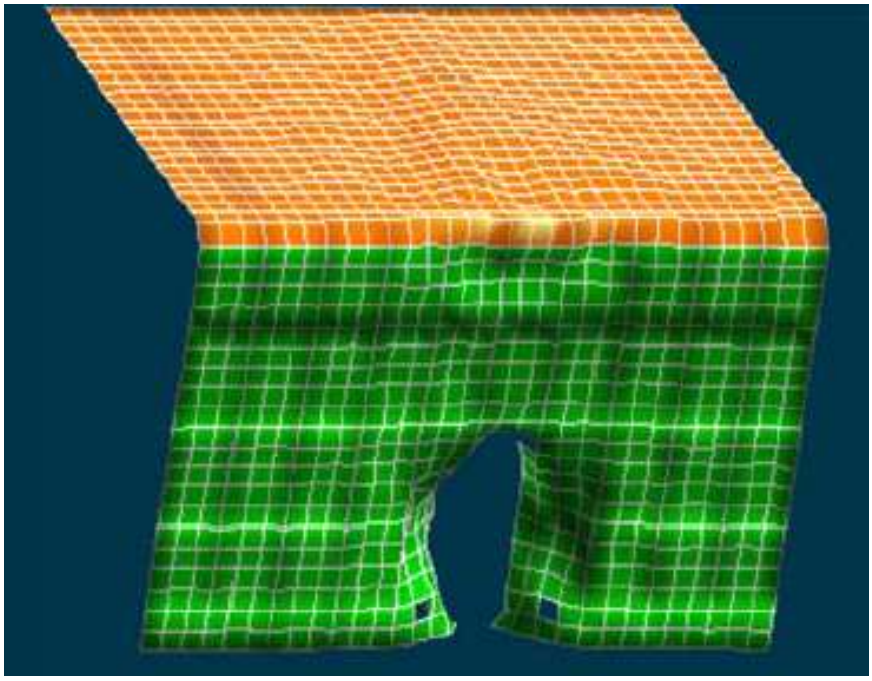


Ilustración 52. Daño en forro del casco

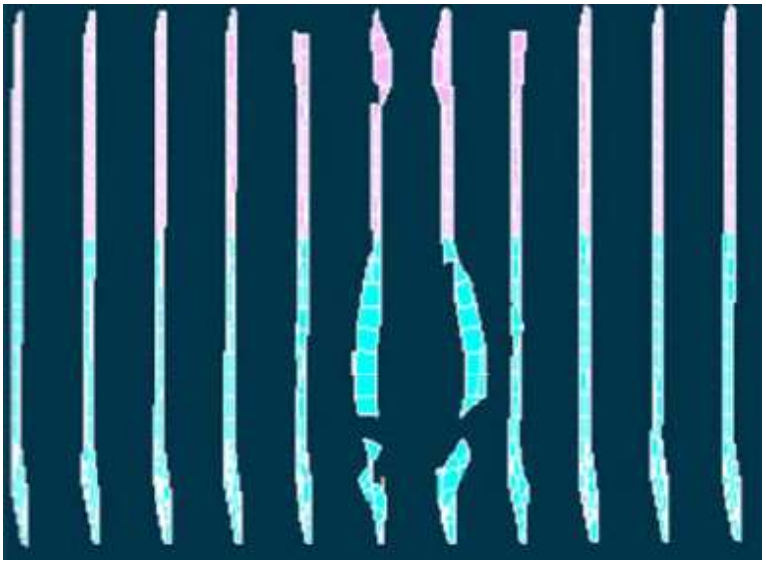


Ilustración 53. Daños en cuadernas y bulárcamas

En la conferencia de 2002, se propuso una metodología para el análisis de zonas de gran acumulación de tensiones mediante la utilización de los elementos en estructuras del barco. Se parte del cálculo y los resultad os de un análisis parcial de la zona con un mallado no demasiado fino ni demasiado grande, abarcando toda la zona con conflicto en el llamado análisis parcial.

Una vez obtenidos los resultados se propone la realización de grandes zooms en la zona de la estructura en cuestión y analizar mediante elementos finitos, con un mallado más fino, obteniendo resultados muy concretos y realistas de la zona.

Esto provoca una reducción de los tiempos de cálculos ya que solo analiza una pequeña zona a partir de los valores de un cálculo parcial d la estructura del buque. Esto es factible si se manejan las variables de diseño de forma correcta en la región del zoom, como son las condiciones de contorno y las cargas del resto de la estructura. Además de la utilización del patrón de mallado diferente lo que permitirá un proceso de optimización mejor a un menor coste. Como resultado se obtiene una optimización más realista de la estructura de los buques.

En 2004, D. Servis, G. Voudouris, M. Samuelides y A. Papaniklaou, realizan un estudio sujeto a las reglas del Convenio SOL AS en relación con la integridad estructural de la bodega No. 1. Regla SOLA Capítulo XII establece que el mamparo estanco transversal entre cofferdam (espacio vacío entre C. M. y bodega) y bodega, tendrá suficiente fuerza para soportar la inundación de la primera bodega. SIGC proporciona reglas para la construcción de estas áreas de estos buques con el fin de cumplir con el convenio SOLAS Capítulo XII.

Este trabajo presenta una metodología para el modelado de retención N º 1 de los graneleros usando elemento para evaluar la integridad estructural de estas áreas bajo las cargas establecidas por IACS.

En este trabajo analizan unas condiciones de cargas establecidas por los reglamentos analizando la bodega nº1 vital para la seguridad del buque, viendo el desarrollo se aprecia el análisis parcial a partir del cual realiza la subdivisión de la estructura en pequeñas partes, escotilla y cubierta, mamparo, fondo y doble fondo para menor coste operacional.

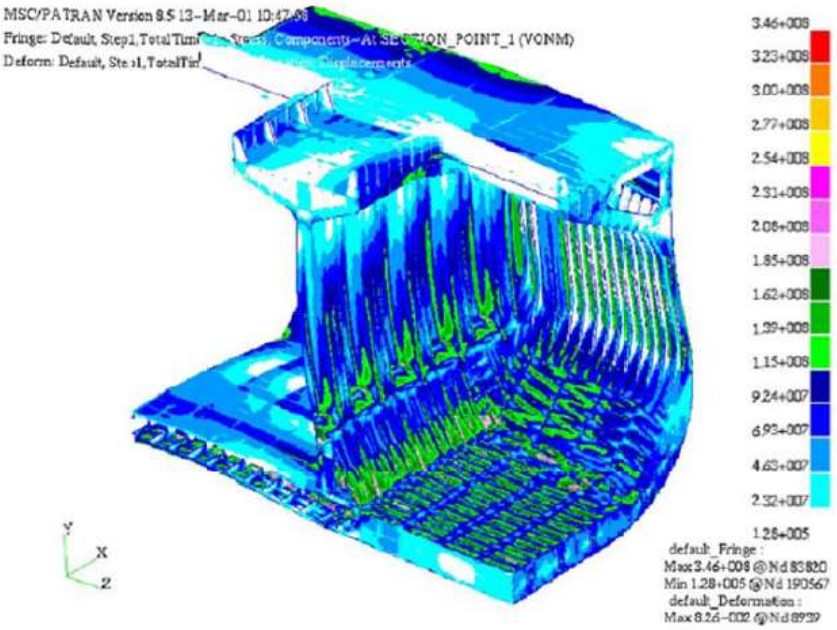


Ilustración 54.Tensiones análisis parcial costado bulkcarrier

Otro caso en el que destaca la necesidad de aplicación del MEF y ante la creciente necesidad de creación de petroleros rompehielos prima necesidad de conocer el comportamiento real del hielo sobre las estructuras de los buques, esto ha dado lugar a un fortalecimiento de las estructuras latera les de los mismos donde es más factible que se produzcan daños en el buque. La teoría de la deformación plástica se ha utilizado con éxito en las formulaciones de diseño para car gas de impacto hielo.

Aunque el fortalecimiento de las normas de diseño para el hielo ha aceptado un cierto nivel de deformaciones permanentes en el forro del costado, las deformaciones permanentes admisibles no se identifican de forma explícita. Nace aquí la necesidad de utilización de M.E.F. que ha permitido calcular las deformaciones permanentes de las estructuras. Estas mismas necesidad es han llegado a la American Bureau of Shipping a desarrollar las notas de orientación sobre M.E.F. de estructuras sometidas a cargas lateral es por el hielo.

Estas guías de orientación proporcionan detalladas instrucciones para la creación de modelos estructurales, la no linealidad del material, las cargas de hielo, condiciones de contorno y la aceptación criterios. Además de garantizar que se acepte si su deformación es comparable, es decir cumple plenamente con los requisitos de la clase de hielo previstos.

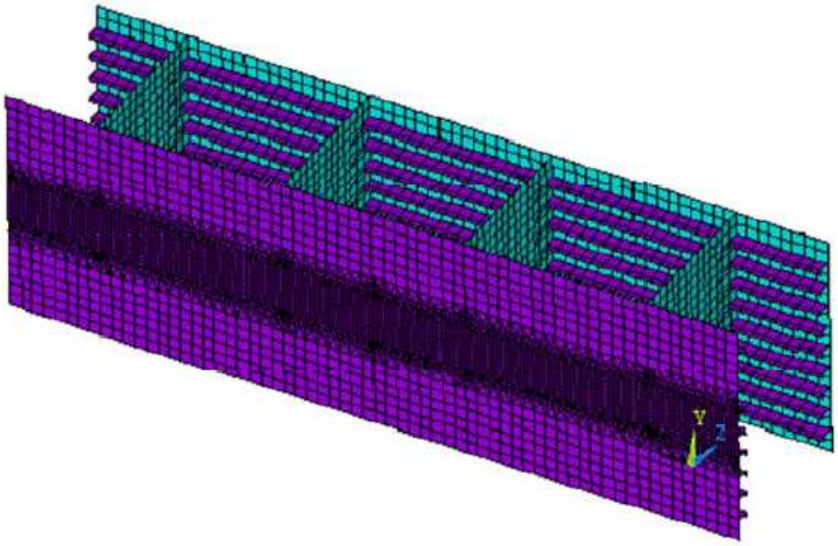


Ilustración 55. Mallado modelo parcial estructura

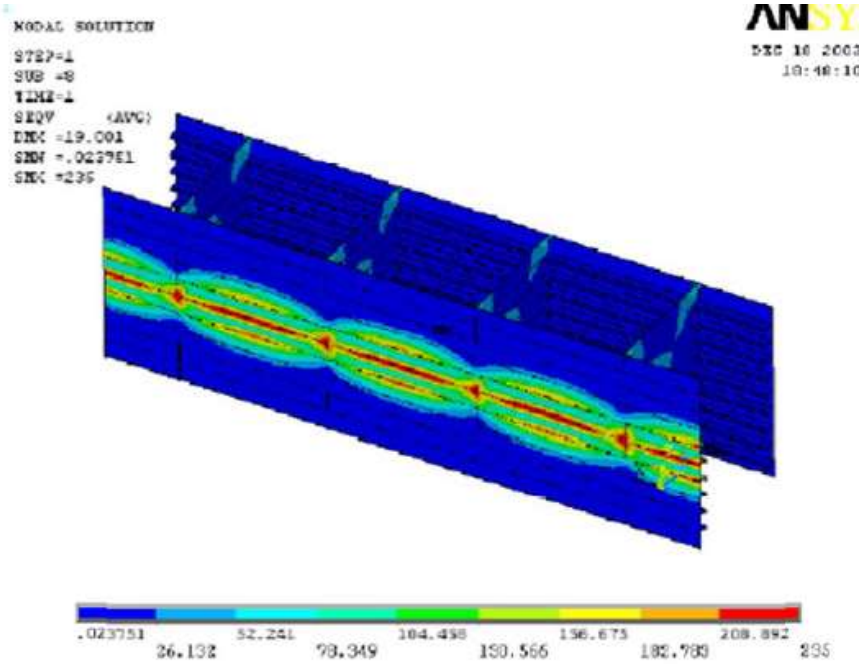


Ilustración 56. Incidencia del hielo sobre estructura lateral

Se aprecia la necesidad de utilización del M.E.F debido al desconocimiento del alcance de la deformación permanente producida por el hielo, que ha hecho necesario la creación de unas recomendaciones por los reglamentos, en este caso aplicadas a la estructura de rompehielos, para que sean aceptadas por la sociedad de clasificación. Es un claro ejemplo del porqué se utiliza el método de los elementos finitos como herramienta de cálculo en el mundo de la construcción naval, subsanando así las carencias de los reglamentos y consiguiendo el objetivo, la creación de las estructuras de forma segura y sin riesgos.

En 2012, el reglamento Det Norske Veritas establece una serie de recomendaciones de aplicación a buques offshore. Este tipo de buques tienen unas características especiales que al igual que cualquier otro tipo de buque se deben de analizar para el cumplimiento de las reglas establecidas. En este caso, este tipo de buques se caracterizan por llevar incorporado el sistema de perforación a bordo del buque por lo que, necesariamente lleva

una estructura especial que atraviesa todo el puntal del buque para el sistema de perforación mediante engranajes rotacionales. En este caso, se aprecia claramente la necesidad de aplicación del método de los elementos finitos para asegurar estructuralmente esta parte de la estructura siendo de vital importancia ya que es la función a la que está destinada el buque.

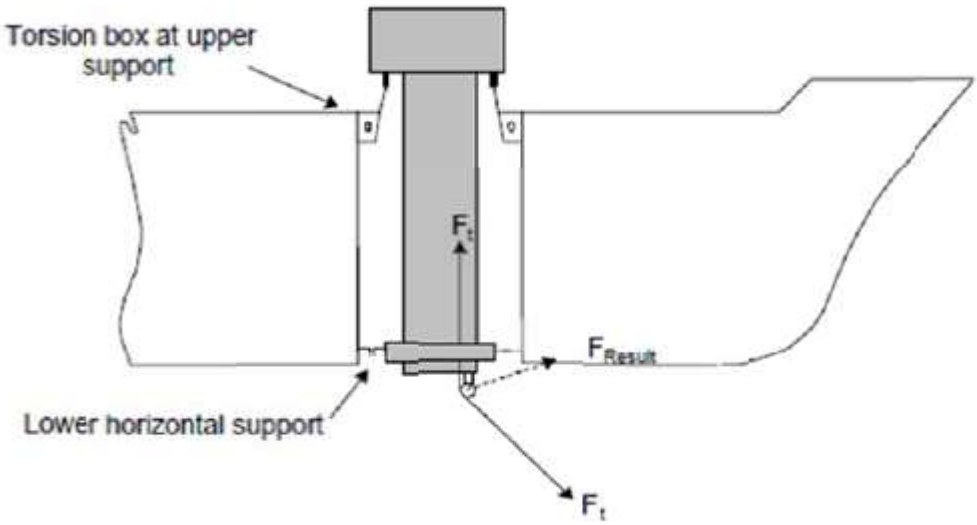


Ilustración 57. Cargas aplicadas en el modelo parcial

El método de los elementos finitos permite conocer con exactitud las propiedades físicas de la estructura, así como su capacidad para resistir los esfuerzos a los que está sometida. En este caso y a partir de un primer análisis global se procede a la realización y siempre siguiendo las recomendaciones establecidas por el DNV de un análisis parcial en la zona critica. La estructura donde se sitúa el sistema de perforación rotacional y que además está agujereando el casco a lo largo del puntal constituyendo un punto caliente para acumulación de tensiones y por lo que se debe de prestar atención a su análisis para que se verifique su resistencia. En este caos, a nivel global el buque tiene sus propias características estructurales como puedan tener cualquier otro tipo de buques, pero lo que sí que destaca en este es la necesidad de asegurar el sistema para el cual el buque fue concebido y diseñado, siendo este el verdadero objetivo del análisis parcial.

6.2.3 Análisis local

En 2002, Harish Mukundan, analiza todas las posibilidades de fallo estructural de un timón en un buque de pasaje. Un análisis local de una zona específica como es el timón del buque siendo una zona de detalle sometida a cargas y que al tratarse de un buque de pasaje adquiere una gran responsabilidad y se debe garantizar su resistencia ante cualquier posibilidad de fallo. Se realiza un análisis lineal estático sobre las cargas aplicadas en el timón, aunque realmente son cargas dinámicas por lo que se introducen masas añadidas para la simulación de las cargas dinámicas y momentos de inercia. Se realizara un análisis paramétrico de distintas frecuencias del timón para su análisis torsional en los refuerzos y engranajes, que dependerá también de la profundidad, así como de la presión del agua.

Además, en este proyecto se estudia el momento de pandeo del timón debido a estas fuerzas incidentes.

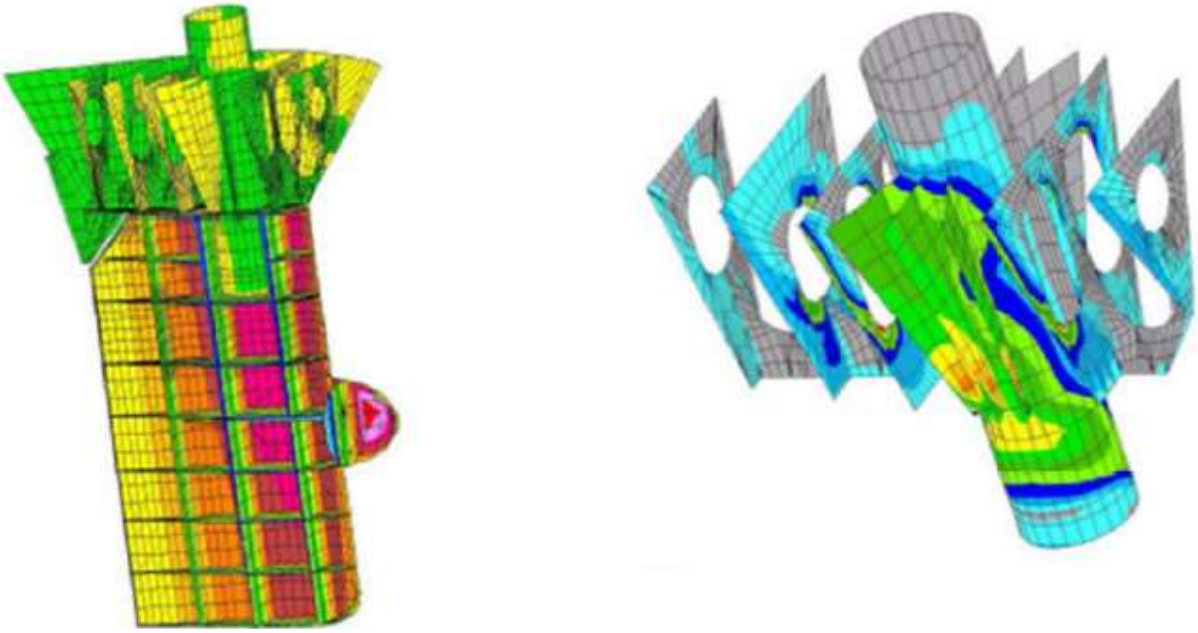


Ilustración 58. Tensiones y deformaciones en timón

Se realiza un análisis local de una zona de vital importancia para la seguridad del buque como es el timón, ya que, sin este, el buque quedaría a merced de las olas sin control alguno por lo que su análisis es impredecible y necesario para asegurar que resistirá los embates y el día a día a lo largo de su vida útil. El modelo local analiza con sumo detalle toda la estructura de su alrededor para simular con exactitud las condiciones reales a las que se somete el timón.

En 2004, Y.Sumi, M. Mohri y Y. Kawamura, estudian el fenómeno de propagación de grietas por fatiga que determinan en cierto modo la vida útil de las estructuras de los 6buques. Se realiza un estudio de una trayectoria curvada de la grieta debido a los efectos de tensiones de la soldadura analizadas en las tres dimensiones. Se demuestra un método de simulación numérica mediante elementos finitos para la valoración de la vida restante y de propagación de grietas. El método de simulación, se basa en un análisis de elementos finitos para la valoración de la vida restante y de propagación de grietas.

El método de simulación se basa en un análisis de elementos finitos a nivel local, donde el recorrido de la fisura se consigue establecer por el método de perturbación con el criterio de simetría local, que da una mayor aproximación del recorrido de la fisura. Se ha demostrado que el presente método puede ser una eficiente herramienta para el diseño de detalles críticos.

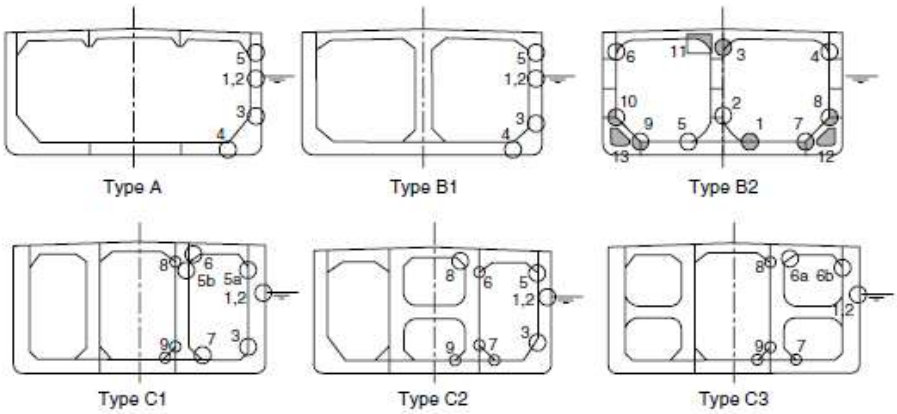


Ilustración 59. Puntos susceptibles a la formación de grietas y fisuras

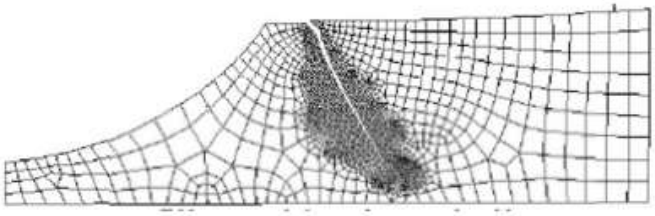


Ilustración 60. Mallado para modelización grietas y fisuras

Se pueden realizar simulaciones de propagación de grietas mediante M.E.F. pero en estructuras navales se producen tensiones debidas a condiciones de mar muy variables y cambiantes con diferentes estados de carga que afectan de una forma muy notable a la forma de propagación de las grietas por lo que, la obtención de la propagación real de la grieta es una tarea complicada debido al continuo cambio de los esfuerzos. Se podría realizar este tipo de estudio en algunas zonas muy concretas donde si se tiene el control de la aplicación de las cargas.

En 2005, R. Medina, M.Salas y R. Luco, realizan un análisis de la estructura típica de un pesquero de altura donde se realizan un análisis local mediante elementos finitos a partir de una condición de carga característica, que provoca una presión hidrostática en un mamparo de separación y estanco de la embarcación.

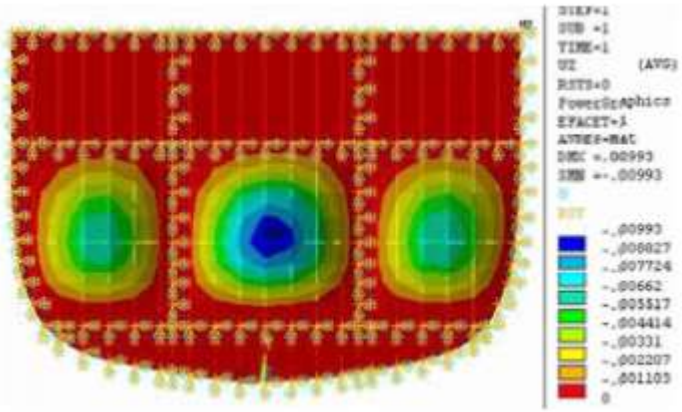


Ilustración 61. Deformacion mamparo de la bodega

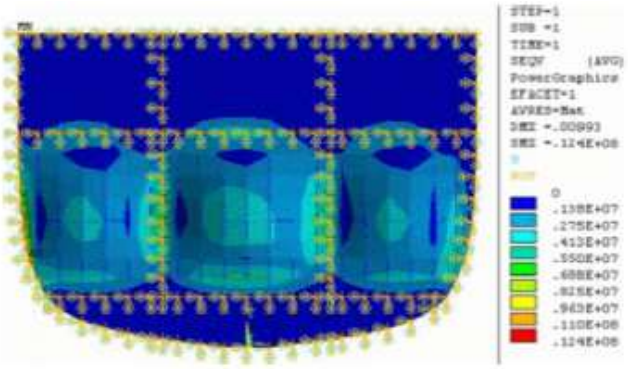


Ilustración 62. Tensión en el mamparo de la bodega

Además, también realizan un análisis dinámico en la cámara de máquinas debido al funcionamiento rotacional del motor, simulando el motor en funcionamiento, con cargas

armónicas aplicadas al motor de la embarcación. Se analiza el modelo para un rango de frecuencias forzadas y también se refina el mallado de las zonas sometidas a mayor esfuerzo para obtener resultados más precisos.

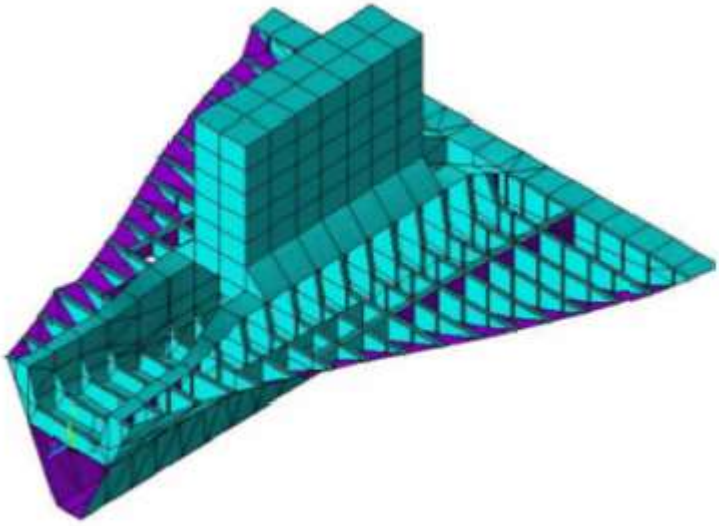


Ilustración 63. Mallado estructura soporte motor

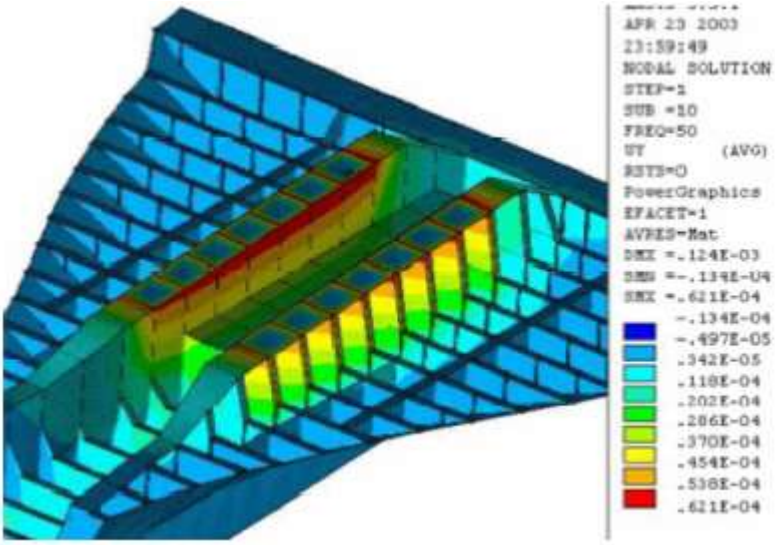


Ilustración 64. Tensiones sobre polín y estructura soporte del motor

El método de los elementos finitos permite analizar diversos tipos de problemas, ya sea estático, dinámico, etc. Un modelo tridimensional en elementos finitos permite analizar cualquier zona del buque, aislándola y convirtiéndola en un análisis local, pudiendo observar su comportamiento particular en una zona concreta, con las condiciones de carga aplicadas de los resultados del modelo global e introduciendo los elementos estructurales secundarios así como las correctas condiciones de carga y de contorno.

En 2008, S. Kumar, analiza los requisitos de las embarcaciones militares, siguiendo los estándares de ingeniería naval para su certificación que establecen los esfuerzos y en qué zonas no deben sobrepasarse ciertos valores. Además, menciona como modelizar las cargas, asi como la estructura. La tesis realizada estudia la verificación de los estándares de las

embarcaciones militares utilizando herramientas de cálculo como el método de los elementos finitos.

Conociendo los escantillones y distribución de cargas y sus parámetros principales se analizara la cuaderna maestra mediante un análisis local calculando esfuerzos y deformaciones para su verificación.

Ilustración 65. Modelo local cuaderna maestra

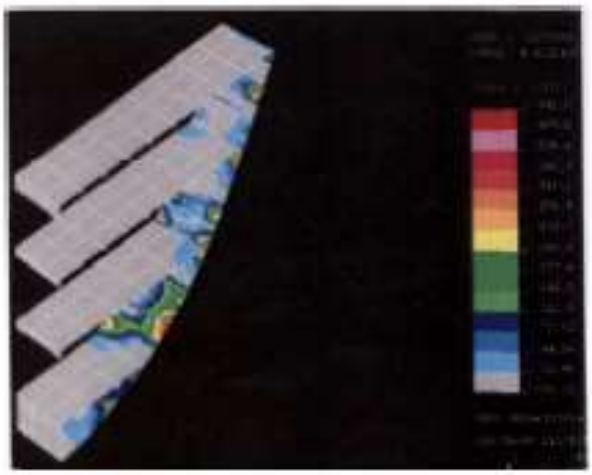


Ilustración 66.Tensiones en cuaderna

Esta tesis es una verificación del procedimiento de análisis del M.E.F. cumpliendo los reglamentos para embarcaciones militares. Se centra en la parte del casco más crítica y modeliza la sección, donde, conociendo las cargas y esfuerzos que se producen en ella los verifica mediante un análisis local con elementos finitos los valores establecidos por los reglamentos.

En 2011, A. Dabbagh y C.Garza, realizan el estudio de detalle de una embarcación de madera botada en 1628 que fue recuperada y posteriormente se realizó un trabajo de investigación. En el trabajo realizado se encuentra el análisis mediante elementos finitos de partes de la estructura, entalladas unas con otras consiguiendo uniones resistentes. El estudio muestra una sección de la estructura analizada con métodos modernos de métodos

de construcción de 1628 en madera. A partir de la estructura del fondo de la embarcación se descompone en elementos menores hasta llegar al perno que se analiza con un análisis local del perno.

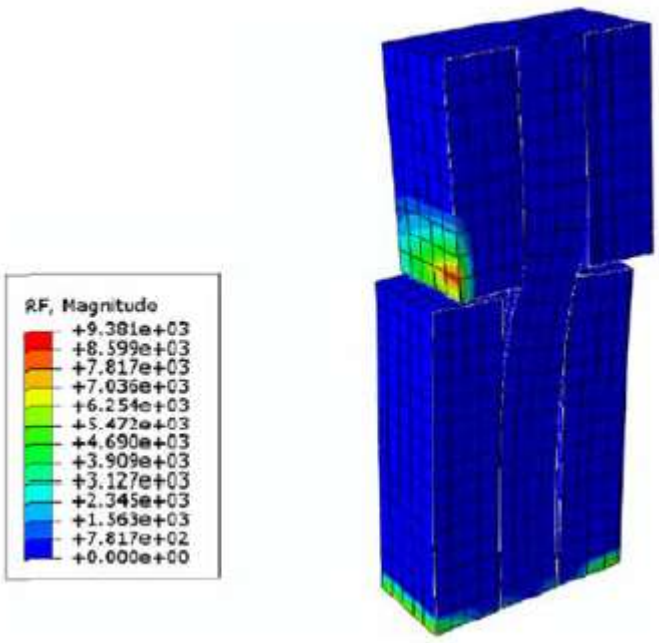


Ilustración 67. Tensión en el perno entallado

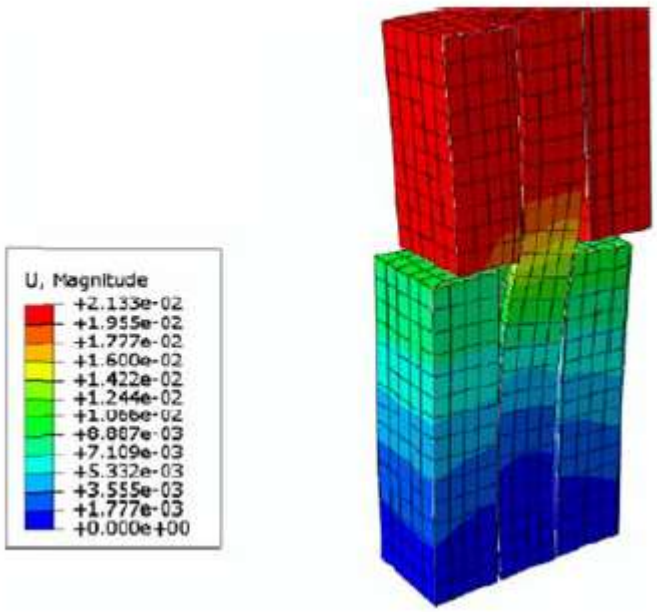


Ilustración 68. Deformación perno entallado

Destacar la peculiaridad de este proyecto de investigación, con el detalle del análisis de las uniones empernadas que permite visualizar su comportamiento. Lo que se debe abstraer del proyecto es la capacidad de análisis concreta de un elemento muy pequeño de vital importancia que forma parte de un conjunto total de la estructura. Una vez más se procede a la descomposición del elemento más básico para el análisis de forma local.

En 2012, S. Vaga, C.Plazaola, I. Banfiel y S. Rashed, predijeron la distorsión de las estructuras del buque producidas por las soldaduras, y evaluar la eficacia del método propuesto. Se analiza un caso típico de la estructura de un barco donde se examina la distorsión producida por la soldadura mediante el uso del método de elementos finitos. Este tipo de estudio es un estudio térmico donde la estructura se deforma permanentemente pudiendo crear tensiones residuales del proceso de la soldadura que resultan perjudiciales ya que debilitan el conjunto.

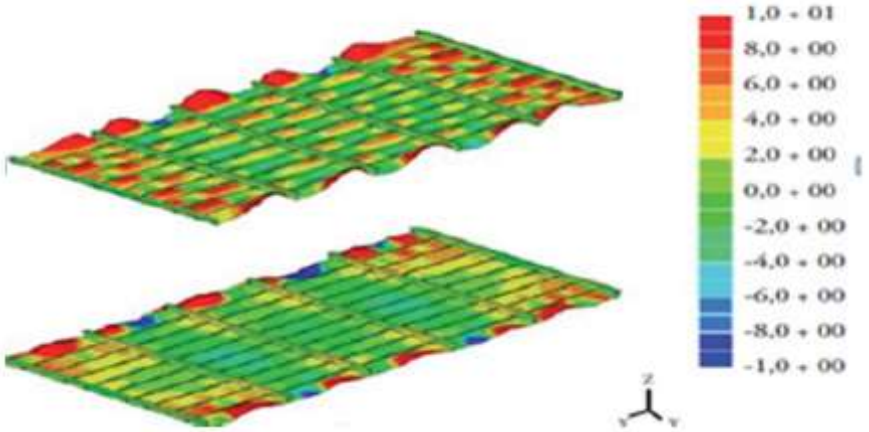


Ilustración 69. Planchas y perfiles soladados

En el 2013, DNV, publica el documento teniendo como objetivo proporcionar orientación sobre la forma de establecer la resistencia estructural por el uso de elementos finitos. Determina la resistencia característica de una estructura o parte de una estructura de una manera que cumple los requisitos de resistencia a la rotura de los niveles aceptados por el DNV. Son recomendaciones que se utilizaran para aquellos casos que no se encuentren directamente en códigos o normas. Los análisis se llevaran a cabo de acuerdo con las recomendaciones dadas en este documento que dará lugar a una estructura que cumple con los requisitos de seguridad. Este documento tiene por objeto presentar métodos que permiten el uso de métodos de elementos finitos para determinar la resistencia en los casos que no estén cubiertos por los códigos y las nomas.

Al tratarse de normativas, siempre en lo tocante al método de los elementos finitos, establecen recomendaciones, en este caso analiza puntos críticos, además de tuberías sometidas a grandes esfuerzos. Esto lo analiza gracias a establecer unas recomendaciones de análisis del M.E.F. y como presentarlos. Establece el procedimiento a seguir para su certificación.

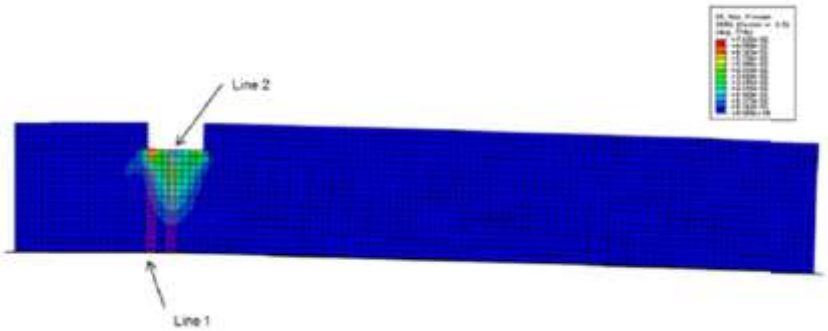


Ilustración 70. Análisis local de los refuerzos y planchas

6.3 Aplicación del M.E.F. según los reglamentos

Los reglamentos realizan una serie de consideraciones a la hora de aplicar el método de los elementos finitos. A continuación, se muestra de forma general cómo los distintos organismos de control consideran la aplicación del método de los elementos finitos teniendo en cuenta el tipo de análisis, la modelización estructural, cargas y condiciones de contorno, así como los cálculos y evaluación de los resultados.

Esta guía específica de cálculo de los esfuerzos en la estructura de un buque con elementos finitos es un método avanzado de cálculo que permite el cálculo de situaciones estructurales complejas con una aproximación más refinada a los resultados que permiten una optimización y mejor elección de los materiales. Se deben de cuidar las premisas básicas de cada tipo de buque acorde con las normativas pertinentes a cada uno de ellos. Además, los programas computacionales para el cálculo mediante elementos finitos, deben de ser reconocidos por los reglamentos pertinentes para garantizar la fiabilidad de los cálculos.

6.3.1 Análisis de esfuerzos

En general el análisis de esfuerzos desarrolla distintos pasos; el primero, identificar el objetivo, tipo y extensión del análisis, la segunda, modelar la estructura del buque y especificar las condiciones de contorno, la tercera, es especificar el estado de carga con las cargas asociadas, resolver y realizar la evaluación de los resultados.

El modelado estructural, así como las condiciones de contorno y cargas, posiblemente o necesariamente deben ser simplificados dependiendo del análisis o del tipo de condiciones estructurales que se den.

Dependiendo del estado de carga y como se apliquen las cargas en las estructuras de los buques, se pueden diferenciar 3 grandes categorías, dependiendo de las condiciones estructurales:

6.3.1.1 Deformaciones y tensiones globales del buque-viga y sus componentes estructurales primarios

La respuesta estructural del buque-viga y sus componentes estructurales primarios, bajo condiciones normales, dan resultados globales de cizalladura, cargas de flexión y de torsión, deformaciones y tensiones.

Se consideran componentes primarios a, vagras, varengas, cuadernas, bulárcamas, baos, donde cada uno incluye una parte efectiva de planchas y refuerzos.

6.3.1.2 Deformaciones y tensiones primarias locales y miembros estructurales secundarios

En los elementos estructurales secundarios, las cargas locales pueden dar lugar a deformaciones y tensiones adicionales en ciertas zonas concretas de la estructura.

Los componentes estructurales secundarios incluyen; refuerzos, los longitudinales, vigas y las planchas con su flexión, cortante y resistencia a la torsión, así como los soportes de apoyo. La manga de la placa efectiva se tendrá en cuenta. Las tensiones resultantes son tensiones nominales que se superponen a las tensiones globales

6.3.1.3 El aumento de las tensiones a nivel local en los detalles estructurales y discontinuidades de la estructura

El aumento local de las tensiones en los detalles y discontinuidades estructurales se deben evaluar especialmente al esfuerzo de fatiga. Se hace una distinción entre tres tipos de tensiones:

- Tensión máxima en la base de la ranura.
- El estrés estructural o punto caliente, creado por las uniones soldadas.
- Parámetros específicos para evaluar el esfuerzo en la grieta.

En estructuras soldadas complejas, sólo el incremento de tensión debido a la geometría estructural se considera en el análisis, mientras que la causada por la soldadura se considera durante la evaluación. Los requisitos de resistencia y los procedimientos de evaluación se dan en las reglas estructurales de los reglamentos.

6.3.2 Modelo estructural

A la hora de realizar el modelado, podemos encontrar tres tipos de modelado en la estructura del buque, un modelo global del buque, un modelo parcial como pueden ser las bodegas, zonas de cargas, los piques, o simplemente un modelo local de detalle en zonas concretas que requieran especial cuidado y atención.

6.3.2.1 Modelo global del casco

Un modelo global del buque-viga, se utiliza normalmente para el análisis de la resistencia global del buque-viga y sus componentes estructurales primarios. El modelado se realiza en 3D de todos los componentes estructurales primarios y las cargas se pueden aplicar de manera realista. El comportamiento estructural de los buques es complejo y puede incluir interacciones entre los distintos componentes individuales que conforman su estructura

6.3.2.2 Modelo parcial del casco

Se utilizan modelos parciales del buque-viga para el análisis de tensiones globales y locales de los componentes estructurales primarios. Una aplicación es la zona de bodegas, utilizando modelos 3D y realizando un análisis complejo tridimensional de la estructura compleja con los elementos primarios

6.3.2.3 Modelo locales

Los modelos locales se utilizan para el análisis de resistencia de componentes secundarios o detalles estructurales. El objetivo principal es el análisis del comportamiento estructural local y el aumento de las tensiones locales en zonas estructurales concretas y donde se produzcan las discontinuidades.

6.3.2.4 Elementos usados para el modelado

Normalmente los elementos más usados para cálculos en estructuras navales son; elementos barra 1D (sólo rigidez axial), elementos de viga (elementos 1D con axial, cizalla, flexión y rigidez a la torsión), elementos de tensión plana (elementos 2D con membrana), placas y elementos lámina (elementos 2D con membrana, flexión y rigidez torsional), elementos sólidos (elementos 3D) y límites y elementos de resorte.

Si se usan elementos distintos se debe prestar atención a la compatibilidad de las funciones de desplazamiento, así como transferir cargas límites y tensiones, sobre todo para el acoplamiento de elementos con y sin resistencia a la flexión en los nudos.

6.3.3 Cargas y condiciones de carga

Las principales cargas aplicadas en el análisis de esfuerzos en estructuras de buques, las podemos clasificar en:

- Análisis estáticos, debidas al peso muerto del buque (carga), la presión hidrostática debido a que flota, o la presión de los tanques internos.

- Cargas inducidas por las olas, produce presiones dinámicas, aceleración de masas y efectos de superficie libre, así como impactos hidrodinámicos en la proa.
- Otras cargas derivadas de operaciones del buque, desde la acción de los motores, el timón, grúas o impactos del hielo si opera en aguas congeladas.
- Cargas debido a accidentes, colisiones, varadas o inundaciones.

6.3.3.1 Procedimientos simplificados de introducción de las cargas

Además de las cargas mencionadas, destacar las condiciones en las que se producen, para ello se establecen situaciones de cargas que puede sufrir el buque. Los análisis se deben de realizar de forma que los casos de carga estén equilibrados y perfectamente definidos de forma realista tanto el modelo, soportes y fuerzas en el análisis.

La aplicación de las cargas y combinación de factores de carga, viene determinada en los reglamentos por lo que, simplemente, se recurrirá a los reglamentos y se introducirán tal y como lo mencionen.

Respecto a las condiciones de carga, se representarán todas y cada una de las condiciones que establecen para cada uno de los tipos de buque, es decir, con bodegas llenas al máximo o en condición de navegación en lastre. Y en cuanto a las olas se analizará en el seno y cresta de la misma considerando la más desfavorable, de igual longitud que el buque. Dependiendo del tipo de buque, habrá que hacer consideraciones especiales por su operatividad y las características estructurales que requieren consideraciones especiales requerirán un análisis determinado de la ola más desfavorable, condición de carga, etc. que se requiera para un correcto análisis

6.3.3.2 Modelización de las cargas

Las cargas deben de ser modelizadas de forma realista distribuyéndolas para conseguir fuerzas nodales. Es necesario que el modelo de la estructura se adapte al modelo de las cargas, por lo que es posible que la modelización estructural se aleje de la geometría real para un mejor ajuste de los cálculos. Si las deformaciones se presentan en grandes áreas de la estructura se deben realizar modelos parciales o locales además de introducir las cargas locales de forma pertinente.

6.3.4 Cálculos y evaluación de resultados

Antes y durante la evaluación, los resultados serán examinados para comprobar la plausibilidad de los cálculos. Esto implica, la comprobación de las deformaciones para ver si sus magnitudes se encuentran dentro del intervalo esperado y si sus distribuciones son significativas con respecto a las cargas y condiciones o soportes establecidos en la frontera.

Se debe comprobar también si las fuerzas y momentos en los apoyos se encuentran dentro del orden de magnitud esperado.

Para los modelos locales con límite de deformaciones por los modelos de los cálculos globales, es necesario comprobar si las tensiones cerca de los límites corresponden para los dos modelos.

6.3.4.1 Deformaciones

Las deformaciones de la estructura deben de ser trazadas de forma que puedan ser corroboradas por otras personas u organismos para el control de los resultados. Se trata de una deformación tridimensional en la que la dirección no está claramente definida. Se suelen realizar estudios de deformación en zonas muy concretas como pueden ser las tapas de las escotillas, soportes de plantas propulsoras. Análisis muy concretos a nivel local.

6.3.4.2 Esfuerzos

Los resultados de esfuerzos obtenidos en los cálculos, deben de ser evaluados según lo especificado en el reglamento correspondiente, debiendo cumplir todos los requisitos.

En aquellos casos en los que se ha realizado simplificaciones, deben de ir incluidas en la evaluación. En los modelos globales realizados con mallas gruesas, deben de considerarse el aumento por detalles estructurales locales y discontinuidades que no se han considerado y que deben de analizarse por separado incluyéndolo en la valoración.

6.3.4.3 Esfuerzo de pandeo

Con respecto a la seguridad para el fallo de la estructura por el pandeo debe ser calculado con los criterios establecidos en los reglamentos para el cálculo de los componentes estructurales sometidos a pandeo.

6.3.4.4 Esfuerzo de fatiga

Para el análisis de la resistencia a la fatiga se tendrá en cuenta las estructuras del buque sometidas a tensiones cíclicas. Se analizará los casos de carga indicados, que se eligen de manera que, el esfuerzo en el rango máximo, se alcanza aproximadamente en los componentes de baja consideración estructural.

Para la evaluación se recomienda que factores de utilización se han aplicado; éstos se obtienen a partir la relación de máxima tensión real al rango de tensión admisible para un espectro de tensión equivalente de la misma forma y mismo número de ciclos de carga.

6.4 Análisis global 3D según las sociedades de clasificación

Los objetivos del análisis global mediante elementos finitos es obtener una descripción fiable del buque (como buque viga), calculando y evaluando los esfuerzos y deformaciones globales que produce la estructura primaria (a lo largo de todo el casco del buque) para la verificación de la estructura longitudinal en las condiciones de cargas determinadas. Así como determinar las tensiones en la estructura primaria transversal. En particular, aquellas zonas que están sometidas a torsión, es decir, los longitudinales del forro del costado (palmejares), esquinas de las escotillas y vigas horizontales de mamparos transversales que serán comprobadas con el análisis global.

El análisis se centra en la rigidez y deformaciones características que sufre como buque viga, no analiza zonas con esfuerzos locales, esto último requerirá otro tipo de análisis a partir de las condiciones de contorno que se determinarán gracias al análisis global.

Para una correcta realización de los cálculos se debe realizar el análisis global siguiendo las recomendaciones que dictan los reglamentos y para ello, a continuación, se muestran las recomendaciones generales de las sociedades de clasificación para la aplicación del método de elementos finitos en un análisis global aplicado a una estructura marina.

