

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**

Análisis global de la estructura de una barcaza de acero autopropulsada  
de 27 metros en diferentes condiciones de carga

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Carlos Eduardo Paredes Alejandro

Andreina Elizabeth Reyes Bonilla

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2021

## DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres Guisella Alejandro y Carlos Paredes, a mis hermanas Pamela Paredes y Romina Paredes, por todo el apoyo incommensurable que me brindaron para lograr esta meta tan anhelada.

Carlos Paredes

Este proyecto se lo dedico a mi madre, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante estos años de estudio y por forjarme a ser la persona que soy. A mi abuelita, que ahora no está conmigo, pero siempre me dio sus consejos e impulso para seguir adelante.

Andreina Reyes

# **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los profesores de la carrera de Ingeniería Naval, en especial a mi tutor PhD. José Rolando Marín por su apoyo en mi formación académica. A mis padres, por los valores y principios que forjaron mi carácter.

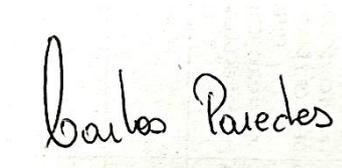
## **Carlos Paredes**

A Dios y a la Virgen por bendecirme cada día. A mi madre Silvia y Geovany por ser mi soporte emocional y motivación. Al Ing. Faytong por sus consejos durante toda mi etapa de pregrado. A mi tutor José R. Marín López por las enseñanzas impartidas durante mi formación profesional y permitirme realizar este proyecto de titulación. A mis amigos por ser el impulso que en ocasiones necesite.

## **Andreina Reyes**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Carlos Paredes Alejandro y Andreina Reyes Bonilla* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Carlos Eduardo  
Paredes Alejandro



Andreina Elizabeth  
Reyes Bonilla

# EVALUADORES

.....  
**M.Sc. Nadia Muñoz Agila**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**Ph.D. José Rolando Marín López**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La empresa NIRSA utiliza barcazas para el transporte de suministros a camaroneras ubicadas en la Isla Puná, que se desplazan a través de canales con poca profundidad. De manera que una disminución de calado permitiría a las embarcaciones operar con mayor flexibilidad de horarios. Por esta razón, se analizó la respuesta estructural global de una barcaza de 27m empleando el método de elementos finitos considerando diferentes condiciones de carga. Para ello, se desarrolla primero un modelo geométrico empleando el programa RHINOCEROS, utilizando superficies. Luego, para el análisis estructural se usó el programa ANSYS 2021 R2, y se consideraron diferentes números de camiones en forma simétrica y asimétrica, con la embarcación flotando en aguas tranquilas. Se consideró luego la embarcación navegando con olas de baja amplitud, y finalmente se consideró la reducción del espesor de los elementos estructurales por desgaste corrosivo.

Los resultados de la respuesta estructural mostraron que los efectos primarios flexural y torsional son despreciables; esta componente del esfuerzo colabora con menos del 10% del total. Por otro lado, se estableció que la condición de carga con 6 camiones a bordo, navegando en olas y considerando el desgaste por corrosión, resultó la más exigente. En esta condición los esfuerzos terciarios alcanzaron 165 MPa en la zona de cubierta donde se sitúan las llantas posteriores de los camiones. En conclusión, los máximos esfuerzos y deflexiones ocurren de manera localizada, por lo que en un futuro sería recomendable realizar una optimización estructural de los paneles de cubierta.

**Palabras Claves:** barcaza, análisis global, elementos finitos, corrosión

## **ABSTRACT**

*NIRSA uses barges to transport supplies to shrimp farms located on Puná Island, which move through shallow channels. Therefore, a reduction in draft would allow the vessels to operate with greater schedule flexibility. For this reason, it is intended to analyze the global structural response of a 27m barge using the finite element method considering different loading conditions. For this purpose, a geometrical model is first developed using the RHINOCEROS program, using surfaces. Then, for the structural analysis, the ANSYS 2021 R2 program is used, and different numbers of trucks are considered symmetrically and asymmetrically, with the vessel floating in calm waters. The ship is then considered sailing with low amplitude waves, and finally the reduction of the thickness of the structural elements due to corrosive wear is considered.*

*The results of the structural response show that the primary flexural and torsional effects are negligible; this stress component contributes less than 10% of the total. On the other hand, it was established that the loading condition with 6 trucks on board, sailing in waves and considering corrosive wear, was the most demanding. In this condition, tertiary stresses reached 165 MPa in the deck area where the rear tires of the trucks are located. In conclusion, the maximum stresses and deflections occur in a localized manner, so that in the future it would be recommend carrying out a structural optimization of the deck panels.*

**Keywords:** *barge, global analysis, finite element, corrosion.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación del problema .....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico .....	4
1.4.1 Características de la barcaza analizada.....	4
1.4.2 Descripción de un modelo para el desarrollo de MEF .....	9
1.4.3 Resistencia estructural del buque .....	9
CAPÍTULO 2 .....	16
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 Desarrollo del modelo geométrico .....	17
2.2 Importar modelo en ANSYS WORKBENCH .....	19
2.3 Material y espesores de las estructuras .....	20
2.4 Generación de Malla .....	21

2.4.1	Batch connection .....	21
2.5	Condiciones de Contorno .....	22
2.5.1	Resortes .....	22
2.6	Simulación de cargas sobre la barcaza .....	24
2.6.1	Presión Hidrostática.....	24
2.6.2	Presión por influencia de olas .....	26
2.6.3	Condiciones de carga .....	27
2.7	Zonas de sobredimensionamiento.....	31
2.8	Correlación de efecto torsor empleando DNV .....	32
2.8.1	Momento Torsor por Carga Asimétrica .....	32
2.8.2	Momento Torsor dado por DNV .....	33
CAPÍTULO 3.....		34
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	34
3.1	Criterios de aceptación de Resultados .....	34
3.1.1	Convergencia de Malla .....	34
3.1.2	Condiciones de Contorno .....	36
3.2	Resultados .....	36
3.2.1	Distribución de esfuerzos.....	36
3.2.2	Distribución de deflexiones .....	41
3.3	Análisis de Resultados de Esfuerzos y Deflexiones .....	45
CAPÍTULO 4.....		50
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1	Conclusiones.....	50
4.2	Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
DNV	Det Norske Veritas
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada
MEF	Método de Elementos Finitos
h/h	Horas hombre
Eb	Estribor
Bb	Babor

## SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
m	Metro
km	Kilometro
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
t	Toneladas
kN	Kilonewton
kn	nudos
Gls	Galones
RPM	Revoluciones por minuto
Hp	Horse Power
Pa	Pascales
$\Delta$	Desplazamiento
LCG	Posición de centro de gravedad longitudinal
$\gamma$	Gravedad específica
L	Eslora
B	Manga
GMT	Altura metacéntrica transversal
d <sub>w</sub>	Peso movable
M <sub>wt</sub>	Momento torsor por olas
f <sub>p</sub>	Factor de reducción
C <sub>b</sub>	Coeficiente de bloque
C <sub>w</sub>	Coeficiente de ola
D	Puntal
T <sub>lc</sub>	Calado en sección media

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Trayectoria de la Barcaza G4 .....	3
Figura 1.2 Refuerzos verticales extras en cuadernas .....	8
Figura 1.3 Esfuerzos primarios en una viga inferior en condición de arrufo .....	10
Figura 1.4 Esfuerzo secundario en una estructura de doble fondo .....	11
Figura 1.5 Esfuerzos terciarios en un refuerzo en un doble fondo .....	11
Figura 2.1 Proceso del análisis estructural de la barcaza empleando MEF .....	17
Figura 2.2 Detalles estructurales -visita técnica 06/11/2021 .....	17
Figura 2.3 Modelo Geométrico en Rhino .....	18
Figura 2.4 Detalles estructurales .....	19
Figura 2.5 Elementos estructurales por capas .....	20
Figura 2.6 Modelo geométrico importado .....	20
Figura 2.7 Espesor y material en refuerzos de mamparos .....	21
Figura 2.8 Grado de conexiones .....	22
Figura 2.9 Resortes verticales y horizontales en los mamparos .....	23
Figura 2.10 Esquema de presión rotada .....	24
Figura 2.11 Efecto combinado de trimado y escora.....	25
Figura 2.12 Paneles de casco .....	27
Figura 2.13 Perfil de Ola .....	27
Figura 2.14 Condiciones de carga.....	28
Figura 2.15 Resumen de carga estática .....	28
Figura 2.16 Modelado de bases de motor .....	29
Figura 2.17 Modelado de Carga Rodante.....	31
Figura 2.18 Límite de deflexión en planchaje .....	32
Figura 2.19 Momento Torsor por Carga Asimétrica .....	33
Figura 3.1 Convergencia de malla 2da condición .....	35
Figura 3.2 Tamaño de malla 40 mm.....	35
Figura 3.3 Respuesta en sección media en planchaje en la primera condición .....	37
Figura 3.4 Respuesta en sección media en planchaje en la segunda condición .....	37
Figura 3.5 Respuesta máxima en la plancha de cubierta de sección media.....	38
Figura 3.6 Respuesta máxima en el refuerzo longitudinal de cubierta.....	38
Figura 3.7 Respuesta en tercera condición sobre plancha de sección media.....	39
Figura 3.8 Descomposición de esfuerzos principales en el punto máximo .....	40