6.4.1 Idealización estructural

6.4.1.1 Características del modelado

El propósito principal del modelo global, es representar la rigidez global y de forma satisfactoria con respecto al objetivo de los análisis. La efectividad del análisis de la rigidez estructural depende de su longitud, flexibilidad de los soportes, la integración de los refuerzos y sus terminaciones, así como el número de aperturas y escotillas del buque en los mamparos y cubiertas interiores.

El análisis con elementos finitos global, se basa en escantillones brutos incluyendo superestructuras. Debido a cargas asimétricas no se puede trabajar con medios modelos, en algunos modelos es posible que ni su estructura sea simétrica debido a los equipamientos, por lo que hay que modelizar la embarcación entera. El modelo global incluirá todos los

componentes estructurales longitudinales primarios, así como estructura transversal como son los mamparos estancos y cortafuegos además de las cuadernas transversales. Los grandes refuerzos estructurales que aumentan la rigidez del casco debido a maquinaria, como pueden ser, bases de pesadas grúas, brazolas, tapas de escotillas... también se incluirán en esta modelización.

La generación de condiciones de carga requiere que las cargas se aplican de manera realista, es decir, las cargas se transferirán en las posiciones correctas de la estructura del buque. Para los casos de maquinaria como grúas, se debe aplicar la carga en el modelo global para poder transferir momentos y esfuerzos de las maquinarias.

Tener especial consideración con elementos como las tapas de escotilla que requiere modelar las tapas de escotilla o la aplicación de un sistema auxiliar de las tapas para transferir correctamente las fuerzas producidas en la parte superior de la brazola a la estructura del buque. Esto crea grandes deformaciones y fuerzas de contacto que afectan a la deformación del casco. El sistema auxiliar debe ser capaz de mostrar las interacciones entre estos elementos además de definir las cargas que actúan. Este tipo de consideraciones se tendrán presentes si existen elementos semejantes en el buque.

A continuación, se muestran ejemplos de la modelización global de los buques, donde se incluye todo lo mencionado anteriormente. En este caso es la representación de un buque portacontenedores y un buque multipropósito.

Tal y como se aprecia en las imágenes, la modelización se realiza de forma completa del buque incluyendo todos los elementos estructurales principales longitudinales y transversales principales como son las cuadernas y mamparos además de incluir tal y como se dice en las normas, las superestructuras, maquinarias, grúas, para realizar el análisis global conforme lo establecido por las sociedades de clasificación

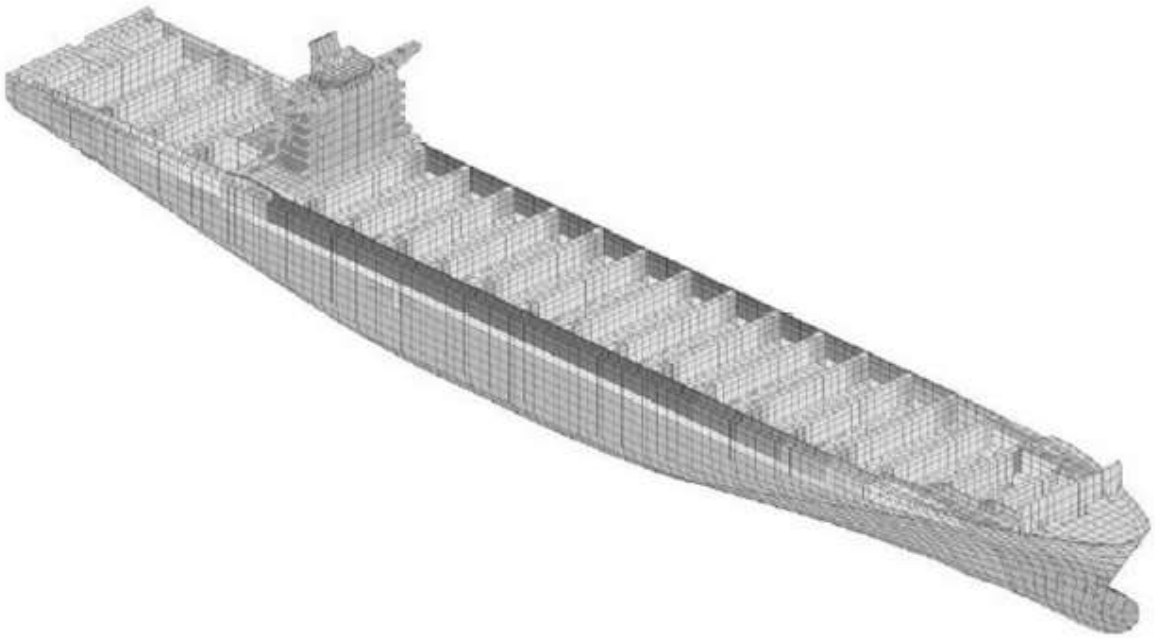


Ilustración 71. Modelo portacontenedores análisis global

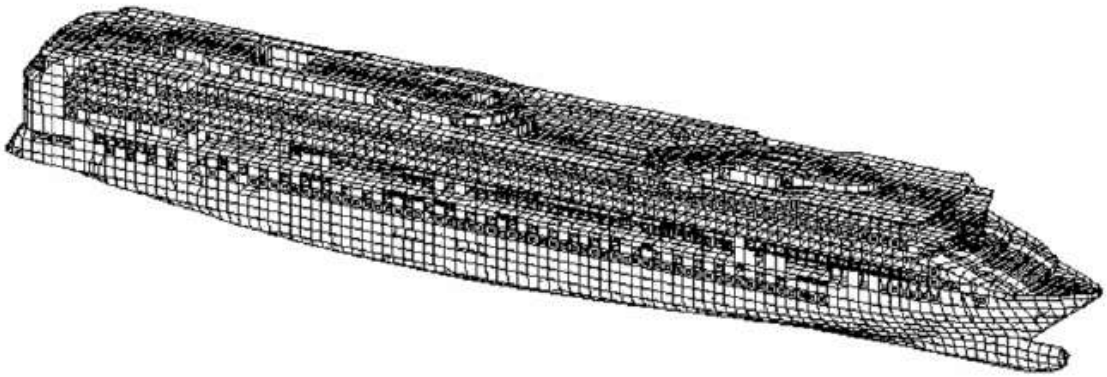


Ilustración 72. Modelo buque de pasaje análisis global

6.4.1.2 Selección de la malla

El tamaño de la malla se determinará en función de la complejidad estructural y diseño de la estructura, dependiendo también de que resultados pretenden obtenerse. El mallado del análisis global, suele ser bastante grueso utilizando solo los componentes primarios de la estructura siempre y cuando se reflejen con absoluta precisión, el comportamiento de flexión de los componentes estructurales primarios. Las superestructuras y los finos de proa y popa son generalmente modelados muy bastos que representan una rigidez realista de aplicación de las cargas. A continuación de representa la densidad de malla para una división de malla aceptable en un análisis global:

- Longitudinal: 3 - 4 m, al menos un elemento entre cada bulárcama.
- Transversal: 3 - 3.5 m.
- Vertical: 1 - 2 elementos entre cubiertas.
- Vigas: 1 elemento sobre la altura.
- Pantoque: 2 elementos sobre el área curvada.

6.4.1.3 Tipo de elementos empleados

Las principales secciones del modelo global deben de concordar con los componentes estructurales primarios de la estructura del buque. Se considerarán las vagras y varengas, cuadernas y bulárcamas, baos, longitudinales palmejares y planchas de entrepuentes y fondo, así como forro del casco. También se considerarán los mamparos estructurales transversales y las estructuras de cimentación de maquinarias de gran envergadura.

El cálculo del análisis de la tensión global causado por la buque-viga da resultados de flexión y torsión de todo el buque. El modelo global no analiza los efectos locales como la flexión de placas rígidas sujetas a presiones hidrostáticas.

Diferentes tipos de elementos pueden ser utilizados en el cálculo global por elementos finitos, existe una preferencia entre elementos de 8/6 nodos, pero también se utilizan el medio tamaño de malla con elemento de 4 nodos. Todos los componentes estructurales primarios han de ser modelizados, preferiblemente por cuatro nodos de tensión plana o elementos de tipo plancha. Las características del tipo de elemento seleccionado se reflejan con precisión la rigidez de la estructura, por lo que, al llevar a cabo un análisis, el conocimiento adecuado de las características del elemento es de vital importancia. Si se

utilizan diferentes tipos de elementos, se prestara atención a la compatibilidad de los desplazamientos, así como la posibilidad de transferir las cargas y tensiones.

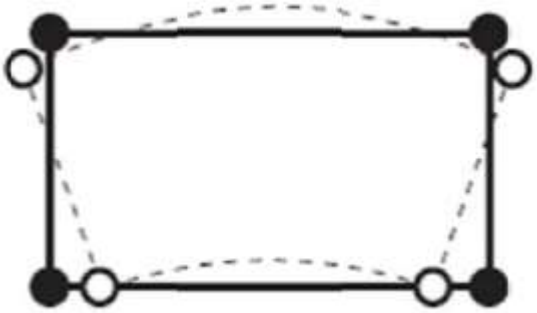


Ilustración 73. Elemento de 4 nodos

Los pilares deben de ser representados por elementos viga definidos por 3 elementos nodos o por 2 nodos cuando se ha utilizado elemento tipo plancha de 4 nodos. Los longitudinales, así como los refuerzos, son agrupados como elementos vigas de 3 o 2 nodos.

Si se utilizan mallas gruesas para el análisis global, es beneficioso utilizar elementos plancha que ofrecen un mejor comportamiento de flexión en el plano cuerpo modelado. La desventaja es que los bordes del elemento pueden divergir, causando una menor rigidez. Sin embargo, si se usa en combinación con la malla gruesa, estos elementos reproducen de manera realista la rigidez del buque-viga.

Se evitaran elementos triangulares con una función de forma lineal. Estos elementos de tres nodos solo pueden representar tensión o estrés. No tienen ninguna característica flexión en el plano y son, por tanto, demasiado rígido en las zonas de gradientes de tensión significativos. Elementos de cuatro nodos con ángulos interiores inferiores a 45 grados o por encima de 135 grados entre bordes serán evitados también.

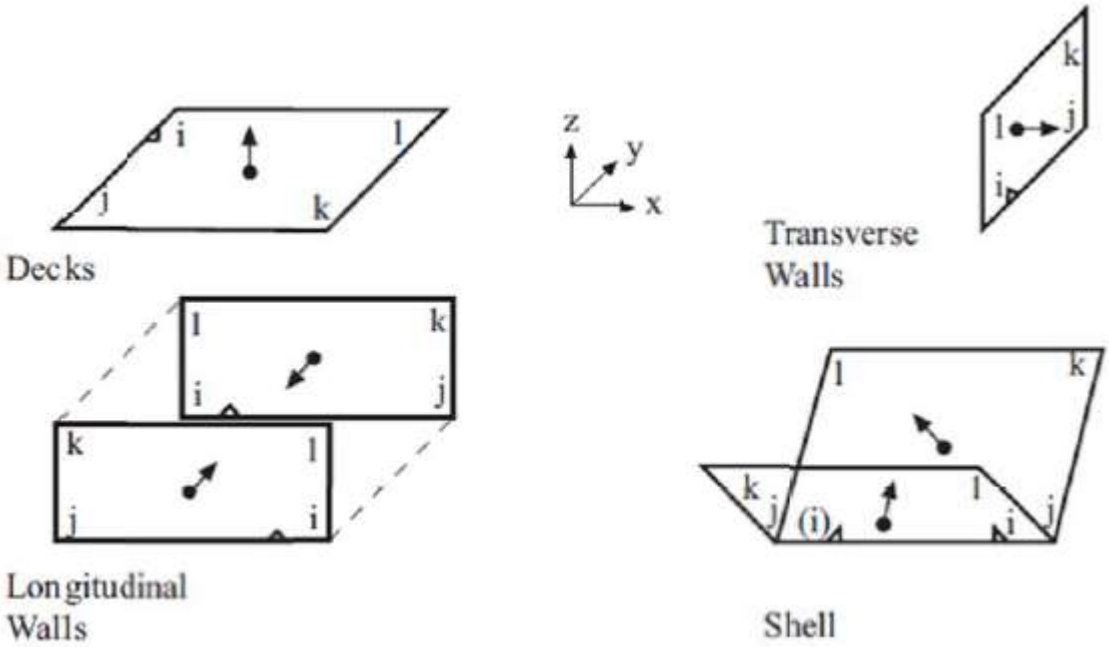


Ilustración 74. Orientación de los elementos

	ij-Direction	ij-Edge	Normal vector direction to
Decks	Transverse	Aft	Top
Longitudinal walls	Longitudinal	Bottom	Inside
CL walls	Longitudinal	Bottom	PS
Transverse walls	Transverse	Bottom	Fore
Shell	Longitudinal	Inwards/ Bottom	Inwards

Ilustración 75. Orientación según su posición

6.4.1.4 Modelización de la estructura

Debido a la complejidad de la estructura del buque se realizaran simplificaciones que son necesarias en el modelaje. Estas simplificaciones están permitidas, siempre que los resultados se vean afectados de manera insignificante, es decir, mantengan el comportamiento estructural real. Los componentes secundarios o detalles estructurales, afectan solo marginalmente a la rigidez y pueden despreciarse en el modelo tal y como se ha mencionado para el análisis global.

Agujeros, pasos de hombre o recortes de tamaño significativo siempre se consideraran en el cálculo debido a las tensiones de cizalladura que provocan. Una reducción en el espesor del elemento puede reducir la rigidez y se deben considerar, un ejemplo de reducciones en el espesor, es el debido a la oxidación que se debe aplicar esta reducción en los análisis. Estas reducciones vienen determinadas por fórmulas de los reglamentos para cumplir la integridad estructural. A continuación de muestra el resultado al detalle del tamaño de la malla en el análisis global y sobre elementos estructurales considerados a modo de referencia y de forma visual.

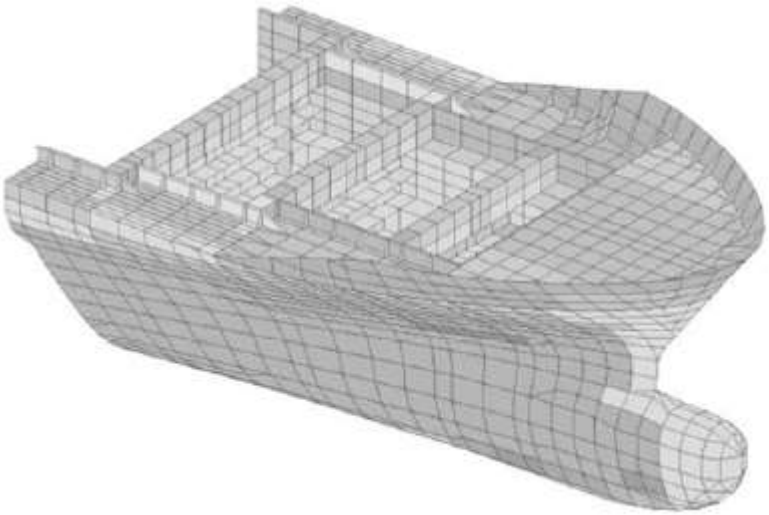


Ilustración 76. Detalle proa en análisis global

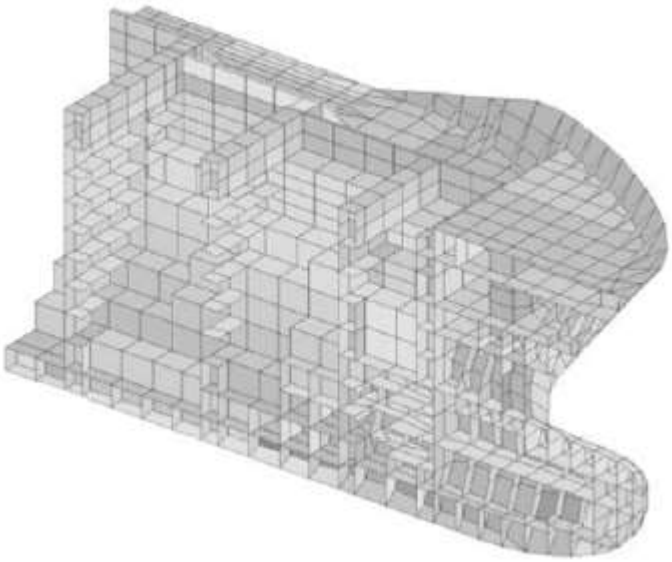


Ilustración 77. Detalle mallado estructura proa para análisis global

6.4.2 Condiciones de contorno

Una condición importante en el análisis global mediante elementos finitos, es el establecer un balance con el mínimo de fuerzas de reacción. Las fuerzas de reacción indicaran como de bien se han calculado las reacciones. Ninguna de las fuerzas de reacción, debe de exceder el 2% del total del peso de la estructura.

La condición de contorno que se suele utilizar en el análisis global es la “simplemente soportada” para evitar de esta forma, la creación de esfuerzos. Esto se debe a que como el buque y el peso de la carga están en equilibrio con el empuje hidrostático, estos elementos de contorno no deben transferir cargas ya que alterarían los resultados finales.

Las fijaciones de estos puntos de control son aplicadas en la línea de crujía, en el fondo y cerca de la proa y popa por lo que suelen utilizar el mamparo del pique de proa y el mamparo de proa de la cámara de máquinas y el pique de popa quedaría muy retrasado afectando los cálculos.

Normalmente suele soportarse con una distribución típica basa en tres posiciones:

1. En la línea base, en el mamparo de proa de la cámara de máquinas, fijada la traslación en los ejes.
2. En la primera cubierta desde el fondo, fijado en la dirección transversal.
3. En la línea de crujía en la base del buque justo en el mamparo de colisión de proa (pique de proa), fijado en la dirección transversal y vertical.

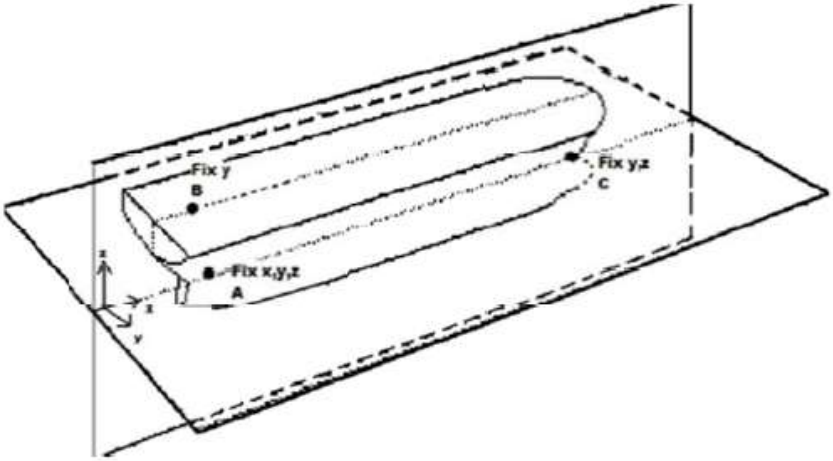


Ilustración 78. Posición de los apoyos

Otra forma de disposición de los soportes para eliminar movimientos rígidos del cuerpo en el modelo global es establecer seis soportes como resortes de alta rigidez con la disposición que se muestra a continuación.

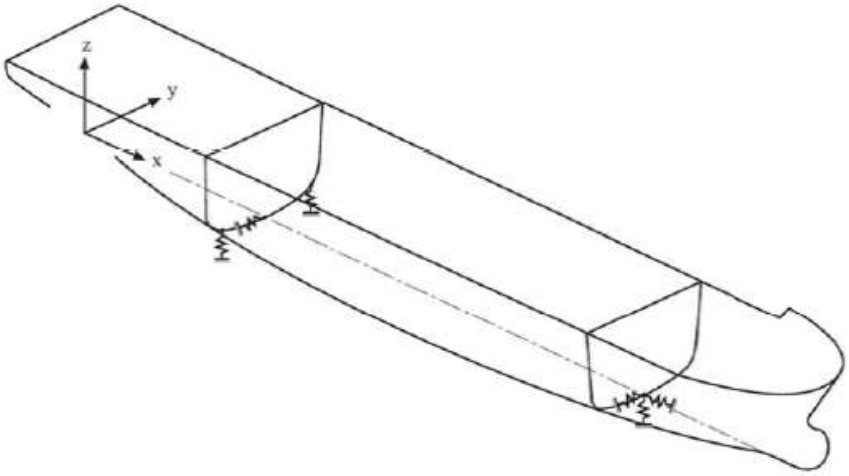


Ilustración 79. Posición apoyos para buque completo

	Location	Direction
Engine room front bulkhead	SB	Z
	CL	Y
	PS	Z
Collision bulk-head	CL	X
	CL	Y
	CL	Z

Ilustración 80. Ejes restringidos

Como se aprecia en la distribución de las condiciones de contorno en los ejemplos anteriores, cada reglamento o sociedad de clasificación, establecerá sus recomendaciones

para de esta forma que se asegure que el análisis global sea correcto y fiable. Pero se aprecia una gran semejanza de la localización de los soportes y las restricciones entre todos ellos.

6.4.3 Condiciones de carga para el análisis global

En conformidad con los reglamentos, el análisis global exige analizarlo en varias condiciones de carga ya que se debe asegurar, que no excedan valores límites en todas las condiciones de carga que se pueden dar en la vida útil del buque. Por lo que se realizará un análisis global para cada uno de los estados de carga indicado según sea el tipo de barco.

El análisis global del modelo ha de representar la distribución de masa del casco, así como las masas de otros componentes con una gran aproximación acertada de la realidad. Sele le dará un valor incrementado para dar cuenta de los elementos estructurales no incluidos (estructura secundaria).

El peso de la estructura se obtiene aplicando densidad al material metálico. De esta forma se establece la posición del centro de gravedad y se verifica la distribución de pesos, factor determinante en el buque. Una aplicación distinta de la densidad del material puede producir un cambio a lo largo del buque. El resto de pesos del buque, se representará como una masa concentrada en el centro de gravedad de cada uno de esos componentes. Todas las masas deben de adjuntarse alrededor de la estructura del buque.

Los pesos importantes a considerar en el análisis global como; el motor principal, maquinaria auxiliar, generadores, deben de ser modelados como masas en un punto alrededor de la estructura en sus precisas localizaciones. En el caso de algunos buques como puedan ser los de pasaje, ro-ro… la distribución de masa de los coches o las personas se introducirá también como un punto de masa en la estructura.

El líquido en los tanques debe de representarse como cargas de presión donde corresponda o puntos de masa en la base del tanque o contorno. No es necesario para incluir la presión local en el análisis global.

Para las condiciones de carga principales, se encuentran principalmente dos estados de carga; Casos carga estática y cargas inducidas por la ola. La presión hidrostática del agua tiene que ser aplicada a lo largo de la parte mojada del casco. En el caso de un estado de carga que incluya la situación de quebranto o arrufo del buque ese momento de la ola debe de ser modelado y distribuido a lo largo del casco para crear esa distribución de presión de la ola a lo largo del casco.

Hay que destacar que, en ciertos buques como los multipropósitos, incluyen elementos como grúas, o cargas especiales de contenedores por lo que estas cargas se deberán incluir en los cálculos como cargas puntuales. En el caso de las grúas, existen estados de carga especiales para analizar en condición de puerto, es decir durante la carga o la descarga ya que es cuando éstas se utilizan y crean esfuerzos importantes en la estructura del buque.

Los componentes del peso en rosca, como la estructura del casco, maquinaria y equipo, equipamiento, etc. son iguales para todas las condiciones de carga contempladas. Habrá que considerar que los consumibles, los efectos y los víveres varían, así como otros pesos, tales como tanques y el agua de lastre, se definirán en función de cada condición de carga, además de cada situación de carga correspondiente. Las situaciones de carga vienen definidas en los reglamentos dependiendo del tipo de buque por lo que simplemente hay que analizar esas situaciones según el tipo de buque y seguir el dictamen de las sociedades de clasificación.

En general, para todas las condiciones de carga se generan los casos de carga estática, mientras que los casos de carga inducidos por las olas son derivados sólo para los casos de carga de navegación marítima que dependiendo del buque se simulará de una forma u otra.

Las herramientas aplicadas para calcular las cargas se basarán en software reconocido y aceptado por las sociedades de clasificación por su fiabilidad en los cálculos. De esta forma puedan dar resultados satisfactorios para las sociedades de clasificación.

6.4.4 Comprobación del modelo

El modelo global de elementos finitos debe de ser comprobado sistemáticamente a los siguientes errores:

- Nodos fijos.
- Nodos sin refuerzo.
- Nodos intermedios en bordes de elementos no conectados al elemento.
- Vigas cruzando elementos plancha.
- Tipos de doble plancha.

Adicionalmente se realizará la verificación del material y la descripción de la geometría de todos los elementos. Además de los momentos de inercia y los ejes neutros de las secciones tipo plancha tiene que ser revisado.

Recordar que para cada uno de los estados de carga la reacción en los soportes de apoyo debe de ser prácticamente inexistentes o muy bajas para la veracidad de los cálculos.

Para comprobar las condiciones de contorno y detectar algún fallo, se realizará un cálculo para su verificación. El sistema deberá ser cargado con una fuerza unitaria en cada una de las direcciones de las reacciones. Esto ayudara a encontrar áreas y zonas con fallo de conexión entre los elementos adyacentes.

Todas las comprobaciones, deben de ser recogidas y redactadas analizadas e impresas para la aceptación de los cálculos. A continuación, se muestran ejemplos de esas comprobaciones:

Ilustración 81. Verificación cálculos

6.4.5 Evaluación de los resultados

Con respecto a la evaluación de los resultados obtenidos del análisis, se compararan con los valores máximos estipulados en las normas y se comprobara que no se excede de dichos valores. Una vez más y dependiendo del tipo de buque, se remitirá a unas normas u otras para la verificación de los resultados para cada uno de los resultados para cada uno de los estados de carga del buque. Se consultaran los capítulos concretos correspondientes a las sociedades de clasificación donde estipulan los parámetros aceptables correspondientes a cada tipo de buque. A continuación, se muestran ejemplos de los resultados que se obtienen en un análisis global según el estado de carga determinado en distintos buques.

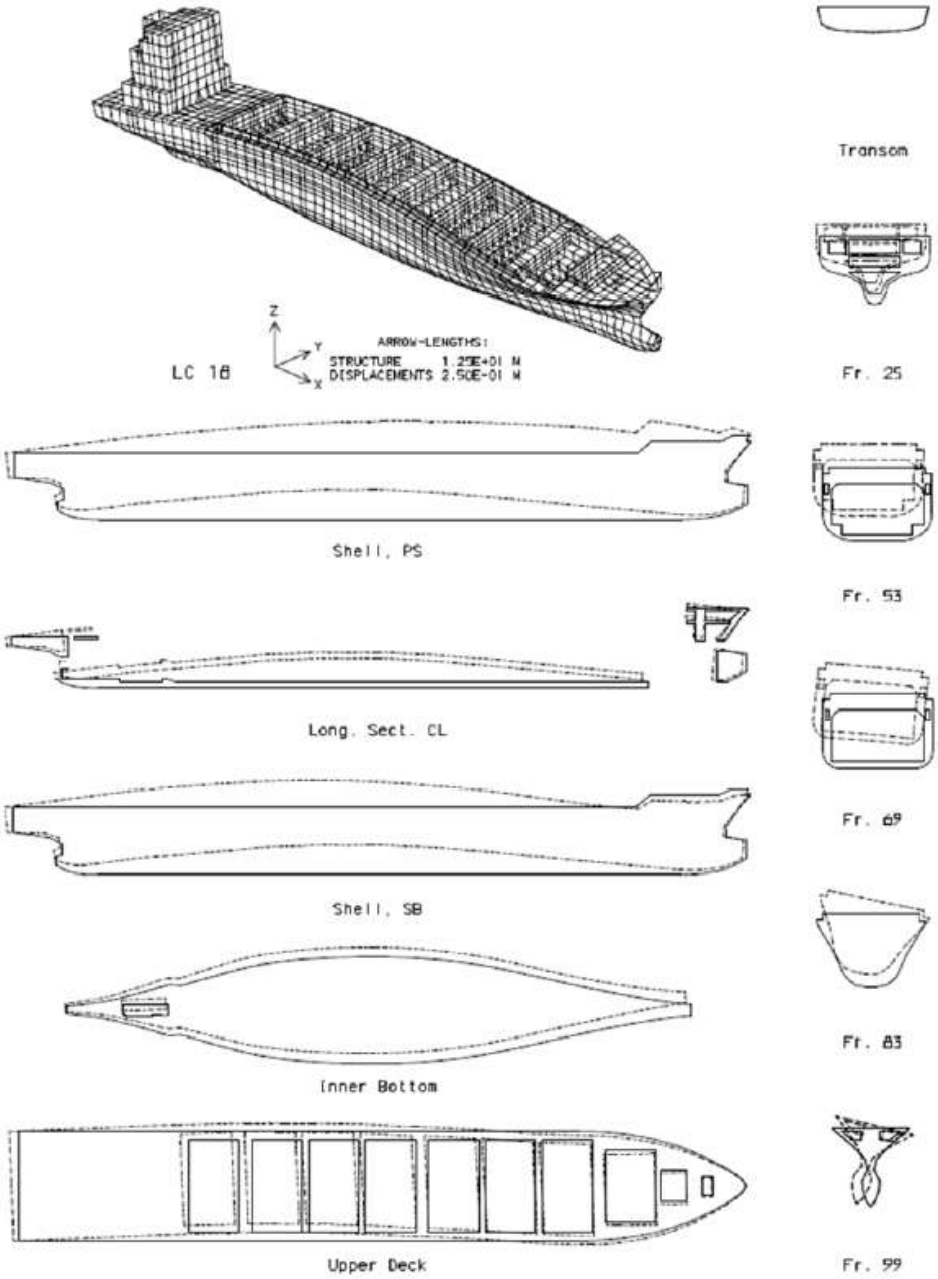


Ilustración 82. Deformaciones en análisis global

6.5 Análisis parcial 3D según las sociedades de clasificación

En cualquier sociedad de clasificación que se examine, aparece la guía de como analizar mediante elementos finitos para realizar los cálculos del casco con absoluta seguridad y certeza y siempre, cumpliendo las normas especificadas en sus respectivos reglamentos. Toda recomendación empieza con un análisis global, definido anteriormente, con una densidad de malla bastante elevada para evaluar globalmente el buque-viga, así como para establecer las condiciones de contorno para futuros análisis parciales y locales junto con la deformación y el pandeo de la estructura. A partir de este punto, se requiere una malla más fina para empezar a analizar que muestre el análisis parcial mediante elementos finitos. Se utilizara de diferente forma que, en el paso anterior, el análisis global, con una malla más fina y donde las cargas aplicadas, los procedimientos de análisis y la evaluación deben ser cuidadosamente introducidos para una buena práctica de ingeniería.

Se presentara información relativa para las áreas críticas, la densidad de malla para el análisis parcial incluso la densidad de malla para un análisis local de detalle para garantizar la seguridad estructural del buque, todo ello, para el cumplimiento de las reglas establecidas siguiendo el análisis pertinente.

Para la seguridad del casco frente a todos los esfuerzos producidos requiere de un análisis global y uno parcial con el cumplimiento del reglamento en función del tipo de buque que se analice, cumpliendo del reglamento en función del tipo de buque que se analice, cumpliendo las condiciones de carga y criterios de evaluación. El análisis global como se ha mencionado con anterioridad se centra principalmente en los requerimientos de espesor de los miembros estructurales, longitudinales y principales transversales, mientras que, en un análisis parcial con una malla más fina principalmente se centra en los requerimientos de las áreas críticas detectadas en ese análisis global, estas áreas, pueden ser las conexiones estructurales sometidas al pandeo, aperturas, escotillas… A continuación, se muestra un diagrama típico en el procedimiento de cálculo mediante elementos finitos.

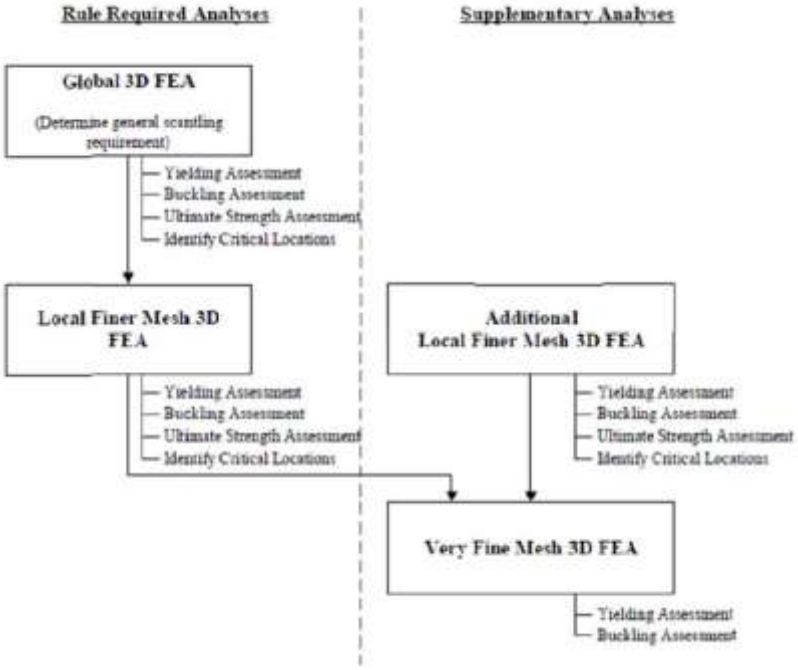


Ilustración 83. Diagrama proceso de cálculo recomendado

Todo esto al realizar un mallado más fino, se reflejará en los cálculos y destacar que puede ser necesario un tercer análisis local con mucho detalle introduciendo todos los

componentes estructurales para la verificación de esas áreas críticas. Para una certeza del nivel de detalle que se precisa queda a juicio de ingeniería quien decidirá el nivel de aproximación local y el detalle necesario.

Algunos puntos de los que posiblemente si requieran esos análisis locales específicos, vienen listados e indicados

- Áreas de gran esfuerzo detectado en el análisis global.
- Áreas y detalles que no han sido representados en el análisis global.
- Problemas surgidos anteriormente en buques semejantes.
- Accesos de brazolas y escotillas de carga.

6.5.1 Idealización estructural

6.5.1.1 Características del modelado

Se utilizan modelos parciales del buque-viga a partir de los análisis de las tensiones globales de la estructura correspondiente, por ejemplo, la zona central del buque que son las bodegas de carga. El modelo parcial de elementos finitos en 3D representa las estructuras del casco en una zona relativamente amplia, una zona de 0,4·L en medio del barco.

El motivo de esta zona de 0,4·L es que, durante la fase de diseño inicial, solamente está disponible la cuaderna maestra. En este caso, se supone que las tres bodegas de carga tienen la misma forma prismática con el fin de determinar los escantillones de las secciones transversales típicas y estructuras de doble fondo. Sin embargo, la parte inferior de las estructuras del casco debe ser evaluada usando la forma real casco. Por consiguiente, es aconsejable comenzar con un modelo prismático sencillo, seguido de un modelo real de la forma del buque. Se utiliza para determinar tanto la respuesta parcial de la sección del buque-viga y el comportamiento local de las principales estructuras de soporte.

Para evaluar las estructuras parciales del buque con una precisión razonable, los modelos de elementos finitos colocan la bodega de carga en el medio y se extienden aproximadamente la longitud del lado a proa y popa. Además, hay una corta extensión más allá de los mamparos transversales en ambos extremos.

Las deformaciones mostradas en el resultado del análisis global serán introducidas en este caso como condiciones de contorno en los modelos parciales para detectar con mayor detalle las zonas críticas de esfuerzos, normalmente en la zona de carga alrededor de la sección media. Hay que llevar cuidado en las condiciones de contorno del modelo. A continuación, se muestran algunos ejemplos de aplicación de modelos parciales en las secciones indicadas del buque en las zonas de mayor acumulación de tensiones.

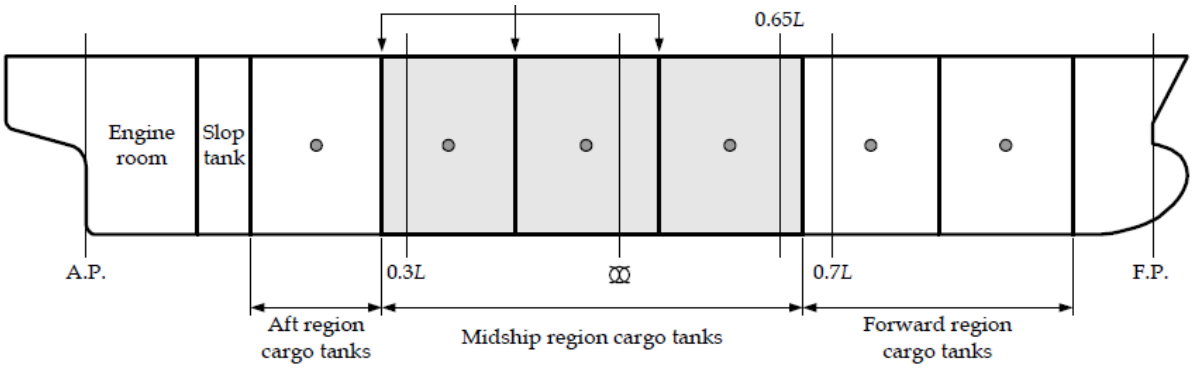


Ilustración 84. Sección media para modelo parcial

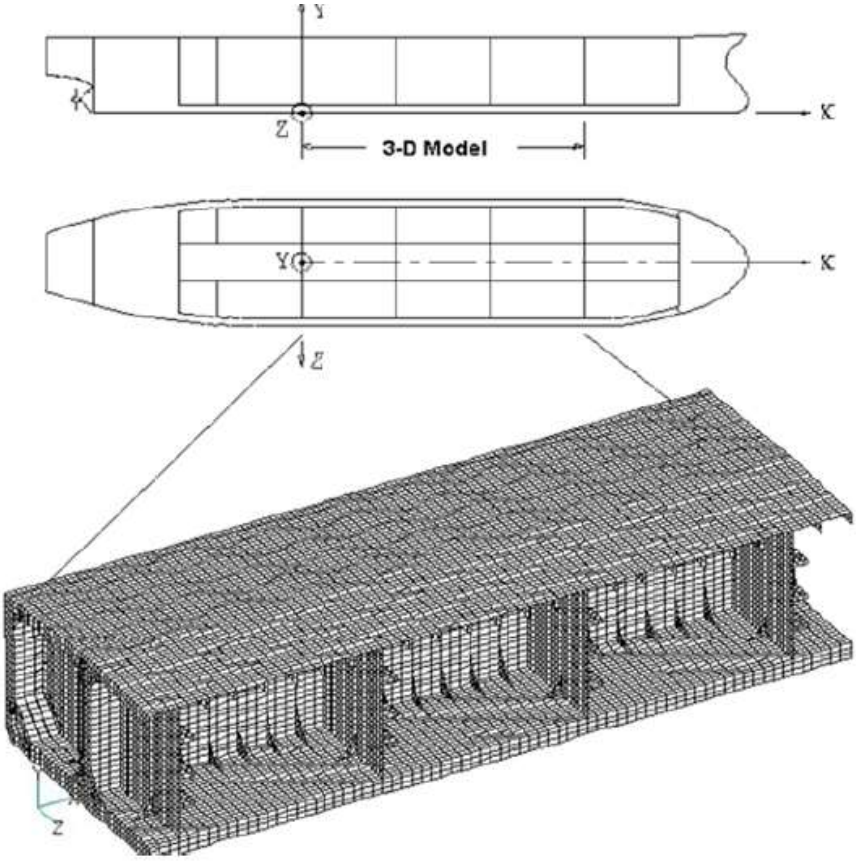


Ilustración 85. Mallado modelo parcial petrolero

Mostrado el modelo típico en 3D de distintos tipos de buques se debe de saber que en estos análisis se incluye n elementos:

- Cuadernas, bulárcamas, topes de tanques incluyendo distintas cubiertas y toda la estructura longitudinal
- Los mamparos corrugados transversales, así como los piques, túnel de tuberías, vagras y varengas
- Toda la estructura del doble fondo, tanques de combustible y lastre incluyendo elementos no considerados en el análisis global.

A continuación, una vez más se aprecia un ejemplo del modelo parcial, en el que se aprecia todo lo mencionad o hasta ahora, un mallado fino, sección crítica del buque, con todos los elementos estructurales dispuestos p ara el análisis incluyendo todos los contretes y consola s en los espacios de fondo, doble fondo, tanques y cubiertas.

Mencionar también que los resultados de éste análisis parcial deben de cumplir las normas establecidas sino habría que modificar la estructura global y rehacer los cálculos por lo que una vez más se precisa el trabajar con los reglamentos, así como seguir las recomendaciones de aplicación del M.E.F.

Para la colocación centro de coordenadas en análisis parciales se recomienda que el origen se sitúe en el mamparo de popa de las bodegas de carga, justo en la intersección de la línea de base y los plan os de la línea de crujía. Este origen se utiliza para todos los sub-modelos.

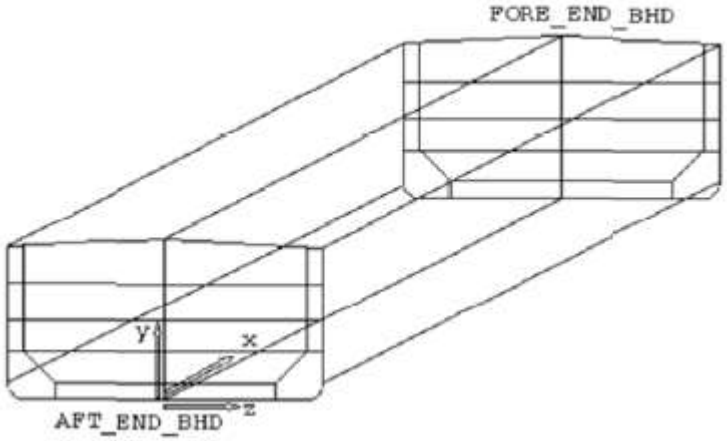


Ilustración 86. Coordenadas referencia en análisis parciales

6.5.1.2 Selección de la malla

El tamaño de malla de los modelos parciales MEF no debe ser tan fino como para incluir los efectos de la tensión terciaria en los resultados. En consecuencia, las directrices para el tamaño de la malla de cada elemento estructural se enumeran en los reglamentos.

Normalmente se aplican tamaños de malla estandarizados para los análisis parciales donde se incluyen ya, detalles estructurales que en caso de ser necesario se realizará una evaluación detallada de estos detalles en los análisis locales con una malla aún más fina justificada por un s buenas prácticas y /o experiencia. A continuación, se muestran unos detalles del tamaño de malla en detalle el análisis parcial aplicado a estructuras marinas en distintos buques.

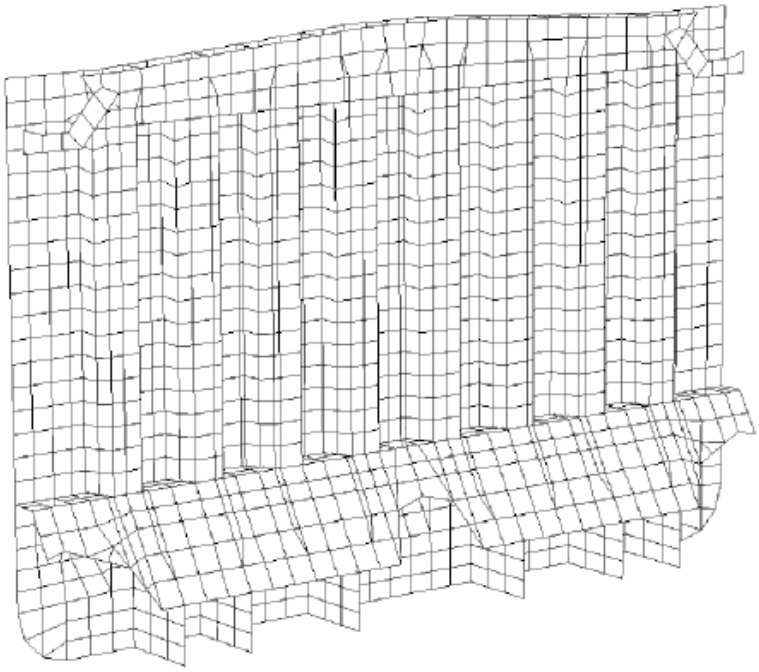
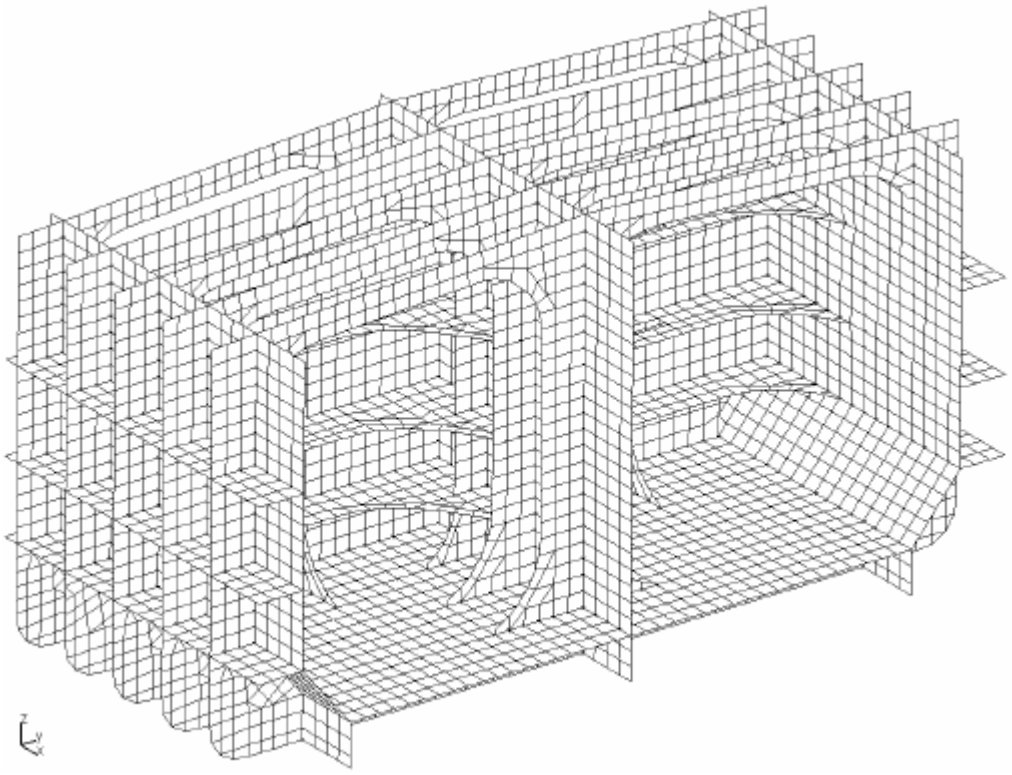
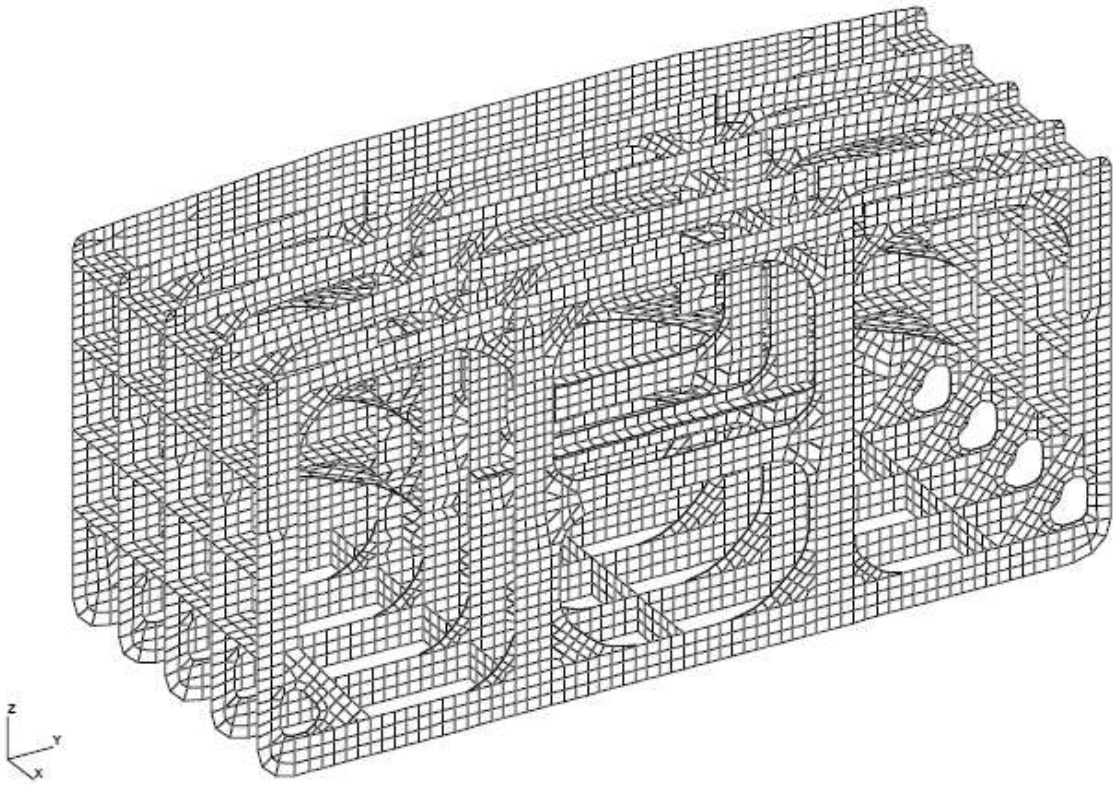


Ilustración 87.Típica malla de elementos finitos en una estructura de mamparo corrugada transversal



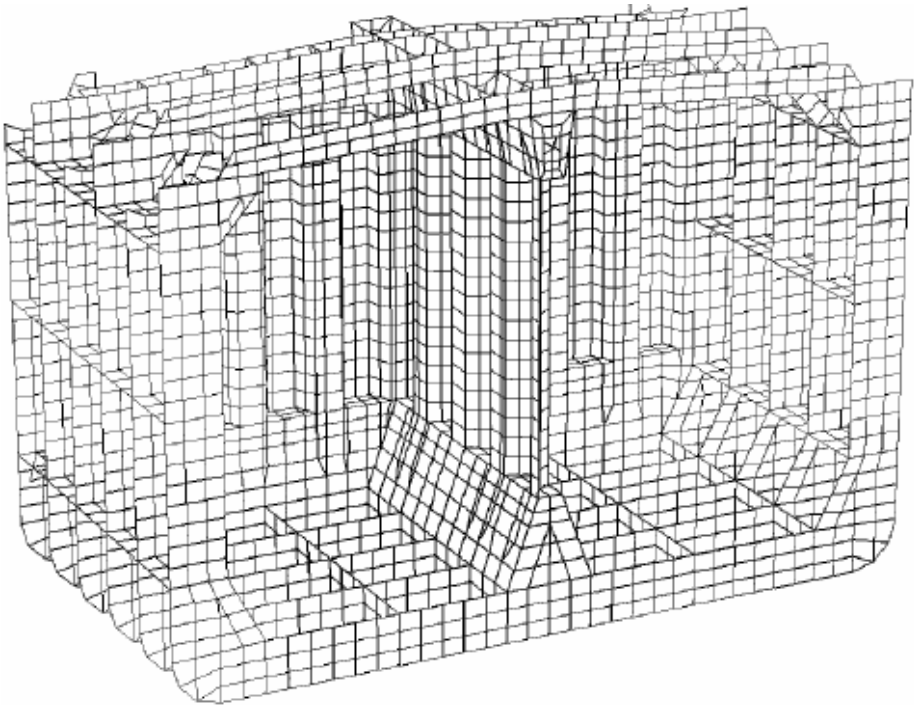
Aframax Oil Tanker

Ilustración 88.Disposiciones típicas (Aframax) de malla de elementos finitos de la estructura del tanque de carga



VLCC

Ilustración 89.Disposiciones típicas (VLCC) de malla de elementos finitos de la estructura del tanque de carga



Product tanker

Ilustración 90.Disposiciones típicas de malla de elementos finitos de la estructura del tanque de carga

6.5.1.3 Tipo de elementos empleados

En general, el barco modelo estructural de elementos finitos, cuya geometría, configuración y rigidez se aproxima a las estructuras reales del casco del barco, se compone de cuatro tipos de elementos:

Para refuerzos:

- Elemento de fijación (elemento barra) sólo un área de sección transversal constante a lo largo de la longitud del elemento.
- Elemento viga, elemento de torsión y comportamiento bidireccional y resistencia a la flexión con propiedades constantes a lo largo de la longitud del elemento.