Figura 3.9 Distribución de esfuerzo “y” en el punto máximo .....	41
Figura 3.10 Deflexión de cubierta en tercera y cuarta condición .....	42
Figura 3.11 Distribución de deflexión en las varengas de la sala de maquinas .....	43
Figura 3.12 Distribución de deflexión en sala de máquinas a lo largo de la quilla .....	43
Figura 3.13 Deflexión en cubierta sin esfuerzos extras en cuadernas .....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características Principales de la Barcaza G4 .....	5
Tabla 1.2 Distribución de tanques de agua dulce .....	6
Tabla 1.3 Distribución de tanques diarios .....	6
Tabla 1.4 Elementos estructurales de casco .....	7
Tabla 1.5 Elementos estructurales de superestructura .....	7
Tabla 1.6 Calados en todas las condiciones .....	8
Tabla 2.1 Rotación de planos locales .....	25
Tabla 3.1 Resumen Fuerzas totales de desbalance en cada condición .....	36
Tabla 3.2 Comparación de valores máximos de deflexión en la 3ra y 4ta condición ....	43
Tabla 3.3 Comparación de valores máximos de considerando modificación estructural .....	45

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Líneas de Forma de la Barcaza G4.....	12
PLANO 2 Distribución General de la Barcaza G4.....	13
PLANO 3 Estructural de la Barcaza G4.....	14
PLANO 4 Circuitos Generales de la barcaza G4 .....	15

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa NIRSA ubicada en el puerto de Posorja, provincia del Guayas utiliza barcazas para el transporte de suministros a sus camaroneras. Este servicio se realiza a través de la movilización de camiones sobre las barcazas desde el muelle de Posorja-NIRSA hasta las principales camaroneras, las cuales son: Cipron, La Maravilla, Darsacon, Cola de Mar, Pelitec y Punta Arena. De acuerdo con los registros de la empresa en lo que va del año 2021, la barcaza G4 realiza un promedio de 10 fletes por mes en épocas de aguaje (Ing. Johnny Chávez, jefe de embarcaciones menores, 06 de noviembre de 2021). Estos números muestran el elevado uso de estas embarcaciones, las cuales transportan un total de 48 bines de camarón por flete, lo que representa una alta tasa de tonelaje bruto transportado entre los puntos mencionados.

Las embarcaciones que prestan servicio a las camaroneras de Nirsa tienen las siguientes dimensiones, en eslora 27.45 m, manga 8 m, calado 1.6 m, puntal de 2.2 m y operan a una velocidad de 8 kn. Las barcazas son autopropulsadas y fueron construidas en acero naval, además, cuentan con una capacidad de transportar hasta seis camiones sobre cubierta, cada uno con un peso estimado de 10 t. El recorrido más extenso que realizan es a Punta Arena con una distancia estimada de 222 km tomándoles un periodo de 12 horas. (W. Anchico H., entrevista al capitán de la barcaza G4, 06 de noviembre de 2021)

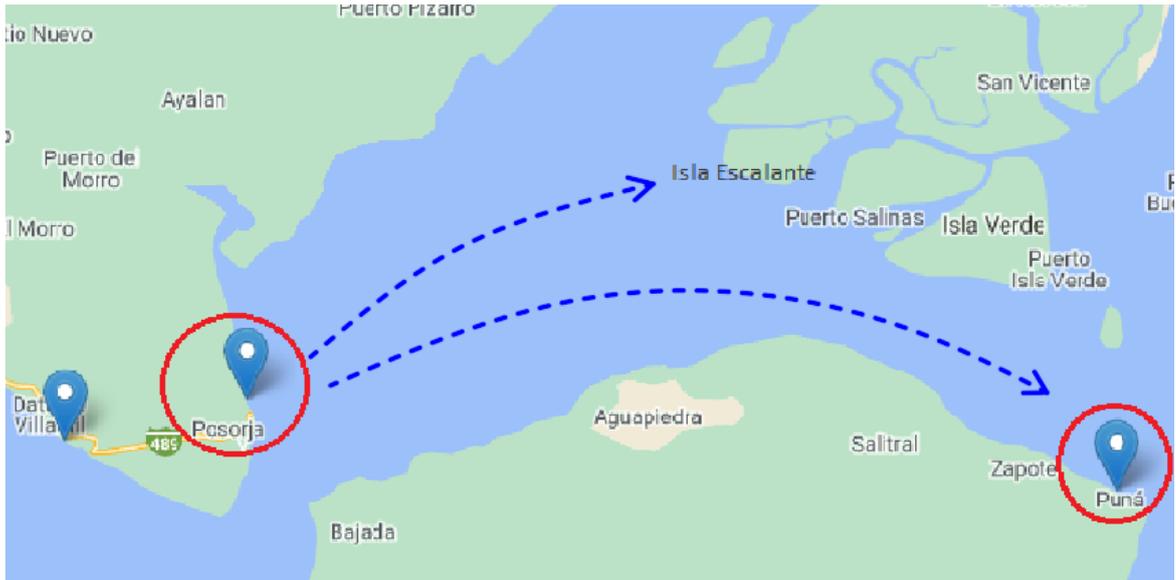
Cuando las barcazas se acercan a su destino operan en ramales con poca profundidad, por ejemplo, los ubicados en las islas Puná y Escalante, de acuerdo con la tabla de mareas (INOCAR, 2021) tienen profundidad promedio en bajamar de 1.45 m. Dada la situación mencionada, las embarcaciones solo pueden navegar en condiciones de pleamar, con una profundidad media de 4.05 m. Como consecuencia las barcazas se restringen en sus operaciones, generando una limitación en el manejo de recursos. Por lo que es recomendable intentar una reducción de calado de estas embarcaciones.

Una opción para una posible reducción de calado de una embarcación es disminuir su peso estructural. Sin embargo, antes de llevar a cabo alguna modificación en la estructura se debe realizar un análisis estructural para determinar en detalle las zonas con bajos niveles de esfuerzos y deflexiones (M.A. Shama, 2019). Con estos resultados se podría identificar zonas de sobredimensionamiento al realizar una comparación con una regla clasificadora de buques (DNV, Finite Element Analysis).

En este trabajo se desarrolla el análisis estructural de una barcaza de 27 m usando el método de Elementos Finitos, MEF. Se consideran condiciones de carga que representan torsión y flexión de la estructura, tanto en aguas tranquilas y protegidas. Debe enfatizarse que el análisis torsional de la estructura de un buque es un aspecto poco analizado en la industria (Shama, Torsion and Shear Stresses, 2010) , por lo que se pretende conocer el grado de contribución de este efecto sobre el análisis desarrollado. De esta forma se determinará la respuesta estructural de la embarcación, lo que beneficiaría a la empresa si en el futuro pretendiera realizar alguna optimización estructural para reducir su calado.

## **1.1 Descripción del problema**

En la actualidad, la zona de navegación donde operan las barcas pertenecientes a la empresa NIRSA tienen limitaciones de profundidad. Por ejemplo, los ramales de acceso a las islas Puná y Escalante están en zonas de manglares del río Guayas, por lo que la profundidad de sus canales de acceso tiene profundidades bajas e irregulares (INOCAR, 2021). Por esta razón, los capitanes de las barcas para su logística utilizan las condiciones de pleamar para su navegación.



**Figura 1.1 Trayectoria de la Barcaza G4  
(INOCAR, 2021)**

De acuerdo con los registros en la empresa Nirsa, la barcaza G4 generalmente se tarda periodos considerables para completar el recorrido de su operación. Según reporta un capitán “En ocasiones para realizar un traslado de suministros a la camaronera Darsacom en la isla Puná, el tiempo estimado es de 20 minutos, sin embargo, por motivos de la marea no se puede acceder y se debe navegar una hora adicional, hasta esperar la pleamar” (W. Anchico H., entrevista al capitán de la G4, 06 de noviembre de 2021). Esto produce que los intervalos de navegación se prolonguen, los costos de operación se eleven, lo que implica mayores gastos de combustible, consumibles, y horas hombre requeridas.

## **1.2 Justificación del problema**

Siendo las barcazas frecuentemente usadas para el transporte de camiones a las camaroneras, la empresa debe buscar un servicio de operabilidad de mayor continuidad. Por esta razón se presenta el siguiente trabajo, el cual está enfocado en el análisis estructural global de la barcaza, pretendiéndose determinar zonas de sobredimensionamiento, para eventualmente disminuir el calado en futuros trabajos.

Al finalizar este trabajo, se presentará una estimación preliminar de la ganancia que tendría la empresa si la barcaza tuviera operabilidad continua. Para esto habrá que considerar que, al operar una embarcación en intervalos de tiempo mayores, los costos de operación se elevan. Sin embargo, el número de fletes van a aumentar, incrementando de forma notable las ganancias.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar mediante el método de elementos finitos el comportamiento estructural de una barcaza de 27 m de eslora en diferentes condiciones de carga, para la determinación de su resistencia y rigidez.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Para lograr analizar el comportamiento estructural de la barcaza es necesario implementar los siguientes objetivos específicos.

- Modelar la estructura global de una barcaza utilizando el MEF, considerando cargas de tipo flexural y torsional.
- Analizar la distribución de esfuerzos y deflexiones durante el embarque de los camiones y la navegación en olas de aguas protegidas.
- Determinar las posibles zonas estructurales de sobredimensionamiento, considerando las reglas de DNV

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Características de la barcaza analizada**

La barcaza analizada para el desarrollo de este proyecto es la Pacific G4. El material de construcción de esta embarcación es acero y se efectuó en las instalaciones del muelle de NIRSA S.A. en el año 2015. Esta barcaza puede transportar 6 camiones de carga, con dimensiones de 2,80 m ancho x 7,0 m de largo y con un peso aproximado de 10 t. Adicionalmente tiene la capacidad para transportar 34.440 galones de agua dulce en sus tanques para suministrar a las camaroneras.