Para las placas:

- Elemento de placa de membrana
- Elemento placa con rigidez en el plano

Estos cuatro tipos de elementos simples se consideran suficientes para representar las estructuras del casco a pesar de que existen tipos de elementos de orden superior. Las estructuras de los buques consisten en varias placas rígidas. Estas placas rígidas están representadas por una combinación de placas de membrana y elementos barra.

La determinación de la orientación se basa en el elemento estructural. En general, la búsqueda de los miembros longitudinales es en la dirección longitudinal y en los m amparos transversales es en la dirección vertical. El uso combinad de placas de membrana y elementos de barra puede simplificar los procesos de modela o y reducir el número total de grados de libertad en el modelo. Sin embargo, las operaciones adicionales, pueden dar lugar a resultados menos precisos para algunos elementos. La combinación de placas de flexión y

elementos de viga es preferible, ya que la tecnología informativa ha avanzado hasta el punto de que el tiempo de cálculo no es un problema para el análisis MEF.

Los elementos tipo membrana son de 4-nodos, puede ser utilizado e n la conexión con tamaño de malla como se describe a continuación. En condiciones normales, no se pueden utilizar elementos de lámina o membrana de 3 nodos con tensión constante. No obstante, puede ser utilizad o de forma limitada para evitar transiciones de malla pobres. La malla de elementos debe representar, los paneles de placas reales entre los refuerzos de manera que las tensiones y la resistencia al pandeo s e puedan promediar los resulta dos sin interpolación o extrapolación.

En la práctica lo aplicamos de la siguiente forma; se debe introducir como mínimo tres elementos sobre la altura d las vigas. La malla debe, en general, seguir el sistema de refuerzo de la viga por las tramas principales.

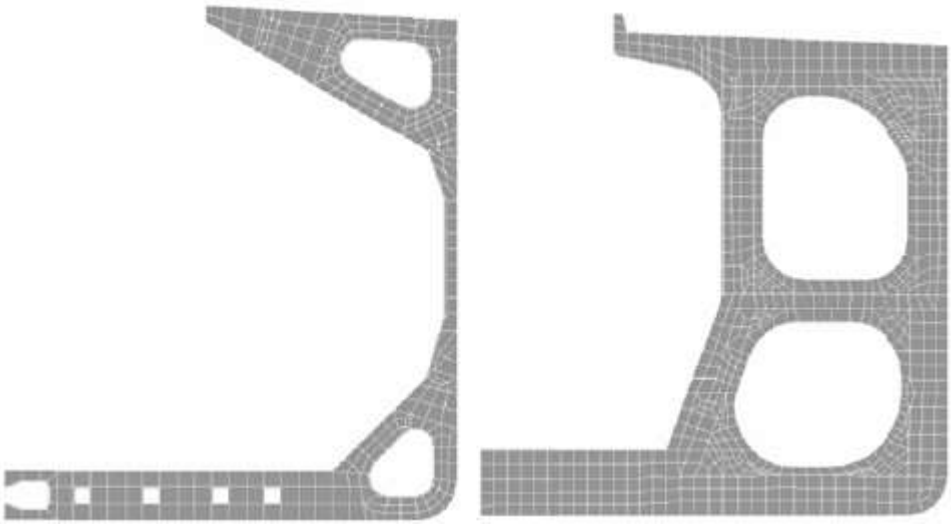


Ilustración 91. Número de elementos según zona

Uno, dos o tres elementos entre las vigas transversales. Suelen utilizarse tres elementos para las secciones principales. Algunos refuerzos para la flexión local se incluyen en los resultados. Las alas de los soportes no deberán estar conectadas a la chapa, con el fin de simular el embridado en las escuadras estructurales. Esto se aplica también a las conexiones inferiores y los soportes del extremo superior.

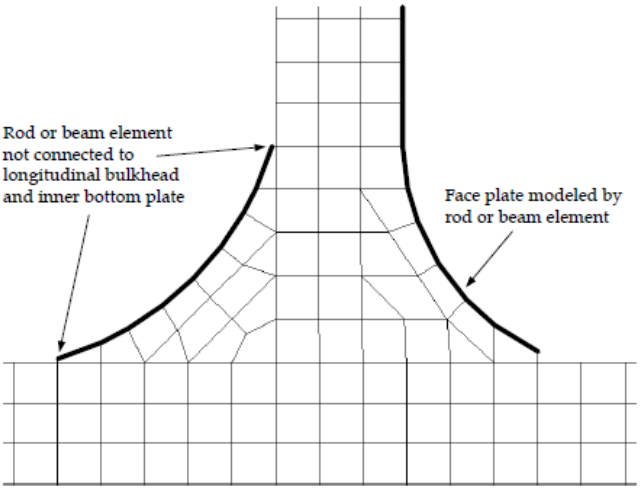


Ilustración 92. Remates en modelos parciales

Se puede considerar una malla más refinada para facilitar la modelización de los contretes con las vigas horizontales, así como en vigas verticales y los amparos transversales de los bulkcarrier. El colocar sólo un elemento entre los longitudinales, contribuye a una correcta transferencia de la carga de d el sistema longitudinal al transversal.

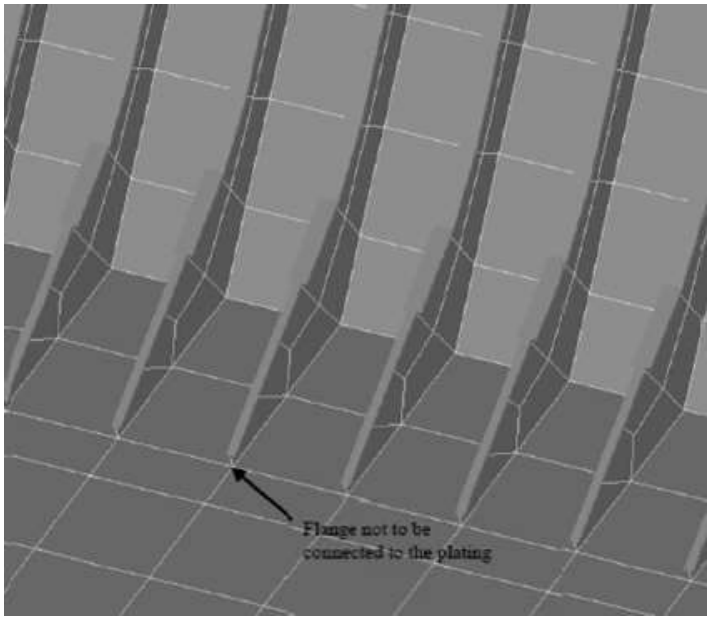


Ilustración 93. Detalles bulárcamas en modelo parcial

En el interior del tanque tolva, las mallas están limitad as debido a las estructuras circundante. La malla debe seguir el sistema de refuerzo en la medida de lo posible siendo lo suficientemente fina para r presentar las grandes aberturas el interior del tanque de tolva.

Se recomienda la utilización de un elemento o más en cada alma y ala de las ondulaciones de los mamparos corrugados. Se recomiendan dos elementos. Esto es satisfactorio para la determinación la tensión en el mamparo.

Para los longitudinales y otros refuerzos continuos se tienen que incluir en el modelo. Estos preferentemente son representados por elementos tipo viga excéntricos de dos nodos.

6.5.1.4 Modelización de la estructura

Para la evaluación de la resistencia de las estructuras en el centro del buque (0,4 L), el modelo de elementos finitos se construye con el objetivo de capturar los siguientes comportamientos estructurales:

- Esfuerzo de flexión y deformación primario. Se trata de un buque-viga so metido a flexión inducido por cargas sobre el buque-viga.
- Esfuerzo de flexión y deformación secundaria. Los paneles rígidos, tales como el forro del costado, mamparos longitudinales y doble fondo, se deforman con cargas locales entre los mamparos transversales.
- Flexión secundaria adicional. Los paneles rigidizados entre las bulárcamas transversales se deforman bajo cargas locales.
- Flexión terciaria. El revestimiento se dobla localmente entre refuerzos debido a la carga de presión local. El "estrés terciario" es fuera de plano de esfuerzo de flexión de la placa, linealmente distribuida a través del espesor, que tiene tensiones de compresión y de tracción en las dos superficies de la placa.

Además, podemos definir las tensiones en las estructuras internas transversales, de la siguiente manera:

- Esfuerzos y deformación en los mamparos transversales
- Esfuerzos y deformación de los principales elementos de apoyo para la obtención de resultados del pandeo.

Para la modelización de la estructura para un análisis parcial, deben de incluirse elementos estructurales para una buena representación estructural de la verdadera estructura del buque. Para ello se deben de considerar distintos aspectos entre los que destacan; las aperturas y pasos de hombre o pasos de tuberías en cuadernas y bulárcamas se deben incluir en el modelo. Es decir, si tales recortes afectan a la distribución de la resistencia total o rigidez del buque, la apertura se refleja en el modelo. Las aperturas más pequeñas como los registros de inspección visual y las tuberías pueden ser ignoradas. Sin embargo, cuando se ignoran este tipo de aberturas debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados.

Los refuerzos continuos orientados en la dirección de las vigas contribuyen a la rigidez de las vigas y se incluirán en el modelo de tal manera que la rigidez a la flexión de la viga sea modelada correctamente. Los refuerzos discontinuos pueden ser incluidos en el modelo como elemento viga con efectividad reducida. Los refuerzos en vigas perpendiculares a las uniones también pueden ser incluidos en el modelo cuando se consideren importantes, transfiriéndolos a los nodos más cercanos en lugar de introducir nodos adicionales.

Los mamparos corrugados se incluirán en el modelo. Así como las placas inclinadas, ya que transfieren las cargas de la unión entre los corrugados con el costado y fondo. Normalmente es difícil hacer que coincida la malla con las ondulaciones, por lo que un enfoque práctico es ajustar la malla a las ondulaciones. Las ondulaciones tendrán entonces su verdadera forma geométrica. Se propone utilizar uno o dos elementos de cuatro nodos sobre la ondulación. Siguiendo esta formulación del modelo queda una buena representación de la respuesta del mamparo corrugado.

Las brazolas de escotilla se incluyen en el modelo. Cuando es necesario evaluar la resistencia en las esquinas de la escotilla, se debe hacer un modelo de malla fina separada, un análisis local. Las cubiertas de las escotillas no se incluirán en el modelo. A menos que las condiciones de carga, implique que haya que incluirlas. Los resultados en estas áreas se limitaran a las concentraciones de tensiones obtenidas en el análisis global como buque viga.

6.5.2 Condiciones de contorno

Considerando un estado de equilibrio estático, el cuerpo libre del buque viga está sujeto a momentos torsionales, así como fuerzas en los dos extremos. Esas fuerzas finales en los extremos son expresadas como fuerzas normales en el buque viga y como condiciones de contorno, fuerzas nodales, impuestas al modelo parcial. A pesar de que las cargas locales y de contorno están en equilibrio, para el modelo de elementos finitos sigue necesitando algún tipo de apoyo con el fin de ser estáticamente estable, por ello y para el cálculo del modelo parcial de elementos finitos se necesitará algunos soportes para conseguir ese equilibrio estático de la estructura. Estos soportes son calculados y diseñados para minimizar los efectos horizontales y verticales sobre el buque, así como los momentos torsionales en el modelo.

Como se ha mencionado anteriormente, cada uno de los distintos tipos de buques, tiene sus propias características estructurales por lo que se deberán de considerar de diferente forma para un correcto análisis con elementos finitos. Para ello y u na vez más, se recurre a los reglamentos para ver a qué tipo de esfuerzos está sometido cada tipo de buque, conocer sus límites estipulados y sobretodo en qué zona se darán. Todo ello conlleva unas modificaciones en las condiciones de contorno para cada uno de ellos.

Sabiendo que las fuerzas y momentos sobre la estructura del buque no están completamente equilibradas es recomendable introducir soportes de contorno especiales utilizan do elementos tipo barra tanto en las direcciones horizontales como en la vertical. Estos soportes estarán por un extremo conectado al modelo y por otro totalmente fijo.

6.5.2.1 Buques tanque

La localización de los elementos tipo barra en los tres tipos de buques tanque, se muestran a continuación. En adición a los soportes horizontales y verticales, existen dos puntos a lo largo del buque en los mamparos transversales justo con las intersecciones de los refuerzos cerca de la vertical del eje neutro de esos refuerzos que deben de quedar fijados en la dirección X.

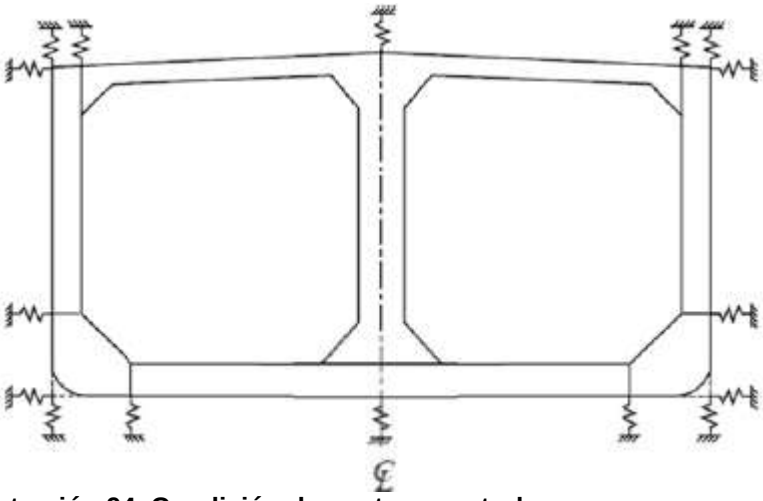


Ilustración 94. Condición de contorno petrolero mamparo en crujía

6.5.2.2 Buques bulkcarrier/ O.B.O

Para establecer una correcta aplicación del momento torsor en el bulkcarrier en elementos finitos en un modelo parcial, se deben de establecer las condiciones de soporte re queridas en los buques tanque. Los soportes con dos finales usados en el análisis estructural de buques tanque aquí son modificados por un solo fin. El extremo delantero del modelo es cambiado por elementos barras verticales y laterales. Los soportes verticales son situados longitudinalmente en los m amparos transversales y en la planchas del costado. Los horizontales, se sitúan en la cubierta, fondo, planchas del doble fondo en los costados de babor y estribor.

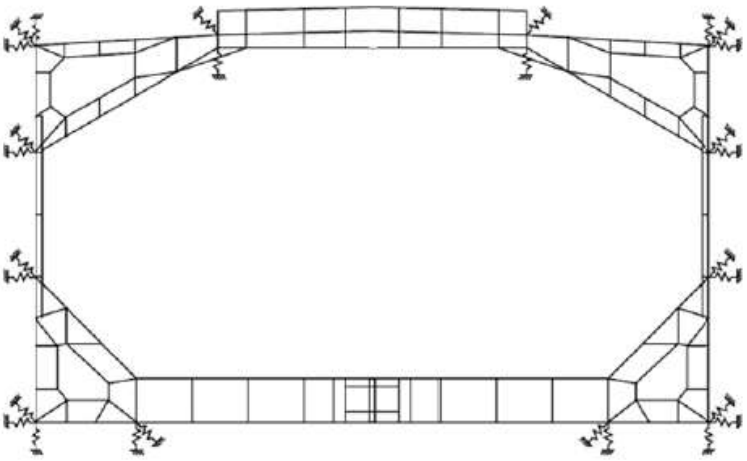


Ilustración 95. Condición de contorno bulkcarrier para análisis parcial

Este sistema de resorte conforma verticalmente y horizontalmente el sistema de elementos para el modelo de elemento s finitos. Para que sea estáticamente estable la estructura se debe incorporar soportes adicionales en la dirección longitudinal. Estos soportes longitudinales deben de colocarse en las mismas posiciones que los soportes de las posiciones horizontales y verticales. En el análisis de la estructura, todos los soportes elásticos deben de estar totalmente fijos, bloquear los 6 grados de libertad. En los extremos de proa y popa no se colocarán soportes y que simplemente se introducirán fuerza s en los extremos como se ha mencionado anteriormente.

En algunos casos y dependiendo de las condiciones de carga las fuerzas introducidas pueden variar para la correcta modelización del estado de carga correspondiente.

6.5.2.3 Buques portacontenedores

En el estado de equilibrio estático, el cuerpo parcial del b que está sujeto a pandeo y momentos torsión ales junto a fuerzas en los dos extremos. Estas condiciones, una vez más son introducidas en el análisis parcial como fuerzas nodales de contorno. Una vez más aun estando en equilibrio, el análisis mediante elementos finitos precisa de soportes adicionales para ser estable, para este propósito se introduce soportes elásticos en los dos extremos del modelo parcial. Estos soportes absorben cualquier desequilibrio local, así como cargas impuestas al modelo.

En los Buques contenedor es los soportes elásticos del modelo son situados en los mamparos transversales en los dos extremos más próximos al final del modelo en vez de situarlos en las bulárcamas finales. Esto crea unas mejores condiciones de carga para el análisis ya que provoca que en los extremos se absorban los esfuerzos directamente sobre la estructura y no sobre los soportes elásticos.

En el extremo de popa, sobre el mamparo no sobre la bulárcama, se coloca un soporte elástico vertical y uno horizontal. Ambos elementos son anclados al nodo de la intersección entre la línea base y crujía. En la zona de proa s e coloca un elemento elástico horizontal, dos elementos elásticos verticales y dos elementos longitudinales.

El soporte horizontal es unido a la intersección de crujía con la línea base, el vertical y el longitudinal son unidos al casco de los mamparos transversales, así como lo fue para los bulkcarriers y petroleros. Todos los soportes elásticos, deben de estar totalmente fijos, deben bloquear los 6 grados de libertad.

6.5.3 Cargas y condiciones de carga

Un buque oceánico experimenta las siguientes cargas:

- Presión hidrodinámica producida por las olas en el casco de la embarcación.
- Presión hidrostática actuando sobre el casco de la embarcación.
- Efectos dinámicos (efecto de superficies libres) en los tanques de combustibles y lastre actuando sobre las superficies de los tanques.
- Presión hidrostática en los tanques de lastre o combustibles sobre las superficies de los tanques.
- Peso estructural.

Además, cabe recordar que se trata de un análisis parcial por lo que este análisis, deriva de un análisis global previamente calculado, implicando que, se introduzcan condiciones de contorno simulando las cargas y momentos en este análisis perteneciente al buque viga

completo, que, al ser reducido el análisis, se debe trasladar los efectos de la estructura eliminada a los extremos del modelo de éste nuevo análisis.

Para la aplicación de las cargas se debe de conocer, en primer lugar, las condiciones de la carga del buque, es decir situación de las bodegas, tanques lastre, combustibles, etc. Que se representará en el modelo de elementos finitos. Para ello, se deben de recurrir a los reglamentos de las sociedades de clasificación para determinar los estados de carga que se deben de analizar para asegurarse del correcto cumplimiento de las normas y garantizar la seguridad estructural.

Cada reglamento, establece unas situaciones de carga, distintas, según el tipo de buque que se esté analizando se recurrirá a una norma u otra. El motivo por el que se realiza esta diferenciación en las condiciones de los estados de carga es debido a la propia naturaleza de la estructura de los buques en sí y la función que desempeñan. Para cada tipo de buque la estructura es diferente para la adecuación de sus funciones operativas.

A continuación, se muestra gráficamente como ejemplo las distintas situaciones de carga a considerar, siendo el objeto de este proyecto. Se puede apreciar estados de carga diferentes representando fundamentalmente la carga del buque, tanques de lastre y tanques de combustibles. La consideración de los distintos casos de carga viene dados debido a la variación de la situación de los tanques de combustibles, se consumen a lo largo del viaje por lo que afecta a la distribución de pesos y además debido a los golpes de mar y escoras, se pueden dar corrimientos de carga que afectarían a la estabilidad y seguridad del buque. De ahí la necesidad de conocer varios estados para en caso de que se den situaciones intermedias, se puedan interpolar valores y estabilizar el buque.

Table B.2.4
Load Cases for Tankers with One Centreline Oil-tight Longitudinal Bulkhead

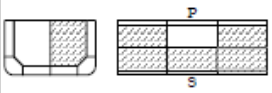
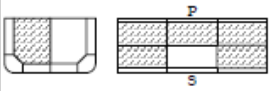
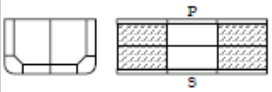
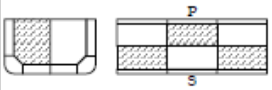
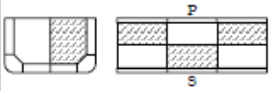
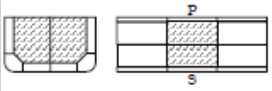
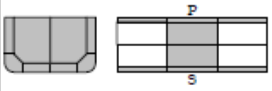
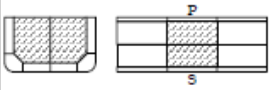
Loading Pattern	Figure	Still Water Loads			Dynamic load cases		
		Draught	% of Perm. SWBM(2)	% of Perm. SWSF(2)	Strength assessment (1a)	Strength assessment against hull girder shear loads (1b)	
					Midship region	Forward region	Midship and aft regions
Design load combination S + D (Sea-going load cases)							
B1		$0.9\ T_{sc}$	100% (sag)	See note 3	1	\	\
			100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5a	\	\
B2 (6)		$0.9\ T_{sc}$	100% (sag)	See note 3	1	\	\
			100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5b	\	\
B3		$0.9\ T_{sc}$	100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 5	2	4	2
				100% (-ve fwd) See note 4	5a, 5b, 6a, 6b	\	\
B4		$0.6\ T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5a	\	\
B5 (6)		$0.6\ T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5b	\	\
B6		$0.6\ T_{sc}$	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 5	1	3	1
				100% (+ve fwd) See note 4	5a, 5b	\	\
B7 (7)		$T_{hal\text{-}en}$	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 4	1	\	\
Design load combination S (Harbour and tank testing load cases)							
B8 (8)		$1/3T_{sc}$	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 5	Applicable to strength assessment of midship region (see 1(a)) and strength assessment against hull girder shear loads (see 1(b))		
B9 (8)		$1/3T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	Only applicable to strength assessment of midship region (see note 1(a))		

Ilustración 96. Condiciones de carga

Después de haber calculado todos los estados de carga mencionados en las normas según el tipo de buque, se establecen cargas que pueden combinarse por lo que hay que usar unos factores de combinación para crear los diferentes estados de carga nuevo que deben ser analizados también. Estos nuevos estados de carga se deben analizar debido a que en un buque continuamente se dan situaciones de carga combinadas por lo que es vital importancia analizar esas combinaciones. Una vez más se recurre a los reglamentos de las sociedades de clasificación para determinar que estados combinar e introducirlos en el análisis de elementos finitos.

6.5.4 Evaluación del análisis parcial

Una vez realizados los análisis y obtenidos los resultados, estos se debe n de comparar con los valores máximos que se establecen en los reglamento. Garantizando que cumplan todas las condiciones impuestas y garanticen la viabilidad estructural del buque.

El análisis parcial, ciertamente tiene dos funciones:

- Verificación de la exactitud del análisis global.
- Confirmación del apropiado diseño estructural cumpliendo con las normas.

Los análisis con elementos finitos principalmente muestran la deformación que debe de ser analiza da visualmente, así como los resultados de tensiones y esfuerzos sobre la estructura que en ningún caso se debe de exceder de lo indicado por los reglamentos. Si se detectase una anormalidad en los resultados parciales debido a las condiciones de contorno impuestas, se debería aplicar unas apropiadas restricciones de carga s procedentes del análisis global

Una vez más tras analizar los distintos estados de cargas y combinaciones de ellos, se obtienen los resultados, que se deben de verificar para garantizar esa seguridad estructural

Además, y gracias a este análisis con mayor detalle que el global, se detectan aquellas zonas que pueden resultar críticas, o peligrosas y deban ser analizadas con u n mayor detalle en un posterior análisis local.

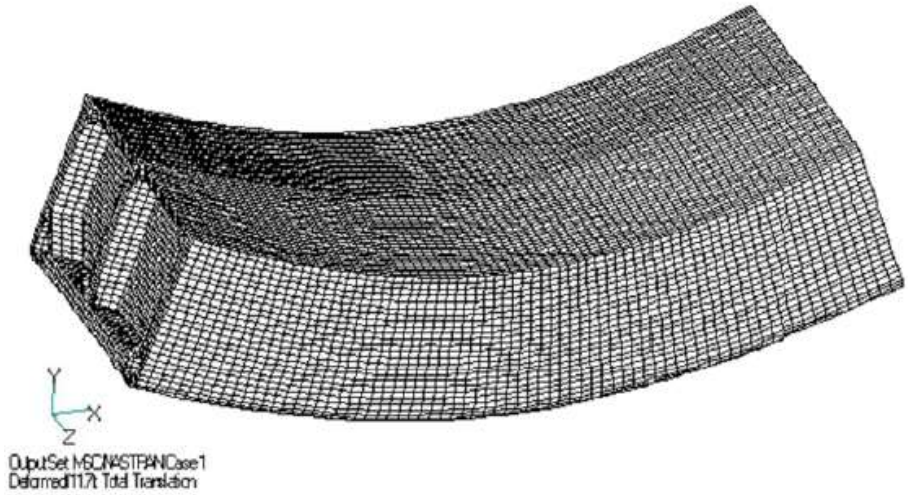


Ilustración 97. Deformación bodegas en análisis parcial

6.5.5 Áreas críticas

Tras haber evaluado mediante elemento s finitos con un análisis parcial, aparece con mayor detalle que zonas, o áreas, tienen gran acumulación de tensiones o esfuerzos y deban de ser analizadas con detenimiento para garantizar que cumplen lo establecido en el reglamento.

Es de sobra conocido que, debido a la función destinada del buque proyectado, se diseña una estructura diferente. Por lo que, para cada tipo de buque, estas zonas conflictivas serán distintas. A continuación, analizaremos los tres principales tipos de buques y sus zonas conflictivas:

6.5.5.1 Buques tanque, petroleros

Las áreas que deben de estar sujetas a análisis más finos serán:

- Acceso a aperturas horizontales en los refuerzos.
- Contretes soldados en soportes principales.
- Esquinas y cerramientos superiores.

Generalmente los buques tanques, pueden dividirse según su estructura de tres formas A, B y C, éstas se muestran en la Imagen, donde cada estructura tiene sus puntos que se deben de analizar correctamente

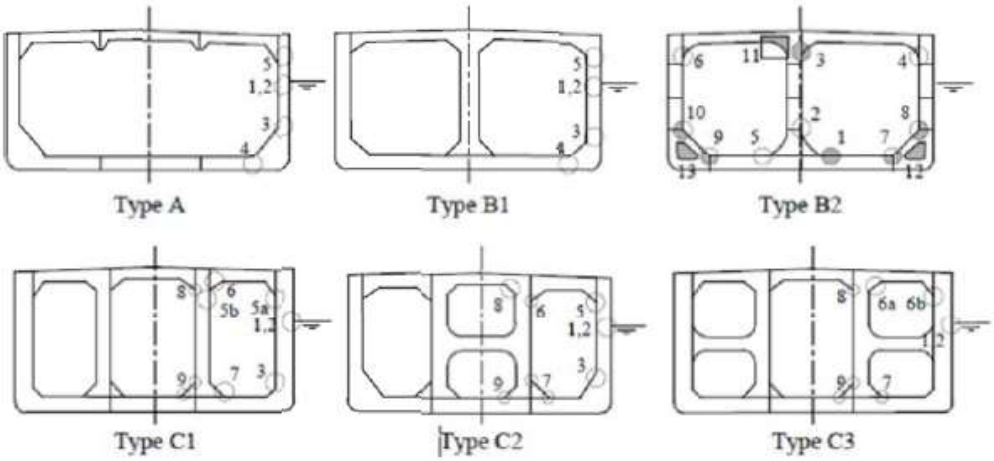


Ilustración 98. Zonas críticas petroleros

EL tipo A tiene simplemente un doble casco, típico de pequeños petroleros. El tipo B Normal mente den ominado “Aframax” y “Suezmax” con un mamparo en crujía. El tipo C con las siglas “VLCC” (Very large crude carrier) lleva dos mamparos longitudinales creando tres tanques.

Algunas áreas específicas que son marcadas, se han encontrado que están sometidas a gran estrés por flexión y a fa los por pandeo bajo v arias condiciones de carga dependiendo del tipo de buque su configuración estructural. To das estas zonas de gran acumulación de tensión excepto la 1 y la 2, cerca de la carga completa o lastre hasta la línea de agua son producidas por altas cargas estáticas, sin embargo, incluso en casos con alta carga estática algunas la tensión es transmitida a ciertas áreas concretas de forma dinámica por lo que puede también ser susceptible a daños por fatiga.

Las críticas localizaciones que se han mencionado y que requieren especial atención mucho más detallada con una evaluación local en 3D son escritas a continuación.

La localización 1 es en las conexiones del refuerzo longitudinal cercano a la línea de agua con las bulárcamas transversales. La localización 2 es un poco similar a la 1 con conexiones a los mamparos transversales estancos. Estas conexiones están sometidas a daños por fatiga debido a principalmente por presiones externas cíclica actuando sobre el casco del buque debido al encuentro con las olas en los movimientos del buque. Esto ocurre en las mismas posicione tanto para los buque s del tipo A, B y C.

La localización 3 es la parte baja del costado transversal (doble fondo) para los buques tipo A y tipo B, así como los buques tipo C sin puntales en el tanque del extremo. Bajo condiciones de grandes ángulos de balance estas áreas se ven afectadas por un alta concentración de tensiones resultando una acumulación de tensiones internas.

Localización 4 está situado en el final de las vigas con carga repartida uniformemente. Estos puntos finales de unión en el doble fondo y cubiertas conectados con los longitudinales de los mamparos experimentan gran concentración de estrés. Esto se cumple para los buques tipo A y B pero más acrecentado en los del tipo A. Además, la unión al doble fondo causa una tensión adicional en las áreas cercanas a su conexión entre el doble fondo y los mamparos de separación transversales.

Localización 5 es similar a la 3 pero referida a las partes altas de las cuadernas. Estas zonas experimentan en el costado y mamparo longitudinal también comparten acumulación

de tensiones, principalmente porque las cuadernas en esta zona están diseñadas con ligeros espesores y bajo condiciones de balance elevados la presión se incrementa rápidamente resultando un punto de acumulación en estas zonas para poder reducirlo se introduce una unión adiciona entre las cuadernas verticales y las cubiertas que distribuyen mejor las tensiones. Esto se cumple para el tipo A, B y también para el C sin puntales en los tanques.

Localización de la 6 a la 9 están en varios contretes conectores. Las altas tensiones son producidas principalmente por el pandeo de los miembros conectados en algunos casos.

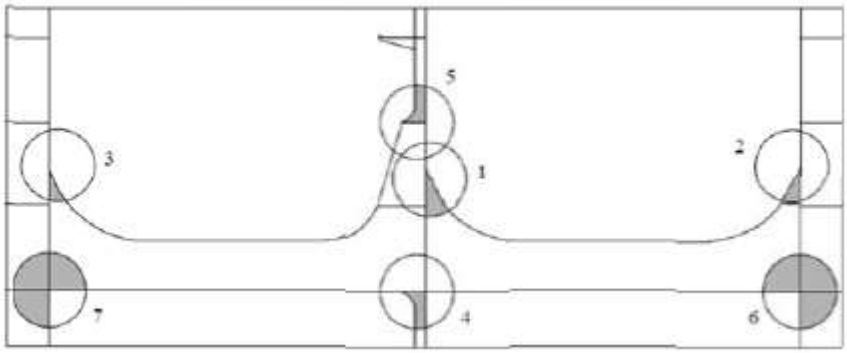


Ilustración 99. Detalle zonas críticas 1

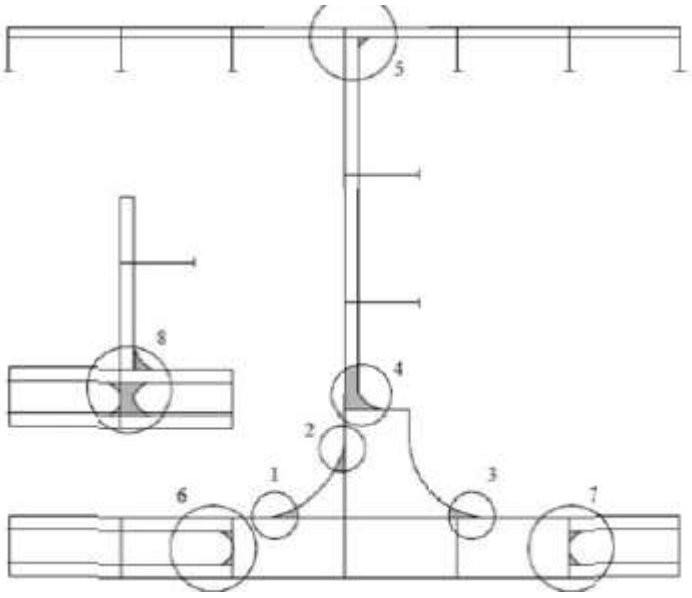


Ilustración 100. Detalle zonas críticas 2

6.6 Análisis local según las sociedades de clasificación

La localización del número y los modelos requeridos serán evaluados a partir del análisis del modelo global y sobre todo del modelo parcial. Tal y como se ha visto con anterioridad, cada uno de los distintos tipos de buques, tiene, debido a sus características estructura es unas zonas críticas o zonas de gran acumulación de tensiones que se detectan gracias a los análisis global y sobretodo del parcial. En el análisis global con elementos finitos para la seguridad estructural del buque se analizó la flexión y el esfuerzo

de pandeo de la estructura primario, del casco estanco a agua en general y los miembros principales estructurales.

Para un análisis local en 3D e requiere primero de ese análisis global o parcial para indicar la zona de acumulación de tensiones, áreas críticas que se han visto, estas zonas al no poder analizarse mediante el análisis global o parcial precisan este análisis local con un mallado fino e incluyendo todos los elementos estructurales, principales y secundarios. En los elementos estructurales secundarios, las cargas locales pueden dar lugar a deformaciones y tensiones locales adicionales. Los miembros estructurales secundarios incluyen, refuerzos, longitudinales, vigas y las planchas del suelo, y la amplitud de la placa efectiva se tendrá en cuenta. Las tensiones resultantes son tensiones nominales que se superponen a las tensiones globales.

Teniendo en cuenta todo esto, Los modelos locales de las áreas críticas con gran acumulación de tensión se analizan con elementos finitos para determinar qué tensión se alcanza para mantenerlo dentro de los límites establecidos. El objetivo principal del análisis local es la evaluación del comportamiento estructural local y debido al aumento de las tensiones locales en detalles estructurales y en sus discontinuidades.

Se precisan distintos análisis de elementos finitos con gran detalle para cubrir los componentes estructurales que conformarán el conjunto estructural del análisis local de la zona crítica. Se introducirán los elementos secundarios estructurales, así como las cargas y las forzadas condiciones de contorno simulando las fuerzas obtenidas en los análisis globales y o parciales.

6.6.1 Extensión del modelo local

La extensión que se aplica al análisis local con mallado fino, es la aplicación de todos aquellos elementos secundarios y discontinuidades que afecten a la estructura añadiéndose a los primarios (Contretes, consolas, refuerzos, todas las aperturas, escotaduras…).

El resultado es un nivel de detalle superior donde se producirá mayor rigidización de la estructura anulando en mayor parte la acumulación de estrés, identificando de esta forma el valor real de las tensiones en estas áreas.

Se deben de realizar varios análisis locales en 3D con diferentes tamaños de malla para garantizar la exactitud de los cálculos dependiendo una vez más del tipo de estructura del buque y a sus detalles estructurales que incluyen:

6.6.1.1 Detalles estructurales cerrados

Estos es la evaluación de los efectos de la discontinuidad estructural en las condiciones relativas a la estanquidad. Las principales localizaciones que precisan esta evaluación son principalmente las zonas de la estructura del doble fondo, uniones con las tolvas inclinadas. En estas zonas se debe de considerar un tercer análisis con un tamaño de malla de ¼ de la clara entre cuadernas o menor que eso para obtener buenos resultados.

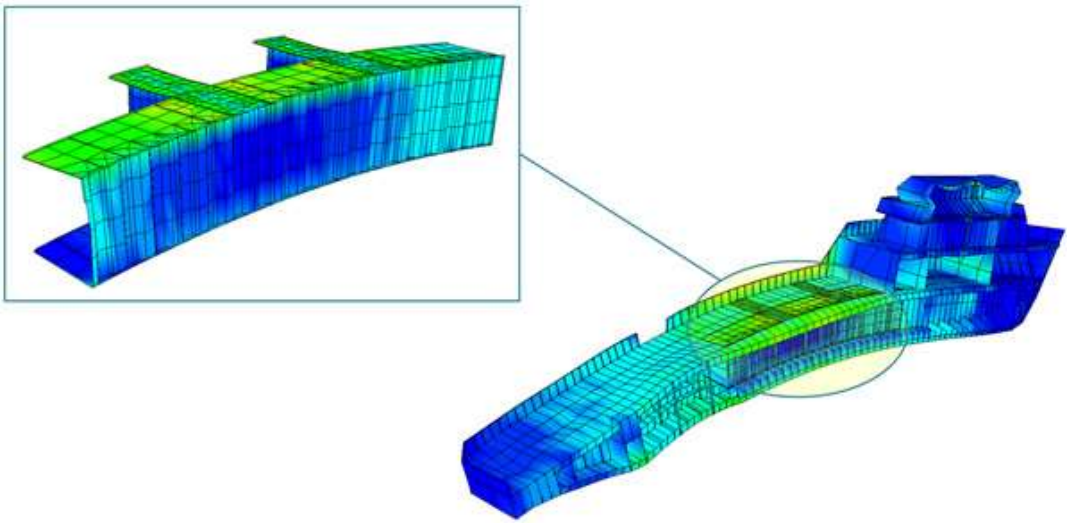


Ilustración 101. Detalles mallados cálculos locales

6.6.1.2 Detalles estructurales no cerrados

Esta es la evaluación de los efectos de la discontinuidad estructural en estructuras no cerradas que además se pue den agrupar en:

- Estructuras abiertas; Pasos de hombre en el doble fondo y estructura del costado, cortes en los longitudinales (escotaduras y aligeramientos). Pasos de tuberías y cables, así como pasos en estructuras transversales para trasiego.

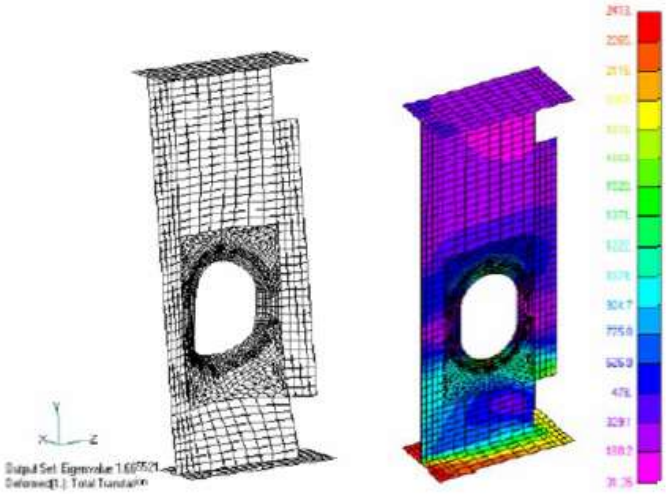


Ilustración 102. Detalles cálculos locales aligeramiento

- Periferias de las estructuras; Siempre existe discontinuidad estructural cuando dos elementos se conectan, en general ya sean grandes o pequeños contretes, consolas… al añadirse a la estructura, generan abruptos cambios en las conexiones, estas conexiones deben por lo tanto ser analizadas.

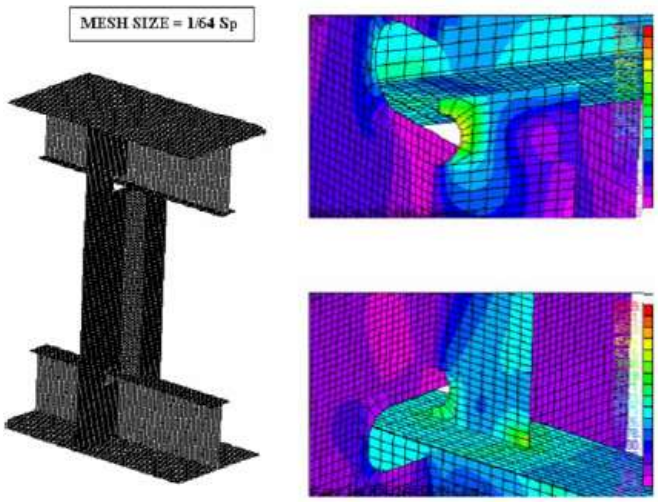


Ilustración 103. Detalles local puntal

- Estructuras locales sometidas a pandeo; los esfuerzos por pandeo en lanchas rectangulares pueden ser fácilmente evaluados; sin embargo, para paneles no rectangulares con o sin apertura en ellos, requieren un diferente método de análisis para la evaluación por pandeo. Una localización típica es en los paneles del doble fondo con pasos de hombre, pasos de tuberías y escotaduras en la estructura longitudinal.

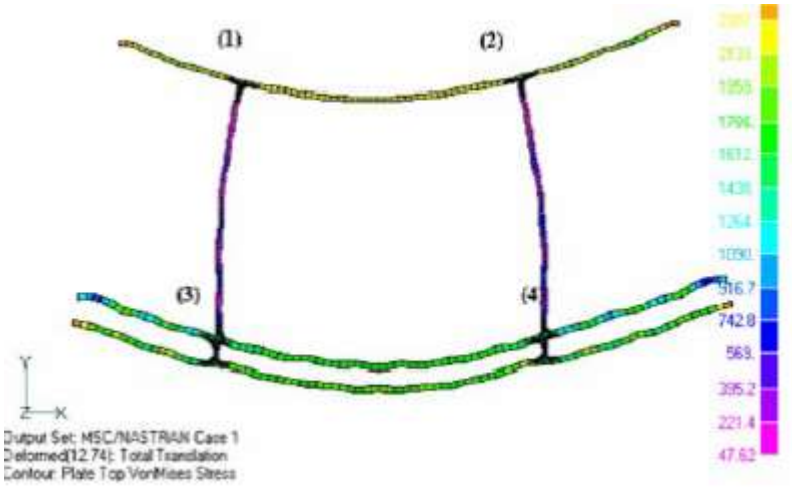


Ilustración 104. Deformación estructura detalle

6.6.2 Definición de la malla

El tamaño de la malla está directamente influenciado con los resultados que se obtienen en el análisis local con elementos finitos. Es por ello que el tamaño escogido debe de ajustarse a la realidad para que los cálculos sean correctos. “Global Model Stress” Es el esfuerzo determinado en el análisis global 3D M.E.F con un tamaño de malla cercano a la longitud de la clara entre cuadernas (equiespaciado de las cuadernas). Este tamaño de malla determina la distribución de las tensiones determinando en que zonas se precisa el análisis local. Sin embargo, aunque detecta las áreas críticas es inadecuado para determinar el grado real de concentración de tensiones en las conexiones y discontinuidades estructurales “Local Stress”. Es el esfuerzo determinado por modelos con tamaño de malla igual a ¼ del espaciado entre las cuadernas, como un tamaño de malla

adecuado para determinar la distribución de tensiones en las estructuras locales, pero sigue sin ser adecuado para el cálculo de la concentración de tensiones en las conexiones sometidas a esfuerzos de fatiga. Para ello se debe realizar un detalle aún más profundo, fino y detallado. Es decir, se requiere un tercer análisis de esfuerzo de pandeo si existe esta condición de pandeo en la zona crítica. Existen dos diferentes tipos de análisis; Detalles estructurales estancos y detalles estructurales no cerrados, los dos, se dan bajo condiciones de tensiones locales. Con estos análisis las tensiones admisibles son superiores y permitidas por lo que se utiliza el tamaño de malla “Detail Stress”.

“Detail Stress” es la tensión en el punto crítico de detalle realzado con el análisis más fino. Esto es donde se espera que comience la fractura por fatiga. Es el punto caliente de tensiones, que se puede permitir con un mínimo de resistencia en el material que se establece en los reglamentos “Fine Stress” es permitido en pequeñas aperturas libres, con discontinuidad estructural o zonas de cordones de soldadura.

6.6.3 Cargas y condiciones de contorno

Los resultados del modelo local deben de ser comparables con los resultados del modelo global. Los casos de cargas aplicados al modelo local suelen ser los m ismos que para el modelo global. Las deformaciones y fu erzas obtenidas del análisis del modelo global son aplicad as en los nodos o condiciones de contorno en el análisis local para garantizar el comportamiento real de esa sección. Además, se precisa la incorporación como se ha mencionado de la estructura secundaria para garantizar los resultados del análisis.

Cuando se realiza n los análisis locales, se realizan en zonas m uy concretas del buque por lo que las cargas que se aplicarán en el análisis son las deriva das de los cálculos globales y parciales que se trasladaran al análisis local. Por tanto, no se aplicará ningún tipo de carga adicional si no que se analizará a partir de los resultados de esfuerzos que se han obtenido anteriormente que se adaptarán al análisis local de parte de la estructura.

6.7 Bibliografía

[14] S. Prof, L. Domnisoru, and D. De Jos, “‘ EMSHIP ’ Erasmus Mundus Master Course in ‘ Integrated Advanced Ship Design ’ Global and Local Strength Analysis in Equivalent Quasi- static Head Waves , for a Tanker Ship Structure , Based on Full Length and 2-3 Cargo Holds 3D-FEM Models Chemical Tanker 4000 t Ship Hull Structure Input Data , granted by Ship Design Group , Galati,” no. February, 2013.

[15] M. Ma, J. Freimuth, B. Hays, and D. R. S. Technologies, “Hull Girder Cross Section Structural Design using Ultimate Limit States (ULS) Based Multi-Objective Optimization,” no. 1980, pp. 511–520, 2001.

[16] M. Maeda, S. Xin, and T. Yoshikawa, “遺伝的アルゴリズムと応答曲面を適用した 佰ᦡ ⓗ□□ ᦡ □ ᦡ □□ ᦡ ᦡ □ 嵀 □ 似 ᦡ □□ 船体中央断面の構造最適化に関する研究 □ □ □ □ □ 嵀 □ °北 □ 似 □□ 娲□ □◊⁎.”

[17] V. Žanić, “STRUCTURAL OPTIMIZATION OF CORRUGATED TRANSVERSE Structural Optimization of Corrugated Transverse,” vol. 61, pp. 18–27, 2010.

[18] A. Jan, “M ASTER T HESIS,” no. 971, 2015.

[19] J. Jelovica and A. Klanac, “Publication P3 Alan Klanac , Sören Ehlers , and Jasmin Jelovica . 2009 . Optimization of Reprinted with permission from Elsevier . Optimization of crashworthy marine structures,” vol. 22, no. 4, pp. 670–690, 2009.

[20] E. Q. Ã, W. Cui, and Z. Wan, “Comparative study of ultimate hull girder strength of

large double hull tankers," vol. 18, pp. 227–249, 2005.

[21] A. Presura and I. Chirica, "Collision Analysis of the Unconventional Double Hull of a Ship," pp. 601–612, 2017.

[22] A. Amrane and P. Rigo, "Scantling Optimization of Ship Structures Considering Fatigue at the Early Design Stage," 2005.

[23] D. Servis, G. Voudouris, and M. Samuelides, "Finite element modelling and strength analysis of hold No . 1 of bulk carriers," no. 1, pp. 1–26.

[24] J. Parunov, "STRUCTURAL ANALYSIS OF A GENERAL UDC Structural Analysis of a General," vol. 61, pp. 28–33, 2010.

[25] I. Rubanenco, I. Mirciu, and L. Domnisoru, "GLOBAL AND LOCAL STRANGTH ASSESSMENT , UNDER EQUIVALENT QUASI-STATIC HEAD WAVE LOADS , BASED ON THREE CARGO HOLD 3D-FEM MODEL , OF AN 1100 TEU CONTAINER SHIP," pp. 63–72, 2012.

[26] M. Costache, G. Jagite, and C. Mocanu, "3D-FEM Strength Analysis for the Influence of Corrosion over Deck Plating of a Oil Tanker Ship," vol. 1354, no. 3, pp. 1351–1354, 2014.

[27] S. Kar, D. G. Sarangdhar, and G. S. Chopra, "ANALYSES OF SHIP STRUCTURES USING ANSYS," pp. 1–13, 1970.

[28] R. D. Page, "DT 7' UT IO STATF ITFhT A," vol. 298, no. 704, 2005.

[29] S. Tomas, N. Vladimir, and I. Senjanovic, "An advanced theory of thin-walled girders with application to ship vibrations ˇ evic," vol. 22, pp. 387–437, 2009.

[30] A. Sarder, "Use of Corrugated Shell Plating in Semi-submersible Offshore Platforms Study on exploring strength , weight and manufacturing implications," no. X, 2010.

[31] Y. Sumi, "SIMULATION-BASED FATIGUE CRACK MANAGEMENT IN WELDED STRUCTURAL DETAILS."

7 CÁLCULO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

7.1 Introducción geometría

La introducción de la geometría crea da en RHINOCEROS debe de introducirse en el programa ANSYS. El procedimiento realizado para la introducción es la selección de los archivos en el programa RHINOCERO y exportarlos en formato igs al ANSYS donde se introducirán de forma que su geometría se independiente elemento por elemento, teniendo control en todo momento del modelo.

En primer lugar y al igual que ocurrió en la modelización comenzará con el casco del buque seguido por la introducción de los elementos tipo planchas y por último los perfiles estructurales. Los elementos plancha y los perfiles estructurales han sido sub divididos según el material y espesores para la correcta introducción en el programa ANSYS. ANSYS necesita reconocer independientemente los elementos por separado para establecer correctamente las superficies introducidas y que pueda establecer correctamente los contactos entre ellas, así como las propiedades para el cálculo.

Esta necesidad de independencia geométrica entre los distintos elementos que conforman la estructura del buque lleva a introducir todos los elementos en varios archivos igs. Es decir, póngase como ejemplo los perfiles del doble fondo, estos perfiles van de proa a popa de la embarcación quedando subdivididos por bulárcamas y mamparos de fondo. A la hora de introducir estos perfiles, si se introdujesen todos en un único archivo incluso estando separados en RHINOCEROS, ANSYS detectaría todo el perfil como un único elemento entrando en indefiniciones geométricas en las intersecciones con los elementos que los separa como son las bulárcamas y los mamparos estancos. Para ello se insertan los perfiles en varios archivos igs de forma que se intercalan los tramos subdivididos de los perfiles de forma que cada archivo igs introducido, todos los elementos en el son geométricamente independientes evitando los problemas de indefiniciones en las intersecciones en el programa ANSYS.

Al igual que ocurre con los perfiles estructurales, puede ocurrir que en los elementos planchas queden partidos como se vio por otros elementos por lo que posiblemente también necesiten de la introducción de varios archivos igs para garantizar las indefiniciones.

A continuación se mostrará la inserción de los elementos en ANSYS así como el número de archivos igs introducidos y el número de elementos que lo con forman.

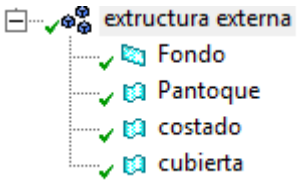


Ilustración 105. Parte Estructura externa

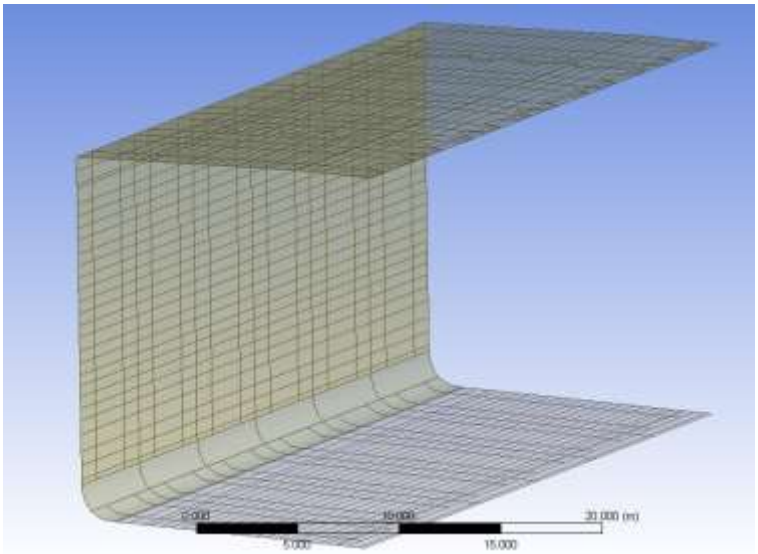


Ilustración 106. Introducción casco exterior en ANSYS (Design Modeler)

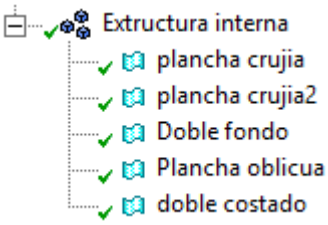


Ilustración 107.Parte estructura interna

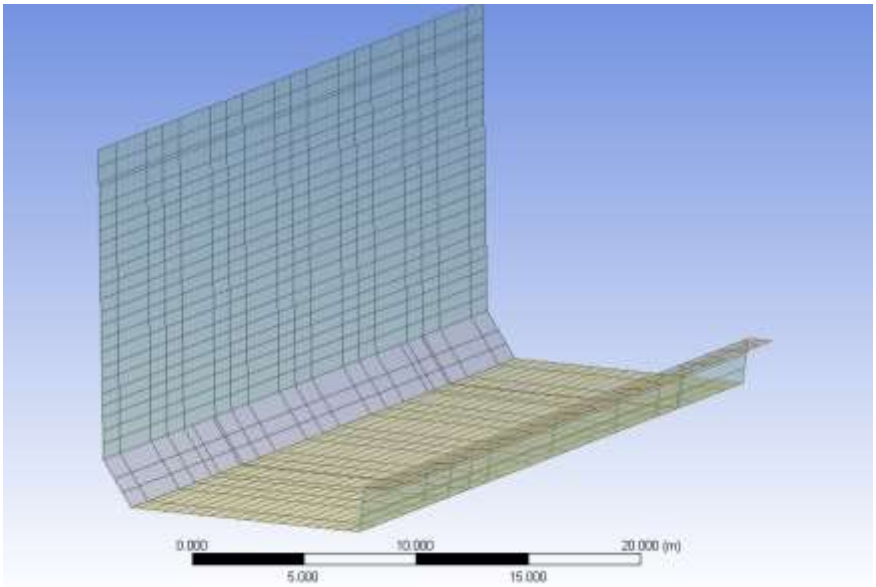


Ilustración 108. Introducción estructura interna en ANSYS (Design Modeler)

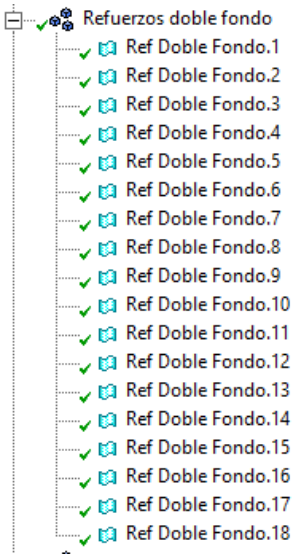


Ilustración 109. Parte Refuerzos doble fondo

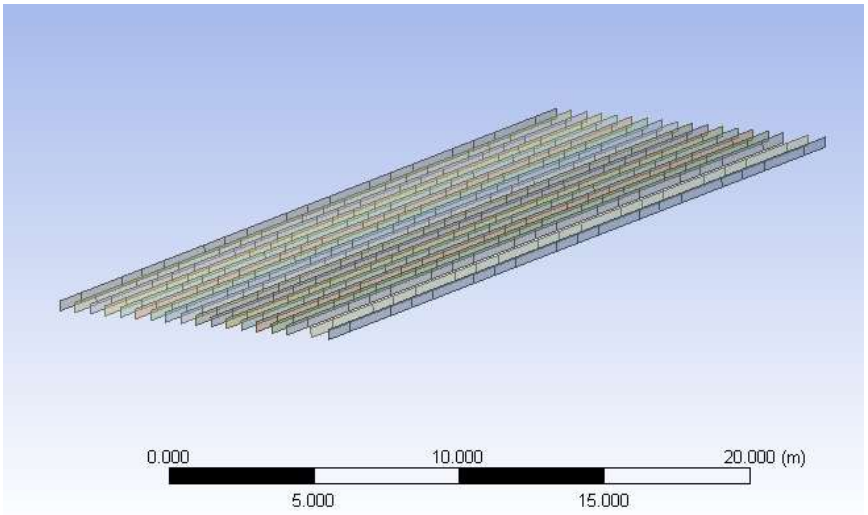


Ilustración 110. Introducción refuerzos doble fondo en ANSYS (Design Modeler)

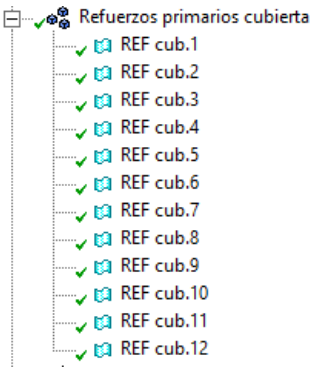


Ilustración 111. Parte refuerzos primarios cubierta

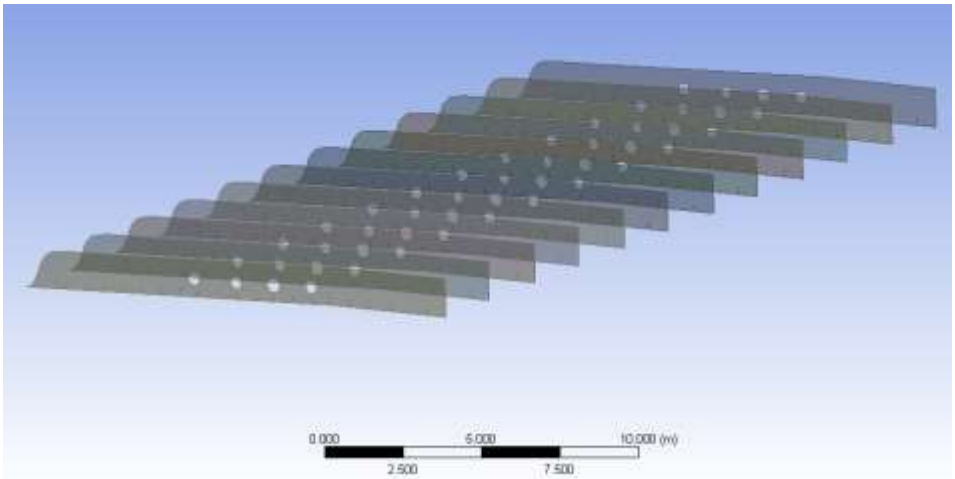


Ilustración 112. Introducción Refuerzos primarios cubierta en ANSYS (Design Modeler)

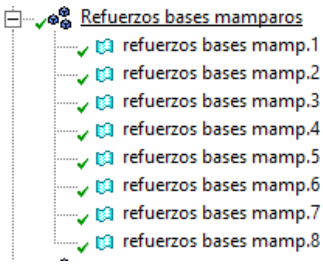


Ilustración 113.Parte refuerzos bases mamparos

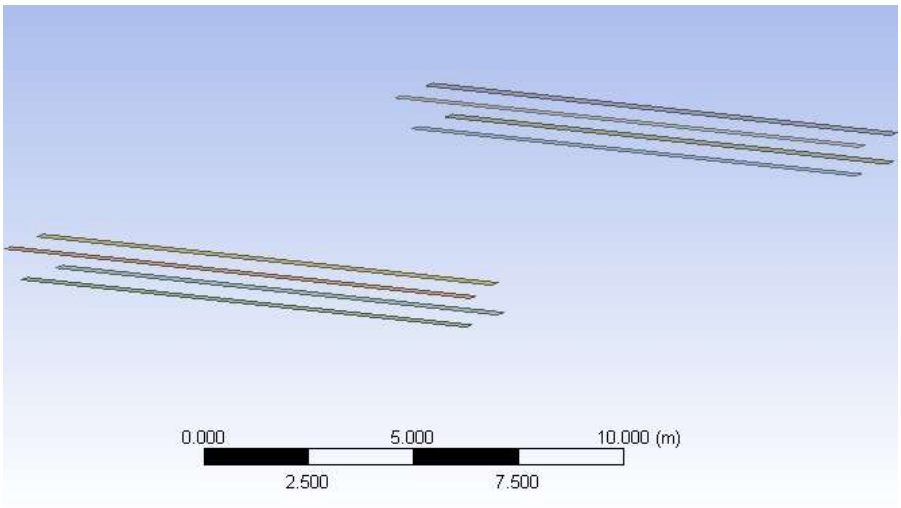


Ilustración 114. Introducción refuerzos bases mamparos en ANSYS (Design Modeler)

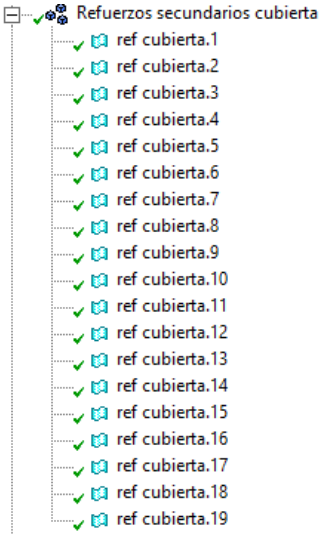


Ilustración 115. Parte refuerzos secundarios cubierta

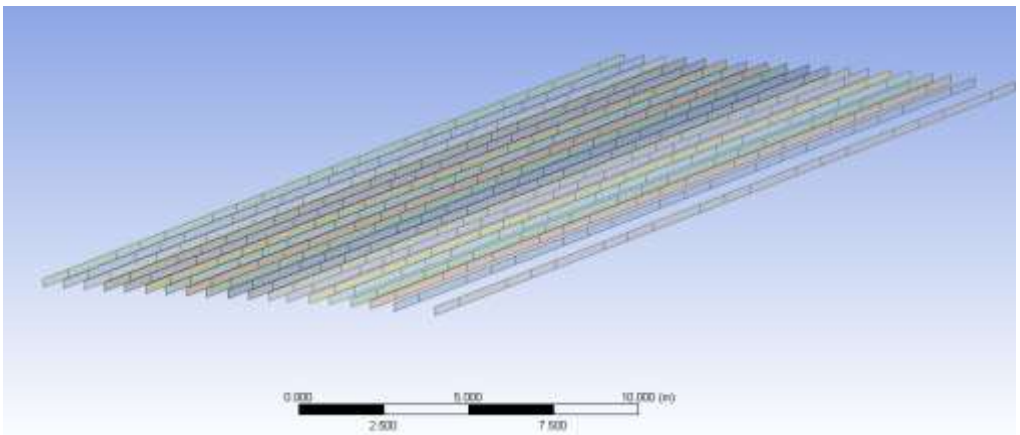


Ilustración 116. Introducción refuerzos secundarios cubierta en ANSYS (Design Modeler)

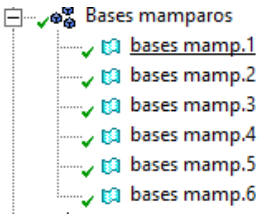


Ilustración 117. Parte bases mamparos

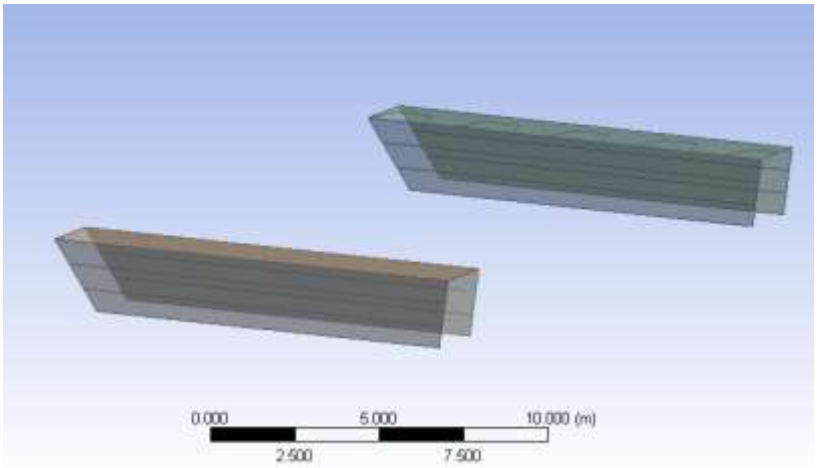


Ilustración 118. Introducción bases mamparos en ANSYS (Design Modeler)

Ilustración 119. Parte refuerzos secundarios costado

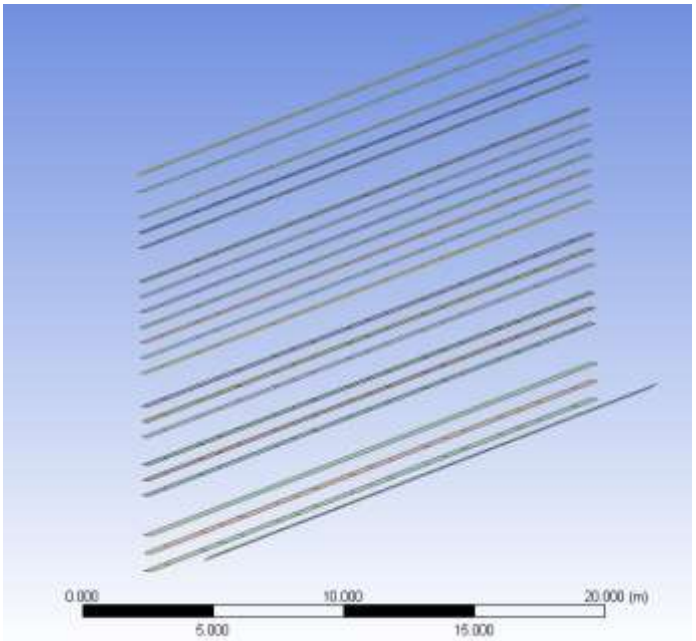


Ilustración 120. Introducción refuerzos secundarios costado en ANSYS (Design Modeler)

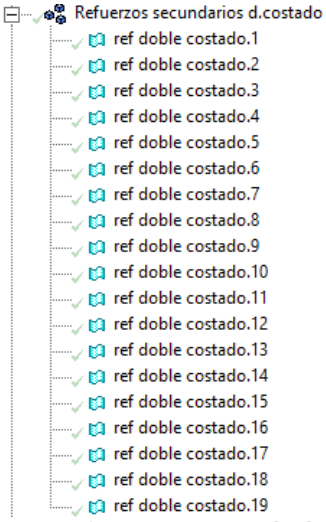


Ilustración 121. Parte refuerzos secundarios doble costado

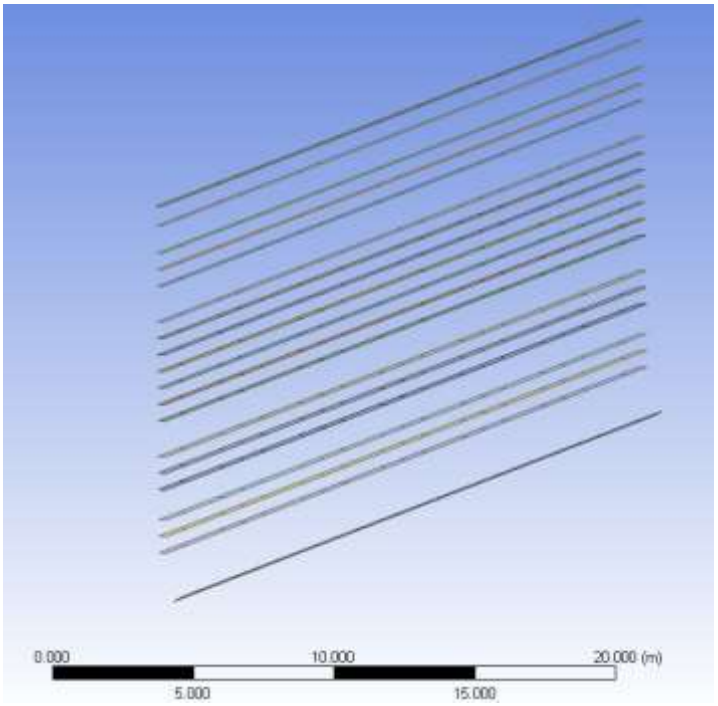


Ilustración 122. Introducción refuerzos secundarios doble costado en ANSYS (Design Modeler)

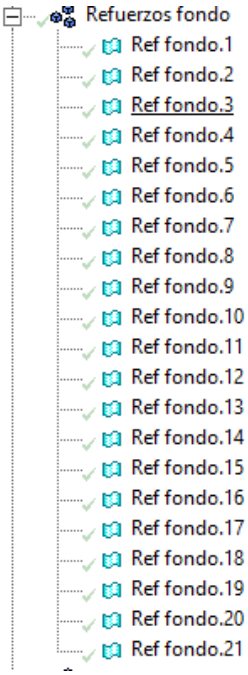


Ilustración 123.Parte refuerzos fondo

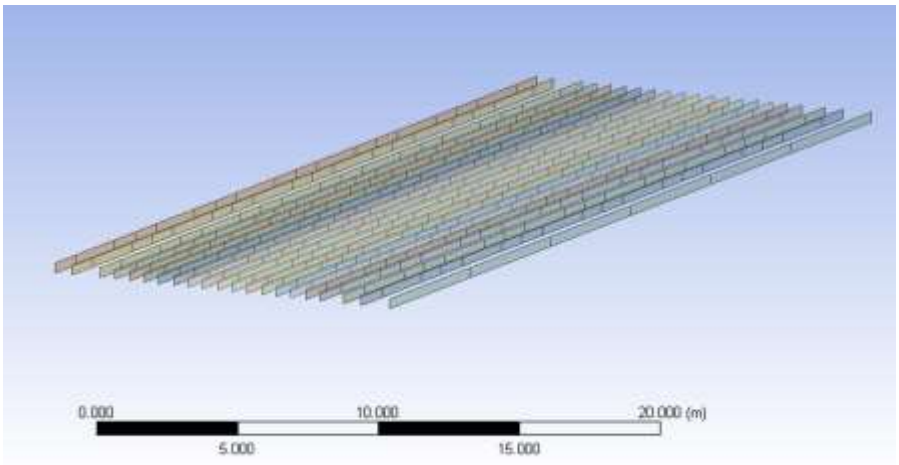


Ilustración 124. Introducción refuerzos fondo en ANSYS (Design Modeler)

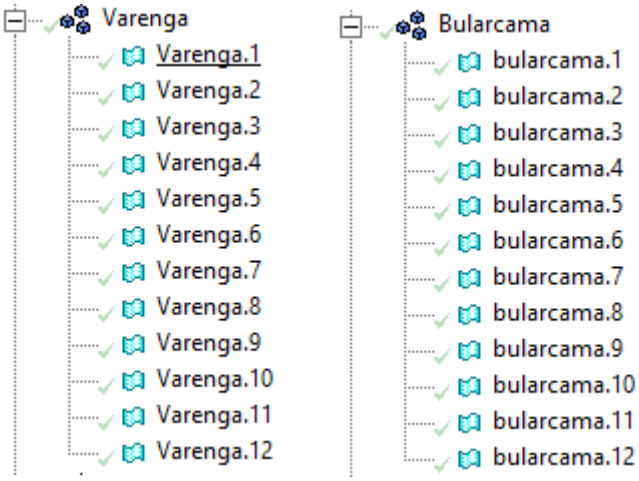


Ilustración 125. Parte bulárcama y varenga

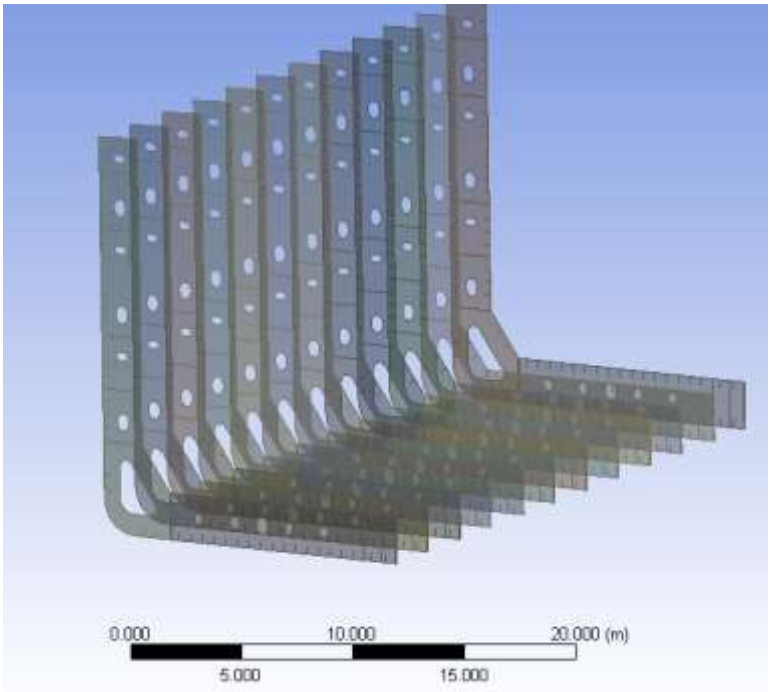


Ilustración 126. Introducción bulárcama y varenga en ANSYS (Design Modeler)

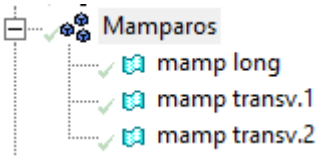


Ilustración 127. Parte mamparos

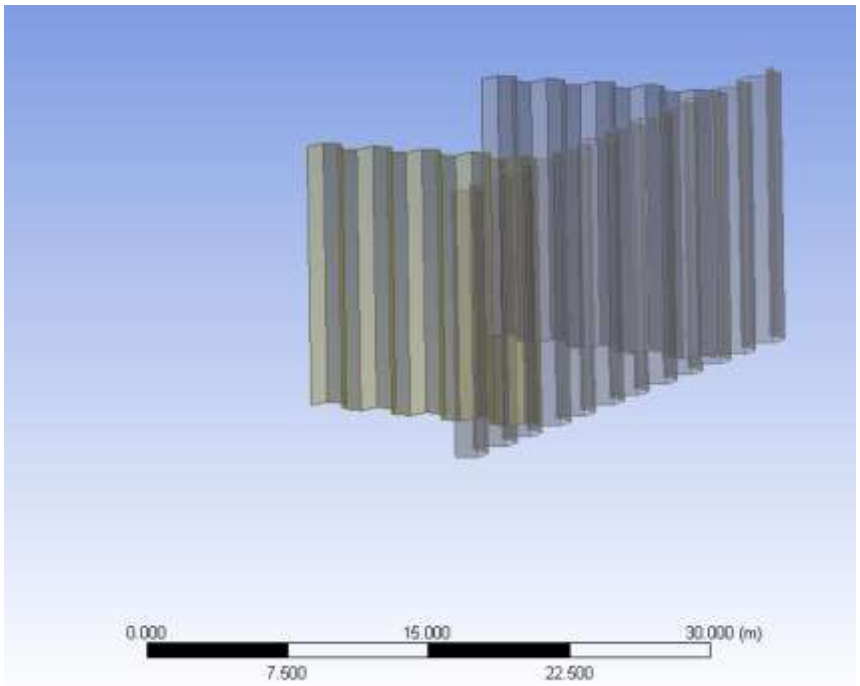


Ilustración 128. Introducción mamparos en ANSYS (Design Modeler)

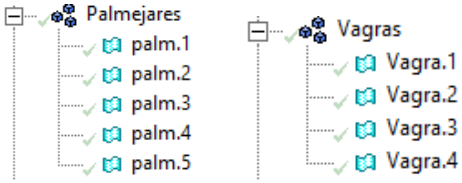


Ilustración 129. Parte vagras y palmejares

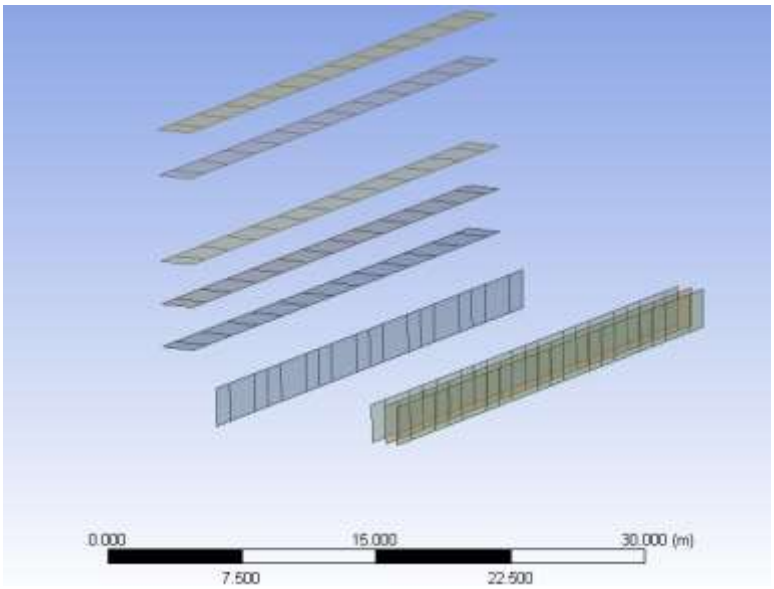


Ilustración 130. Introducción vagras y palmejares en ANSYS (Design Modeler)

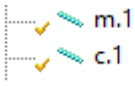


Ilustración 131. Parte contorno momentos y fuerzas

Para el caso de los momentos, se dibujó el contorno de la cuaderna maestra y poder hacer un enjaretado de líneas y poder aplicar en un punto en concreto el momento de arrufo y quebranto del buque viga y además la fuerza cortante. Se le aplicará un material con una densidad ínfima y una inercia bastante alta. Hay que indicar que para que el programa detecte los elementos lineales, antes de importar cualquier fichero igs, en propiedades de geometría hay que habilitar la importación de elementos lineales.

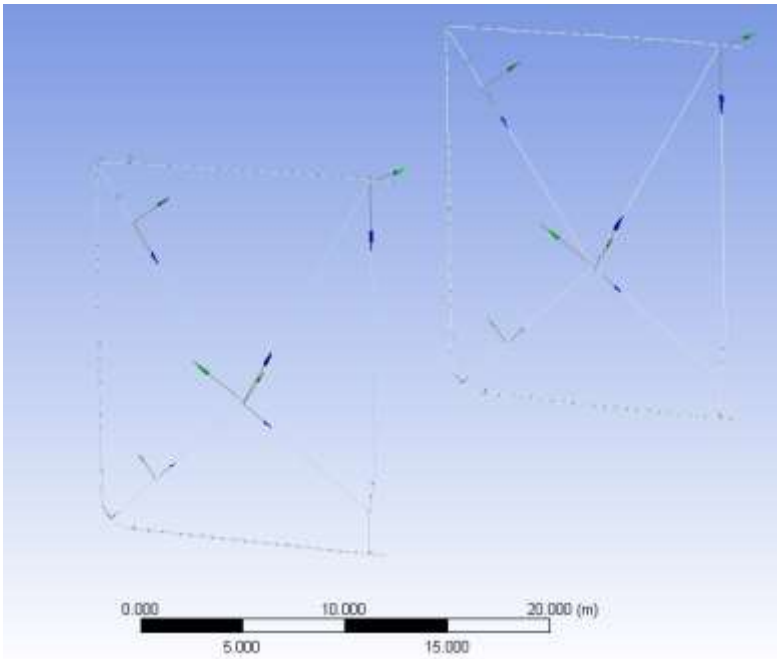


Ilustración 132. Introducción contorno momentos y fuerzas en ANSYS (Design Modeler)

7.2 Materiales

El buque modelado, emplea 2 tipos de aceros navales para la totalidad de su estructura. Estos aceros tienen propiedades ideales para su resistencia al medio marino así como resistencia a los esfuerzos sometidos en el buque.

El acero empleado se ha dividido en dos zonas:

- Acero de alta resistencia AH36 (355 N/mm2).
- Acero de alta resistencia AH32 (315 N/mm2).

A continuación, se muestran las tablas con las características de los componentes del acero, así como sus propiedades mecánicas.

AH32

Grade	C max	Si max	Mn	P max	S max	Als min	Ti max	Cu max	Cr max	Ni max	Mo max
AH32	0.18	0.50	0.90-1.60	0.035	0.035	0.015	0.02	0.35	0.20	0.40	0.08

Ilustración 133. Composición química del acero AH32

Grade	Rm (MPa)	Re(MPa) min	A% min	Akv/J min						
				E.T °C	Thickness (mm)					
					≤ 50		>50-70		>70-100	
AH32	440-570	315	22	0	L	C	L	C	L	C
					31	22	38	26	46	31

Ilustración 134. Propiedades mecánicas del acero AH32

AH36

Grade	C max	Si max	Mn	P max	S max	Als min	Ti max	Cu max	Cr max	Ni max	Mo max	Nb	V
AH36	0.18	0.50	0.90-1.60	0.035	0.035	0.015	0.02	0.35	0.20	0.40	0.08	0.02-0.05	0.05-0.10

Ilustración 135. Composición química del acero AH36

Grade	Rm (MPa)	Re(MPa) min	A% min	Akv/J min						
				E.T °C	Thickness (mm)					
					≤ 50		>50-70		>70-100	
AH36	490-630	355	21	0	L	C	L	C	L	C
					34	24	41	27	50	34

Ilustración 136. Propiedades mecánicas del acero AH36

Conociendo las propiedades de los materiales empleados en el buque quimiquero, se crean como nuevos materiales en el programa ANSYS, estableciendo sus propiedades físicas como se indica a continuación.

En el apartado de “Engineering Data” se pueden crear materiales específicos que no se encuentran incluidos en la biblioteca de materiales de ANSY siendo es to lo que s e busca ya que, al estar tratando con materiales navales, no suelen encontrarse disponibles en las bibliotecas.

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	AH32		D:\Disco duro\MASTER	
4	AH36		D:\Disco duro\MASTER	

Properties of Outline Row 3: AH32

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's ...			
5	Young's Modulus	2E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0.265			
7	Bulk Modulus	1.4184E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7.9051E+10	Pa		
9	Field Variables				
13	Tensile Yield Strength	3.15E+08	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5.7E+08	Pa		

Ilustración 137. Introducción característica acero AH32 en ANSYS

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	AH32		D:\Disco duro\MASTER	
4	AH36		D:\Disco duro\MASTER	

Properties of Outline Row 4: AH36

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's ...			
5	Young's Modulus	2E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0.265			
7	Bulk Modulus	1.4184E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7.9051E+10	Pa		
9	Field Variables				
13	Tensile Yield Strength	3.55E+08	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	6.3E+08	Pa		

Ilustración 138.Introducción característica acero AH36 en ANSYS

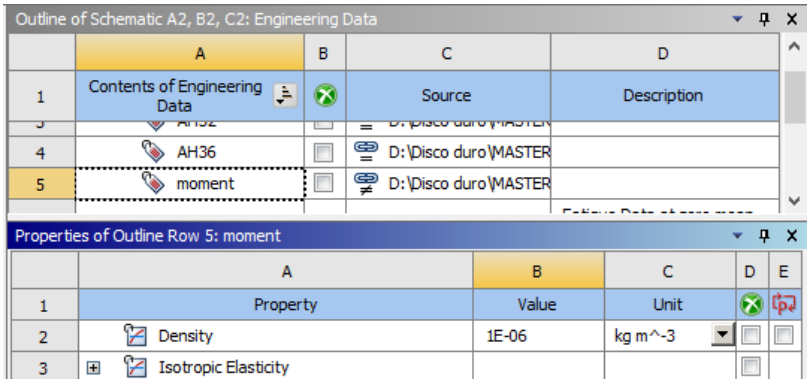


Ilustración 139. Introducción características material momento y fuerza cortante

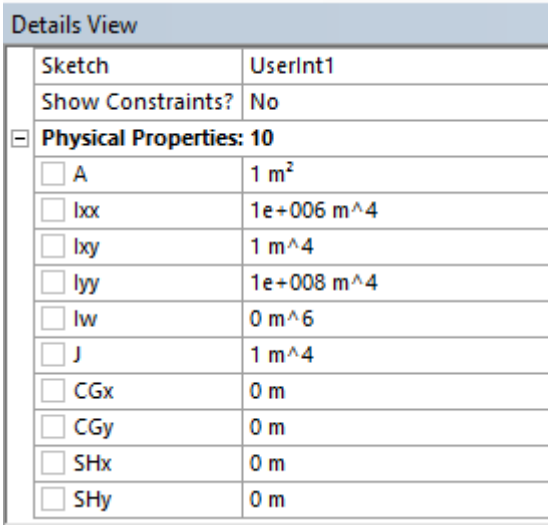


Ilustración 140. Detalle de inercia para momentos y fuerza cortante del contorno

Siguiendo el proceso de introducción de datos en el programa ANSYS, se podrá seleccionar para cada elemento introducido, el tipo de material que se trate al igual que el espesor que tendrá la posterior malla sobre el elemento.

Las características de los materiales, se asignan seleccionado, y gracias al nombrado que se realizó durante la introducción de los elementos, todos los elementos quedan claramente identificados.

Hay que analizar detenidamente donde se encuentra cada uno de los grupos de elementos seleccionados, ya que como recordara estos fueron divididos debido a diferencias de propiedades del material, por lo que ahora hay que asignarle el material correcto dependiendo de su situación, así como los espesores establecidos.

Los espesores de los distintos componentes estructurales, vienen definidos en el capítulo 4 del cálculo y diseño de la cuaderna maestra por DNV.

A continuación, se muestran las imágenes de la asignación de los distintos elementos estructurales del buque acorde su material, y espesor dado.

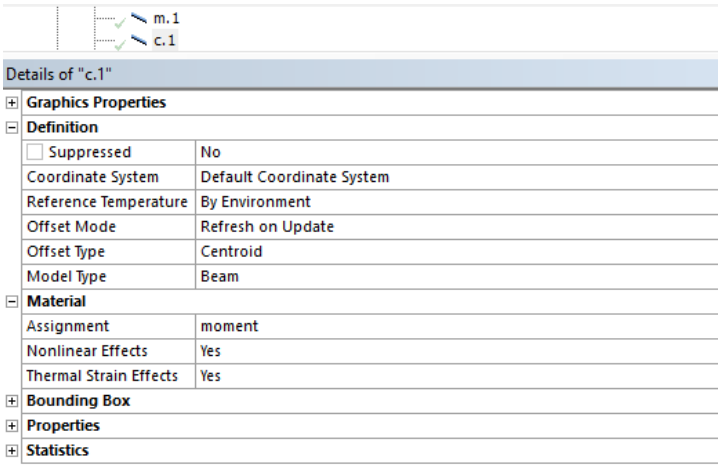


Ilustración 141. Geometría contorno momento y fuerzas

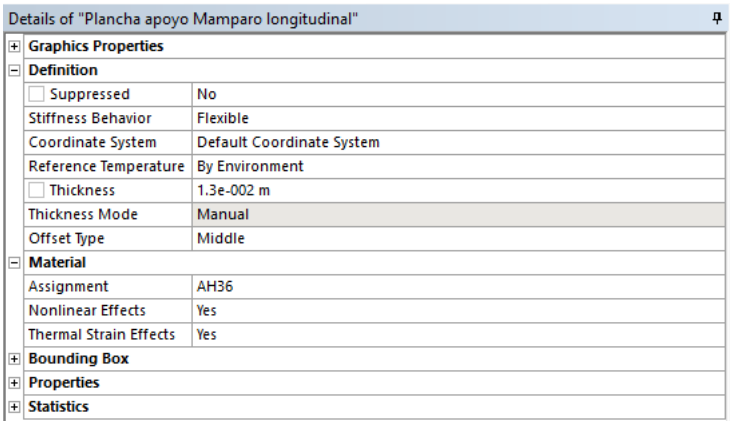


Ilustración 142.Geometría mamparo longitudinal

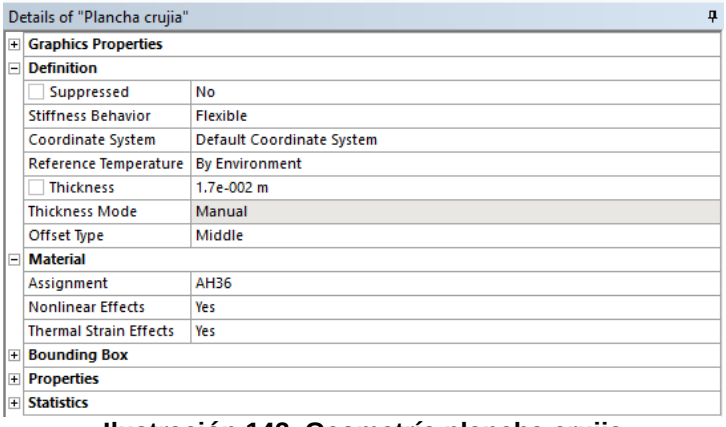


Ilustración 143. Geometría plancha crujia

Details of "Doble fondo"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.5e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 144. Geometría doble fondo

Details of "P. Oblicua"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.6e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 145. Geometría plancha oblicua

Details of "D.costado"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.3e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 146. Geometría doble costado

Details of "Fondo"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.5e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 147. Geometría fondo

Details of "Pantoque"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.6e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 148. Geometría pantoque

Details of "Costado"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.3e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 149. Geometría Costado

Details of "Cubierta"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.4e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 150. Geometría Cubierta

Details of "RDF3"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.8e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 151. Geometría Refuerzos doble fondo

Details of "Vagra4"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.3e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 152. Geometría Vagra

Details of "Varenga7"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.3e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 153. Geometría Varenga

Details of "RF1"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.8e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 154. Geometría Refuerzos fondo

Details of "Bularcama3"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.2e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 155. Geometría bulárcama

Details of "ref doble costad 12"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.6e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 156. Geometría refuerzos doble costado

Details of "r.c.7"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.8e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 157. Geometría refuerzos costado

Details of "Mamparo longitudinal"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.9e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 158. Geometría mamparo longitudinal

Details of "Mamp1"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.85e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 159. Geometría mamparo transversal

Details of "B.Mamp1_3"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.75e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 160. Geometría base mamparo

Details of "R.Cubierta5"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.8e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 161. Geometría refuerzo cubierta

Details of "Refcrujia2"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	2.e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 162. Geometría refuerzos crujía

Details of "palm 2"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.5e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 163. Geometría palmejar

Details of "refuerzos bases mamp.5"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.5e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH36
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 164. Geometría refuerzos base mamparo

Details of "REFPRIMCUB 3"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	1.35e-002 m
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	AH32
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Ilustración 165. Geometría refuerzos primarios cubierta

7.3 Uniones

A la hora de importar los elementos, puede que haya una pequeña tolerancia de separación que hace que la estructura no esté bien unida y en el mallado nos puede crear error.

Por tanto, para que los elementos estén bien unidos entre sí, existe un comando (Joint) en el programa ANSYS donde para cada intersección de superficies crea una unión.

Como se puede observar en la ilustración 166, las líneas verdes, indican las uniones que se han creado.