El arreglo general de la embarcación incluye 6 mamparos transversales y 3 longitudinales. Por otro lado, la sala de máquinas se ubica en la popa de la embarcación y cuenta con dos líneas de propulsión. Además, tiene una caseta elevada ubicada a popa, en la cual se encuentra el alojamiento para 4 personas, cocina/comedor, baño y el puente de mando con sus respectivos equipos electrónicos.

#### 1.4.1.1 Características Principales

A continuación, se presenta la Tabla 1.1 con las características principales de la barcaza G4.

**Tabla 1.1 Características Principales de la Barcaza G4**  
(Holguín, 2015)

Nombre de la embarcación	PACIFIC G4
Tipo de embarcación	Gabarra
Armador	NIRSA S.A.
Puerto de Registro	----
Bandera	Ecuatoriana
Constructor / Año	NIRSA S.A / 2015
Material del casco	Acero naval
Material de la superestructura	Acero naval
Eslora total	27,43 m
Manga moldeada a cubierta principal	08,00 m
Puntal a la Cubierta Principal	02,20 m
Calado máximo	01,50 m
Potencia instalada	02 Caterpillar 3306 220 HP a 1800 RPM
Velocidad estimada	11.00 nudos
Capacidad de agua dulce a transportar	34.440 Gls
Capacidad de combustible	3.900 Gls
Capacidad de agua dulce de consumo	1.451Gls
Capacidad de agua dulce tanque elevado	500 Gls
Autonomía	4 días
Dotación	5 tripulantes
Volumen casco	405,5 m <sup>3</sup>
Volumen superestructura	59,13 m <sup>3</sup>

### 1.4.1.2 Tanques de almacenamiento

En la Tabla 1.2 y Tabla 1.3, se presenta el detalle de los tanques de almacenamiento de toda la embarcación con sus respectivas características.

**Tabla 1.2 Distribución de tanques de agua dulce  
(Holguín, 2015)**

N°	Tipo	Banda	Ubicación	Capacidad [Gals]
1	Tanque de lastre	Estribor	Entre mamparo 1 y 2	2500
1		Babor		2500
1	Tanque de agua dulce	Estribor	Entre mamparo 2 y 3	8610
1		Babor		
2		Estribor	Entre mamparo 3 y 4	
2		Babor		

**Tabla 1.3 Distribución de tanques diarios  
(Holguín, 2015)**

Tipo	Banda	Ubicación	Capacidad [Gals]
Tanque diario de combustible	Estribor	Sala de máquinas	1950
	Babor		1950
Tanque de consumo diario	Sección media	Proa de la sala máquinas	1451

### 1.4.1.3 Estructura

#### 1.4.1.3.1 Casco

La estructura de la embarcación tiene cuadernaje longitudinal, con cuadernas, baos, longitudinales de fondo, costado y de cubierta. Los elementos estructurales que conforman el casco presentan el siguiente escantillonado como se muestra en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4 Elementos estructurales de casco**  
(Holguín, 2015)

<b>Descripción</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida [mm]</b>
Baos	L	300x75x12
Varengas	L	220x75x12
Cuadernas	L	100x100x9
Longitudinales de fondo	Ángulo	100x100x9
Longitudinales de costado	Ángulo	100x100x9
Esloras de cubierta	Ángulo	100x100x9
Casco del fondo	Plancha	9
Casco en pantoque	Plancha	9
Casco proa y espejo	Plancha	12
Cubierta principal	Plancha	8
Cubierta acomodación	Plancha	5
Mamparo	Plancha	8
Refuerzos verticales de Mamparo	Ángulo	100x100x9

#### 1.4.1.3.2 Superestructura

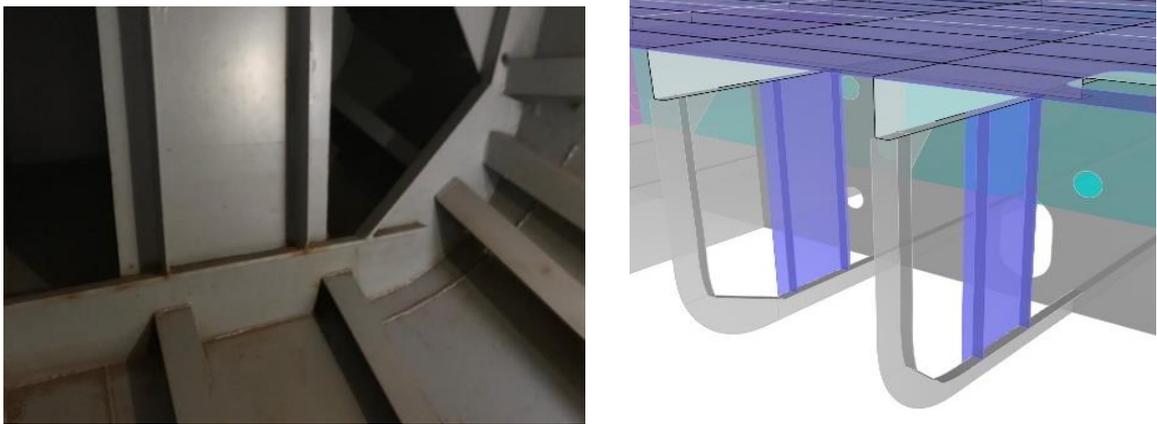
Los elementos estructurales que conforman la superestructura presentan el siguiente escantillonado:

**Tabla 1.5 Elementos estructurales de superestructura**  
(Holguín, 2015)

<b>Descripción</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida [mm]</b>
Baos	L	125x60x8
Refuerzos verticales de costado	L	125x60x8
Refuerzos horizontales de costado	Platina	80x8
Longitudinales de cubierta	Platina	50x6
Refuerzos verticales	Angulo	64x6.4
Costado	Plancha	5
Tumbado	Plancha	5

#### 1.4.1.4 Visita Técnica

El 6 de noviembre del 2021 se llevó a cabo una visita a la embarcación G4 para corroborar el escantillonado reportado en los planos estructurales. Se observó la existencia de refuerzos verticales extras en todas las cuadernas como se observa en la Figura 1.2, que no se encuentran especificados en el plano. Además, se registraron los francobordos de la embarcación en condición ligera, con los cuales, se calcularon los diferentes calados que servirán para equilibrar la embarcación en diferentes condiciones de carga, véase la Tabla 1.6.



**Figura 1.2 Refuerzos verticales extras en cuadernas**

[FUENTE: Propia]

**Tabla 1.6 Calados en todas las condiciones**

[FUENTE: Propia]

Condiciones		Calados [m]			
		Proa	Popa	Estribor	Babor
Ligera		0,60	1,37	0,98	0,98
Sin carga	1 camión	0,59	1,41	1,03	0,96
	2 camiones	0,58	1,45	1,01	1,01
	3 camiones	0,61	1,46	1,07	1,00
	4 camiones	0,65	1,46	1,06	1,06
	5 camiones	0,73	1,44	1,12	1,05
	6 camiones	0,80	1,42	1,11	1,11
Cargado	1 camión	0,58	1,45	1,08	0,95
	2 camiones	0,56	1,53	1,05	1,05
	3 camiones	0,63	1,55	1,15	1,03
	4 camiones	0,70	1,57	1,13	1,13

Condiciones	Calados [m]			
	Proa	Popa	Estribor	Babor
5 camiones	0,85	1,52	1,26	1,12
6 camiones	1,00	1,47	1,23	1,23

#### 1.4.2 Descripción de un modelo para el desarrollo de MEF

Para el análisis global de la barcaza por el MEF es necesario generar un modelo geométrico. De manera que, el forro del casco, y los refuerzos primarios y secundarios son modelados completamente con superficies generadas a partir de bosquejos ó conjuntos de curvas, empleando el programa Rhinoceros. De esta forma al importar el modelo geométrico desde el programa ANSYS WORKBENCH 2021 R2, se evitan inconsistencias en las conexiones de las superficies, (Terranova, 2020).

Al modelar una embarcación de forma global por el MEF es conveniente considerar los problemas de singularidad. Cuando una embarcación se encuentra flotando no posee condiciones geométricas establecidas, y por este motivo, es necesario colocar resortes en sectores que presenten mayor rigidez estructural como son los mamparos longitudinales y transversales (DNV, Finite Element Analysis). Por otro lado, para corroborar el equilibrio estático del modelo analizado, las fuerzas totales de desbalance (boyantez menos pesos) generadas por los resortes deben ser inferiores al 1% del desplazamiento total de la embarcación, (E.D. Wang, J.S. Bone, . M. Ma, & A. Dinovitzer, 2019).

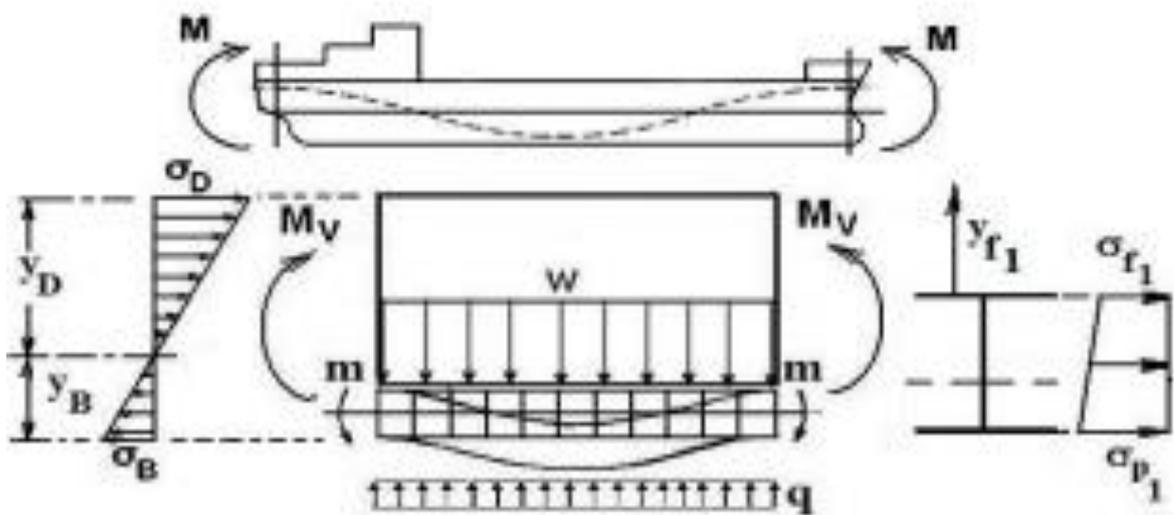
Para incluir la influencia de olas en un análisis estructural de una embarcación, es necesario considerar que el nivel de agua cambia a lo largo de la embarcación. Por ende, para simular la presión hidrostática de una forma adecuada, se divide longitudinalmente el casco de la embarcación en secciones de paneles. Esto permite asegurar un adecuado modelado de presiones, (Terranova, 2020).

#### 1.4.3 Resistencia estructural del buque

Para un estudio simplificado de la estructura de un buque los esfuerzos y deflexiones están divididos de acuerdo a su comportamiento Primario, Secundario

y Terciario. Esta clasificación permite que cada una de las categorías se las pueda analizar de forma independiente y luego superponerlos asumiendo linealidad de la respuesta.

1) Respuesta Primaria: dado que la eslora es bastante mayor que la manga y puntal, se considera la embarcación como una viga-buque, con la estructura sometida a la distribución de peso longitudinal y boyantez.



**Figura 1.3 Esfuerzos primarios en una viga inferior en condición de arrufo**  
(Shama, Compounding of Stresses in Ship Strength Members, 2013)

2) Respuesta Secundaria: se produce por la flexión de un panel de planchaje reforzado, por ejemplo, los paneles que se encuentran en el fondo o cubierta que estén entre mamparos transversales.

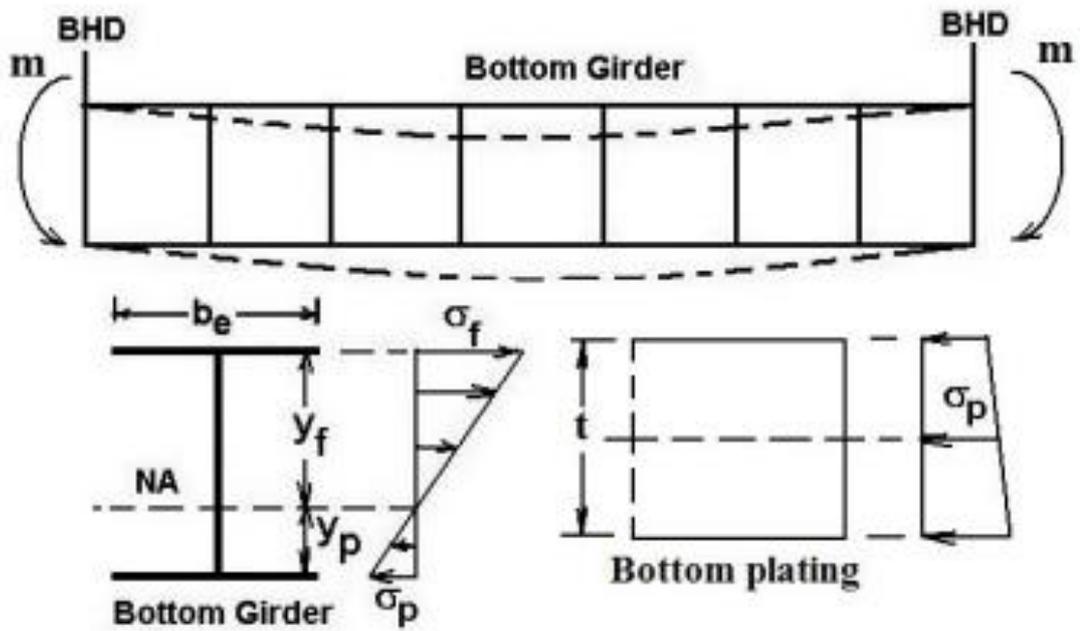


Figura 1.4 Esfuerzo secundario en una estructura de doble fondo  
(Shama, Compounding of Stresses in Ship Strength Members, 2013)

3) Respuesta Terciaria: se produce por la flexión de un panel individual de planchaje entre refuerzos.

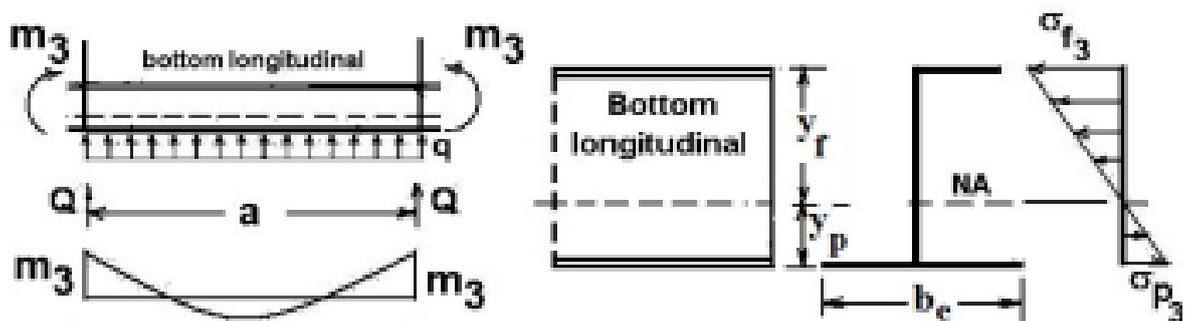
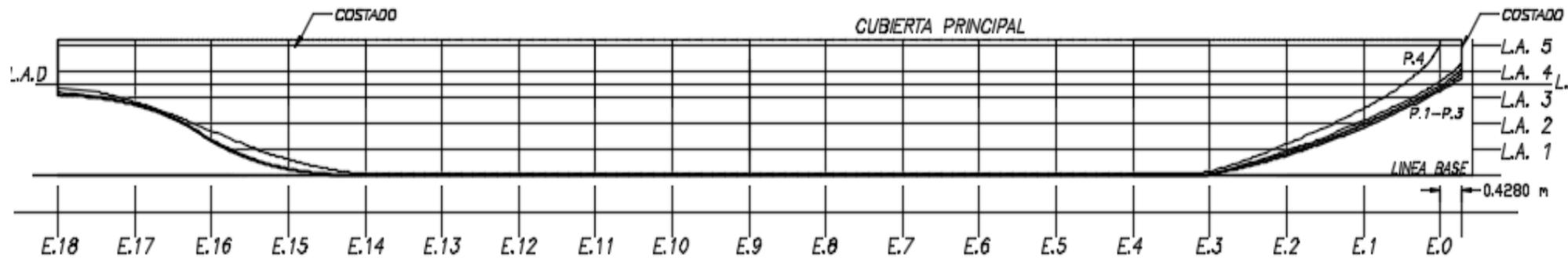


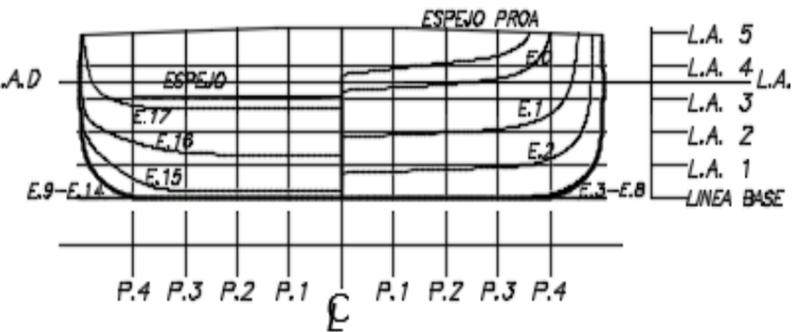
Figura 1.5 Esfuerzos terciarios en un refuerzo en un doble fondo  
(Shama, Compounding of Stresses in Ship Strength Members, 2013)

# G/ PACIFIC G4

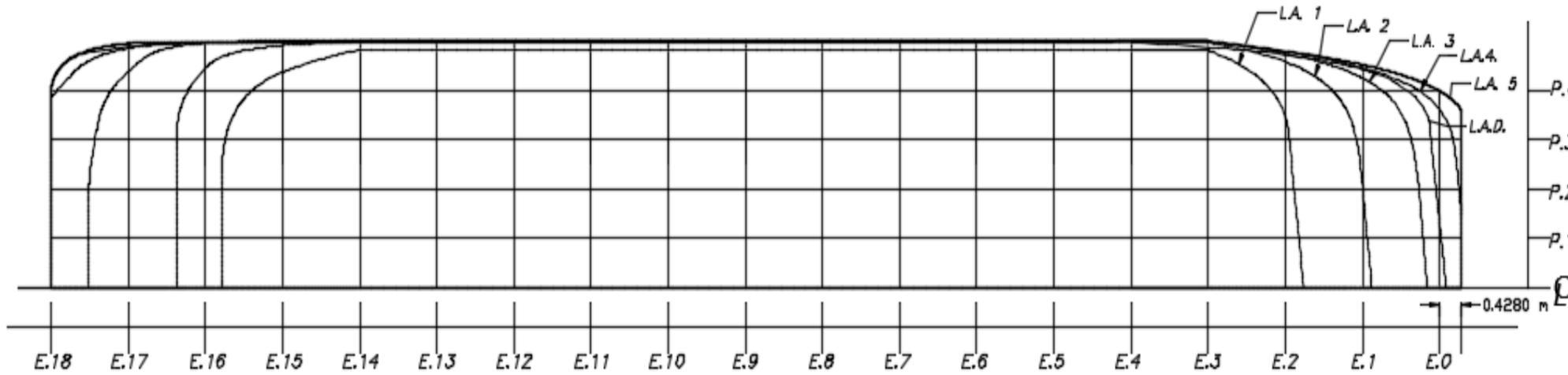
VISTA DE PERFIL.