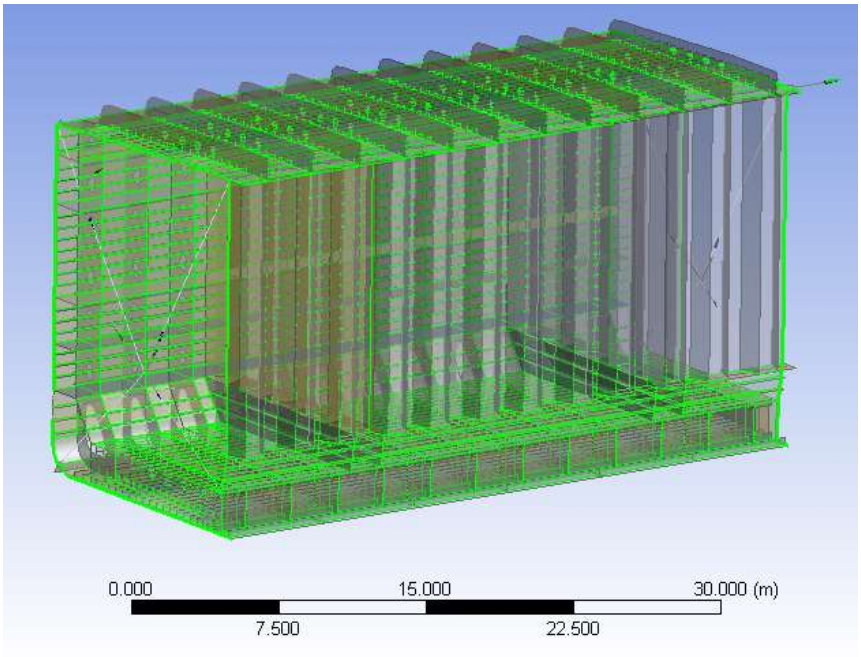


Ilustración 166. Uniones de la geometría importada

Por otra parte, los elementos lineales (los contornos para momentos y fuerzas) anteriormente citados para poderse unir no se puede usar el comando Joint, en ese caso, habría que utilizar otro tipo de unión llamado Booleana.

7.4 Mallado

Una vez importado la geometría se abre en ANSYS el “Multiple Systems – Mechanical”. Y se le aplica los espesores y acero indicados anteriormente.

Sin embargo, el procedimiento de mallado de la cuaderna maestra comienza con el método automático (“automatic method”).

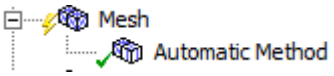


Ilustración 167. Método automático mallado

Un aspecto muy importante, es el Mesh Connection Group, si no se utiliza este comando, la malla que se crea no estaría conectada y esto supondría un inconveniente. Por ejemplo supongamos una fuerza aplicada a una chapa con un perfil unido, esa fuerza no deformaría el perfil ya que éste no está unido a la plancha, es decir, solo se desplazaría la plancha y el refuerzo no. Esto se evitaría con el comando anteriormente indicado. Por lo tanto, se crearán tantas conexiones como uniones.

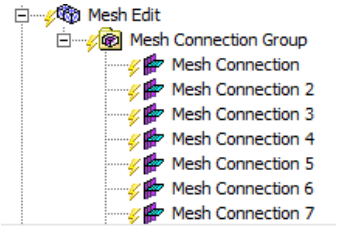


Ilustración 168. Uso de Mesh Connection Group

7.5 Condiciones de contorno y carga

En este apartado, vamos a tratar dos tipos de situaciones a estudiar. Es decir, primero tenemos que estudiar el sistema buque viga y por otro lado, las condiciones de carga que nos indica las sociedades de clasificación.

Cada tipo de estudio tiene sus condiciones de contorno y cargas.

Primero, para el caso de *buque viga*, en un extremo de la cuaderna maestra tendremos la fuerza cortante y el momento aplicado (arrufo o quebranto) simulando la fuerza cortante y momento correspondiente a la curva (ilustración 169).

Las curvas de fuerzas cortantes y momentos de arrufo y quebranto no lo proporciona el plano de la cuaderna maestra, por tanto, para saber que valores hay que aplicar tenemos que irnos al capítulo 4 Cálculo y diseño de la cuaderna maestra por DNV, donde se calculó los momentos y fuerzas cortantes.

Todas estas flexiones en la forma de arrufo o quebranto crean tensiones internas en el material. Si tomamos una barra y la doblamos en forma de quebranto, las fibras en la parte exterior de la curvatura estarán en tensión, es decir, estiradas. Las fibras en la parte interior de la curvatura estarán en compresión (en cierto eje no estarán ni en tensión ni compresión, este se llama eje neutral). Por una parte los metales solo pueden asimilar la tensión o la compresión hasta cierto límite antes de sufrir deformaciones perennes. Por otra parte sucesivas deformaciones opuestas, como arrufo-quebranto-arrufo debido a la forma en que un buque se posiciona en la ola, puede conducir a la fatiga y eventualmente a las rajaduras o fallo estructural.

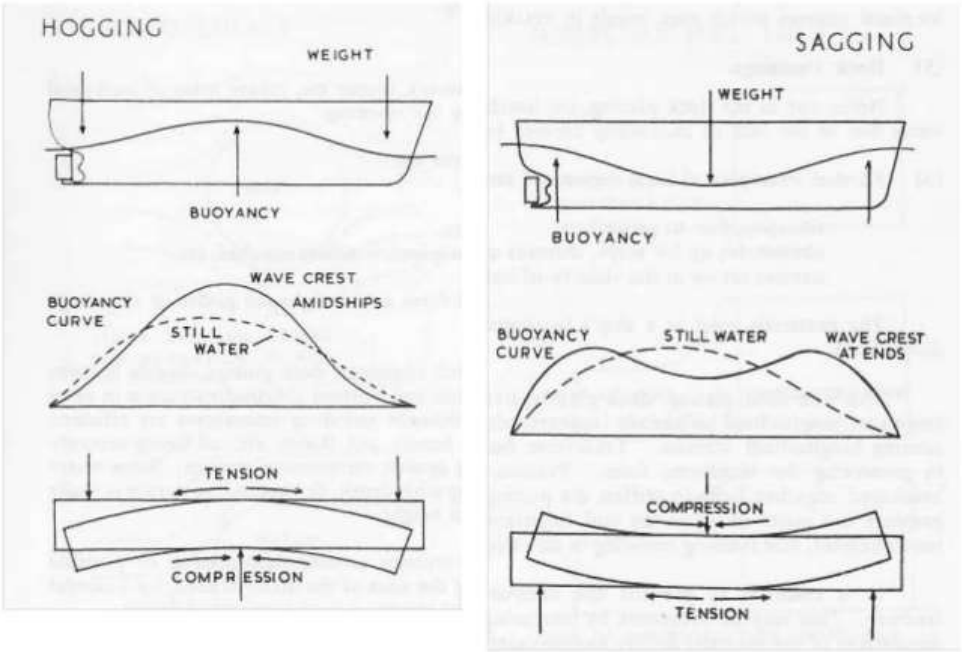


Ilustración 169. Diagrama Arrufo y Quebranto

En los estudios de elementos finitos para el caso de la cuaderna maestra en buque viga, la práctica más común es que en el extremo tendremos la condición de contorno de empotramiento y en el otro extremo, como hemos comentado anteriormente, irá aplicada la condición de momento y fuerza.

Como se puede observar en la ilustración 170, los vértices son soportes fijos. Y en la ilustración 171, tenemos aplicado la fuerza y momento

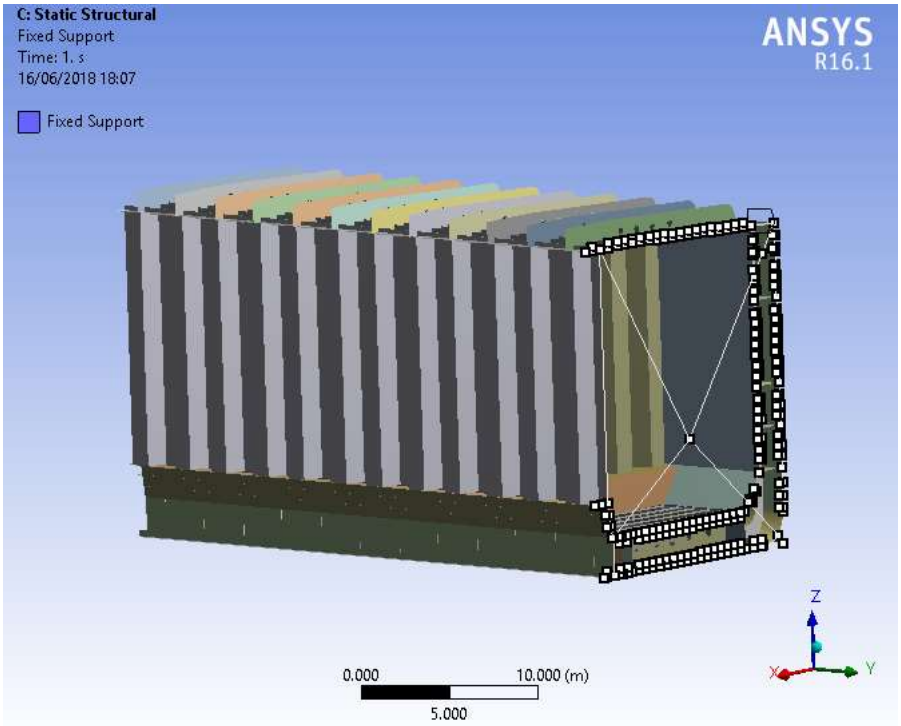


Ilustración 170. Extremo de proa condición empotramiento

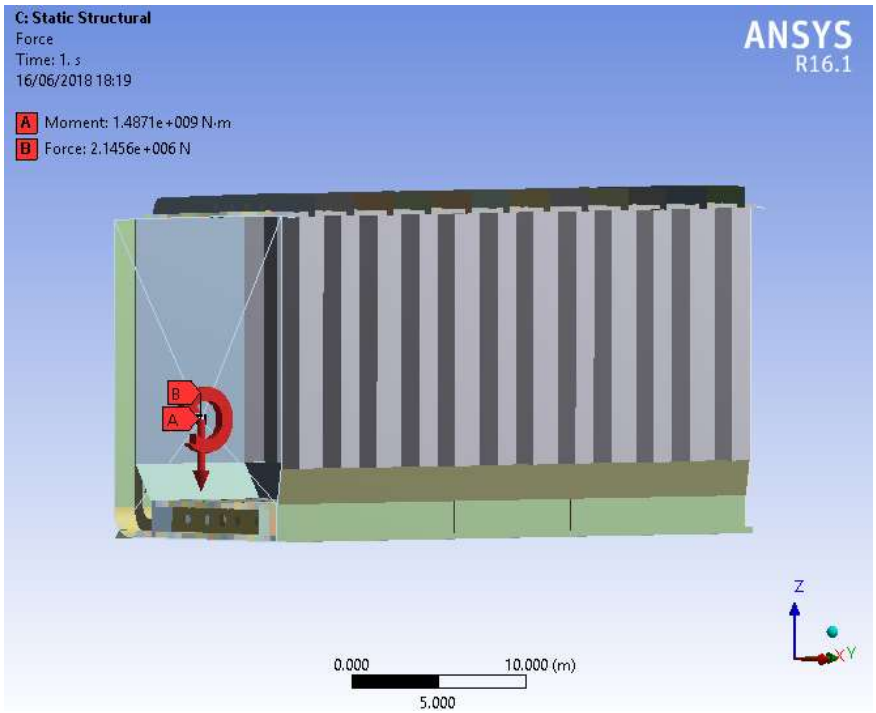


Ilustración 171. Punto de aplicación fuerza y momento

Mientras que en el plano de crujía, tendremos una condición de contorno de simetría, debido a que solo se ha dibujado la mitad de la cuaderna maestra, como se puede apreciar en la ilustración 171, las líneas rojas representan la región de simetría.

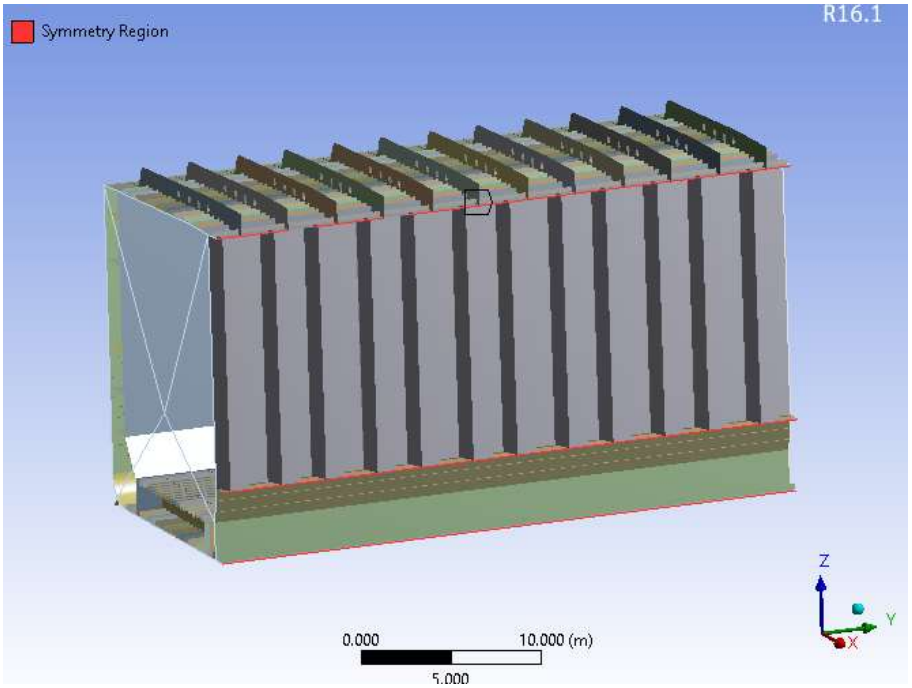


Ilustración 172. Región de simetría cuaderna maestra

Por otro lado, el segundo caso de estudio, son las “pautas” de condiciones de carga (Ilustración 96) que nos refleja la sociedad de clasificación en este caso el DNV. Sin embargo, como se ha dicho anteriormente son pautas generales. En este trabajo, el segundo caso de estudio se realizara de forma más específica, ya que lo que se pretende es optimizar la estructura en ciertas zonas de la cuaderna maestra. En cuanto a las condiciones de contorno del segundo caso, tanto el extremo de proa como popa se consideran no empotradas ya que estaríamos diciendo al tanque central que el barco “termina” en sus extremos más próximos y no reflejaría la situación real, es decir, obtendríamos valores distorsionados.

Por tanto, el estudio se centra en tres elementos, la bulárcama, los mamparos transversales y la varenga. Para cada elemento, tendremos que ver que combinación de carga es más desfavorable, es decir, que condición de carga les crea mayores tensiones internas y mayores esfuerzos.

El programa de elementos finitos permite la superposición de análisis, no obstante, en el supuesto caso de que no se tuviese esta opción, la superposición habría que hacerla de forma manual, es decir, si en el análisis por buque viga obtenemos una tensión de 200 MPa y en el estudio de la presión de mar en el costado tenemos una presión de 20 MPa, la superposición se haría lineal, por tanto, obtendríamos como resultado final una tensión de 220 MPa.

La realización de superposición es sencilla de hacer, basta sólo con arrastrar un análisis estructural (desde cero) hasta la solución de nuestro modelo (ilustración 173) y automáticamente se genera otro análisis que “bebe” del mismo modelo y misma malla, lo único que cambia son otras condiciones de carga y contorno que se quieran aplicar (ilustración 174).

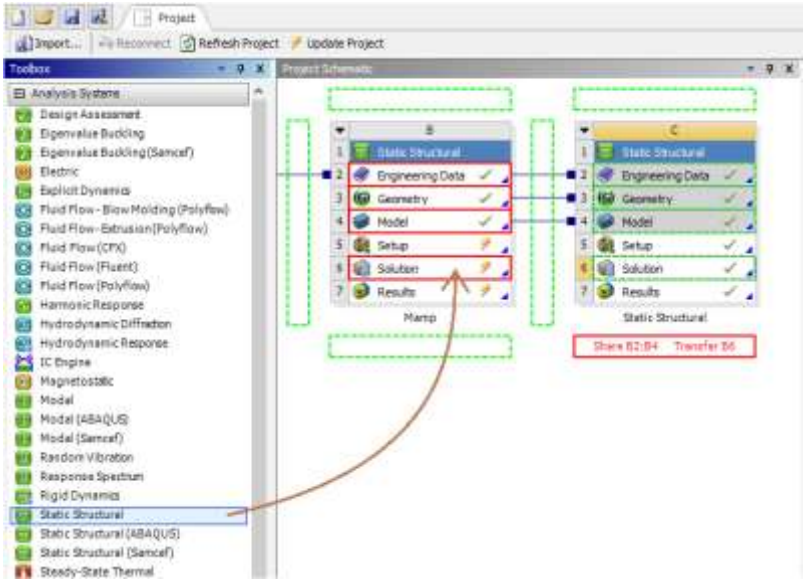


Ilustración 173. Creación superposición

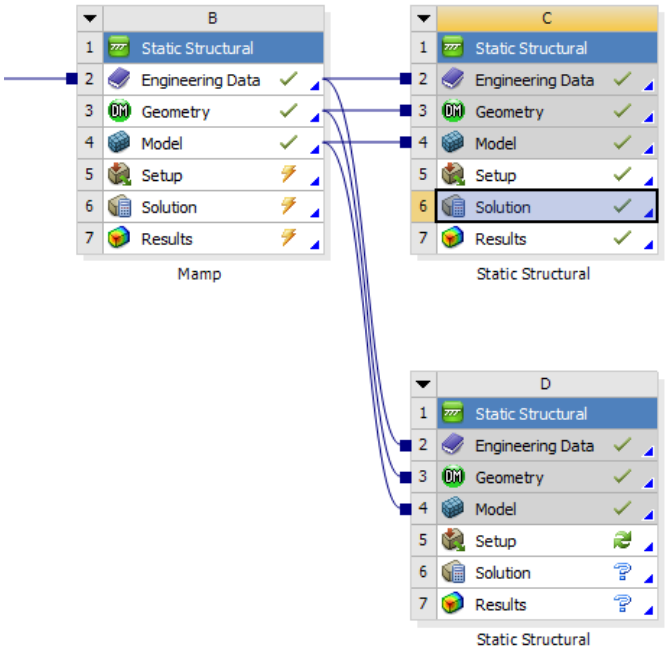


Ilustración 174. Creación superposición (2)

7.5.1 Bulárcama

Para el caso de la bulárcama vamos a suponer dos condiciones de carga, presión de mar y tanque central lleno y por otro lado presión de mar y tanque central vacío. Además se le aplicará la superposición del análisis del buque viga (anteriormente explicado).

7.5.1.1 Buque viga, presión de mar y tanque central lleno

La fuerza y el momento, son los valores obtenidos por los cálculos del DNV realizado en el capítulo 4.

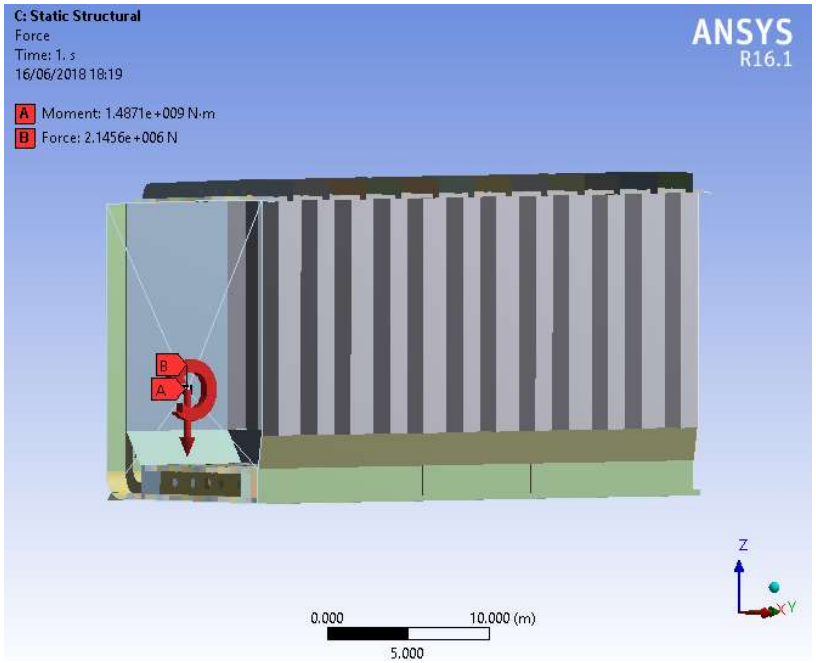


Ilustración 175. Fuerza y momento del buque viga

En el caso de la presión hidrostática, se calcula automáticamente, solamente tenemos que seleccionar las superficies que se le aplica la presión. Indicar la densidad del fluido, en este caso 1025 Kg/m^3, por otro lado, la aceleración que tendrá un valor de 9.81 m/s^2 (sentido positivo, hacia arriba) y por último la cota de altura, que será el calado de diseño de carga (11 metros).

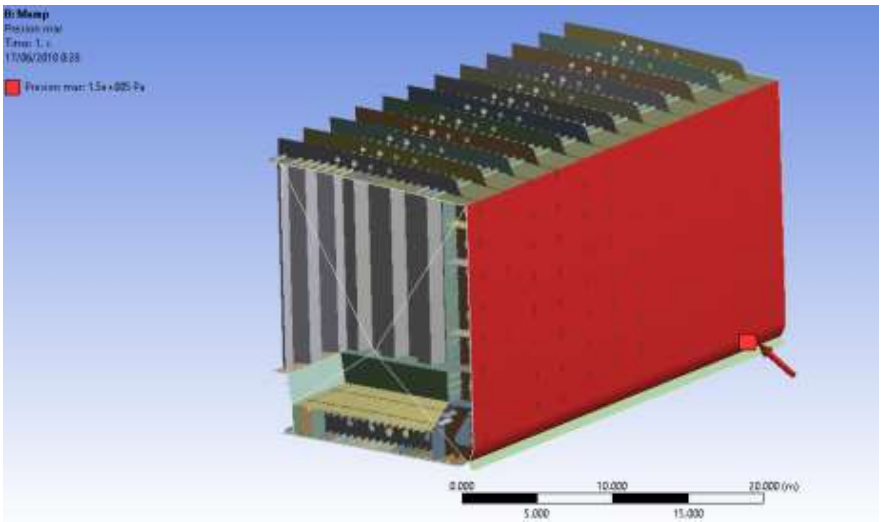


Ilustración 176. Presión del mar aplicado

Por último, se considera la presión del tanque como una presión hidrostática, al igual que en el caso de la presión de mar, solamente tenemos que seleccionar las superficies que se le aplica la presión. Indicar la densidad del fluido, en este caso 1025 Kg/m^3, este valor viene reflejado en el plano de la cuaderna maestra (Ilustración 177), por otro lado, la aceleración que tendrá

un valor de 9.81 m/s^2 (sentido positivo, hacia arriba) y por último la cota de altura, que será la altura del tanque.

5. THE DENSITY OF CARGO IS 1.025t/m^3 AT FULL LOADING,

Ilustración 177. Detalle de densidad de carga

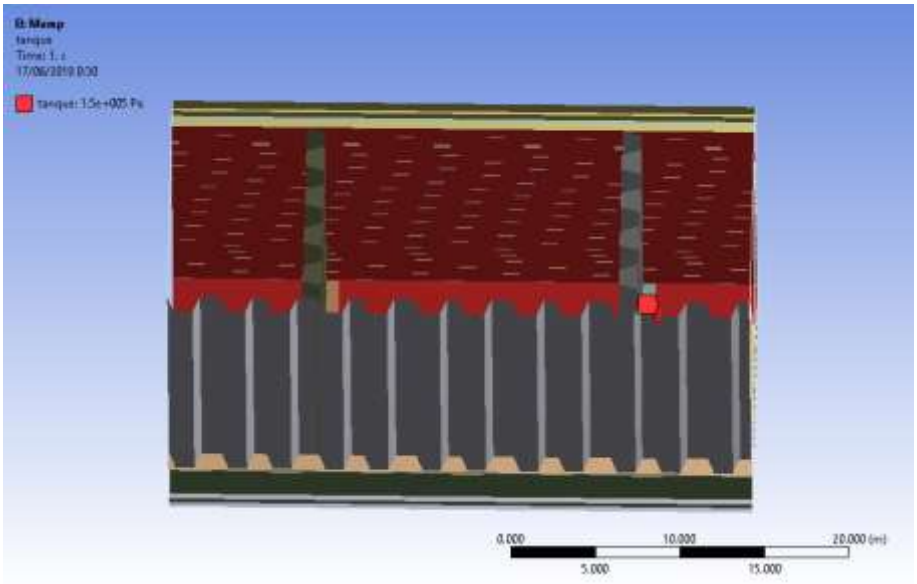


Ilustración 178. Presión del tanque lleno

7.5.1.2 Buque viga, presión de mar y tanque central vacío

A priori este es la condición más desfavorable, en el capítulo 8 se comprobará si esta condición es más perjudicial que la primera o no. Las cargas son las mismas que en el caso anteriormente explicado tanto para el buque viga como para el caso de la presión de mar.

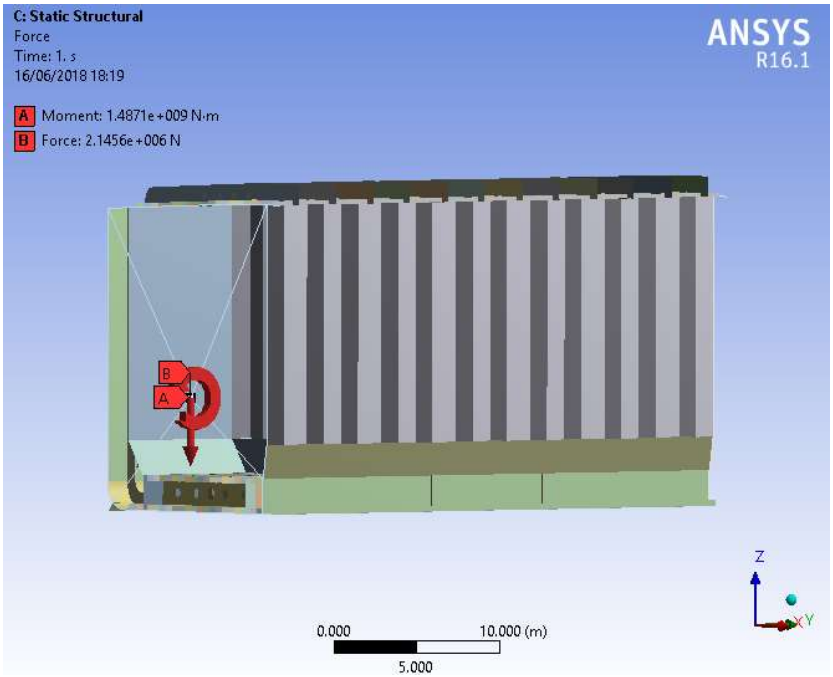


Ilustración 179. Momento y fuerza buque viga

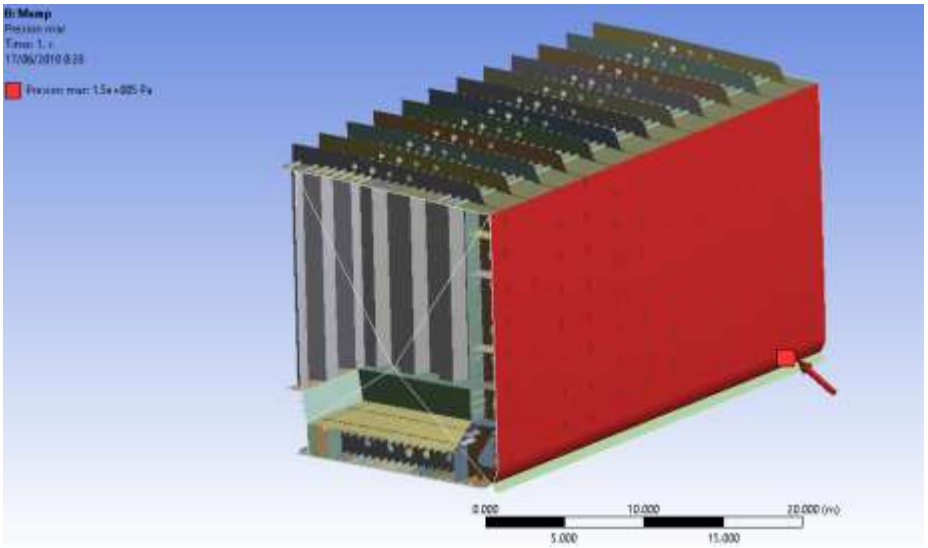


Ilustración 180. Presión del mar aplicado al costado

7.5.2 Mamparo

En el caso del mamparo, la situación más perjudicial para este elemento estructural es un tanque lleno y otro vacío. Por tanto, supondremos el tanque central lleno junto con el momento y fuerza del buque viga, y comprobaremos los resultados obtenidos.

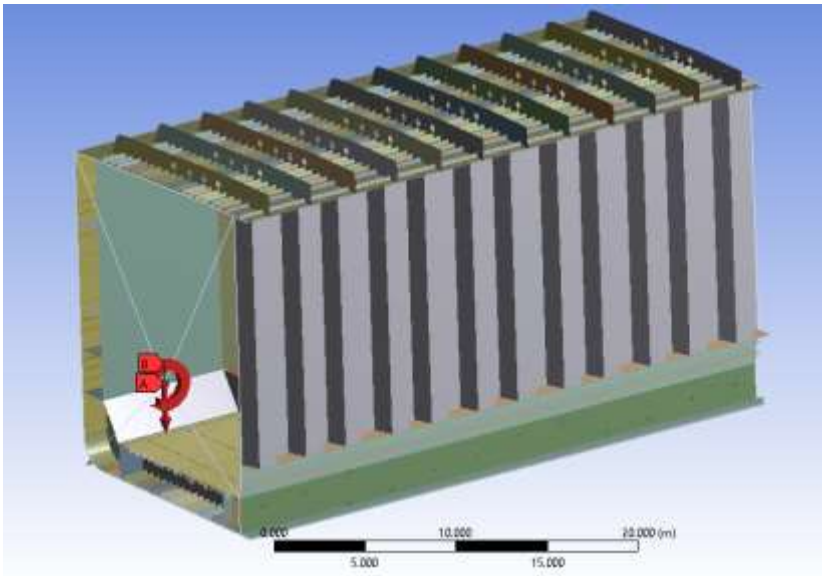


Ilustración 181. Momento y fuerza buque viga

Se considera la presión del tanque como una presión hidrostática, se selecciona las superficies que se le aplica la presión.

Indicar la densidad del fluido, en este caso 1025 Kg/m^3, este valor viene reflejado en el plano de la cuaderna maestra (Ilustración 177), por otro lado, la aceleración que tendrá un valor de 9.81 m/s^2 (sentido positivo, hacia arriba) y por último la cota de altura, que será la altura del tanque.

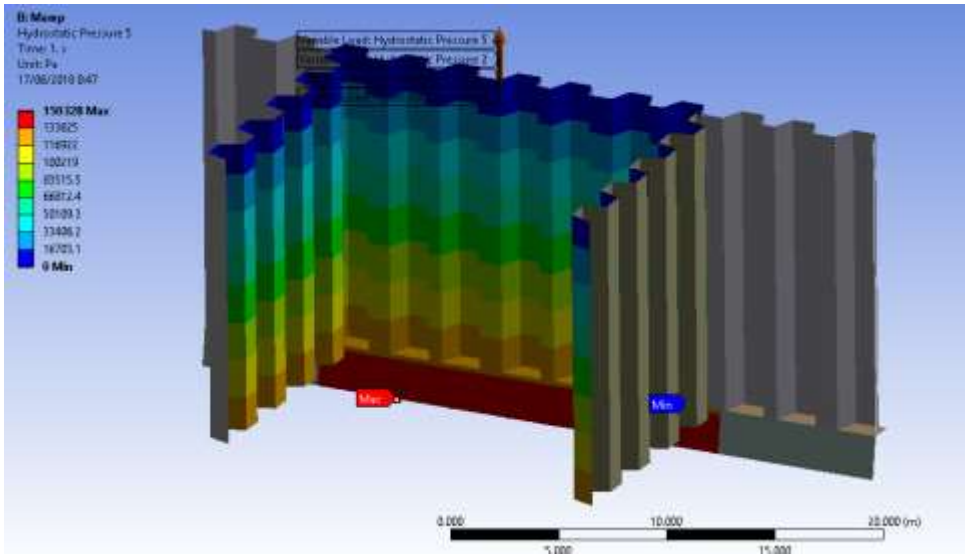


Ilustración 182. Presión hidrostática tanque sección central

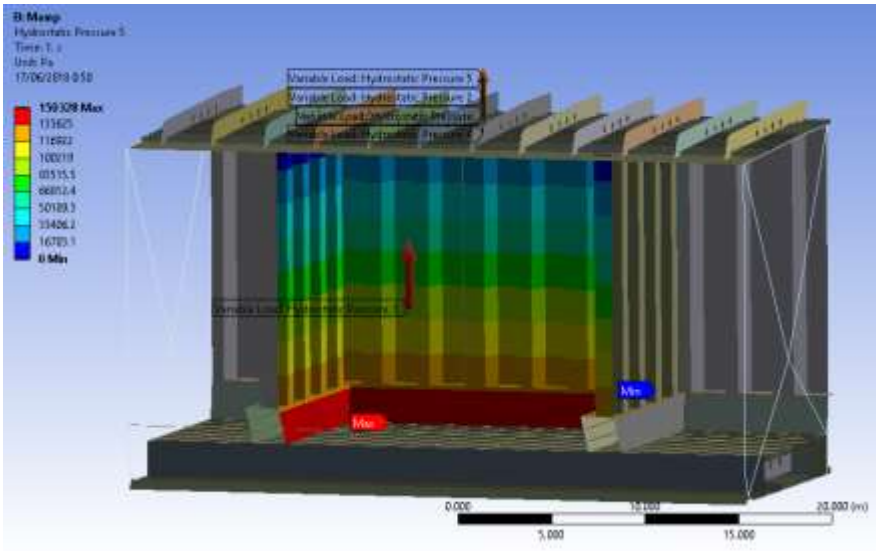


Ilustración 183.Presión hidrostática tanque sección central (2)

7.5.3 Varenga

Y por último, la situación más desfavorable para la varenga corresponde con el buque viga y con la máxima presión del mar.

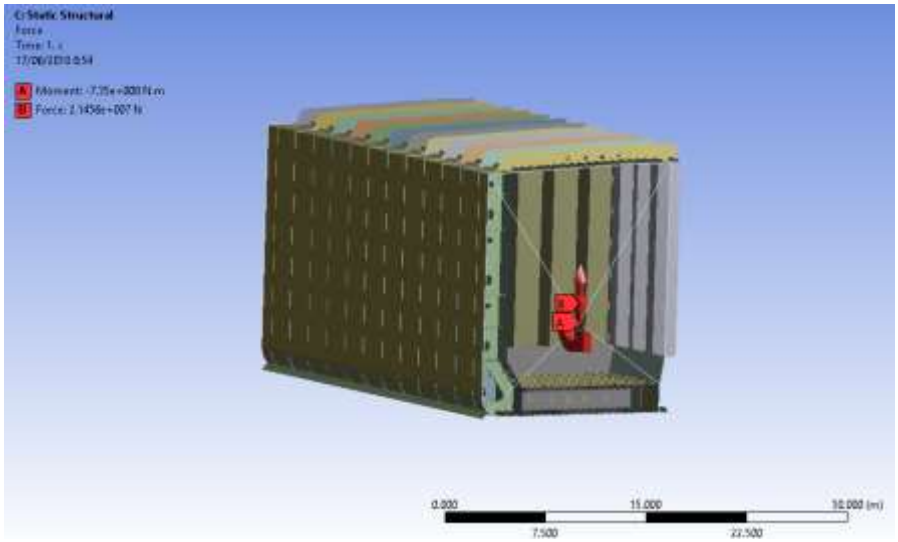


Ilustración 184. Momento y fuerza buque viga

En el caso de la presión hidrostática, se indica la densidad del fluido, en este caso 1025 Kg/m^3, por otro lado, la aceleración que tendrá un valor de 9.81 m/s^2 (sentido positivo, hacia arriba) y por último la cota de altura, que será el calado de diseño de carga.

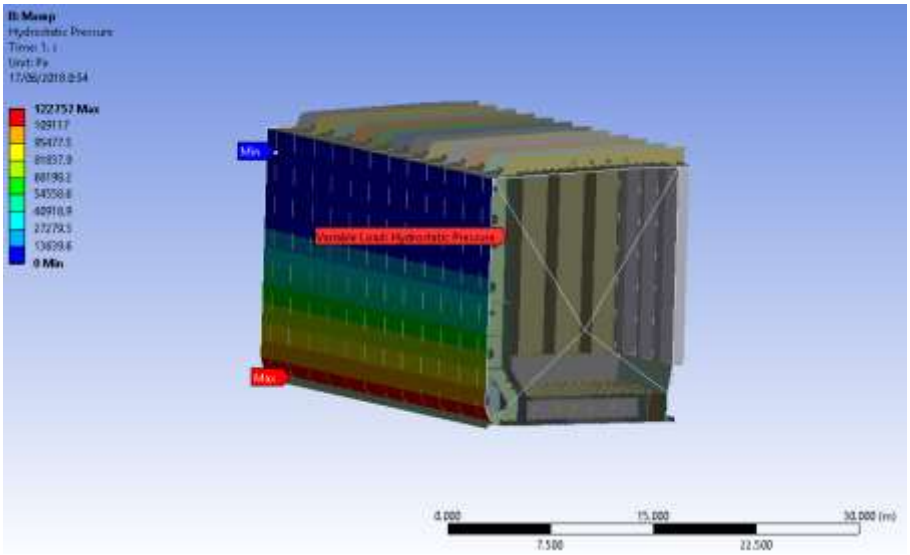


Ilustración 185. Presión de mar costado y fondo

8 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

8.1 Resultados obtenidos y propuestas

Se aportan los resultados gráficos de la deformada global de la cuaderna maestra para las combinaciones de carga mencionado anteriormente.

Se ha procedido a analizar 3 casos diferentes como se ha comentado en el anterior capitulo junto con las siguientes propuestas de optimización:

- Propuesta 1: La bulárcama de 12’5 milímetros de espesor por una bulárcama de 12 milímetros.
- Propuesta 2: El mamparo transversal, se reduce el espesor de 19,5 milímetros a 18, 5 milímetros de espesor.
- Propuesta 3: El espesor de la varenga se reduce de 13 milímetros a 12 milímetros de espesor.

8.1.1 Propuesta 1: Bulárcama

A continuación, comprobaremos para cada caso los resultados obtenidos y ver que las tensiones producidas no superan la tensión de rotura del material empleado.

8.1.1.1 Buque viga, presión de mar y tanque central lleno

En la ilustración 186, se comprueba que la zona de mayor tensión a la que están sometidas las bulárcamas es justo la mitad del tanque central.

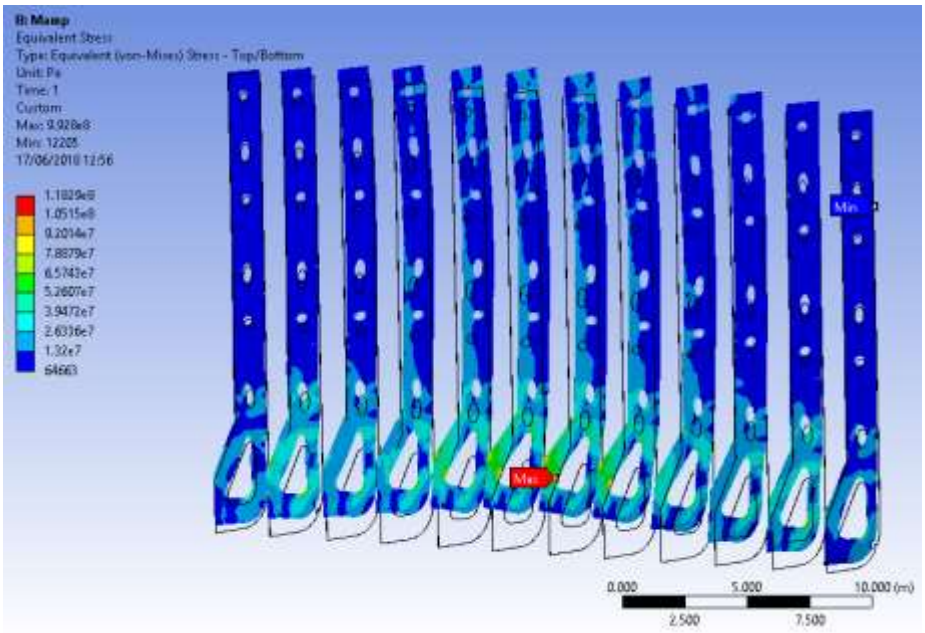


Ilustración 186. Tensiones producidas por la condición de carga

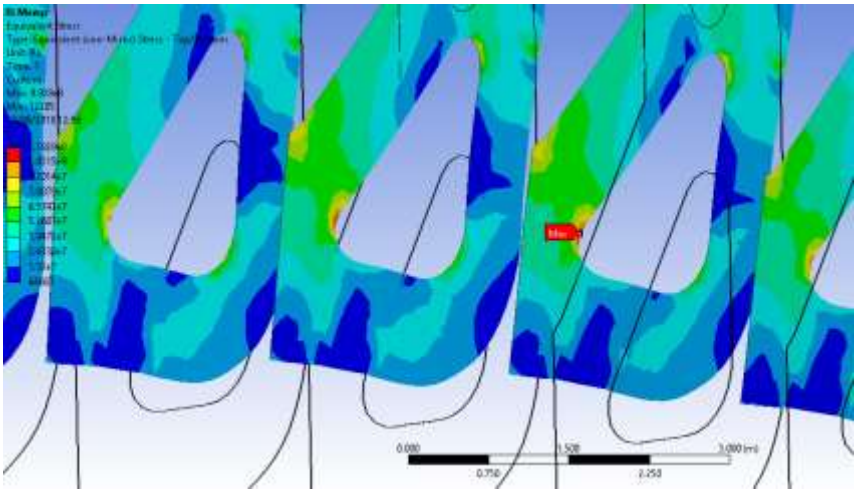


Ilustración 187. Localización de la máxima tensión

Como se puede apreciar en la imagen 187, justo en el contorno del aligeramiento del pantoque, hay un contorno en rojo que adquiere un valor de 118 MPa. Esa máxima tensión produce una máxima deformación de 5,3 milímetros en la zona central.

En ningún caso, la presión reportada por el tanque central lleno y la presión de mar, hacen que la tensión supere el nivel de rotura del material. Además, se puede apreciar en la ilustración 188, la deformación que se produce con respecto a la estructura original, representado mediante una estructura alambre.

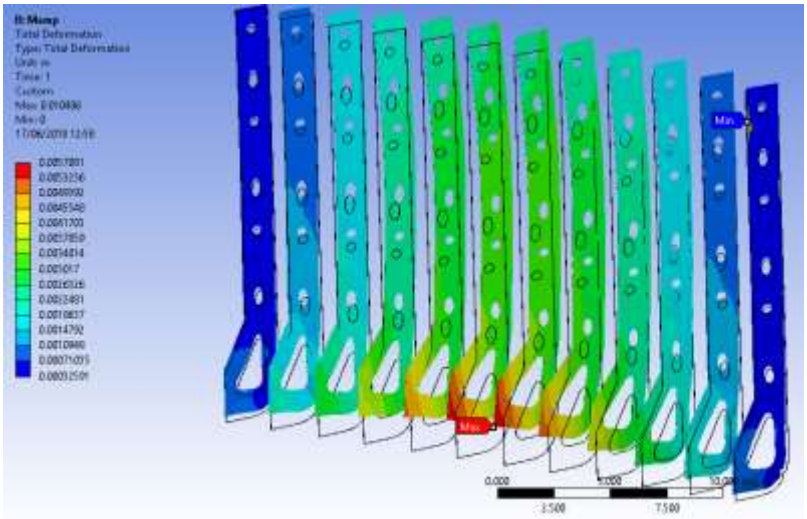


Ilustración 188. Deformada debido por la condición de carga

En cambio, la ilustración 189, nos muestra las tensiones creado por la fuerza y momento debido al buque viga. La imagen nos reporta un máximo, justamente en el aligeramiento de la primera bulárcama (en popa de la cuaderna), este máximo solo se visualiza en un punto en concreto de la estructura, se denomina este punto como hot spot. Un hot spot es un valor “residual” que no se puede establecer como nivel de referencia, por tanto, cogemos como límite, el inmediatamente inferior.

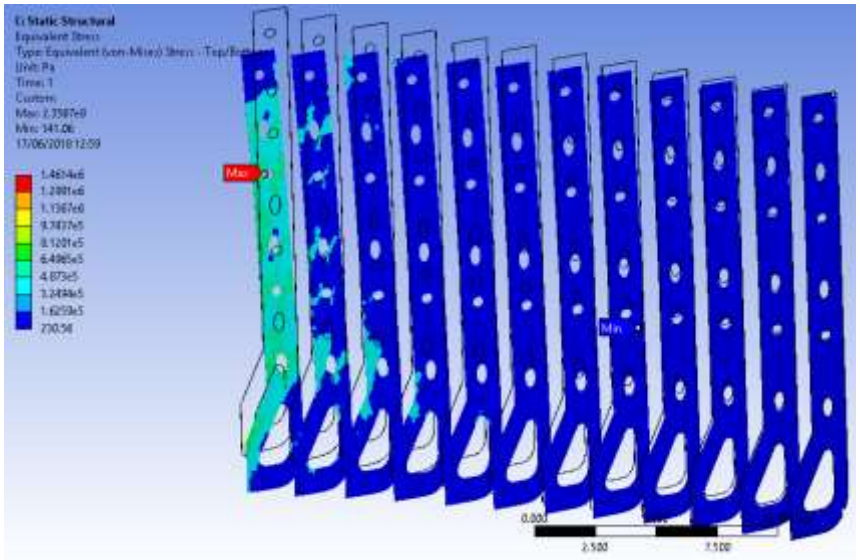


Ilustración 189. Tensiones producidas a nivel buque viga

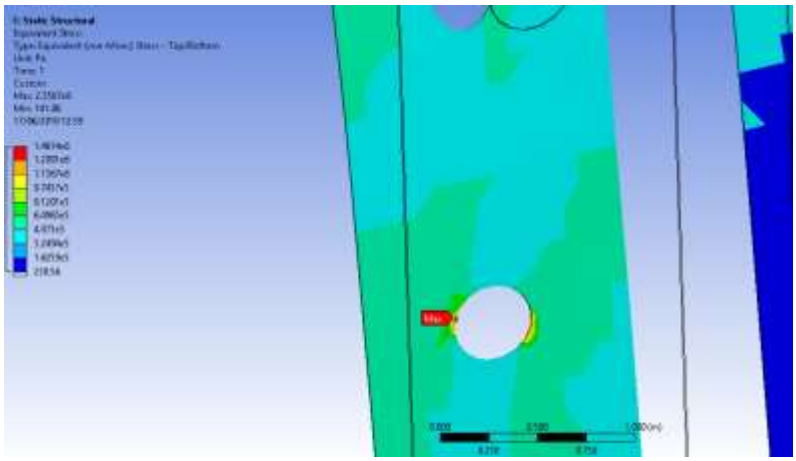


Ilustración 190. Localización máxima tensión

La bulárcama de popa es el elemento que más tensiones está soportando debido a la acción de las fuerzas cortantes y momentos aplicados por el buque viga. En la ilustración 191, se aprecia como dicha bulárcama es el elemento que mayor desplazamiento adquiere con respecto a la estructura inicial (estructura alambre).