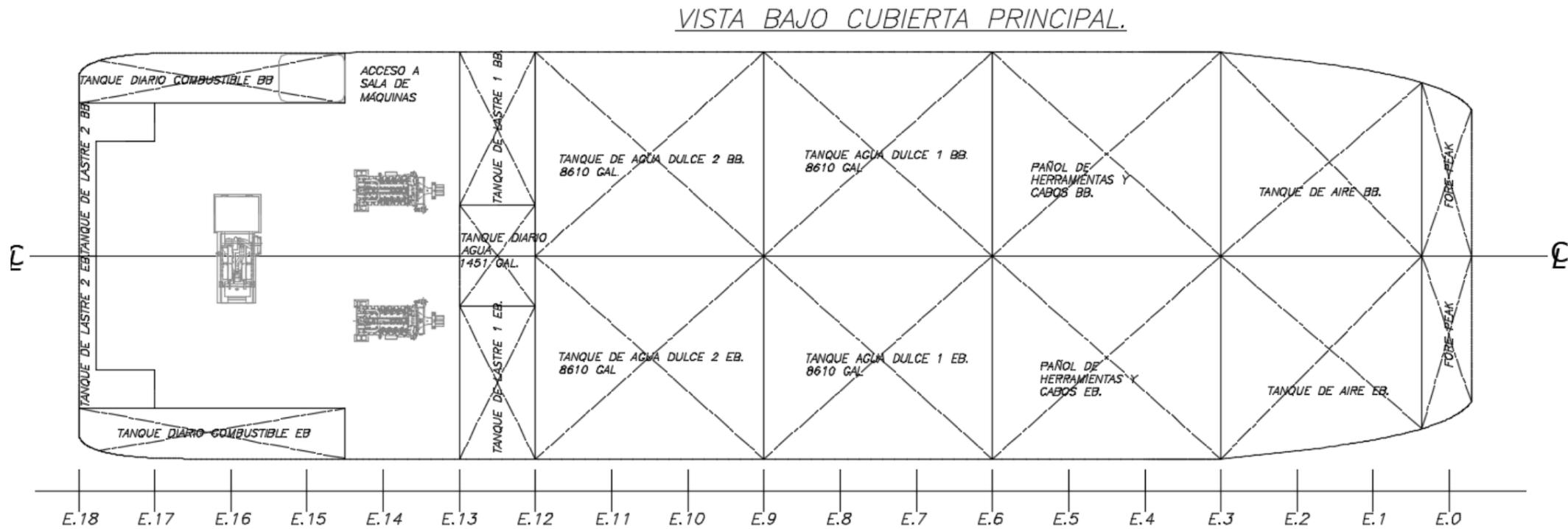
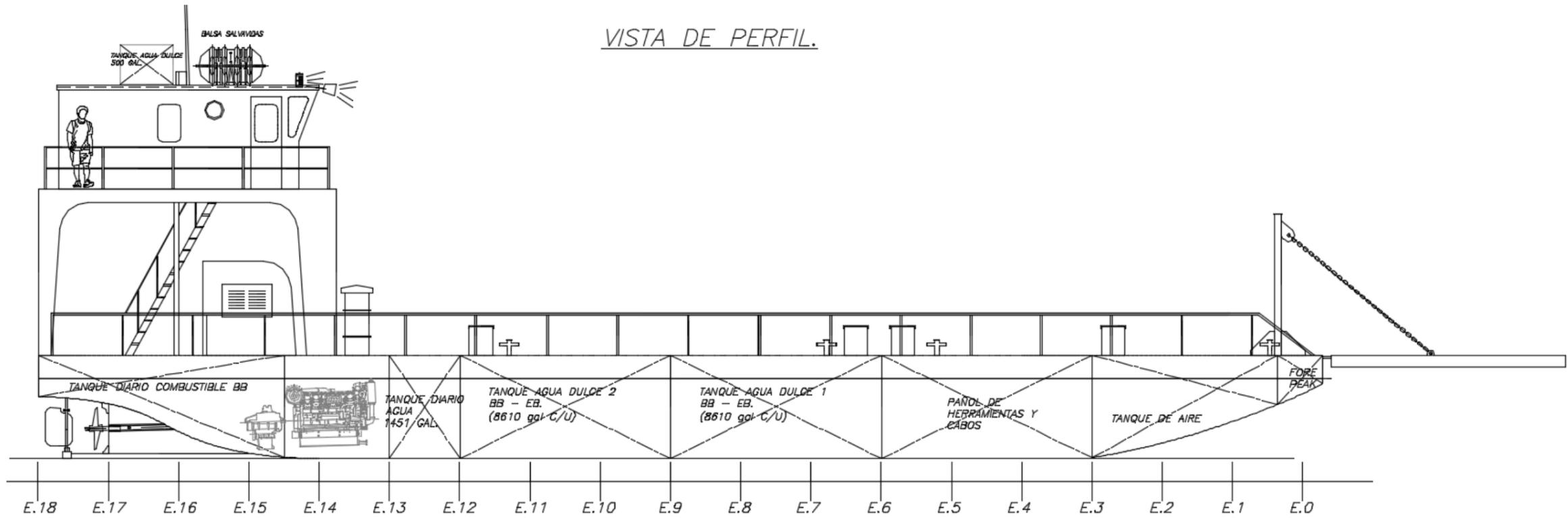
VISTA DE ESTACIONES.



VISTA DE PLANOS DE AGUA.

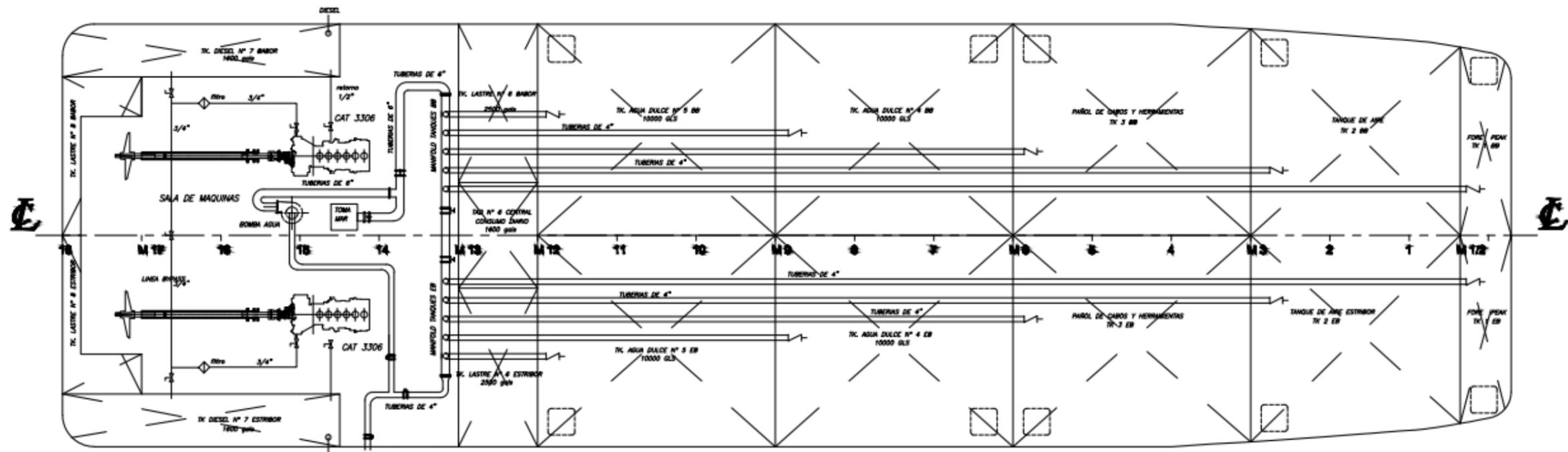
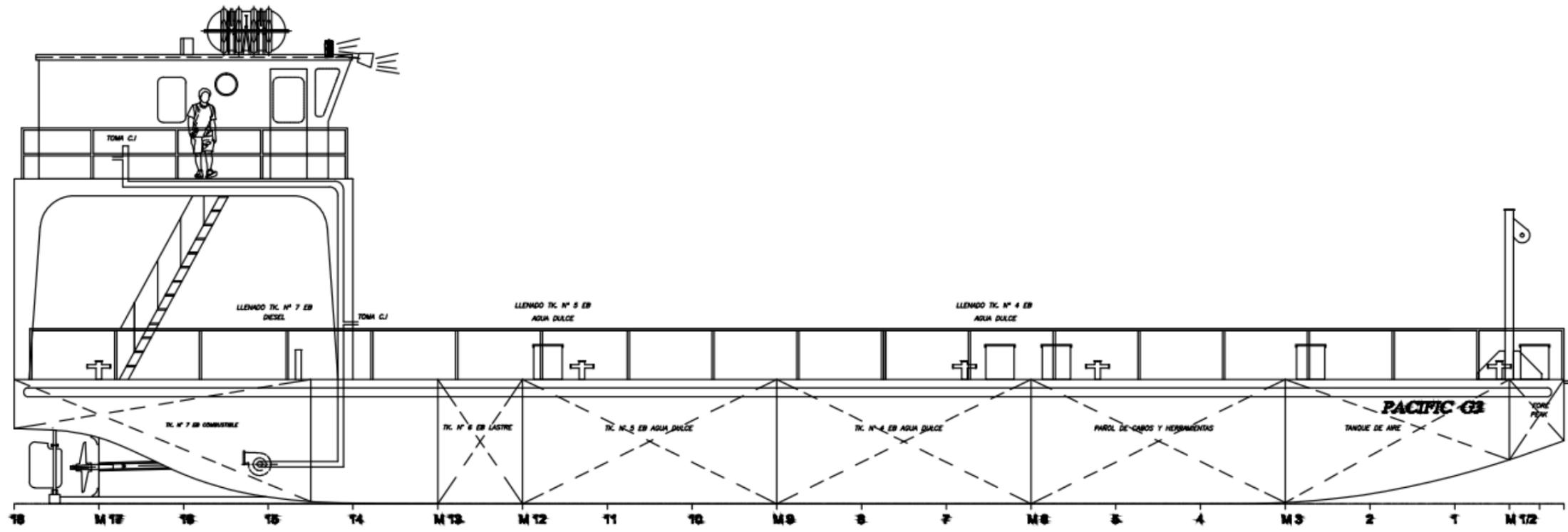