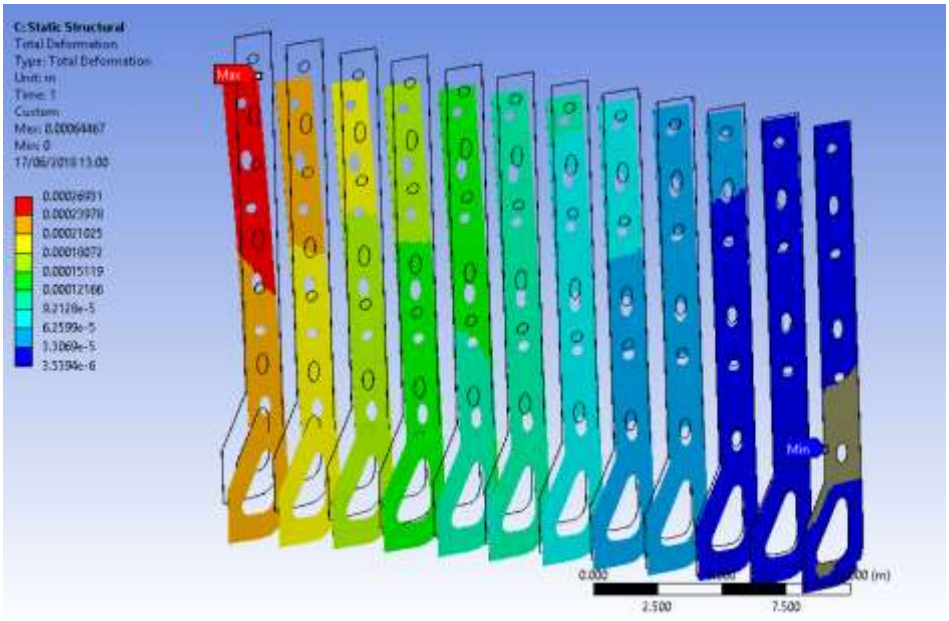


Ilustración 191. Deformación producida por buque viga

A continuación, tal y como se describió en el capítulo anterior, se procede a realizar una superposición de análisis para comprobar qué tensiones y deformaciones son las máximas y dónde se producen.

En la ilustración 192, se muestra la combinación de tensiones entre el buque viga y las tensiones producidas por el efecto del tanque lleno y presión del mar. Se puede corroborar que las tensiones producidas no son superiores a la tensión de rotura del material, 315 MPa, donde la máxima superior es de 118 MPa.

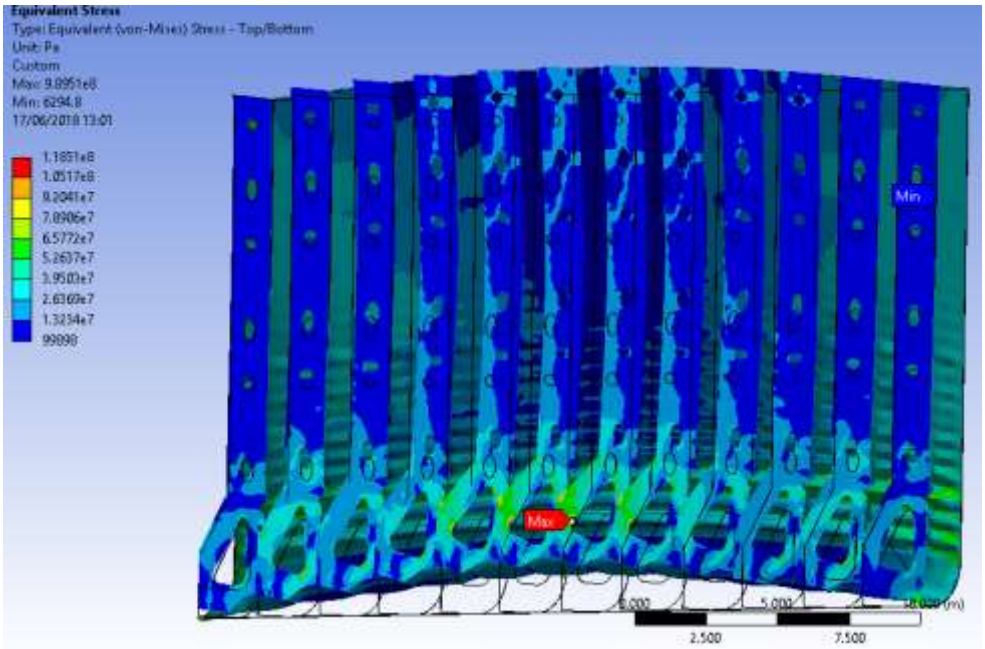


Ilustración 192. Combinación tensiones en propuesta 1

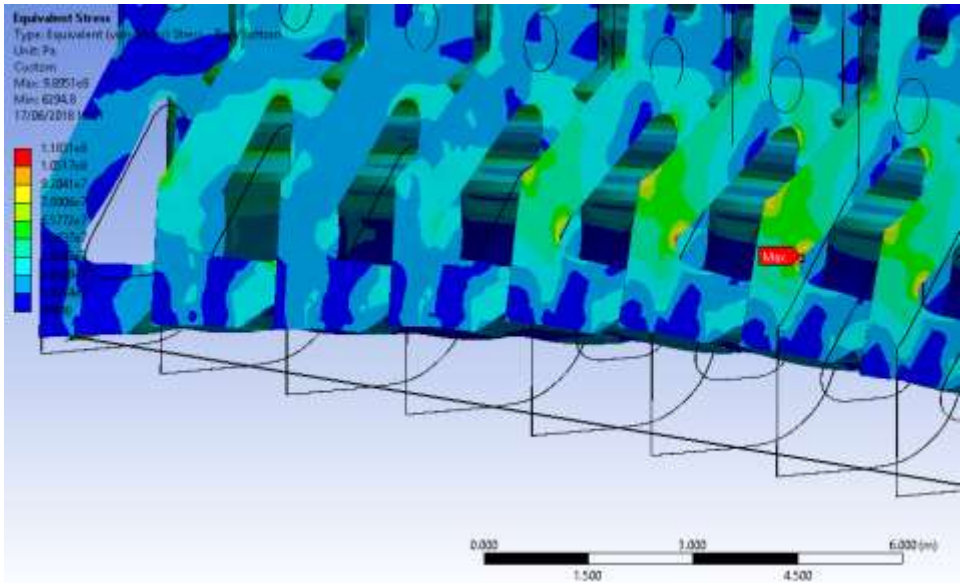


Ilustración 193. Localización de tensión máxima

Ilustración 194. Perfil buque viga combinación de tensiones

No obstante, en la deformada, se comprueba que la máxima deformación se lleva a cabo en la zona central de la sección del tanque (ilustración 195), que coincide con la combinación y acumulación de tensiones entre los dos análisis indicados anteriormente en la ilustración 192.

Además, se puede apreciar cómo se deforma y en qué sentido con respecto a la estructura inicial.

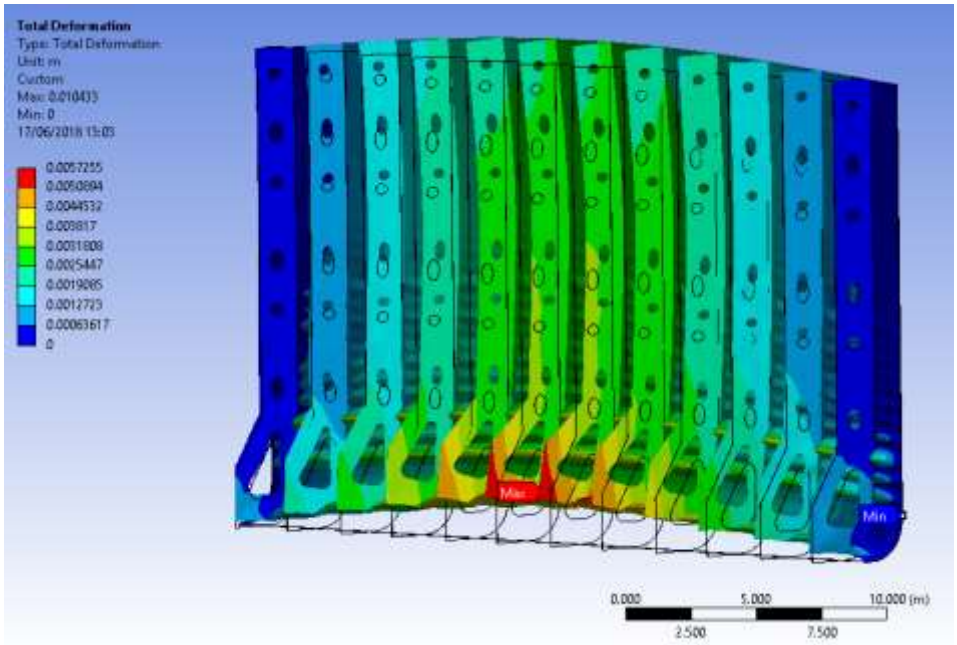


Ilustración 195. Superposición de la deformada

8.1.1.2 Buque viga, presión de mar y tanque central vacío

A continuación, se ilustrarán diferentes imágenes, primero la ilustración 196, cuyas tensiones están causadas por la condición de carga que se le aplica al costado por el golpe de mar y tanque central vacío, ésta es la condición más desfavorable o lo que es lo mismo la mayor tensión que puede sufrir por una presión externa la bulárcama.

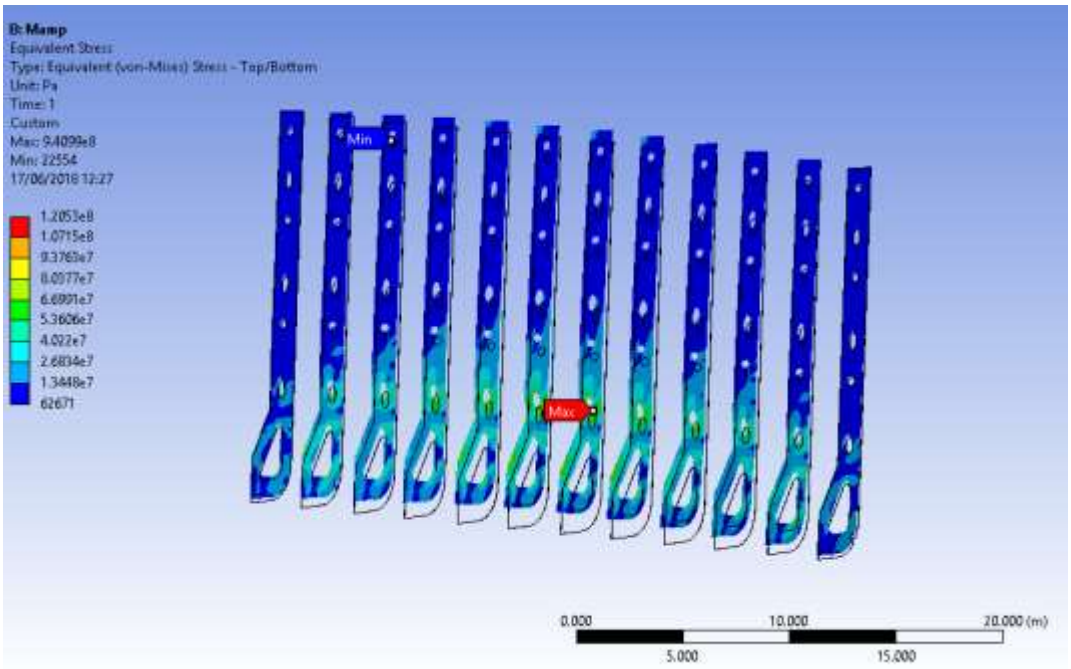


Ilustración 196.Tensiones producidas por la presión de mar

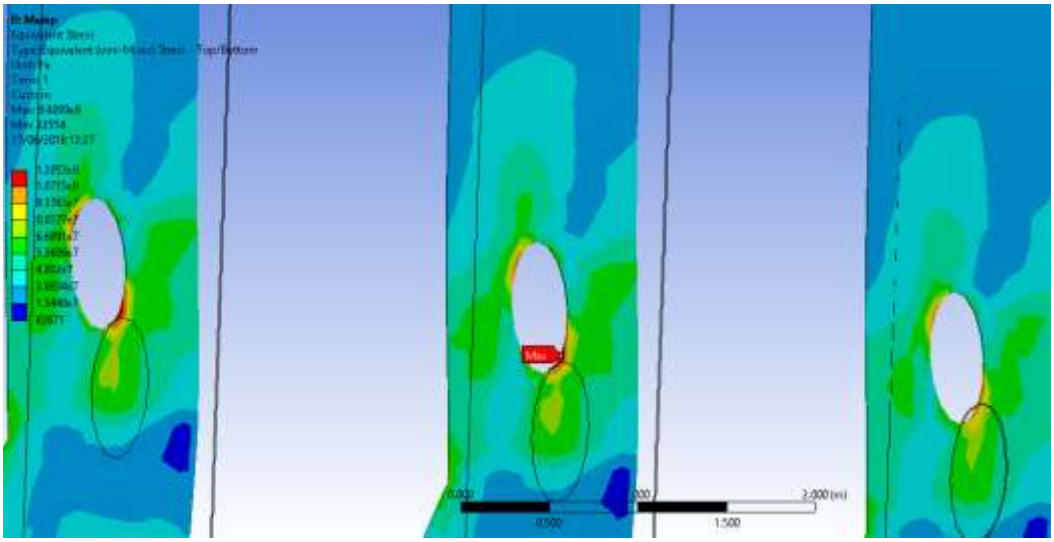


Ilustración 197. Máxima tensión en el aligeramiento

Hay que aclarar que la presión del mar hace que la tensión no supera el nivel de rotura del material. Además, se puede apreciar en la ilustración 198 y 199, la deformación que se produce con respecto a la estructura original, representado mediante una estructura alambre.

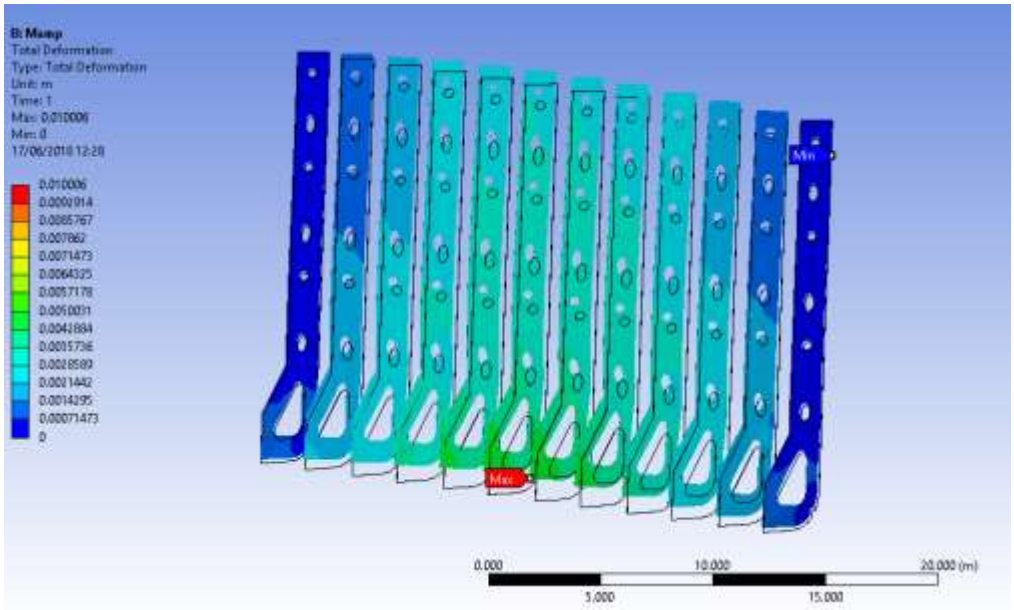


Ilustración 198. Deformada debido a la presión del mar

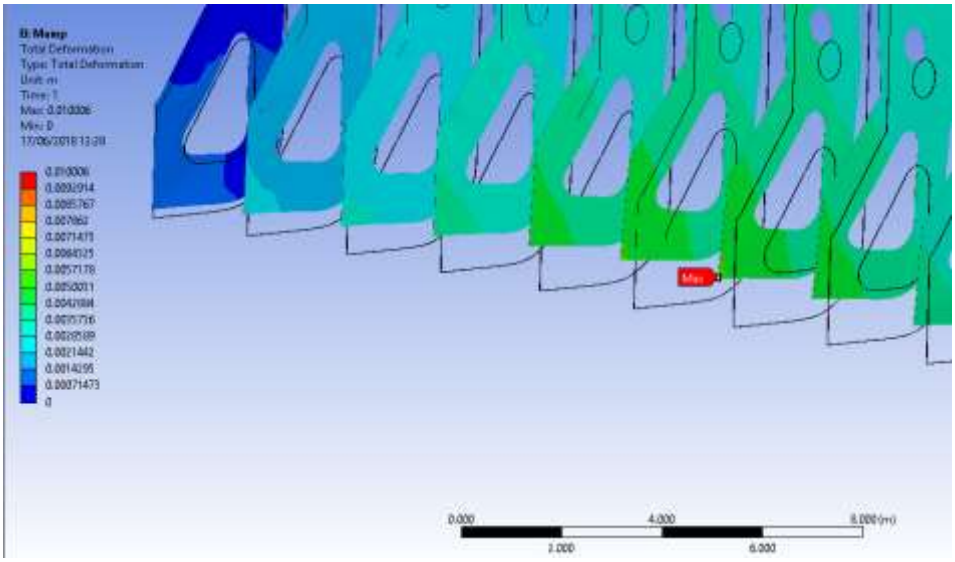


Ilustración 199. Punto máximo de deformación producido

El otro análisis necesario para poder realizar la combinación de tensiones y deformaciones es a nivel buque viga. Se puede apreciar en las siguientes ilustraciones 200 y 201 como la tensión que se acumula alrededor del aligeramiento es la tensión máxima. Dicha tensión no se expande por toda la bulárcama, sino que está concentrado en una pequeña área de la estructura (hot spot). El resto de las tensiones que se distribuyen por la bulárcama son tensiones con valores más bajos.

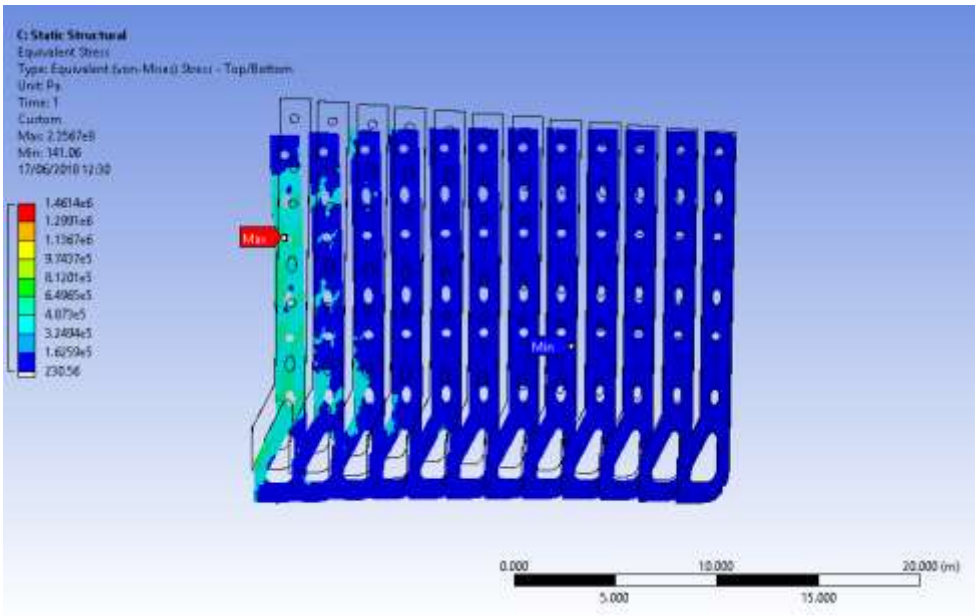


Ilustración 200. Tensiones producidas por buque viga

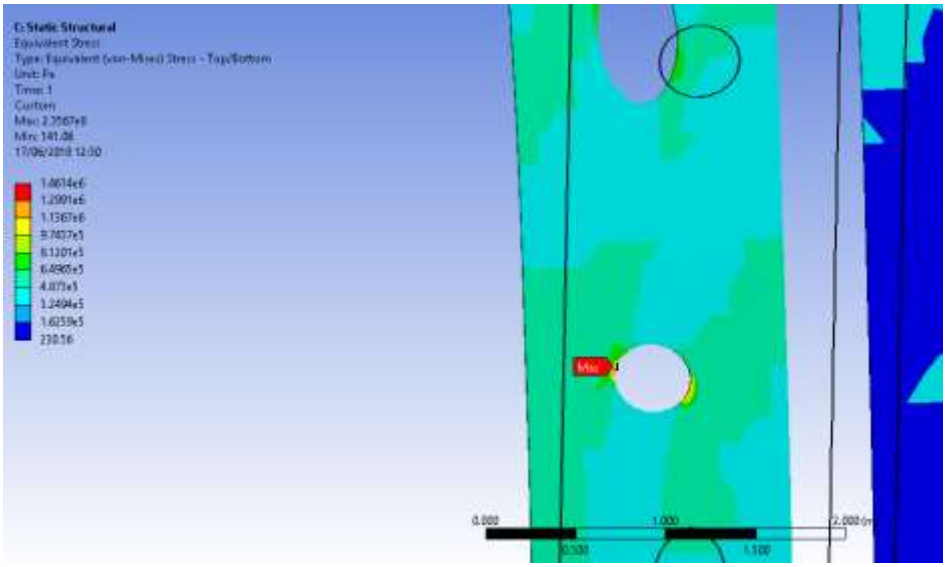


Ilustración 201. Máxima tensión en el aligeramiento

La ilustración 202, nos muestra la deformación causada por las tensiones producidas por el momento más desfavorable y la fuerza cortante producida en el buque viga.

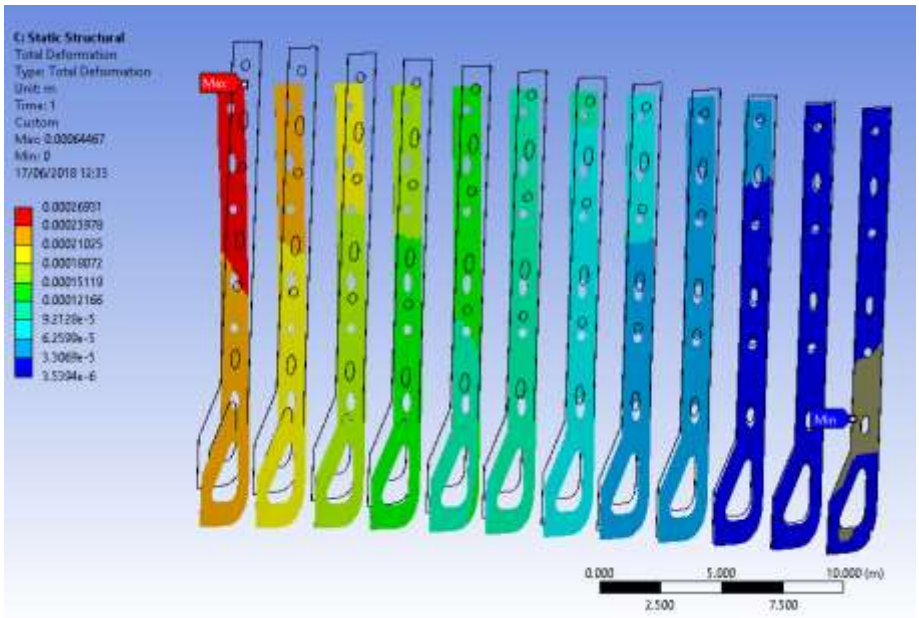


Ilustración 202. Deformación producida por buque viga

A continuación, se procede a realizar una superposición de análisis para comprobar qué tensiones y deformaciones son las máximas y dónde se producen.

En la ilustración 203, se muestra la combinación de tensiones entre el buque viga y las tensiones producidas por el efecto del tanque vacio y presión del mar. Se puede corroborar que las tensiones producidas no son superiores a la tensión de rotura del material, 315 MPa, donde la máxima superior es de 208 MPa.

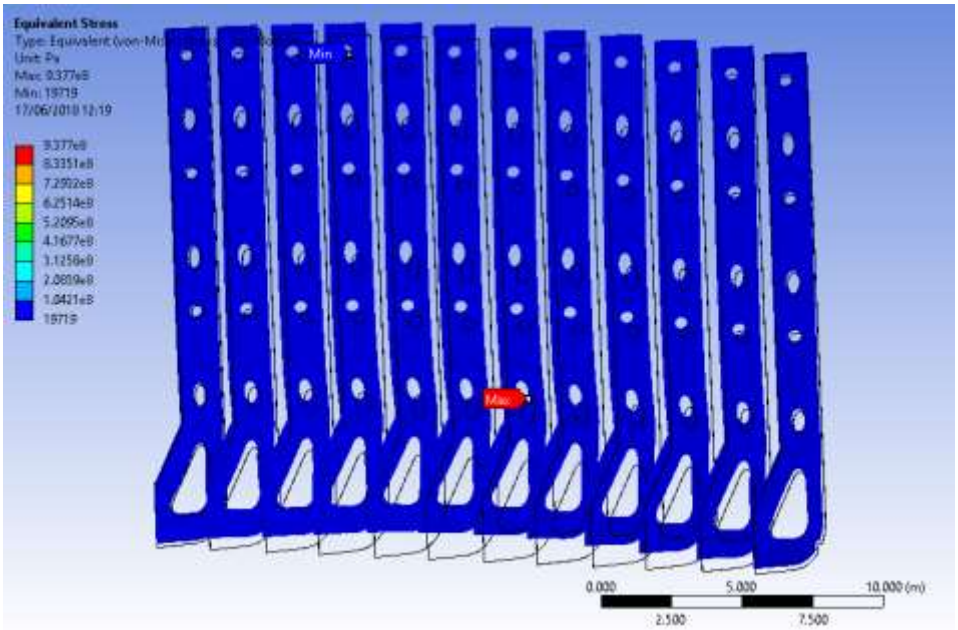


Ilustración 203. Superposición tensiones producidas en las bulárcamas

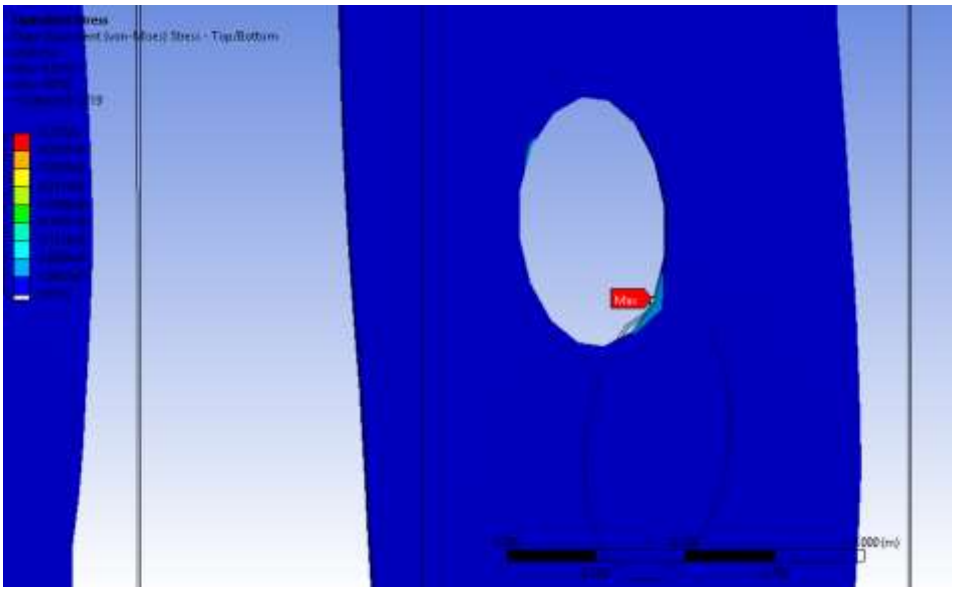


Ilustración 204. Máximo producido en un aligeramiento

Por tanto, la ilustración 205, nos refleja la deformación real que sufre las bulárcamas (objeto de estudio de optimización de este apartado) aplicando las tensiones de buque viga y presión de mar. Como se puede comprobar la máxima deformación que sufre nuestra propuesta de optimización de las bulárcamas son 9 milímetros.

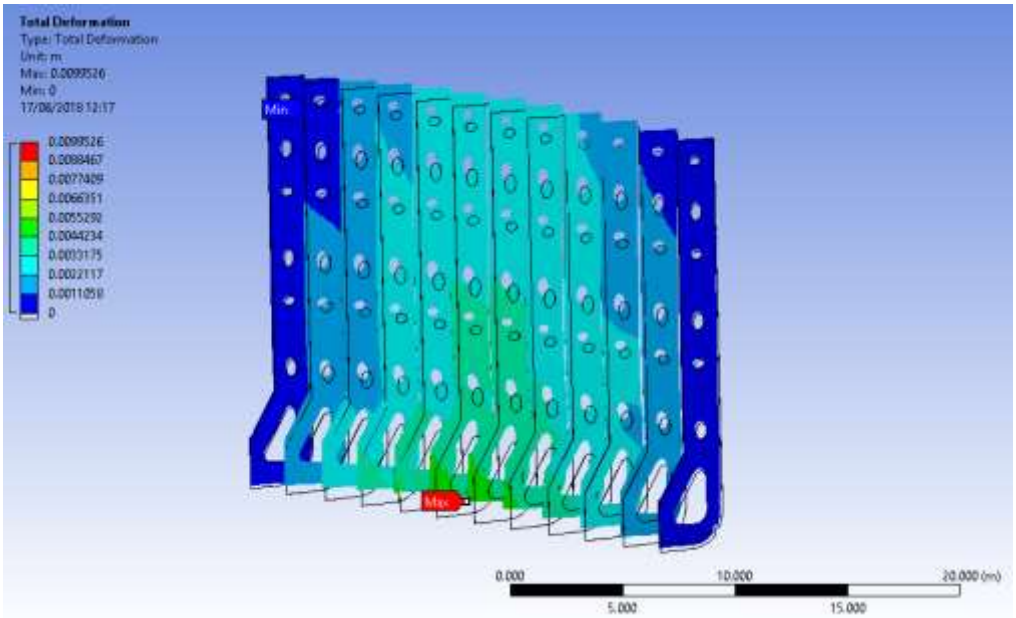


Ilustración 205. Superposición de la deformada

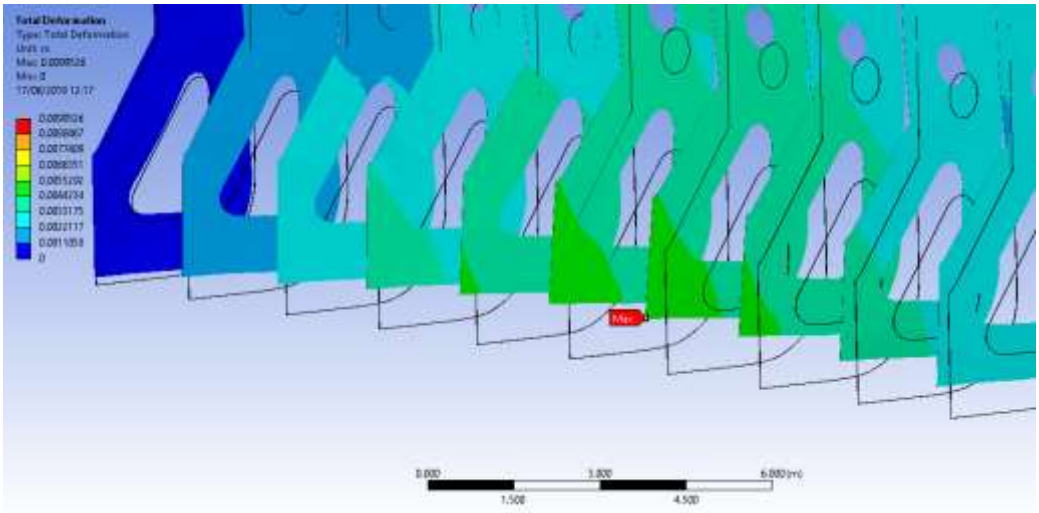


Ilustración 206. Punto de máximo deformada

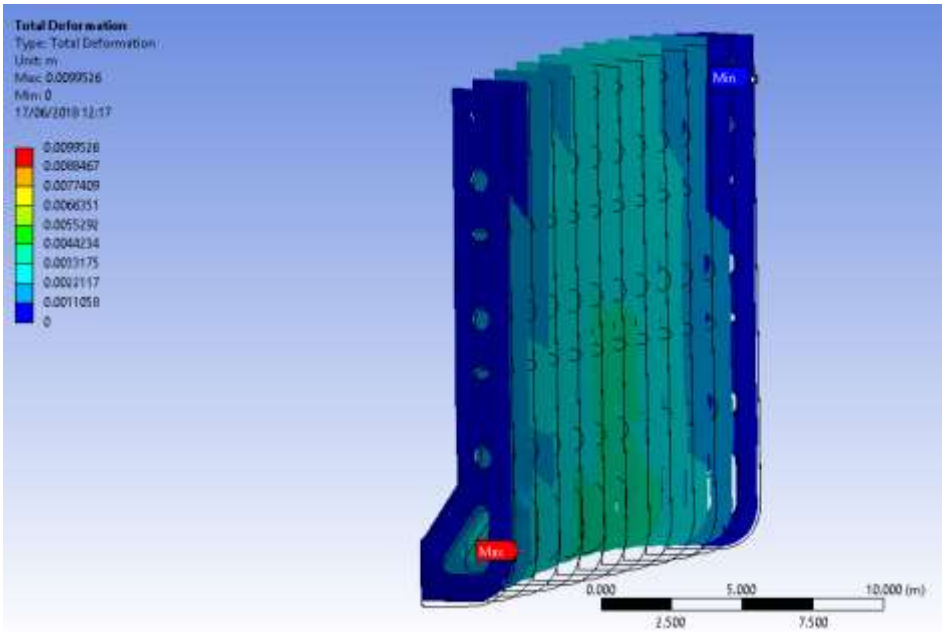


Ilustración 207. Comparativa inicial-deformada

.

8.1.2 Propuesta 2: Mamparo

Al igual que el mismo caso de estudio de la bulárcama, se va a examinar el mamparo. La condición más desfavorable es un tanque lleno y otro vacío, por lo que llenaremos el tanque central y veremos que sucede con los mamparos contiguos.

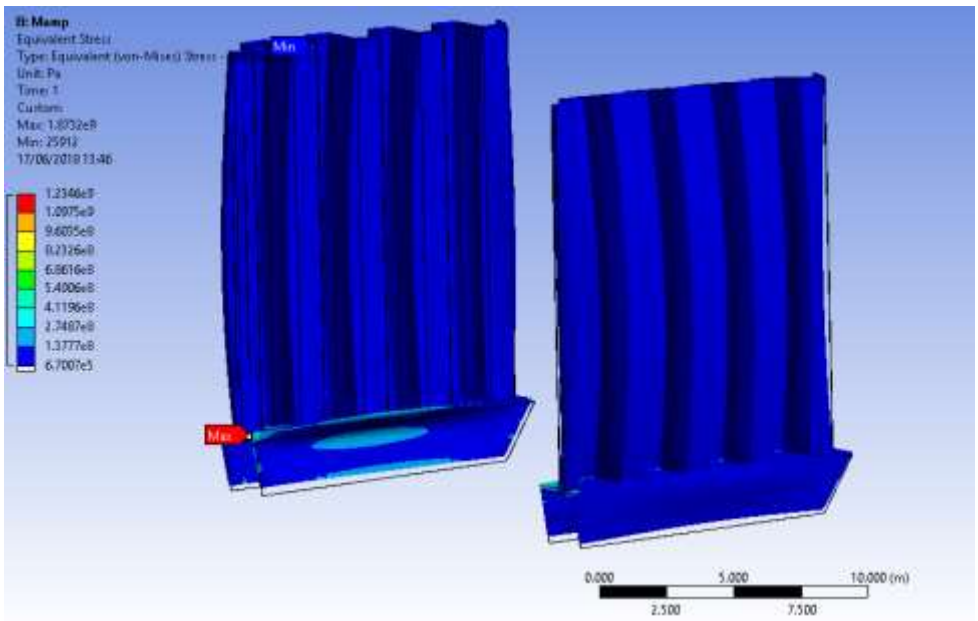


Ilustración 208. Tensiones producidas por la condición de carga

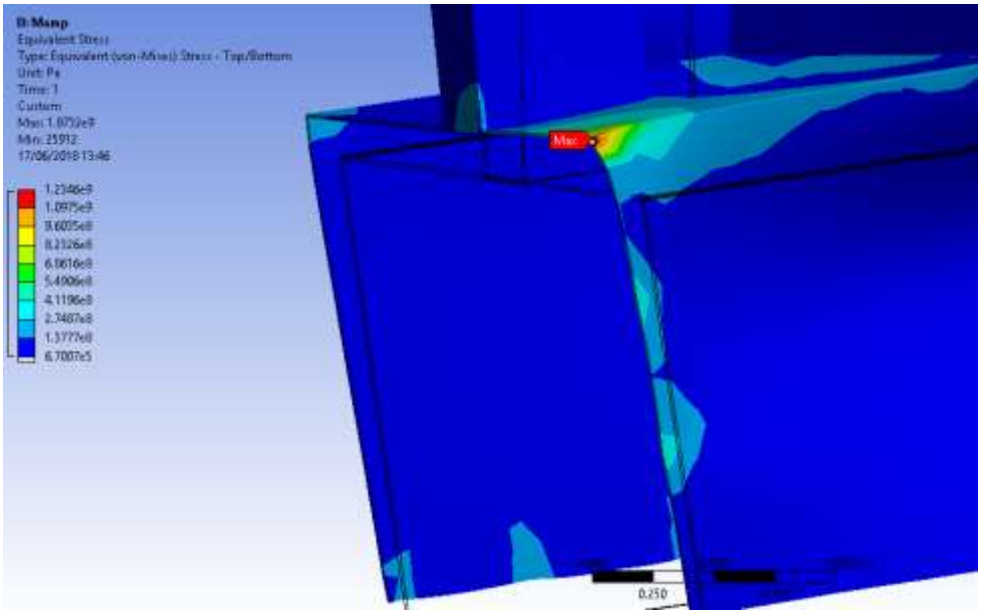


Ilustración 209. Localización del punto tensión máxima

Aplicando las fuerzas de la presión dentro del tanque, se puede percibir un hot spot como la máxima tensión que provoca estas fuerzas. En la unión con el mamparo y la base del mamparo. Como se ha comentado anteriormente, este valor lo despreciaremos y no lo fijaremos como límite de referencia.

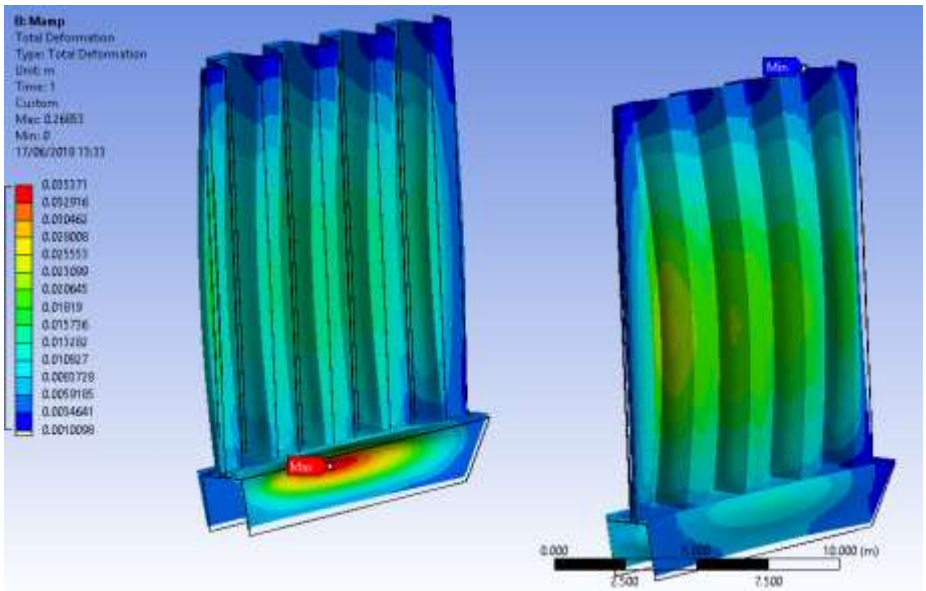


Ilustración 210. Deformación máxima producida por la condición de carga

La máxima deformación no se encuentra en el mamparo, si no en la plancha vertical que une con el doble fondo, esta plancha sufre una deformación de 3 milímetros. En cambio, la deformación en el mamparo tiene un valor en torno los 1,5 milímetros y 2,3 milímetros.

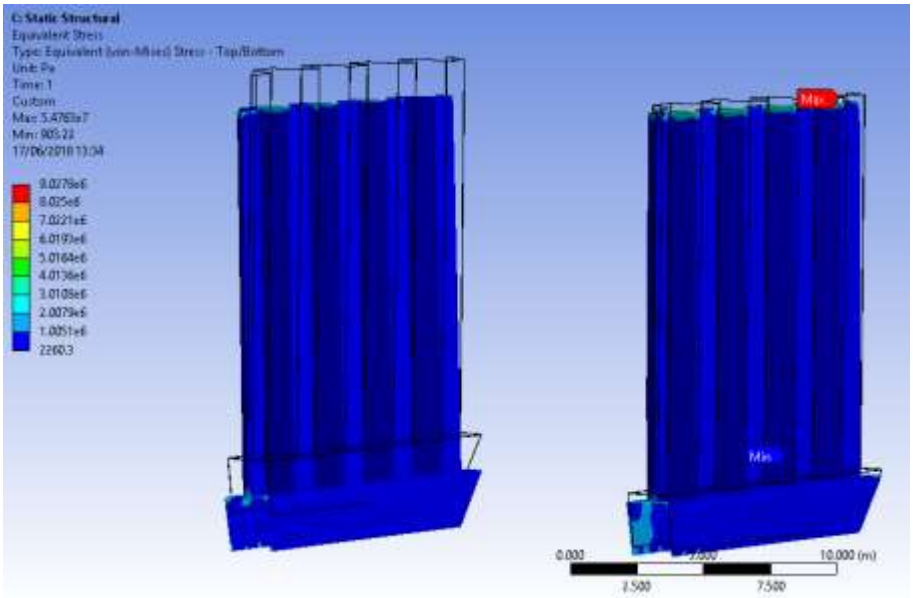


Ilustración 211. Tensiones producidas a nivel buque viga

Las tensiones mayores que se producen a nivel buque viga se sitúan en el mamparo donde más cerca está aplicado el momento y fuerza cortante, es decir, el mamparo de popa tendrá tensiones mayores que el mamparo transversal de proa. Como se puede apreciar en la ilustración 212 y 213.

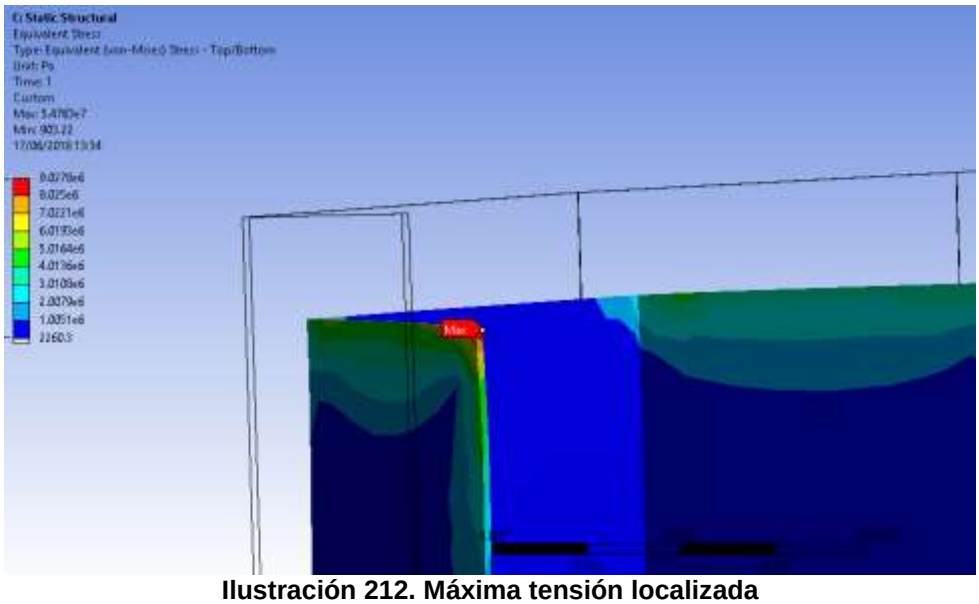


Ilustración 212. Máxima tensión localizada

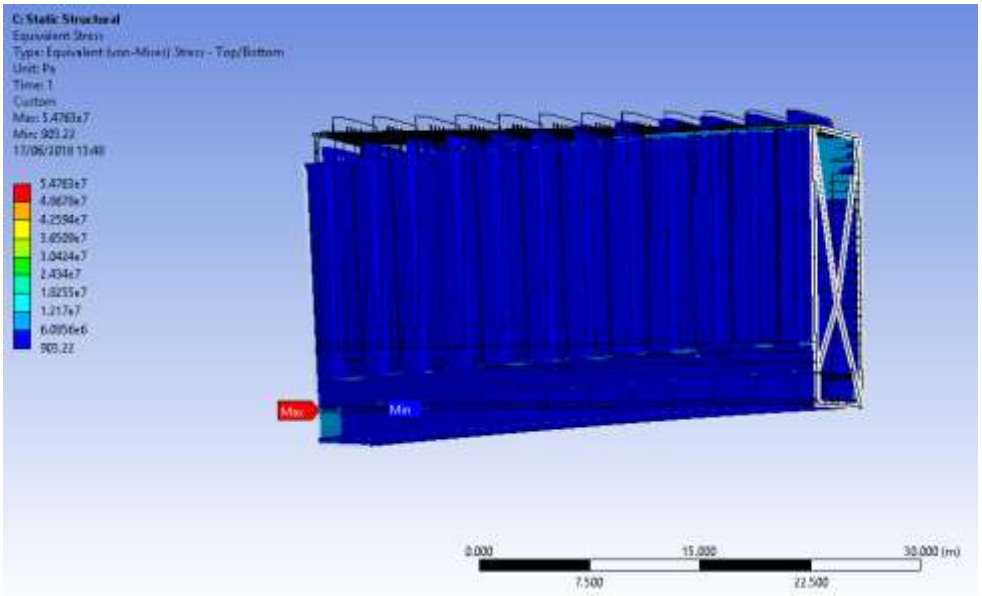


Ilustración 213. Tensiones cuaderna maestra en buque viga

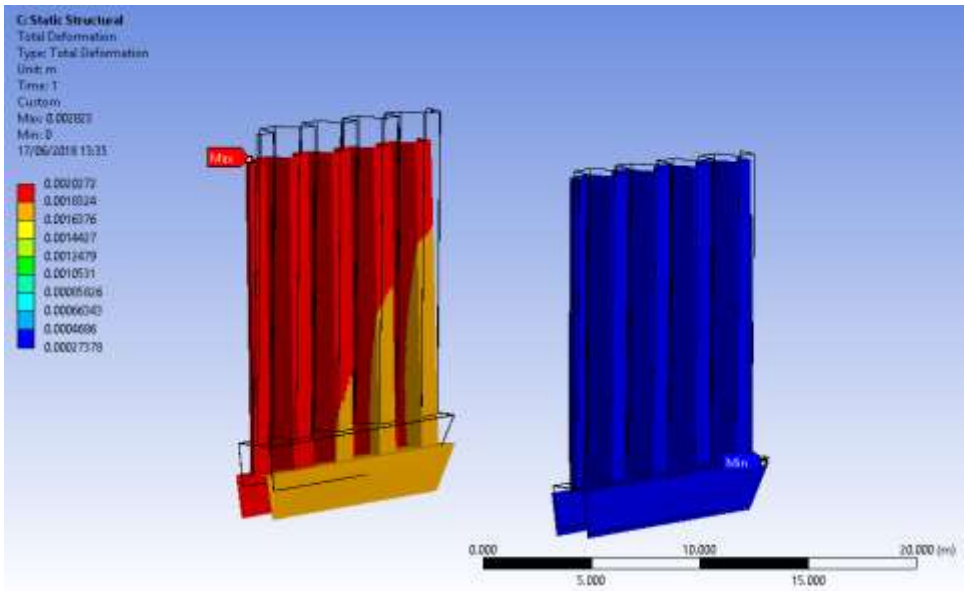


Ilustración 214. Máxima deformación producida por el buque viga

No obstante, para ver la deformación máxima en los mamparos (objeto de estudio), se ocultan los demás elementos y dejamos solo visibles los mamparos y como se puede

comprobar se produce una deformación de unos 0.2 milímetros en la zona de popa del mamparo.

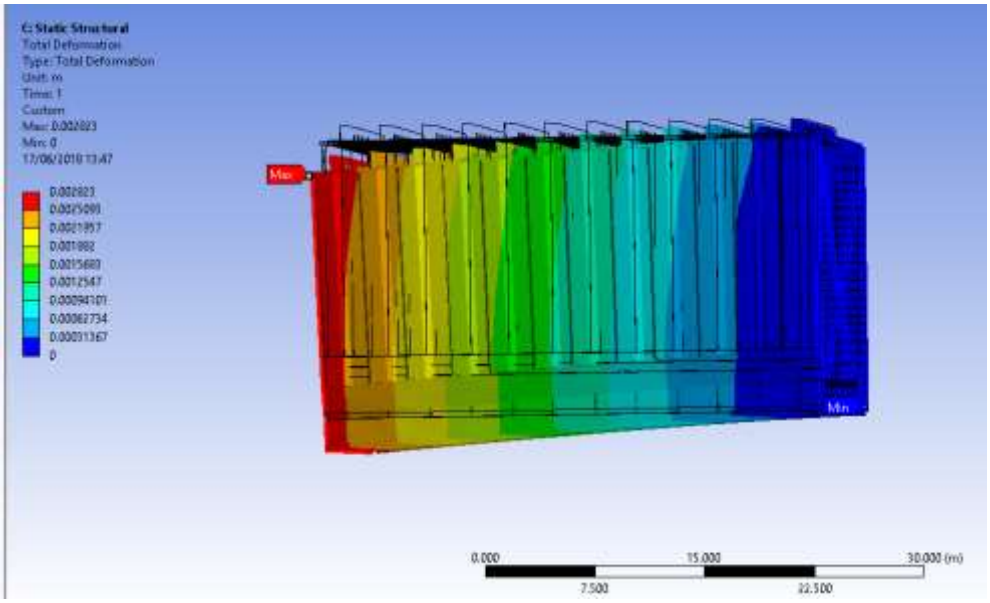


Ilustración 215. Deformación buque viga

A continuación, se procede a la superposición de los análisis de la condición de carga (presión hidrostática en el tanque) y el análisis del buque viga. La máxima tensión es un punto disperso, es decir, un hot spot. Por lo que, las solicitaciones a la que está sometido los mamparos transversales no se traducen en tensiones que superan la tensión de rotura del material tal y como se refleja en las ilustraciones 217 y 218.

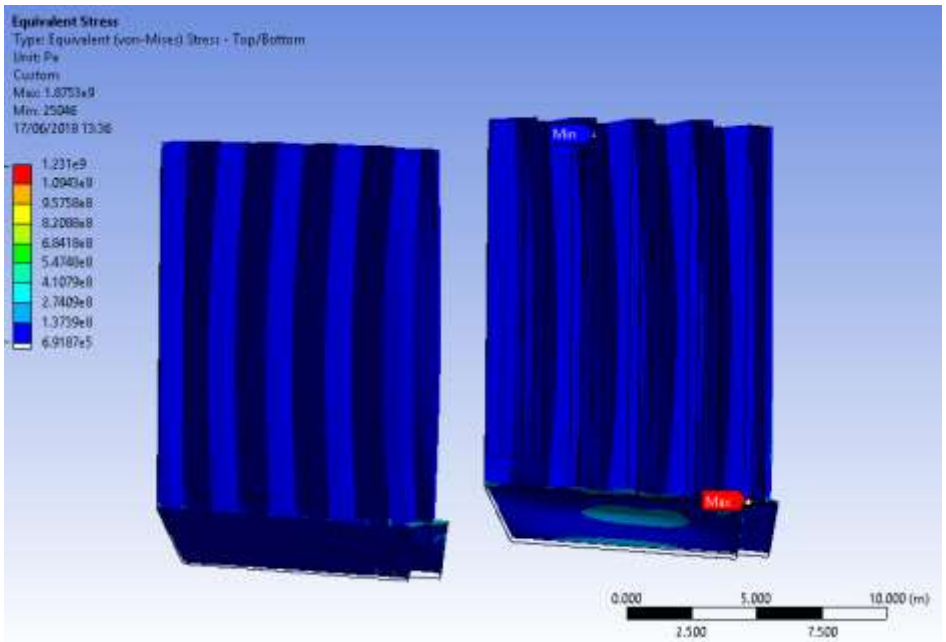


Ilustración 216. Superposición de tensiones producidas

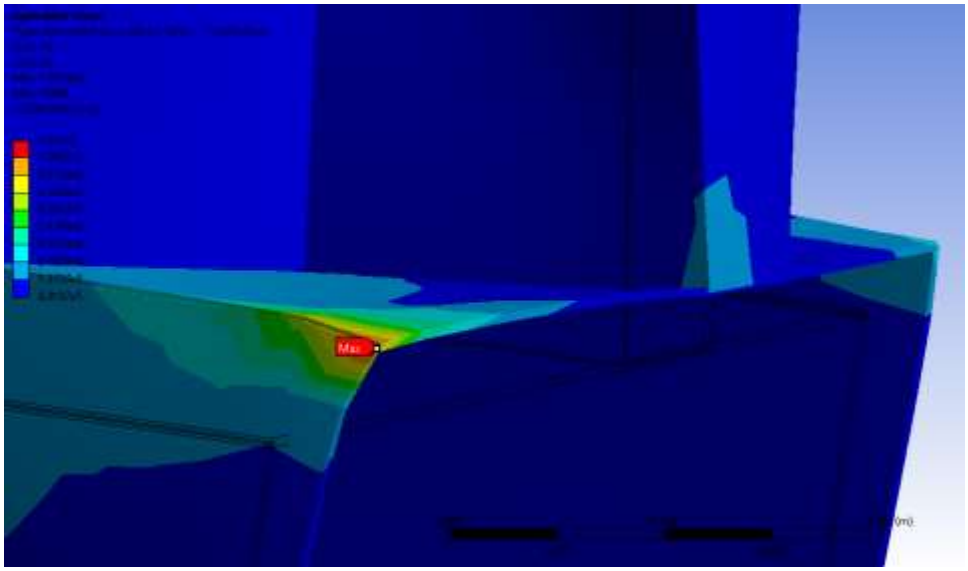


Ilustración 217. Punto de máxima tensión

Es destacable reseñar que la máximo deformación que se produce se localiza en la plancha vertical que une el mamparo transversal con el doble fondo. En cambio, en el mamparo transversal se ve deformada aproximadamente unos 2 milímetros. Se puede visualizar en la ilustración 219 esa deformación con respecto en la estructura original.

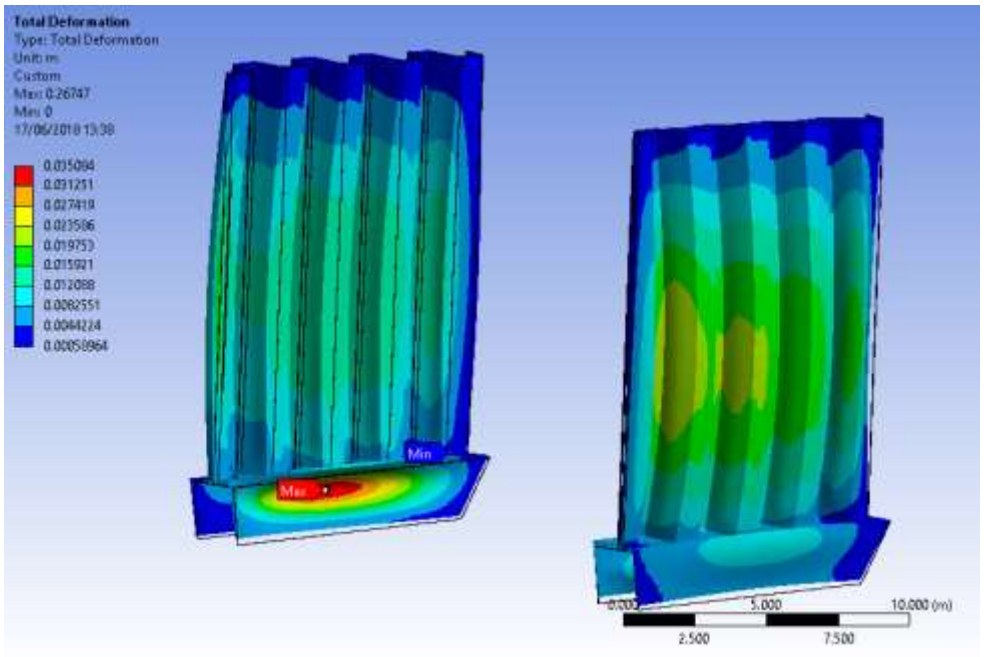


Ilustración 218. Máxima deformación producida por la superposición

Por último, para la propuesta 2, se homogenizó el mismo espesor del mamparo longitudinal junto con el mamparo transversal (18.5 milímetros), sin embargo, los resultados obtenidos no se encuentran por debajo del límite de rotura del material. Se puede observar en la ilustración 220 como la tensión está en torno a los 410 Mpa, esto junto con una deformada de 10 centímetros.

Por tanto, desestimamos esta última opción de estandarizar el mamparo longitudinal con respecto al mamparo transversal.

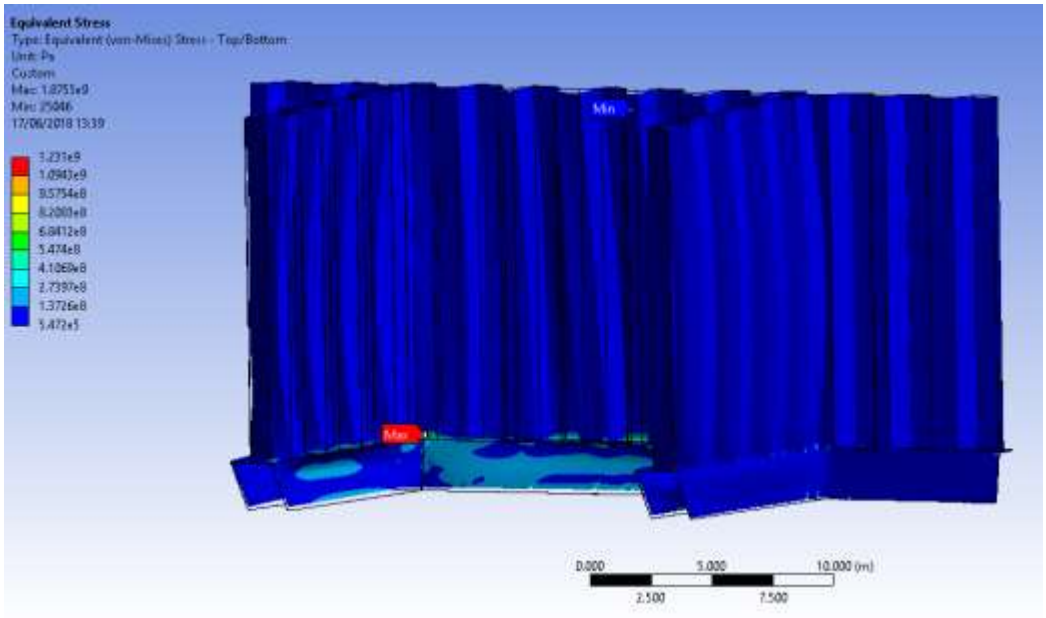


Ilustración 219. Tensiones producidas en mamparo longitudinal (superposición)

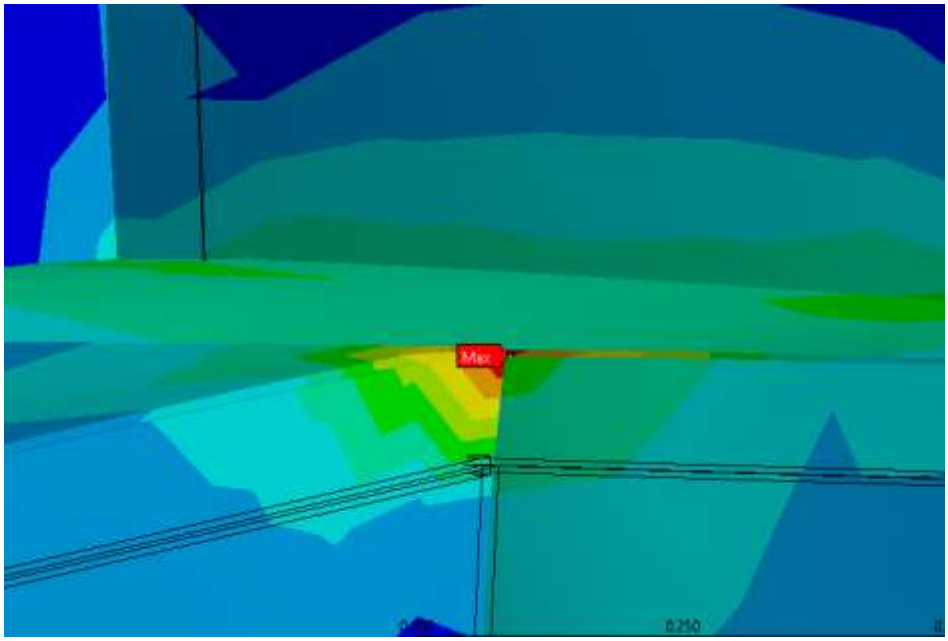


Ilustración 220. Zoom de la máxima tensión

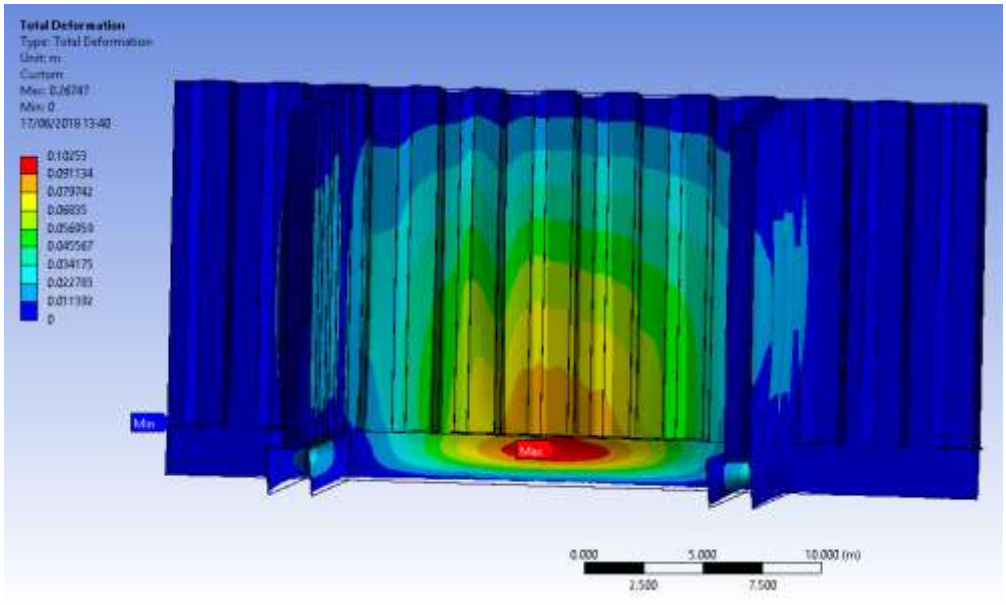


Ilustración 221. Máxima deformación producida en el mamparo longitudinal

8.1.3 Propuesta 3: Varenga

Para el caso de la varenga, la condición de carga más desfavorable o que más tensiones puede sufrir el elemento estructural es para la situación del golpe de mar en el fondo del buque. Podemos observar en la ilustración 223, como las tensiones producidas por la presión del mar no superan el límite de rotura del material.

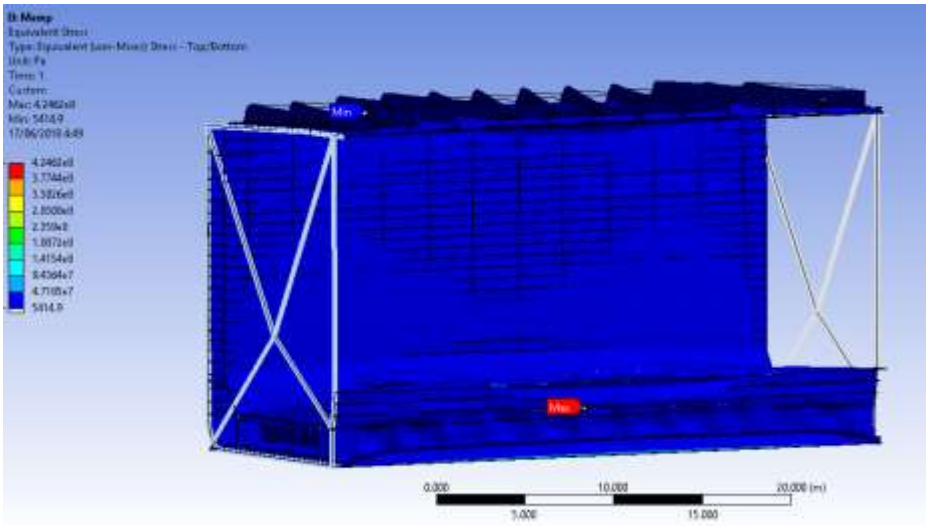


Ilustración 222. Tensiones producidas por la presión de mar

En la ilustración 224, se visualiza mejor como la máxima tensión que se produce por la presión del mar en la varenga es de 141 MPa en el extremo y alrededor del aligeramiento.

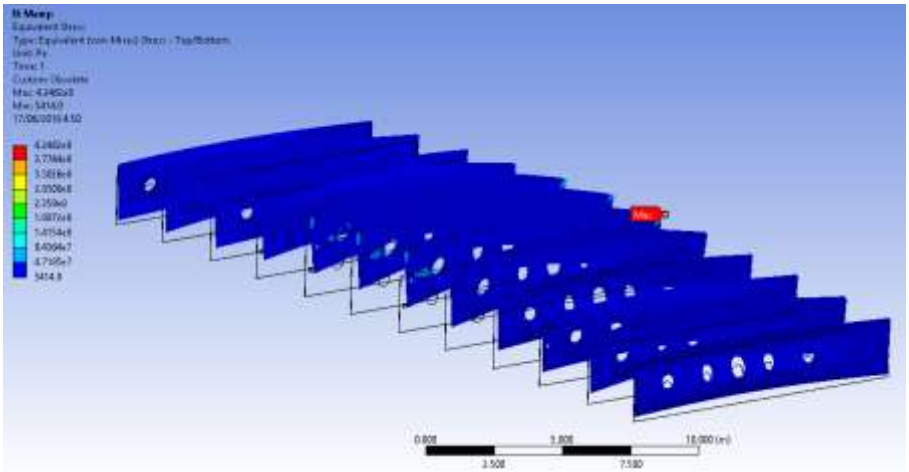


Ilustración 223. Visualización de las tensiones en varengas producido presión mar

Dicha presión de mar produce una máxima deformada de 4 milímetros en la zona de crujía, tal y como se refleja en la ilustración 225.

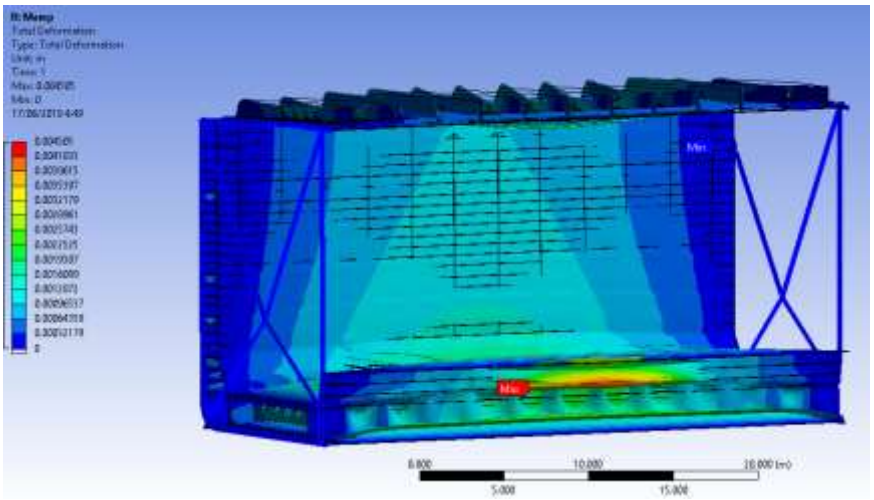


Ilustración 224.Deformación producida por la presión de mar

No obstante, para ver la deformación máxima en la varenga (objeto de estudio), se ocultan los demás elementos y dejamos solo visibles las varengas y como se puede comprobar se produce una deformación de unos 3 milímetros en la zona central de la varenga donde se sitúa la máxima flecha.

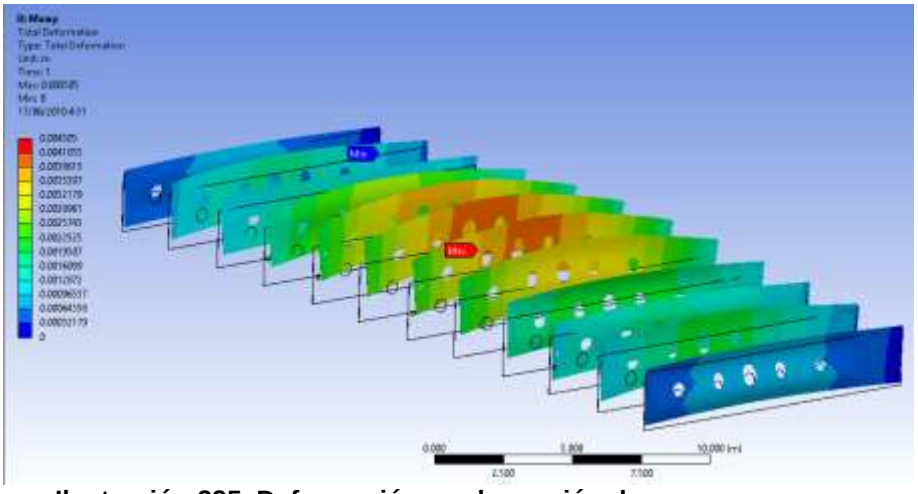


Ilustración 225. Deformación por la presión de mar en varengas

Por otra parte, en las tensiones producidas por el buque viga, se puede apercibir como hay un máximo que distorsiona los resultados, esta distorsión se da en un punto en concreto, por lo que se trata de un hot spot. En cambio, el resto de la estructura mantiene una tensión por debajo del límite de rotura del material.

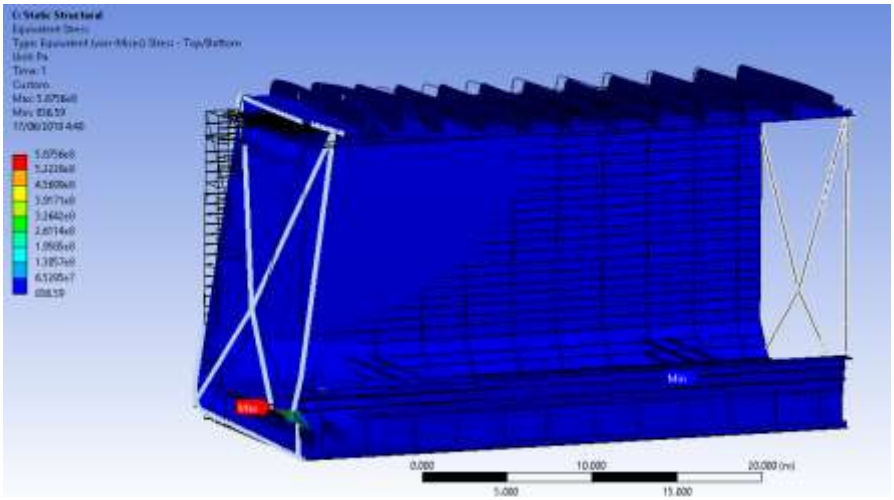


Ilustración 226. Tensión producida por buque viga

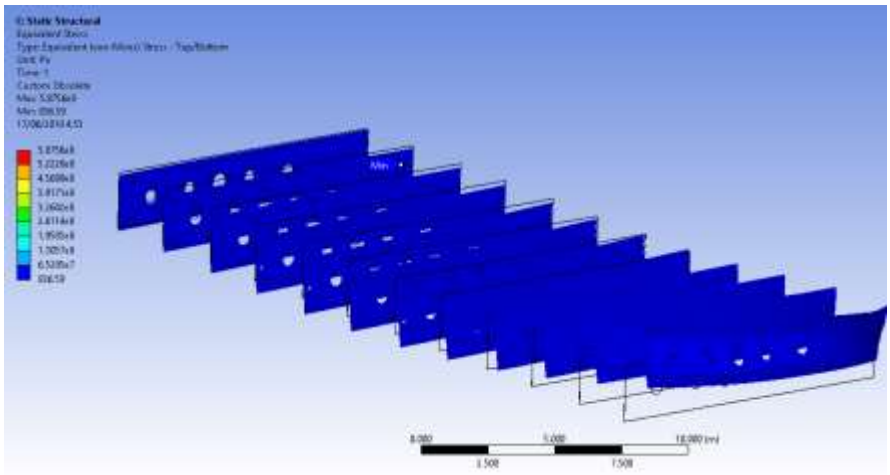


Ilustración 227. Tensiones en varengas por buque viga

Con respecto a la deformación producida por los momentos y fuerza cortante en el buque viga, podemos contemplar como en la ilustración 229, la máxima deformación corresponde con 1 milímetro, justo en el contorno de la cuaderna maestra del extremo de popa.

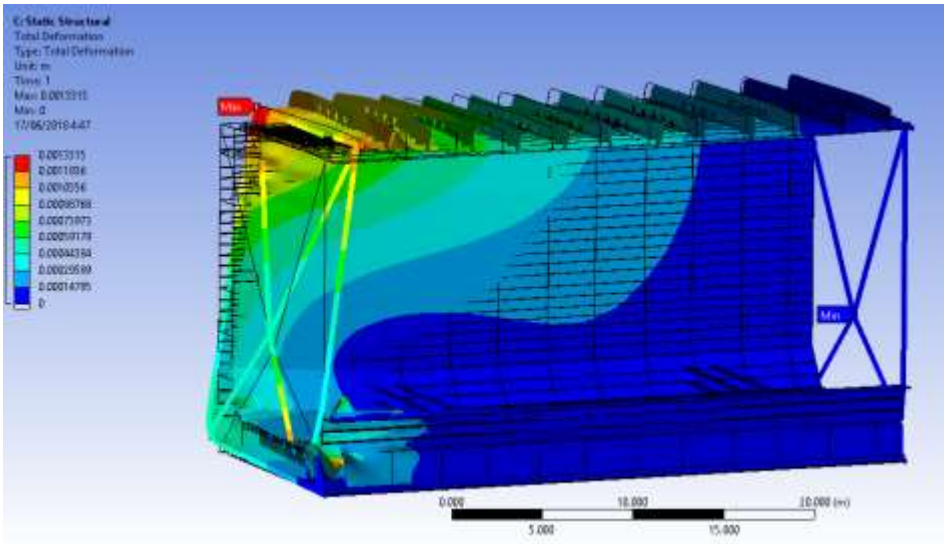


Ilustración 228. Deformación producida por buque viga

En la ilustración 230, se filtra por elementos para contemplar la deformación a nivel buque viga en las varengas, siendo la máxima 0,4 milímetros.

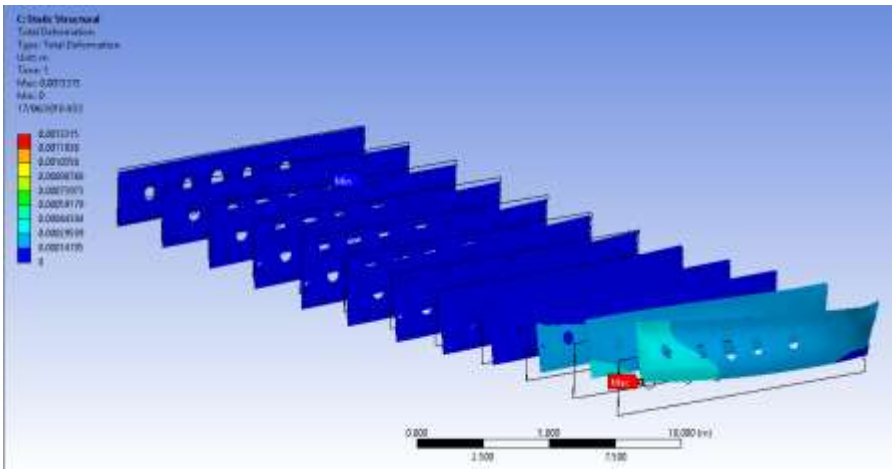


Ilustración 229. Deformación en varengas por buque viga

Posteriormente, se aplica la superposición de resultados y no se obtienen diferencias notables con respecto a la condición de carga, mostrándose el hot spot en el contorno de la cuaderna maestra.

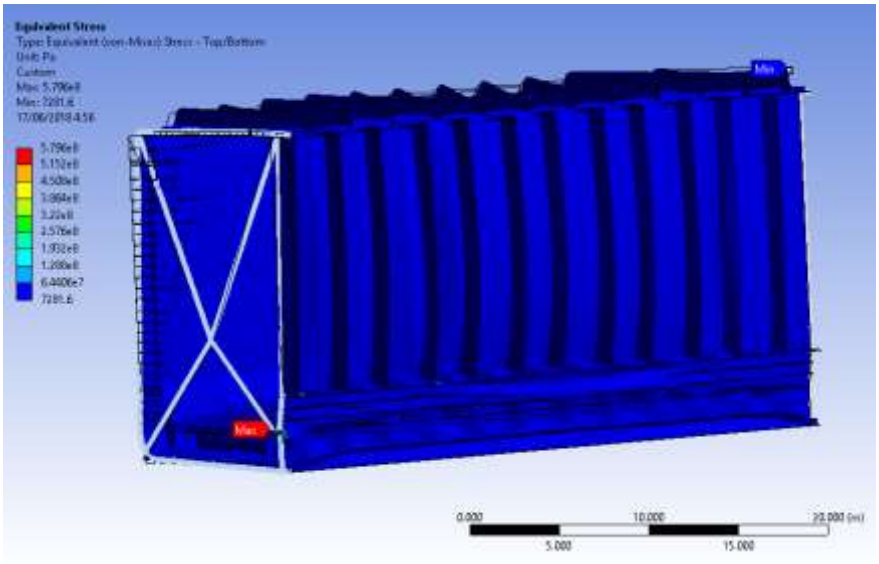


Ilustración 230. Superposición de las tensiones

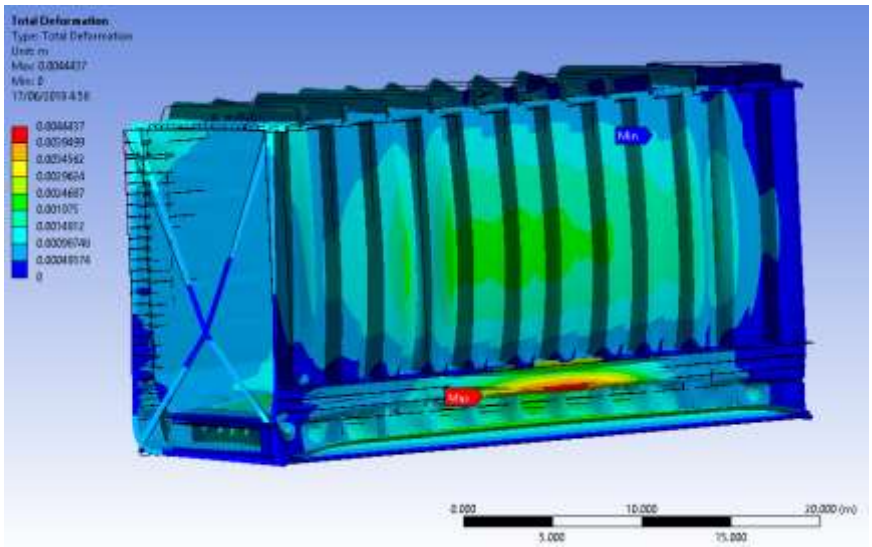


Ilustración 231. Superposición de la deformada

Las tensiones en las varengas no superan en ningún caso la tensión de rotura del material ya que éstas se encuentran en torno a los 133 MPa.

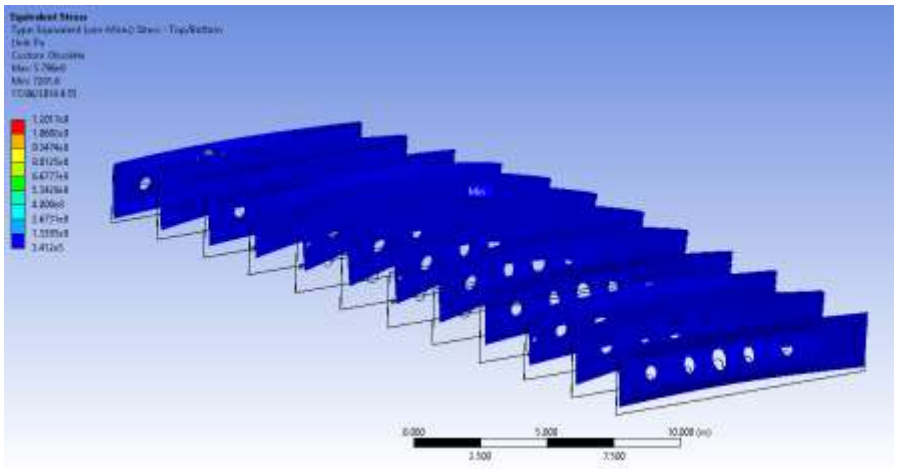


Ilustración 232. Superposición de las tensiones en varengas

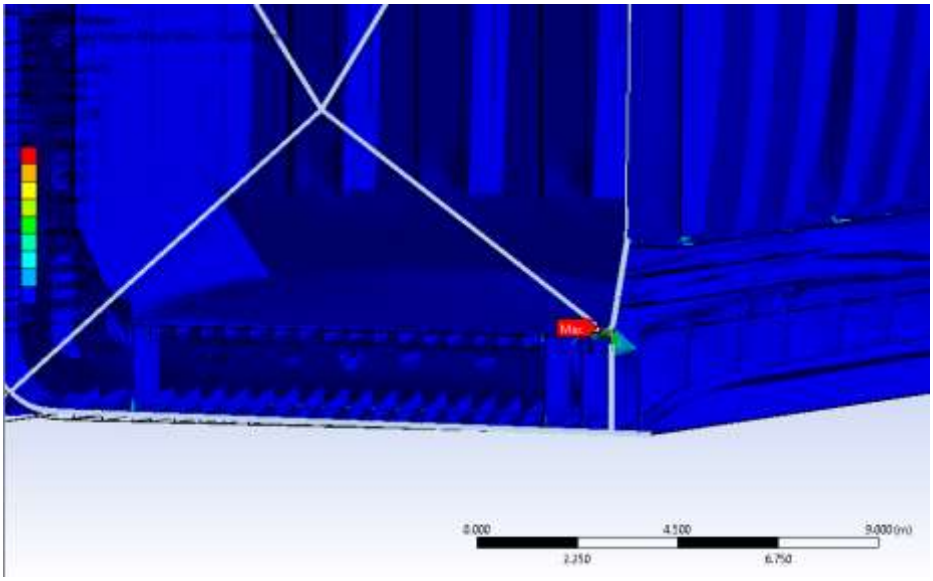


Ilustración 233. Hot Spot en las tensiones por superposición

La máxima deformación que se produce se encuentra en la varenga central, ésta varenga está sometida a mayores esfuerzos y deformaciones, no obstante, la deformación producida de 4 milímetros no produce ninguna rotura del material al no superar el límite de rotura.

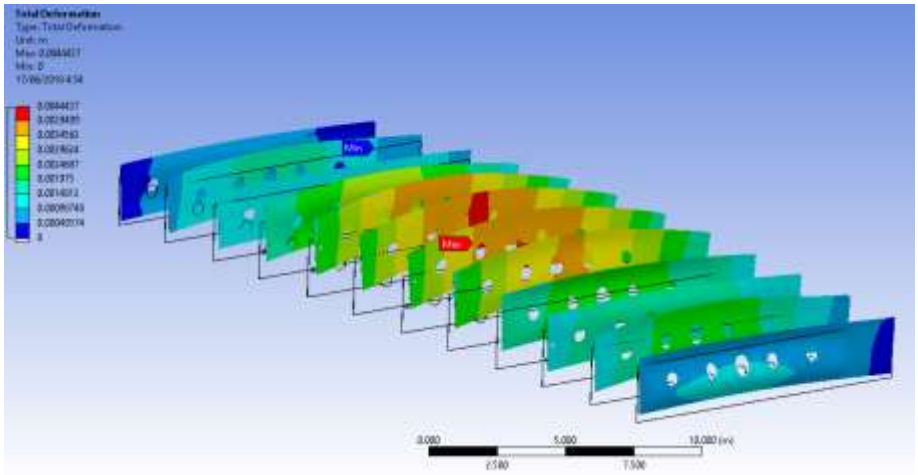


Ilustración 234. Superposición de la deformada de las varengas

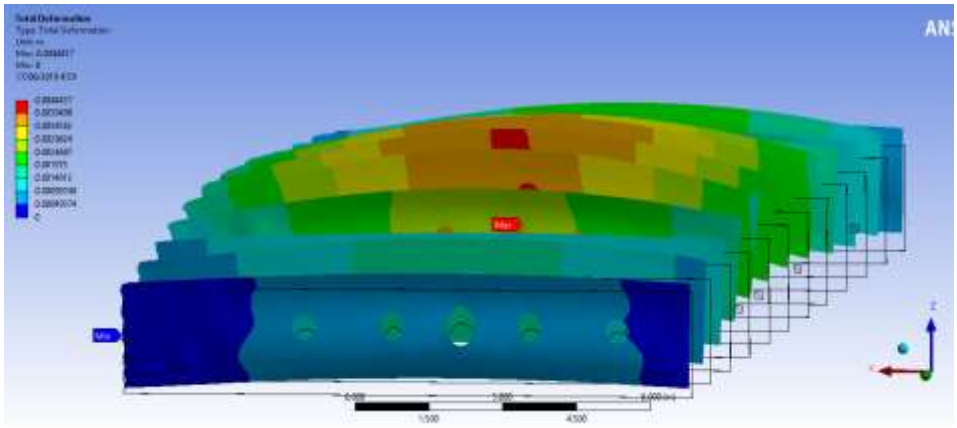


Ilustración 235.Superposición de la deformada de las varengas (2)

8.2 Conclusiones y trabajos futuros

Resumiendo, en la propuesta 1, se ratifica que la opción dos es la propuesta más desfavorable para la estructura de la bulárcama. Donde la tensión mayor que sufre la estructura no supera el límite de rotura del material empleado y no sufre una deformación excesiva.

Por otra parte, en la propuesta 2, lo más destacable es la inviabilidad de reducir el espesor del mamparo longitudinal al mismo espesor de los mamparos transversales, ya que se obtienen unas tensiones en torno a los 410 MPa, valor muy superior al límite de rotura del material 315 MPa. A su vez, se producen unas deformaciones bastante altas en el mamparo longitudinal, aproximadamente unos 10 cm. En cambio, los mamparos transversales tienen una tensión máxima de 137 MPa, eso se traduce en una flecha máxima en el mamparo de unos 3 milímetros.

Por último, en la propuesta 3, al igual que las propuestas anteriores, la tensión máxima que sufre las varengas no supera en ningún caso el límite de rotura de 315 Mpa.

Todo esto se traduce en una reducción de peso en la cuaderna maestra, tal y como se expuso en el capítulo 3, se consiguió una reducción de peso en torno al 3,27 % con respecto a la situación inicial, solamente modificando los refuerzos secundarios y planchas asociadas.

Además, con la modificación de los refuerzos primarios (bulárcama, mamparo y varenga), la cuaderna maestra se vería optimizada en torno al 5,05% con respecto a la inicial. Este porcentaje supone una reducción de peso y a su vez una reducción de costes de construcción, reducción de costes estructurales (coste inicial, mantenimiento y reparaciones), mínimos costes materiales y mínimos costes en plazos (horas).

En este trabajo, como conclusiones, se planteó una serie de objetivos, estos hacían referencia en optimizar la estructura de la cuaderna maestra del buque quimiquero. Mediante la estandarización de planchas y refuerzos con el uso del cálculo directo y análisis de elementos finitos. En la situación inicial se comprobó que la estructura cumplía con las indicaciones estructurales expuestas en la sociedad de clasificación del DNV

En la actualidad, los astilleros procuran, en la medida de sus posibilidades, potenciar el desarrollo del I+D+I en el ámbito naval, mejorando nuevas técnicas permitiendo renovar cada componente del barco de tal manera que éste sea lo más eficiente a nivel estructural.

Para seguir con la línea de investigación de este proyecto se propone para trabajos futuros seguir con la misma dinámica, centrar el estudio en otros elementos primarios, como los palmejares, vagras, baos, esloras e ir buscando la alternativa más eficiente y optimizada sin que sufra la cuaderna maestra ningún fallo estructural.

8.3 Trabajos realizados

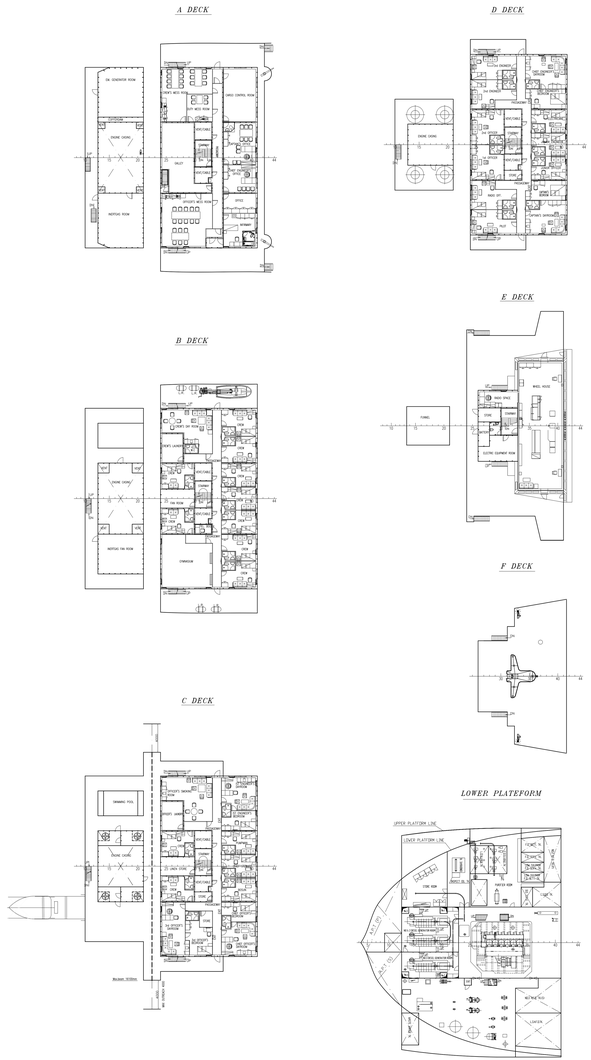
En el presente proyecto se han realizado los siguientes trabajos:

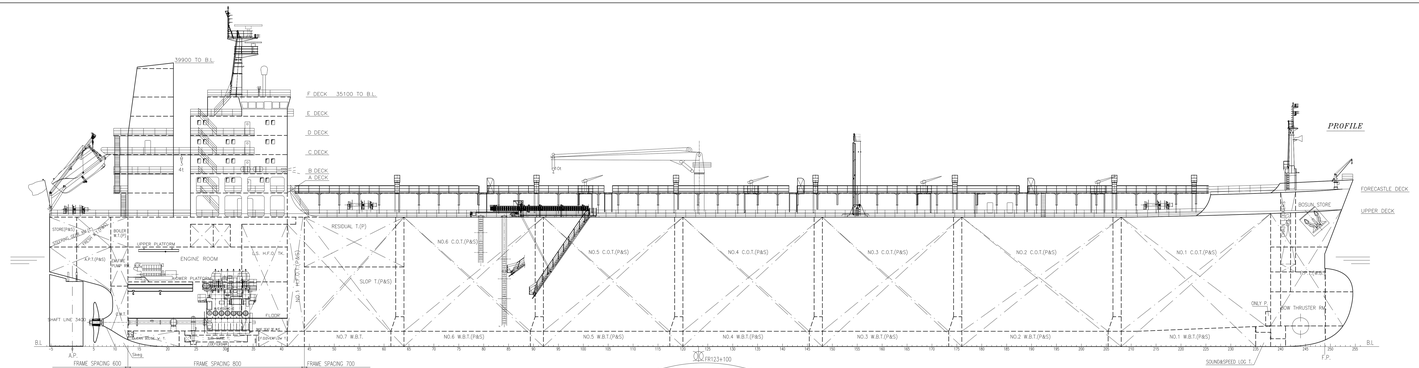
- Investigación de la aplicación del MEF en la construcción naval.
- Preselección de los modelos, referencias y estudios.
- Análisis de reglamentos y sociedades de clasificación con respecto al MEF.
- Búsqueda de documentación para la modelización del buque.
- Modelización del buque CAD.
- Determinar el procedimiento de modelización estructura para cálculos.
- Determinar las propiedades y características de los elementos introducidos.
- Determinar tamaño y forma del mallado de los elementos.

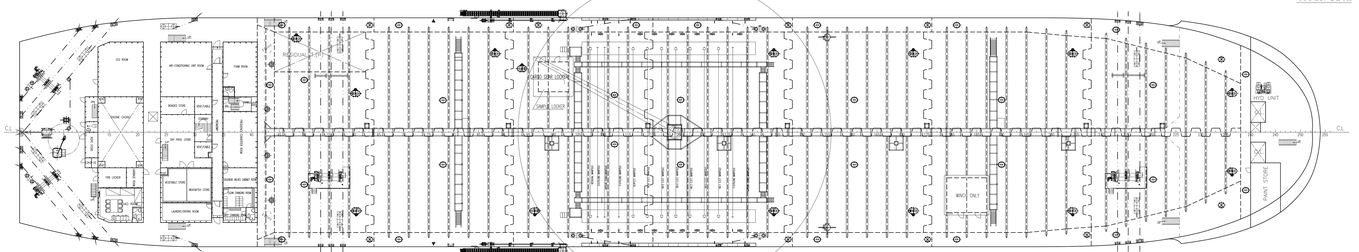
- Determinar las condiciones de contorno para el análisis global.
- Cálculos y evaluación de resultados.
- Redacción del informe.