PLANO 1 Líneas de Forma de la Barcaza G4



**PLANO 2 Distribución General de la Barcaza G4**





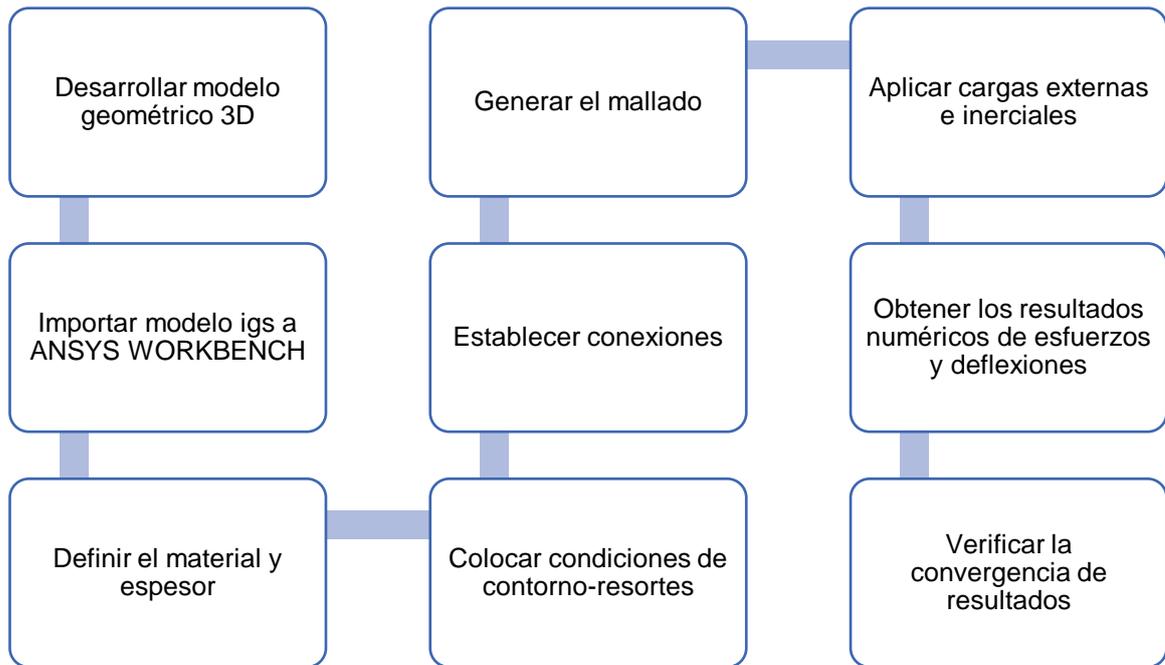
PLANO 4 Circuitos Generales de la barcaza G4

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Una de las opciones a considerar para reducir el calado de una embarcación es minimizar su peso estructural. En general, una barcaza tiene una baja relación de puntal/manga (Lewis, 1988), lo que conlleva a una baja rigidez a la flexión del casco y, por ende, a desarrollar esfuerzos normales elevados en cubierta y fondo. Sin embargo, un barco menor a 30 metros de eslora es considerada una embarcación pequeña, con momentos de flexión relativamente bajos (DNV, Hull structural design ships with length less than 100 meters , 2021), por lo que los esfuerzos primarios no son relevantes. Por lo tanto, es importante determinar la influencia de los esfuerzos primarios sobre la estructura de la barcaza de la empresa anteriormente mencionada a través de un análisis estructural detallado.

Para analizar la estructura global de la barcaza G4, se desarrolló un modelo estructural empleando el MEF. En este proyecto se utilizó un programa de análisis estructural en el que se realizó la partición del dominio para el mallado y se establecieron condiciones de contorno para evitar la singularidad del problema. Por otro lado, se aplicaron condiciones de fuerzas externas e inerciales, las cuales originaron cargas de tipo flexural y torsional, y también se consideró condiciones de navegación en aguas tranquilas, y protegidas (olas de baja amplitud). Por lo que, con esta metodología se pretende estimar los niveles de esfuerzos y deflexión sobre la estructura para determinar posibles zonas de sobredimensionamiento.



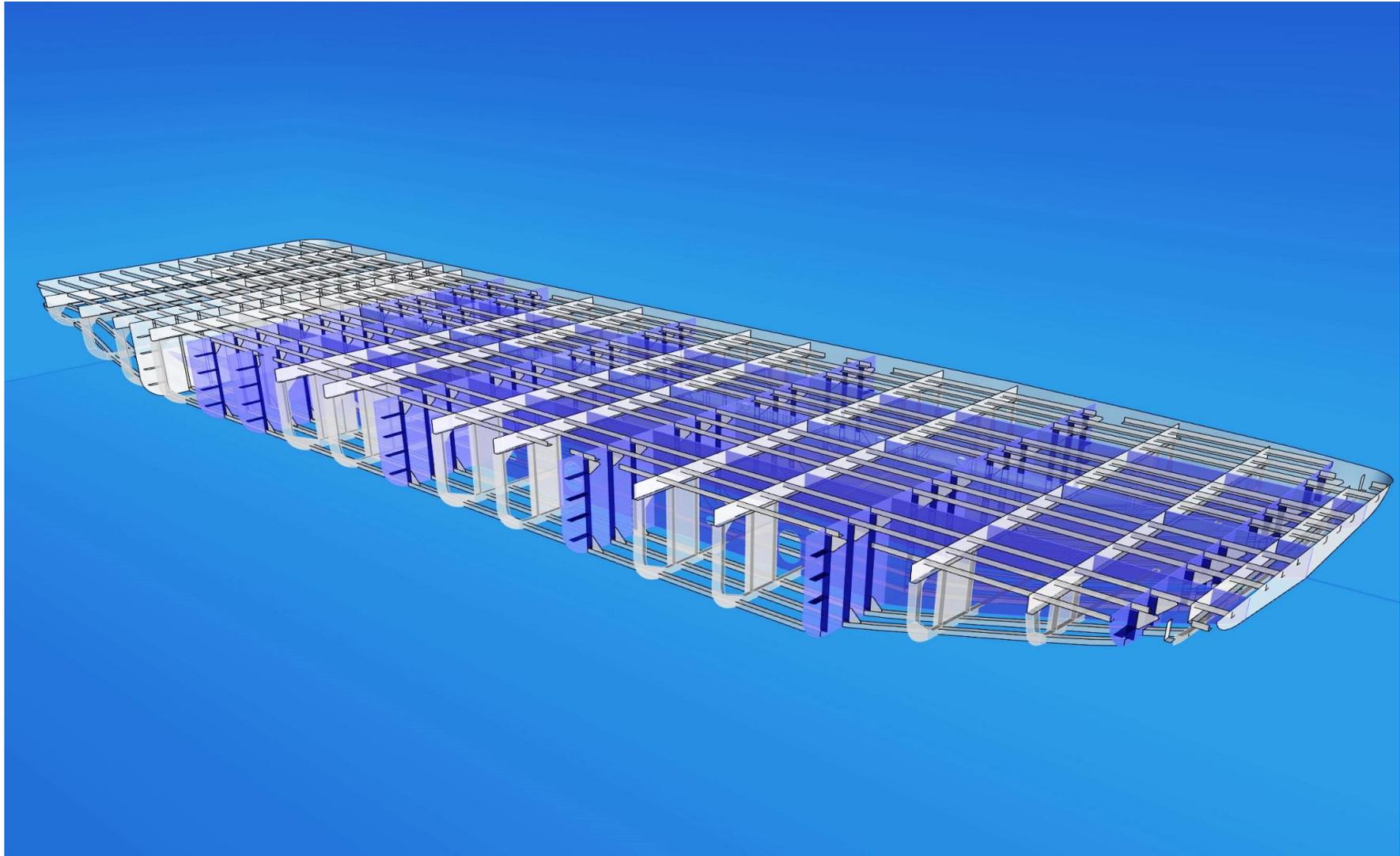
**Figura 2.1 Proceso del análisis estructural de la barcaza empleando MEF**

## 2.1 Desarrollo del modelo geométrico

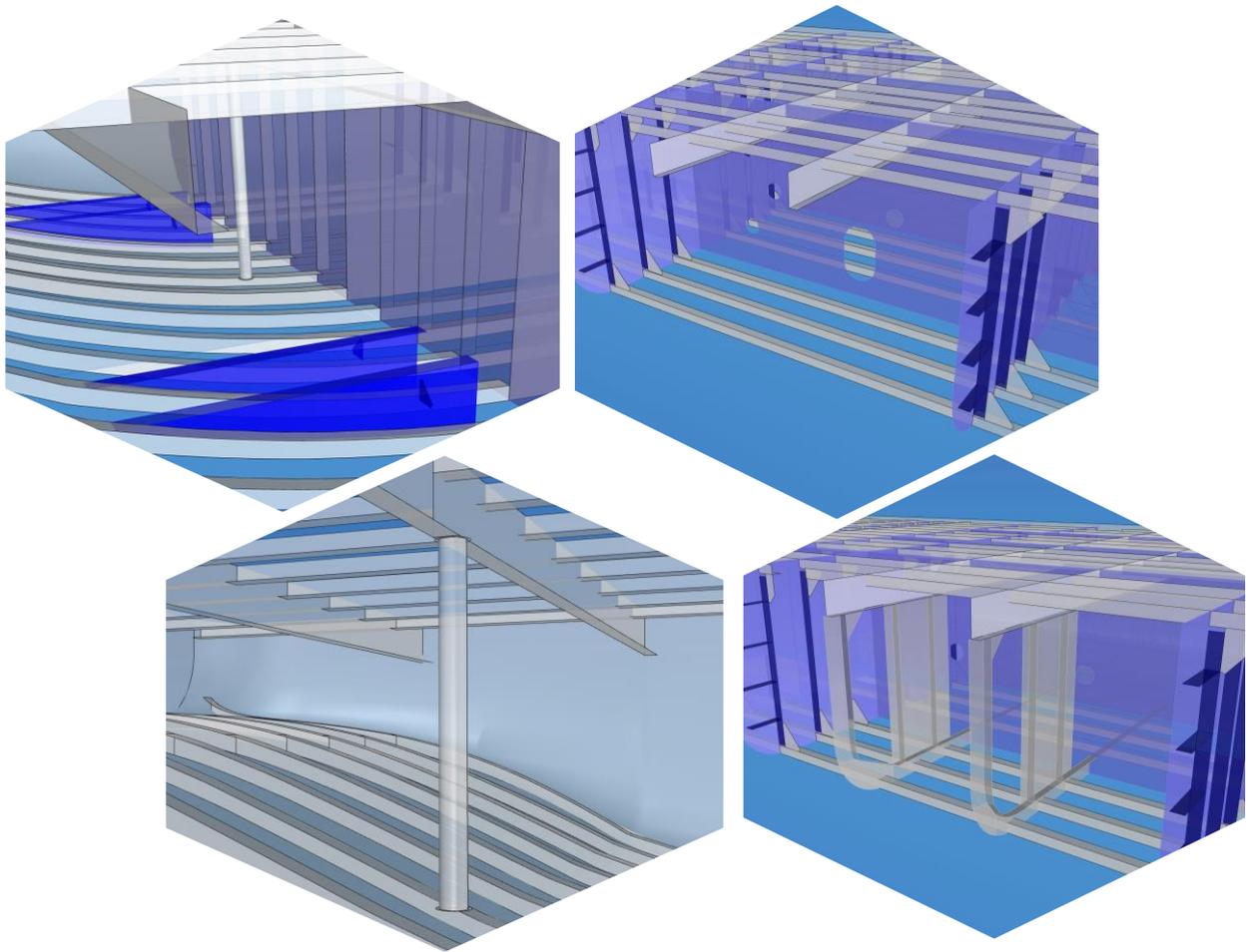
Para su posterior análisis estructural, se generó el modelo geométrico 3D de la barcaza en RHINOCEROS considerando el plano estructural. Los refuerzos fueron modelados completamente con superficies generadas a partir de conjuntos de curvas, como se observa en la Figura 2.3 y Figura 2.4. Además, se realizó una visita técnica para corroborar las dimensiones de la estructura.



**Figura 2.2 Detalles estructurales -visita técnica 06/11/2021**  
[FUENTE: Propia]



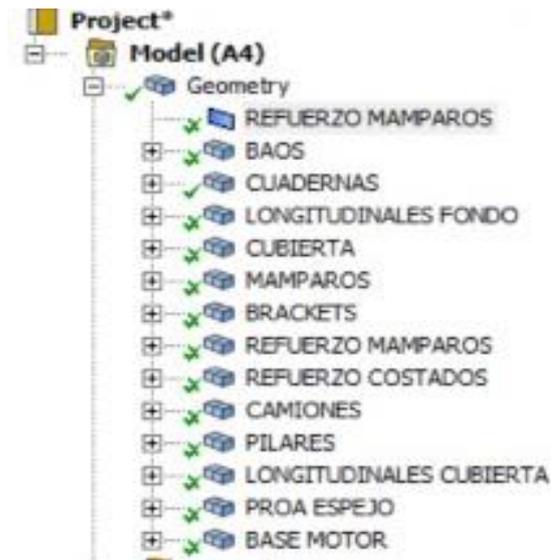
**Figura 2.3 Modelo Geométrico en Rhino**  
[FUENTE: propia]



**Figura 2.4 Detalles estructurales**  
[FUENTE: propia]

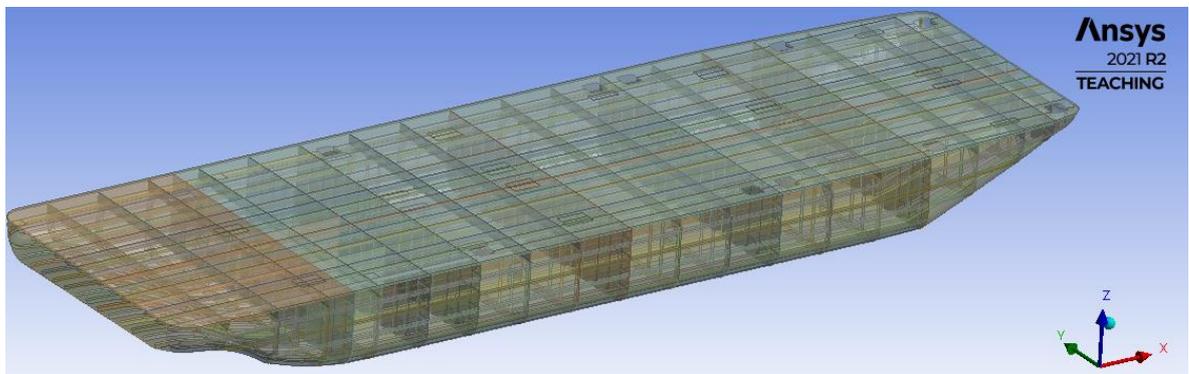
## **2.2 Importar modelo en ANSYS WORKBENCH**

Posteriormente, el modelo geométrico fue importado en formato IGS a ANSYS WORKBENCH 2021R2. Para un manejo eficiente de los comandos en ANSYS es de importante ingresar las estructuras mediante capas, tal y como se muestra en la Figura 2.5. Además, se estableció el origen del sistema de referencia en la intersección de la proyección del espejo con la línea base, el eje “y” en dirección Estribor-Babor, eje “z” direccionado hacia arriba, y el eje “x” en el sentido de crujía.



**Figura 2.5 Elementos estructurales por capas**

[FUENTE: Propia]

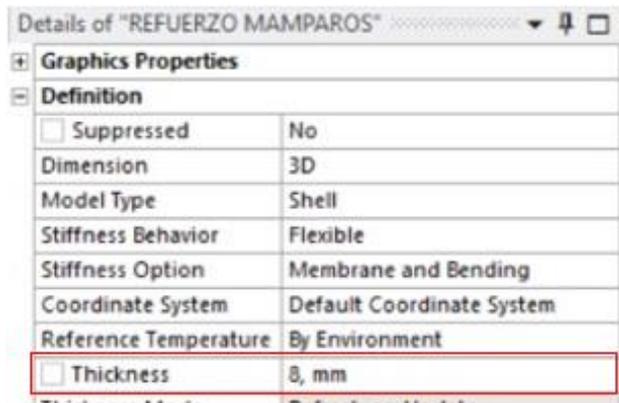


**Figura 2.6 Modelo geométrico importado**

[FUENTE: propia]

### 2.3 Material y espesores de las estructuras

Una vez que se tiene el modelo global desarrollado por capas, el ingreso de espesores resulta un proceso simplificado. Los espesores y el tipo de material fueron tomados del plano estructural, PLANO 3.



**Figura 2.7 Espesor y material en refuerzos de mamparos**  
[FUENTE: Propia]

## 2.4 Generación de Malla

### 2.4.1 Batch connection

Este comando conecta vigas y estructuras de tipo plancha de forma rápida y automática, además combinado con el comando "connect" proporciona un proceso eficiente para las conexiones que se requieren al realizar análisis estructurales de embarcaciones. (Selvaganapathi, 2021)

Las principales características del comando batch connection:

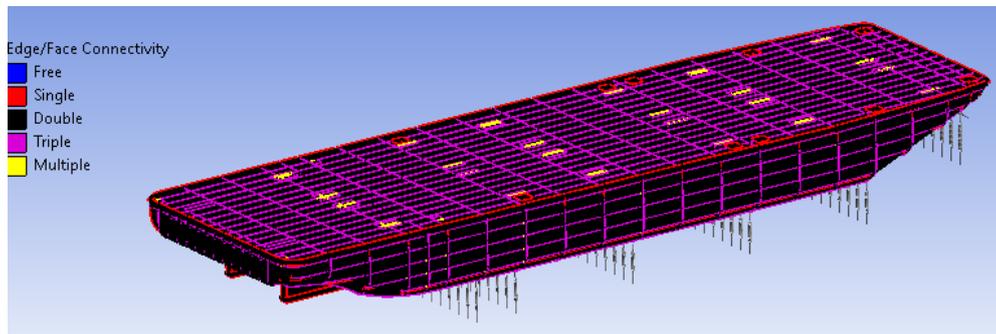
- No requiere topología compartida y ahorra tiempo para realizar conexiones.
- Maneja las intersecciones automáticamente.
- Tiene la capacidad para controlar el orden de conexión.
- Mejora la calidad y el tiempo en el mallado.