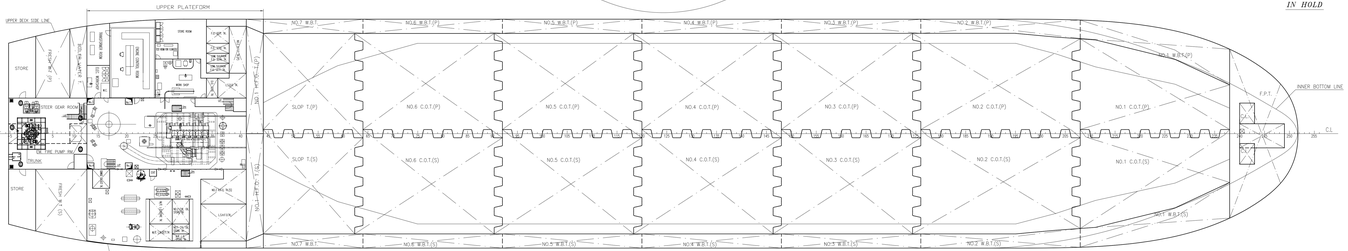
ANEXOS

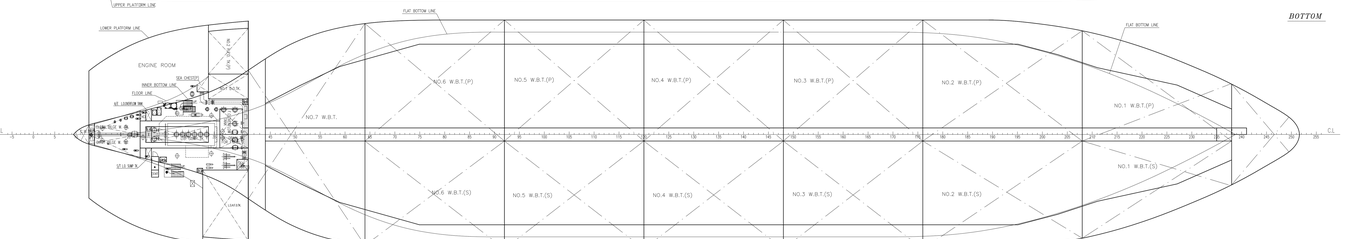
更改记录 REVISION RECORD					
标记 MARK	数量 QUANTITY	更改内容 REVISION NOTE		更改人 REVISER	校核 CHECKED	日期 DATE

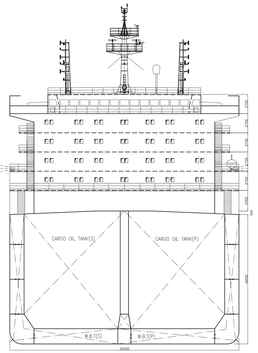


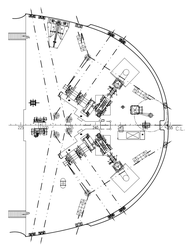












PRINCIPAL PARTICULARS

LENGTH OVERALL	Loa	abt. 183.20m
LENGTH B. P.	Lbp	176.00m
BREADTH (MLD.)	B	32.20 m
DEPTH (MLD.)	D	18.20 m
DRAFT (DESIGN)	Td	11.00 m
DRAFT (SCANTLING)	Ts	12.60 m
DEADWEIGHT AT DESIGN DRAFT		42,500 t
DEADWEIGHT AT SCANTLING DRAFT		50,500 t

MAIN ENGINE: B&W 6S50MC-C MCR 9480kWx127RPM

SERVICE SPEED: 14.8kn

CLASS NOTATION: ✠1A1, CSR Tanker for Chemicals and Oil ESP SPM, EO, VCS-2, BWM-E(S), BIS, TMON

REGISTER INFORMATION: Ship type 2, a2, b3, c2, f2, str0.075

会签		
船体		
外装		
内装		
机装		
电装		
舾装		

GSI 广州广船国际股份有限公司 GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL CO., LTD.

船号 YARD NO. K0000102

50500DWT(B)-化学品/成品油轮 50500DWT(B)-CHEMICAL/PRODUCT OIL TANKER

图号 DWG. NO. 06130020

第 1 页 PAGE NO.1 共 1 页 TOTAL 1

设计 DESIGNED 校对 CHECKED 审核 APPROVED 标准 CERTIFIED 审定 APPROVED 描图 COPIED

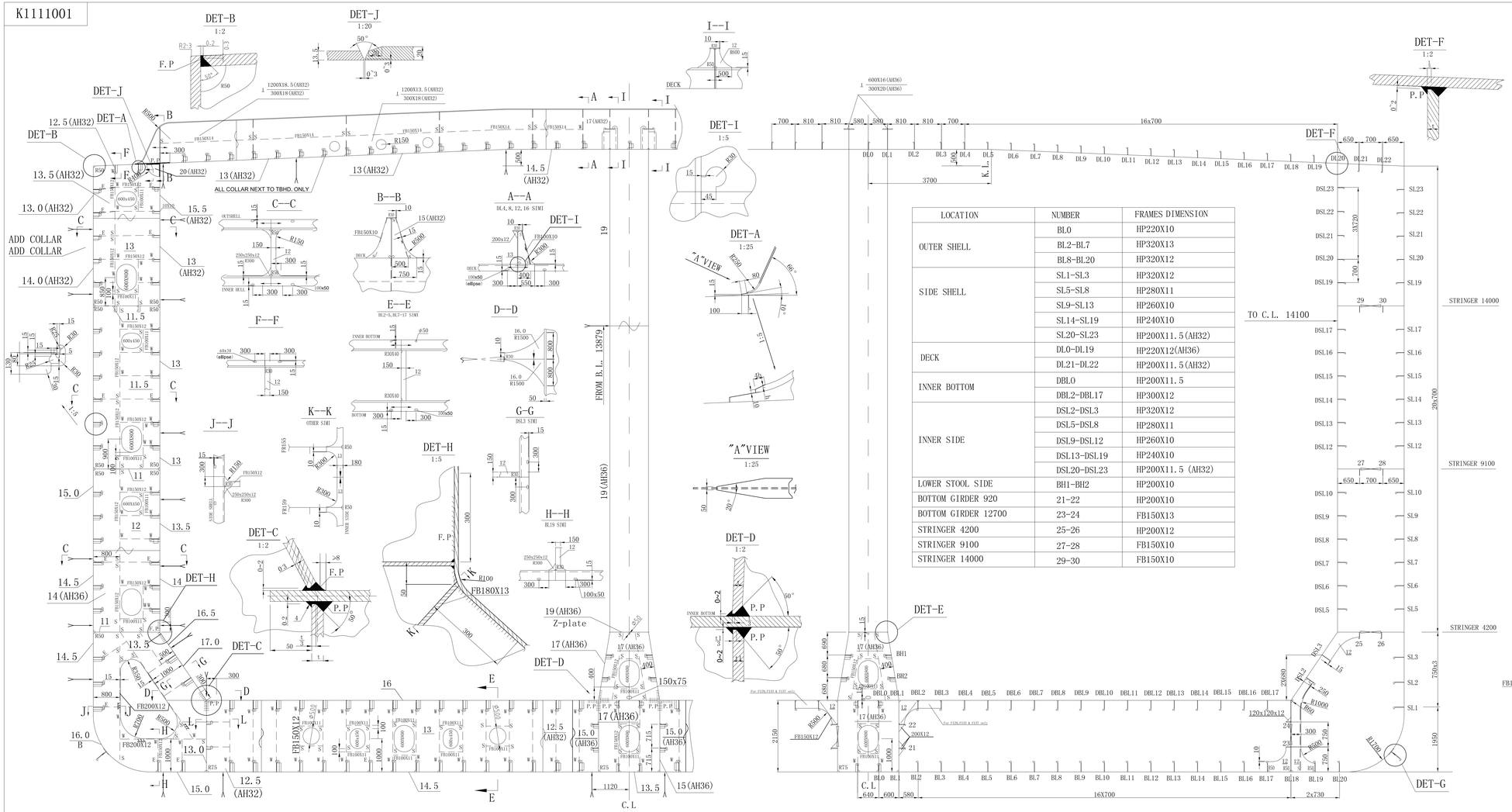
总布置图
GENERAL ARRANGEMENT

比例 SCALE 1:200 材料 MATERIAL 重量 WEIGHT(kg) 图纸版本 REV.

图纸编号 DWG. NO. G-2

K1111001

更 改 记 录 REVISION RECORD					
标记/版本 MARK/EDITION	数 量 QUANTITY	更 改 依 据 REVISION BASIS	更改人 REVISER	审 核 APPROVED	日 期 DATE



LOCATION	NUMBER	FRAMES DIMENSION
OUTER SHELL	BL0	HP220X10
	BL2-BL7	HP320X13
	BL8-BL20	HP320X12
SIDE SHELL	SL1-SL3	HP320X12
	SL5-SL8	HP280X11
	SL9-SL13	HP260X10
	SL14-SL19	HP240X10
	SL20-SL23	HP200X11.5(AH32)
DECK	DL0-DL19	HP220X12(AH36)
	DL21-DL22	HP200X11.5(AH32)
INNER BOTTOM	DBL0	HP200X11.5
	DBL2-DBL17	HP300X12
INNER SIDE	DSL2-DSL3	HP320X12
	DSL5-DSL8	HP280X11
	DSL9-DSL12	HP260X10
	DSL13-DSL19	HP240X10
	DSL20-DSL23	HP200X11.5 (AH32)
LOWER STOOL SIDE	BH1-BH2	HP200X10
BOTTOM GIRDER 920	21-22	HP200X10
BOTTOM GIRDER 12700	23-24	FB150X13
STRINGER 4200	25-26	HP200X12
STRINGER 9100	27-28	FB150X10
STRINGER 14000	29-30	FB150X10

A. NOTES:

1. GRADES OF ALL STEEL ARE NVA EXCEPT AS NOTED
2. WEB TRANSVERSE SPACING 2800mm
3. BOTH SIDES ARE SYMMETRICAL EXCEPT NOTED
4. THESE SECTIONS ARE SHOWN IN LOOKING FORWARD
5. THE DENSITY OF CARGO IS 1.025t/m^3 AT FULL LOADING,
   1.54t/m^3 AT APPR.60% FILLING OF CARGO TANKS (SUBJECT TO SPECIFICATION)
6. MARK E,F,W,S SEE STRUCTURAL DETAIL(K1111006)
7. MAX ALLOWABLE STILL WATER BENDING MOMENT
   HOGGING. 1,400,000 kN - m
   SAGGING. -735,000 kN - m
8. CARGO TANK LENGTH IN WAY OF MIDDLE: 19600mm

B. NOTES:

1. MARK F.P MEANS FUIL PENETRATION WELDING.
2. MARK P.P MEANS PARTIAL PENETRATION WELDING.

PRINCIPAL PARTICULARS

LENGTH OVERALL	Loa	Abt.	183.20m
LENGTH B. P.	Lbp		176.00m
LENGTH (SCANTLING)	L		174.00m
BREADTH (MLD.)	B		32.20 m
DEPTH (MLD.)	D		18.20 m
DRAFT (DESIGN)	Td		11.00 m
DRAFT (SCANTLING)	Ts		12.60 m
Cb			0.86
DEADWEIGHT AT DESIGN DRAFT			42,500 t
DEADWEIGHT AT SCANTLING DRAFT			50,500 t

GSI 广州广船国际股份有限公司 GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL CO., LTD.

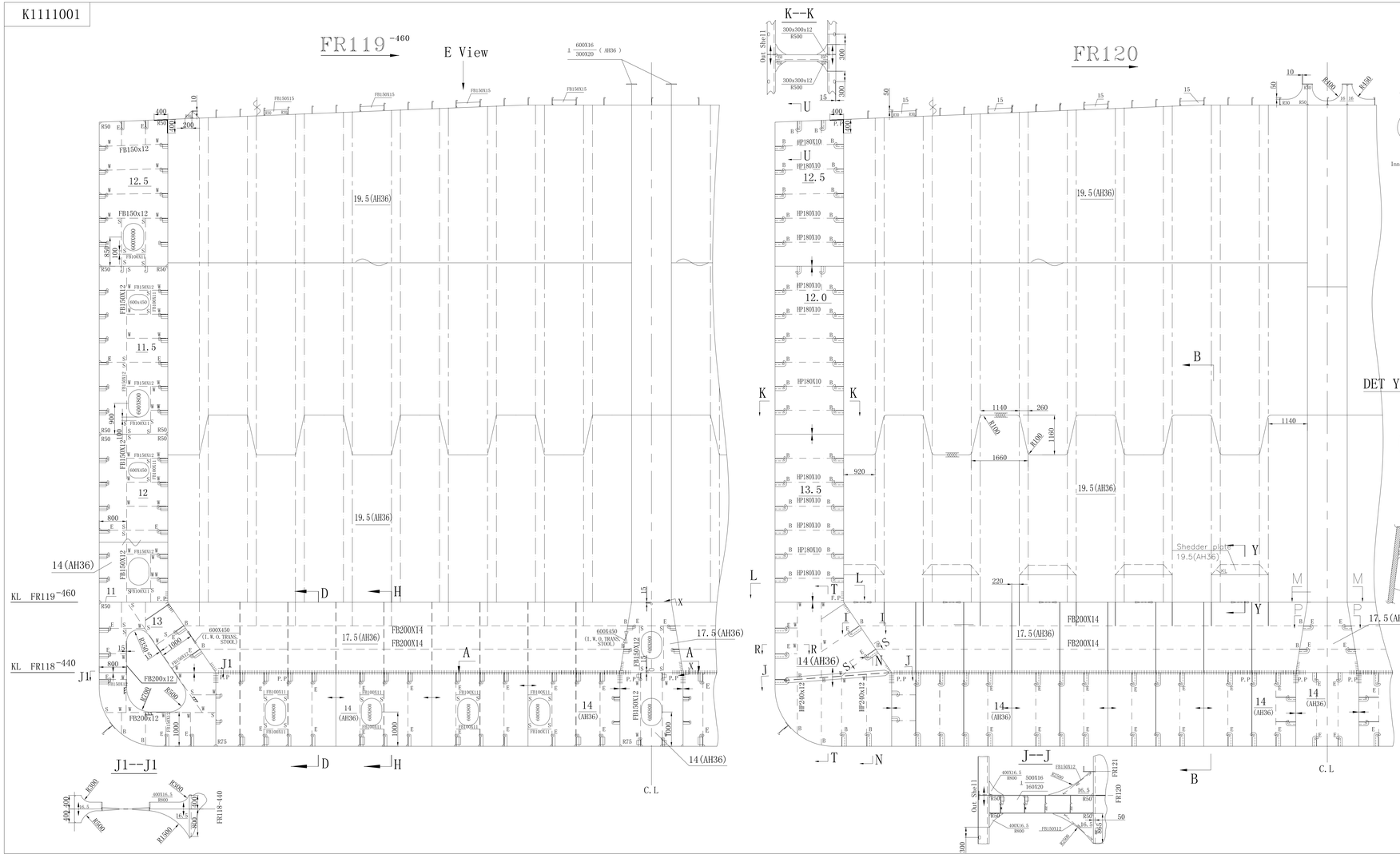
船号: H06130020/21/22/23 HULL NO.

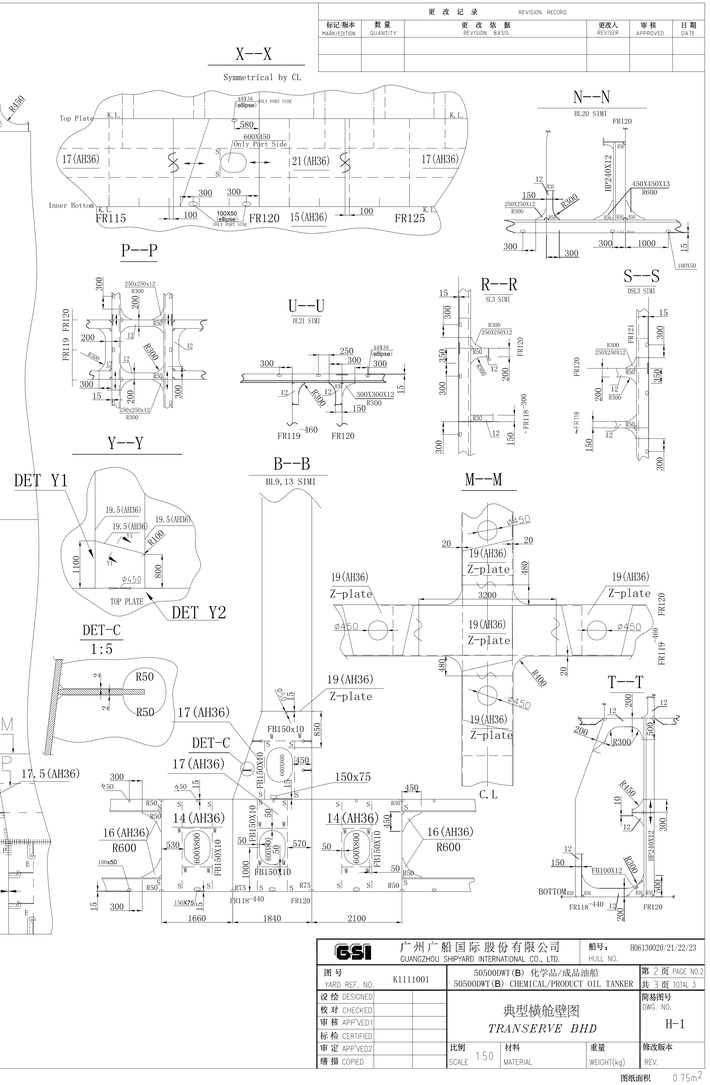
图 号 YARD REF. NO. K1111001	50500DWT(B) 化学品/成品油船 50500DWT(B) CHEMICAL/PRODUCT OIL TANKER		第 1 页 PAGE NO.1 共 3 页 TOTAL 3
设 检 DESIGNED	舯剖面图 MIDSHIP SECTION		简易图号 DWG. NO. H-1
校 对 CHECKED			
审 核 APP'VED1			
标 检 CERTIFIED			
审 定 APP'VED2	比例 SCALE 1:50	材料 MATERIAL / 重量 WEIGHT(kg)	修改版本 REV.
晒 图 COPIED			

图纸面积 0.75m^2

K1111001

更 改 记 录 REVISION RECORD					
标记/版本 MARK/EDITION	数 量 QUANTITY	更 改 依 据 REVISION BASIS	更改人 REVISER	审 核 APPROVED	日 期 DATE





GSI 广州广船国际股份有限公司 GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL CO., LTD.		船号: HULL NO.	H06130020/21/22/23
图 号 YARD REF. NO. K1111001	50500DWT(B) 化学品/成品油船 50500DWT(B) CHEMICAL/PRODUCT OIL TANKER		第 2 页 PAGE NO.2 共 3 页 TOTAL 3
设 计 DESIGNED	典型横舱壁图 TRANSERVE BHD		简易图号 DWG. NO. H-1
校 对 CHECKED			
审 核 APP'VED1			
标 准 CERTIFIED			
审 定 APP'VED2			
描 摹 COPIED	比例 SCALE 1:50	材料 MATERIAL / 重量 WEIGHT(kg)	修改版本 REV.

图纸面积 0.75m²

更 改 记 录 REVISION RECORD					
标记/版本 MARK/EDITION	数 量 QUANTITY	更 改 依 据 REVISION BASIS	更改人 REVISER	审 核 APPROVED	日 期 DATE

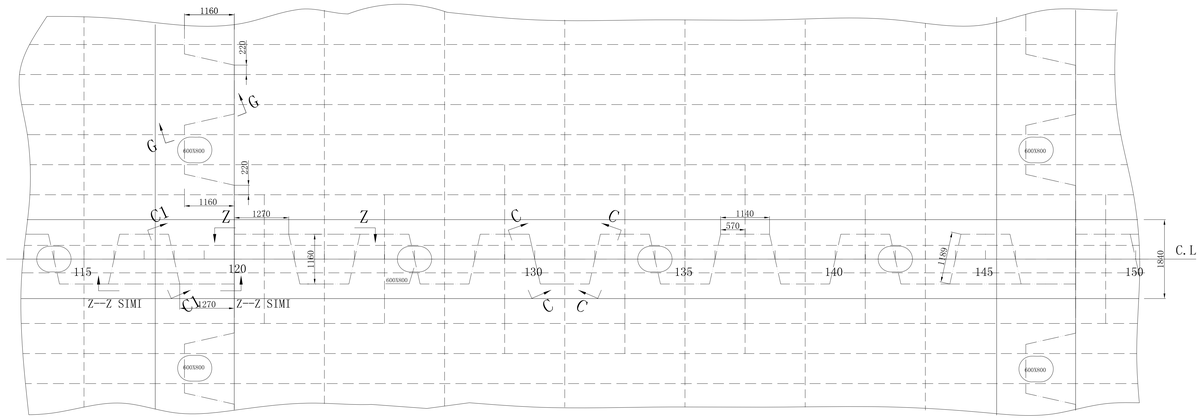
A. NOTES:

1. GRADES OF ALL STEEL ARE NVA EXCEPT AS NOTED
2. WEB TRANSVERSE SPACING 2800mm
3. BOTH SIDES ARE SYMMETRICAL EXCEPT NOTED
4. THESE SECTIONS ARE SHOWN IN LOOKING FORWARD
5. THE DENSITY OF CARGO IS 1.025t/m^3 AT FULL LOADING, 1.54t/m^3 AT APPR.60% FILLING OF CARGO TANKS (SUBJECT TO SPECIFICATION)
6. MARK E,F,W,S SEE STRUCTURAL DETAIL(K1111006)
7. MAX ALLOWABLE STILL WATER BENDING MOMENT
   HOGGING. 1,400,000 kN - m
   SAGGING. -735,000 kN - m
8. CARGO TANK LENGTH IN WAY OF MIDDLE: 19600mm

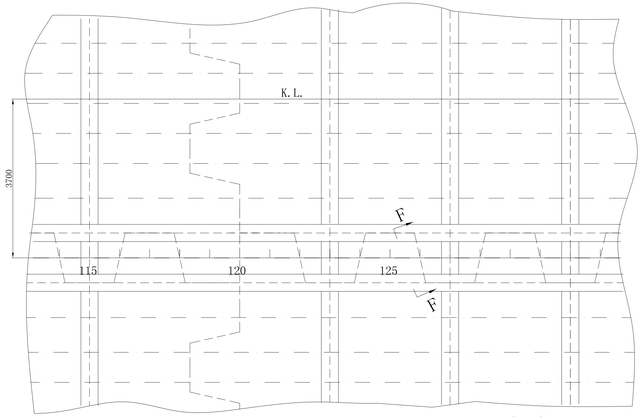
B. NOTES:

1. MARK F.P MEANS FUIL PENETRATION WELDING.
2. MARK P.P MEANS PARTIAL PENETRATION WELDING.

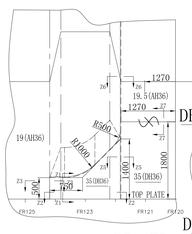
A--A
INNER BOTTOM



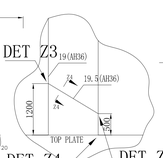
E View
UPPER DECK



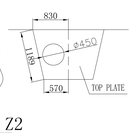
Z--Z



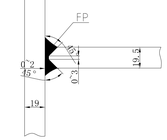
Z1--Z1



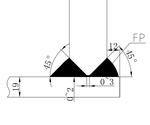
Z2--Z2



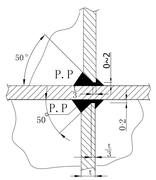
Z4-Z4&Y1-Y1
1:2



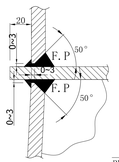
DET Z4
1:2



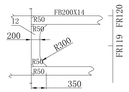
DET-A
1:2



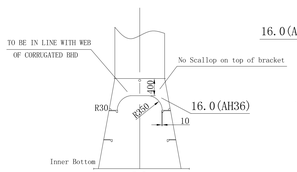
DET-B
1:2



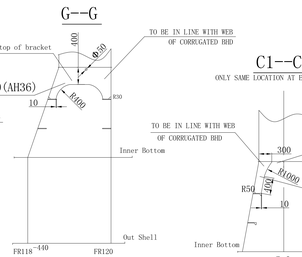
I--I
SIMI DSL3



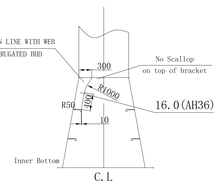
C--C



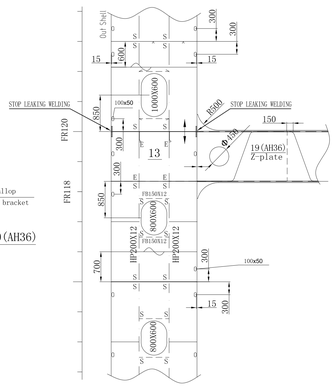
G--G



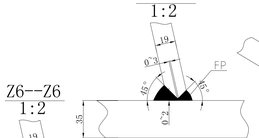
C1--C1
ONLY SAME LOCATION AT EACH CARGO TANK



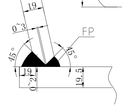
L--L



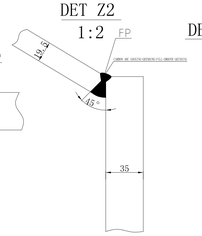
Z5--Z5
1:2



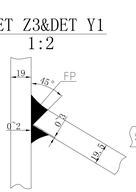
Z6--Z6
1:2



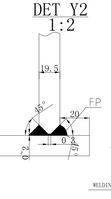
DET Z2
1:2



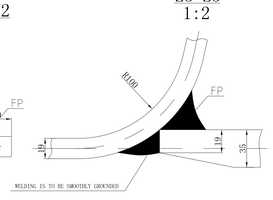
DET Z3&DET Y1
1:2



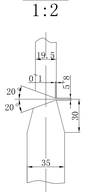
DET Y2
1:2



Z3-Z3
1:2

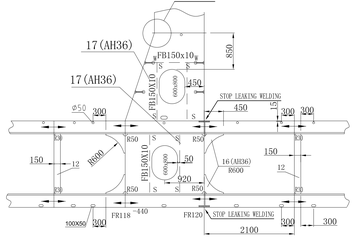


Z7-Z7
1:2

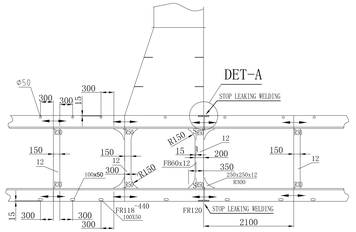


H--H
BL3,7,15,17 SIMI

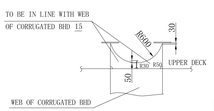
DET-B



DET-A



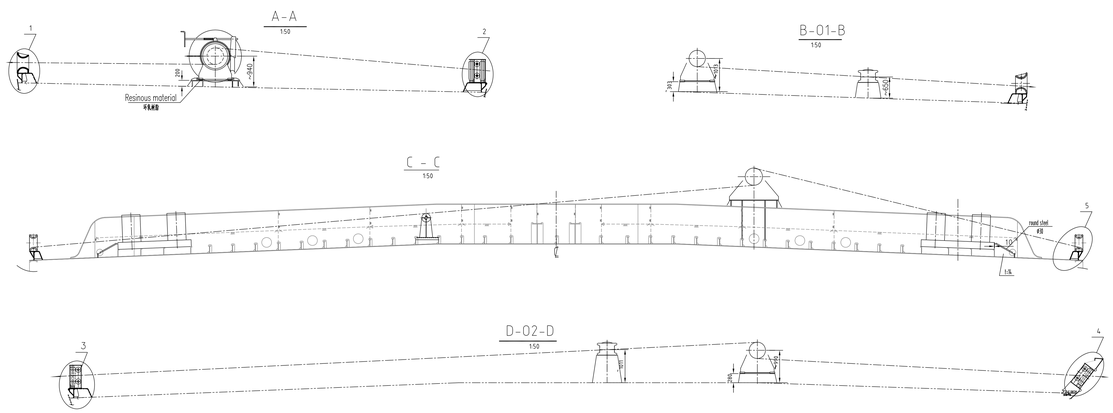
F--F

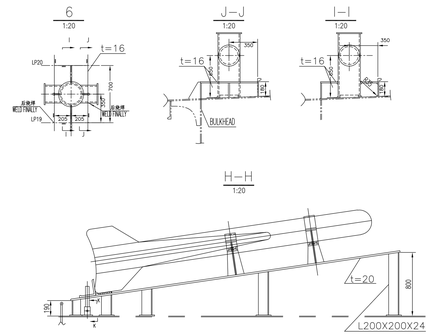


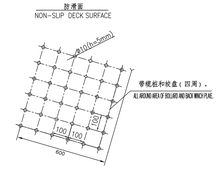
GSI 广州广船国际股份有限公司 GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL CO., LTD.		船号: HULL NO.	H06130020/21/22/23
图 号 YARD REF. NO. K1111001	50500DWT(B) 化学品/成品油船 50500DWT(B) CHEMICAL/PRODUCT OIL TANKER		第 3 页 PAGE NO.3 共 3 页 TOTAL 3
设 计 DESIGNED	典型横舱壁图 TRANSERVE BHD		简易图号 DWG. NO. H-1
校 对 CHECKED			
审 核 APP'VED1			
标 准 CERTIFIED			
审 定 APP'VED2			
描 描 COPIED	比例 SCALE 1:50	材料 MATERIAL / 重量 WEIGHT(kg)	修改版本 REV.

图纸面积 0.75m^2

修改记录 REVISION RECORD					
标记/版本 MARK/EDITION	数量 QUANTITY	修改依据 REVISION BASIS	修改人 REVISER	审核 APPROVED	日期 DATE





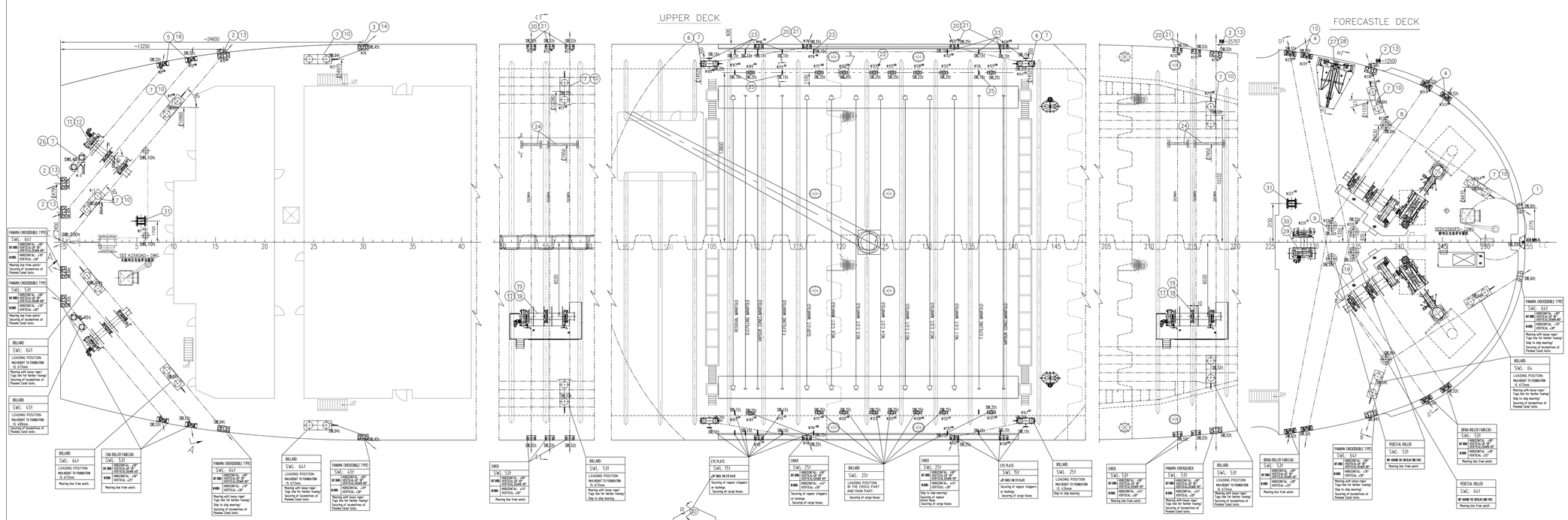


NOTE:

1. NON-SLIP DECK SURFACE TO BE ARRANGED IN WAY 600mm OF BOLLARDS AND OPERAINE AREA OF AFI MOORING WINCH.
2. THE FINAL PICBIRON, HEIGHT AND, INCLINAIION OF PEDESIAL ROLLER, TO BE DECIDED ON SHE BY DRAW LINE, IHEN TO BE LOCAMED BY SPOI WELDING, AND TO BE APPROVED BY OWNER BEFORE WELDING.
3. THE AREA UNDER ALL FOUNDAIONS, BOLLARD , CLOSED CHOCK , FAIRLEADERS, MOORING FITINGS TO BE SIRENGHENED.

说明：

1. 带缆桩，系泊绞车周围600mm操作范围内，船体甲板设防滑点。
2. 带羊角滚轮导缆器，导缆孔的高度及倾斜度应在船上现场拉线定位，完成后点焊定位，取得船东认可后焊接。
3. 在带缆桩，导缆孔，滚轮导缆器等易出现高应力区域下须加强。



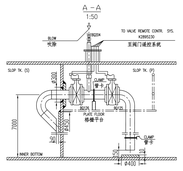
序号 NO.	代号 CODE	名称及规格 NAME & SPEC.	数量 Q'TY	名称 NAME MATERIAL	牌号 TYPE	每件 UNIT	共计 TOTAL WEIGHT (kg)	备注 REMARKS
31		防火钢丝 FIRE WIRE	2	组合件 ASSEMBLY		~100	~200	
30		系泊绞车底座 SEAT OF MOORING WINCH	1	A级钢 GRADE A		~500	~500	
29		系泊绞车 MOORING WINCH	1	组合件 ASSEMBLY		~4140	~4140	
28		备用锚座 SEAT FOR SPARE ANCHOR	1	钢 STEEL	Q235-A	1900	1900	
27		备用锚（大抓力锚） SPARE ANCHOR	1	钢 STEEL		6975	6975	
26	M400 GB/T 554-1996	带缆桩 BOLLARD	2	组合件 ASSEMBLY		499	998	
25	φ-F16.0 GB7029-86	眼板 EYE PLATE	6	钢 STEEL	25##	50	600	
24		托架 BRACKET	4	钢 STEEL	Q235-A	~50	~200	
23	E16.0 GB7029-86	眼板 EYE PLATE	20	钢 STEEL	25##	19	380	
22	BA300 GB10106-88	十字带缆桩 φ300 BOLLARD	16	钢 STEEL	Q235-A	153	1836	
21		L90X250 2120L483导缆孔底座 L90X250 2120L483 SEAT OF CHOCK	18	钢 STEEL	Q235-A	~150	~2100	
20	L90X250 2120L483	导缆孔 CHOCK	18	铸钢 CAST STEEL		210	2940	
19		系泊绞车操作平台 WORKING PLATFORM OF MOORING WINCH	2	钢 STEEL	Q235-A	~200	~400	
18		系泊绞车底座 SEAT OF MOORING WINCH	2	A级钢 GRADE A		~500	~1000	
17		系泊绞车 MOORING WINCH	2	组合件 ASSEMBLY		~4510	9020	
16		导缆滚柱座 C160 C160-SEAT OF ROLLER FAIRLEAD	4	A级钢 GRADE A		227	908	
15		导缆滚柱座 BB160 BB160-SEAT OF ROLLER FAIRLEAD	4	组合件 ASSEMBLY		207	828	
14		AC310巴拿马运河导缆孔底座 AC310-SEAT OF PANAMA CHOCK	4	A级钢 GRADE A		~100	~200	
13		AC400巴拿马运河导缆孔底座 AC400-SEAT OF PANAMA CHOCK	4	A级钢 GRADE A		~150	~1500	
12		系泊绞车底座 SEAT OF MOORING WINCH	2	A级钢 GRADE A		~500	~500	总质量各-1
11		系泊绞车 MOORING WINCH	2	组合件 ASSEMBLY		~4650	~9300	总质量各-1
10	A560 GB/T 554-1996	带缆桩 BOLLARD	14	组合件 ASSEMBLY		499	6986	
9	400ZG GB T436-83	带羊角滚轮导缆器 PEDESTAL ROLLER	4	组合件 ASSEMBLY		664	1328	H1=~860
8	400ZG GB T436-83	带羊角滚轮导缆器 PEDESTAL ROLLER	2	组合件 ASSEMBLY		544	1088	H1=~500
7	A32GB/T 3155-94	带缆桩助索 MOORING ASSISTANT ROPE	20	组合件 ASSEMBLY		18	360	
6	A355 GB/T 554-1996	带缆桩 BOLLARD	4	钢 STEEL		358	1432	
5	C160 CB*3062-79	导缆滚柱C160 C160-ROLLER FAIRLEAD	4	组合件 ASSEMBLY		675	2700	总质量各-2
4	BB160 CB*3062-79	导缆滚柱BB160 BB160-ROLLER FAIRLEAD	8	组合件 ASSEMBLY		576	4608	
3	AC310 GB11586-89	巴拿马运河导缆孔 PANAMA CHOCK(SINGLE TYPE)	2	铸钢 CAST STEEL	ZG230-450	253	506	
2	AC400 GB11586-89	巴拿马运河导缆孔 PANAMA CHOCK(DOUBLE TYPE)	10	铸钢 CAST STEEL	ZG230-450	323	3230	
1	BC400 GB11586-89	巴拿马运河导缆孔 PANAMA CHOCK(DOUBLE TYPE)	2	铸钢 CAST STEEL	ZG230-450	344	688	

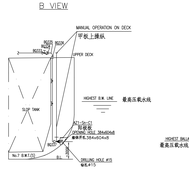
GSI 广州广船国际股份有限公司 GUANGZHOU SHIPYARD INTERNATIONAL CO., LTD.	船号 HULL NO.	06130020~23	
图号 YARD REF. NO. K2500240	50500DWT（B）化学品/成品油船 50500DWT（B）CHEMICAL/PRODUCT OIL TANKER	第1页 PAGE NO.	共1页 TOTAL
设计 DESIGNED	系泊布置图 MOORING ARRANGEMENT	图纸编号 DWG. NO.	D-9
校对 CHECKED			
审核 APP'VED			
标检 CERTIFIED			
审定 APP'VED	比例 SCALE. 1:100	材料 MATERIAL	重量 WEIGHT(kg) ~35166	修改版本 REV.
绘图 COPIED			

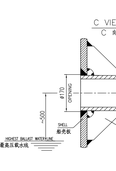
甲板面积 100m²

文件名称

CARGO SYSTEM 货油系统	K2900230	第32页 PAGE NO. 共33页 TOTAL

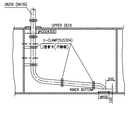


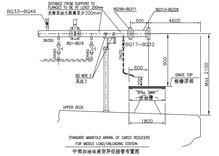




DETAIL OF CARGO OIL FILLING PIPE

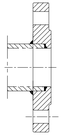
货油注入管详图





DETAIL OF CARGO PIPEING FLANGE

货油法兰详图



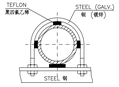
THE CARGO MANIFOLD SUPPORTS,DISTANCE PIECES AND REDUCERS SHOULD BE CAPABLE OF WITHSTANDING THE LOADS AT THE PRESENTATION FLANGE AS OUTLINED IN THE TABLE GIVEN BELOW

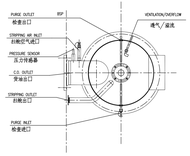
货油总管支撑，间距片和异径接头应能承受如表所列之工况法兰处，如下表所示。

VERTICAL FORCE (TONNES) 垂直重力(吨)	10
LATERAL FORCE (TONNES) 横向重力(吨)	3
AXIAL FORCE (TONNES) 轴向重力(吨)	7
MOMENT (TONNES METERS)力矩(吨.米)	10
FORCES BASED ON MAX.LOADS IMPOSED BY UNSUPPORTED LOADING ARMS OF STATED SIZE 在此未支撑的装载臂工况，最大负荷所，等于所述重力	20°

INSTALL SCHEMATIC OF "U" TYPE CLAMP ON DECK C.O. PIPE

甲板上油支管等"U"型管子卡箍安装示意图

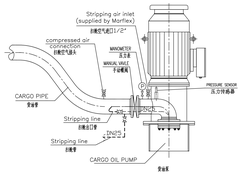




CARGO OIL PUMP SKETCH

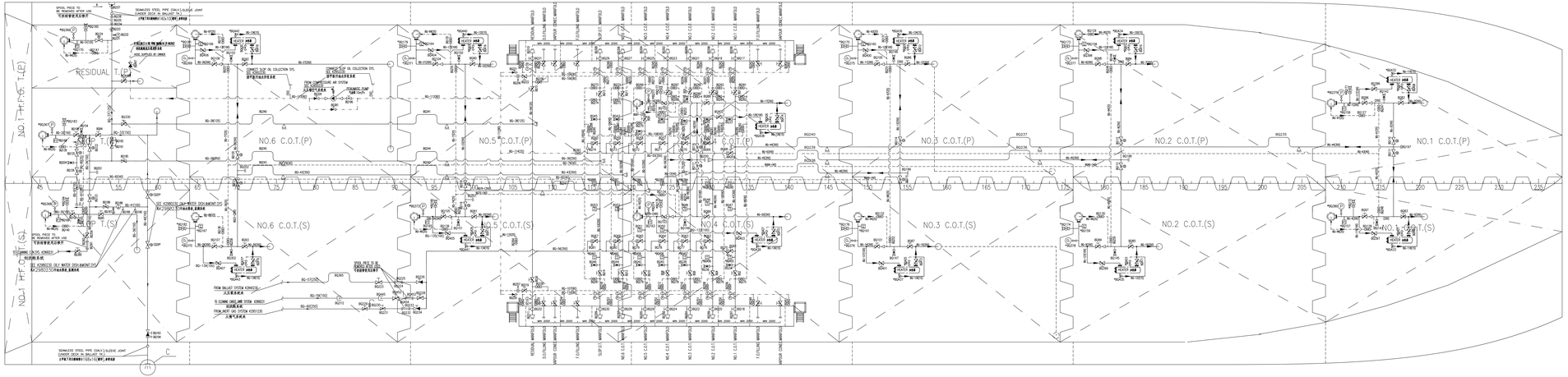
(RES. TANK PUMP NOT INCLUDED)

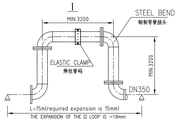
货油泵示意图(不含油渣泵)

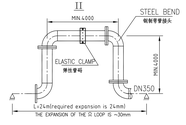


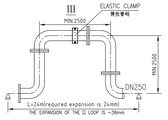
CARGO PUMP TABLE

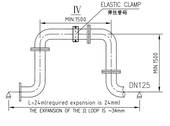
EQUIPMENT	CAPACITY	TYPE	Q'TY
CARGO PUMP FOR 1~6 C.O.T.(P&S)	550m³/hX120mlc	VERTICAL,CENTRIFUGAL,ELEC. SUBMERSIBLE,WITH CONTROL, DEEP WELL TYPE	12
CARGO PUMP FOR SLOP TK.(P&S)	300m³/hX120mlc	DO	2
CARGO PUMP FOR RESIDUAL TK.	70m³/hX60mlc	VERTICAL,CENTRIFUGAL,ELEC. SUBMERSIBLE WELL TYPE	1
PORTABLE CARGO PUMP	150m³/hX80mlc	VERTICAL,CENTRIFUGAL,ELEC. SUBMERSIBLE,SUNDRIES TYPE	1



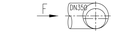




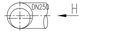




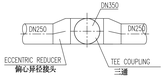
VIEW E



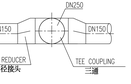
VIEW G



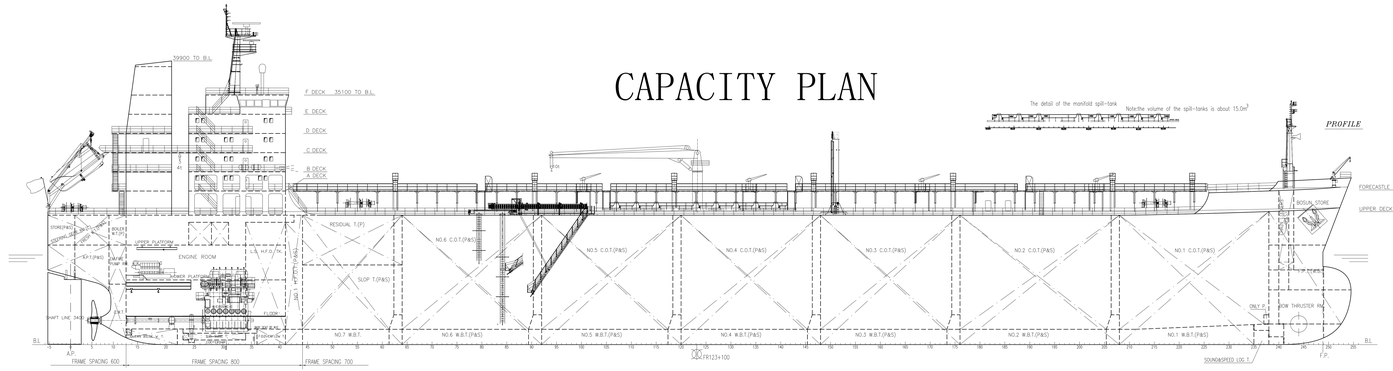
VIEW F



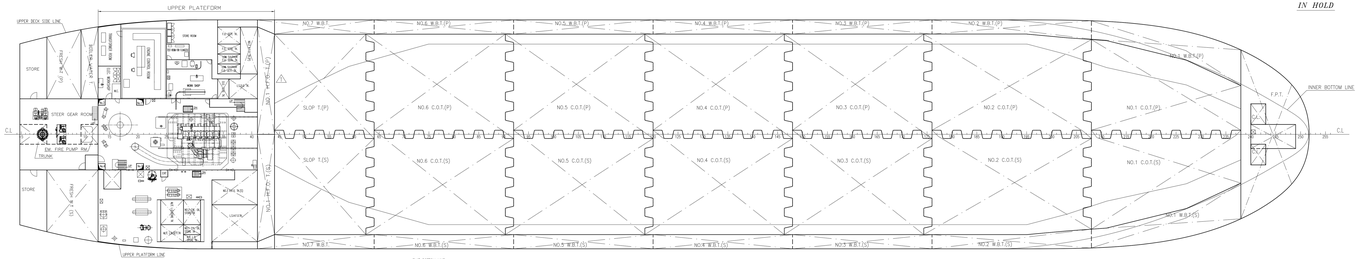
VIEW H



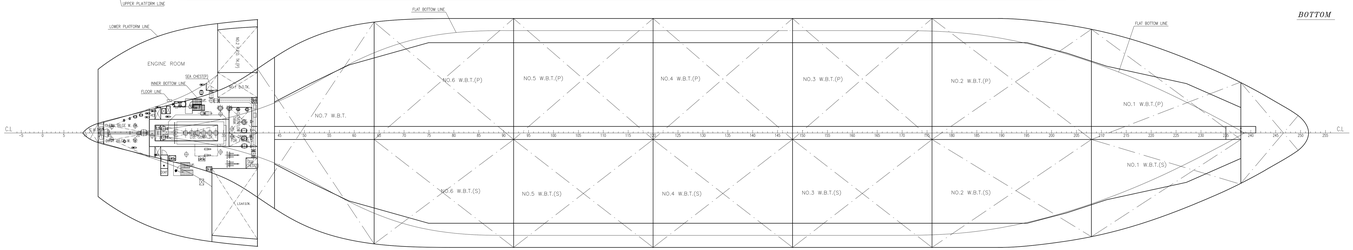
CAPACITY PLAN



PROFILE

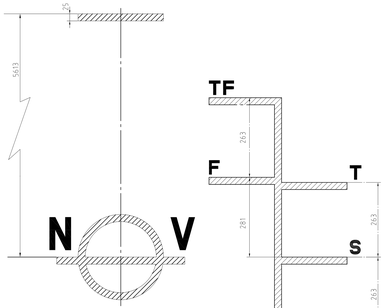


IN HOLD



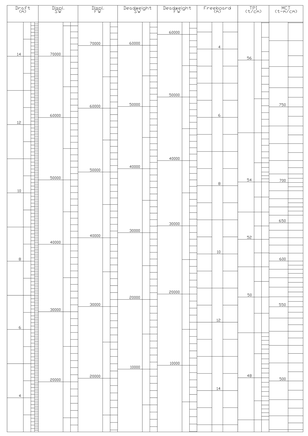
BOTTOM

LOAD LINE MARKS(STARBOARD)

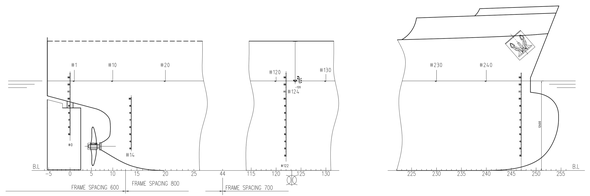


(FOREWARD)

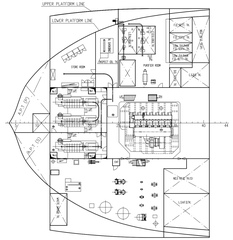
DEADWEIGHT SCALE



DRAFT SCALE



LOWER PLATEFORM


UPPER PLATFORM LINE
LOWER PLATFORM LINE
CONF. ROOM
ANNEX W.R.
OFFICE ROOM
CHIEF ENGINEER
CHIEF OFFICER
CAPTAIN
CHIEF ENGINEER
CHIEF OFFICER
CAPTAIN
MAIN ENTRANCE
MAIN ENTRANCE
MAIN ENTRANCE