#### 2.4.1.1 Opciones de conexión

El comando batch connection permite ingresar una tolerancia, lo que significa que realizará todas las conexiones de forma automática en el radio preestablecido.

- Free to free: conecta solo los bordes no conectados en el alcance.
- Free to all: conectado solo bordes no conectados al resto de las entidades (bordes o caras) en el alcance.
- All to all: Conecta todas las entidades posibles (bordes o caras) al alcance.

Luego de implementar la combinación de los comandos se visualizó el orden de conexiones usando la herramienta “connectivity”, como se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8 Grado de conexiones**

[Fuente: Propia]

#### **2.4.1.2 Tamaño de malla**

La sociedad (DNV, Finite Element Analysis) menciona que el tamaño de malla no debe superar los 50 [mm], con la finalidad de obtener resultados más confiables y también se debe satisfacer los siguientes requisitos.

Un elemento entre cada refuerzo longitudinal.

Un elemento entre cada refuerzo en los mamparos transversales.

Tres elementos en el alma del refuerzo más pequeño.

En general, es aceptable un tamaño de malla igual a la distancia entre refuerzos.

### **2.5 Condiciones de Contorno**

Para un análisis estructural por MEF se siguieron las recomendaciones dadas por la sociedad (DNV, Finite Element Analysis).

#### **2.5.1 Resortes**

Los resortes son conexiones que en un análisis estructural de forma global permiten establecer condiciones de contorno y evitar problemas de singularidad. De acuerdo con la regla, estos soportes deben ser ubicados en estructuras con mayor rigidez como son los mamparos. Además, para corroborar el equilibrio estático, los resortes no deberían desarrollar fuerzas totales de desbalance mayores al 1% del

desplazamiento total de la embarcación, (E.D. Wang, J.S. Bone, . M. Ma, & A. Dinovitzer, 2019). Para la conexión de los resortes, en el programa se debe emplear la opción de “body -ground” lo que representa que un extremo conecta al modelo y el otro esta de forma fija. Finalmente, para estimar su rigidez se empleó la ecuación dada por (Tenorio, 2015) la cual fue usada en un análisis global de una barcaza fluvial.

$$k = \frac{A_s}{L} \left( \frac{E}{1 + \nu} \right) \quad (2.1)$$

Donde

$E$ : Modulo de Young del material [Pa]

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

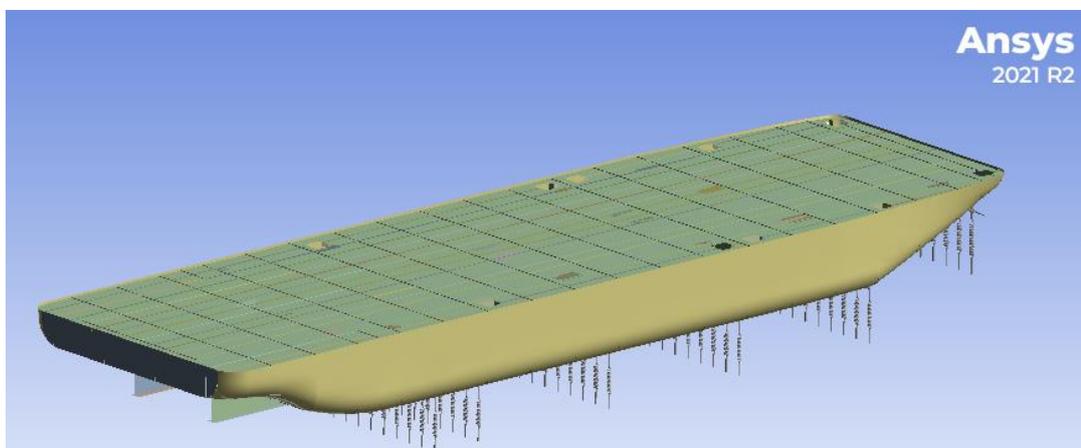
$L$ : Distancia entre mamparos [m]

$A_s$ : Area del refuerzo dependiendo de la dirección del resorte [m<sup>2</sup>]

$$A_s = (B, T) \times t \quad (2.2)$$

$B, T$ : Manga y calado respectivamente [m]

$t$ : Espesor [mm]



**Figura 2.9 Resortes verticales y horizontales en los mamparos**

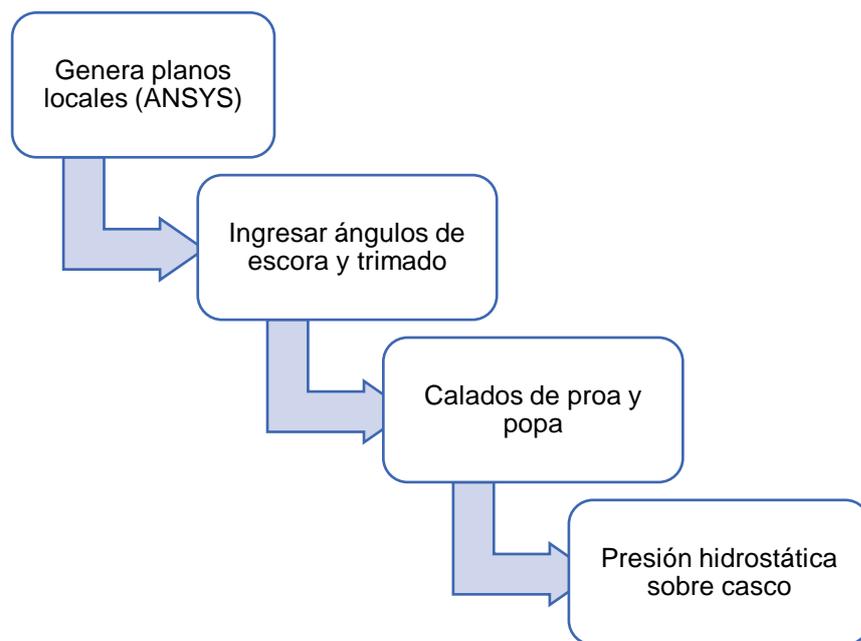
[FUENTE: Propia]

## 2.6 Simulación de cargas sobre la barcaza

### 2.6.1 Presión Hidrostática

En la mayoría de los análisis estructurales de una embarcación se considera la presión hidrostática al nivel calado. Para este proyecto, se aplicaron cargas asimétricas debido a la posición de los camiones en la barcaza, originando efectos torsionales, por lo que se deben considerar ángulos de trimado y escora.

En la Figura 2.10 se presenta la forma de aplicación de la presión hidrostática no uniforme.



**Figura 2.10 Esquema de presión rotada**

Las ecuaciones que se utilizaron para estimar el ángulo de trimado y escora (Lewis, 1988) fueron las siguientes:

Ángulo de trimado

$$\theta_t = \frac{12\Delta \times LCG}{\gamma BL^3} \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta$ =Desplazamiento [t]

$LCG$  =posición de centro de gravedad longitudinalmente [m]

$\gamma$  =gravedad específica [t/m<sup>3</sup>]

$B$  =Manga [m]

$L$  =Eslora [m]

Ángulo de escora

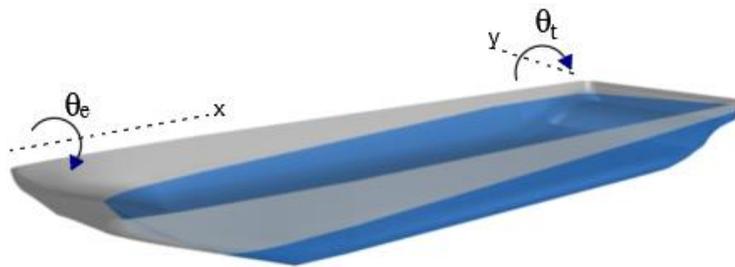
$$\theta_e = \frac{\delta W \times d}{\Delta GM_t} \quad (2.4)$$

Donde:

$GM_t$  =Altura metacéntrica transversal [m]

$\delta W$  =peso movable [t]

$d$  =distancia transversal desde crujía hasta el CG del peso trasladado [m]



**Figura 2.11 Efecto combinado de trimado y escora**

[FUENTE: Propia]

En la Tabla 2.1 se presenta la variación de las componentes del ángulo de inclinación, dependiendo de cada condición.

**Tabla 2.1 Rotación de planos locales**

[FUENTE: Propia]

	$\theta_x$ [°]	$\theta_y$ [°]	$T_{medio}$ [m]
1ra condición	-0.33	-	1.63
2da condición	-0.03	1.20	1.69
3ra condición	-0.31	-	1.75

### 2.6.2 Presión por influencia de olas

La presión por la influencia de olas que actúa sobre la barcaza se realizó combinando la ecuación (2.5), que considera el perfil de ola y el trimado de la embarcación. La influencia por olas fue modelada de tal forma que se consideró el caso más crítico descrito por (DNV, Hull structural design ships with length less than 100 meters , 2021), en Hogging, es decir la cubierta en tensión.

En donde el origen del sistema de referencia este situado en la popa.

$$z = T + \left(\frac{L}{2} - x\right) \sin(\alpha) - \xi \cos(kx) \quad (2.5)$$

Donde

$z$  =Columna de agua [m]

$T$ =Calado medio [m]

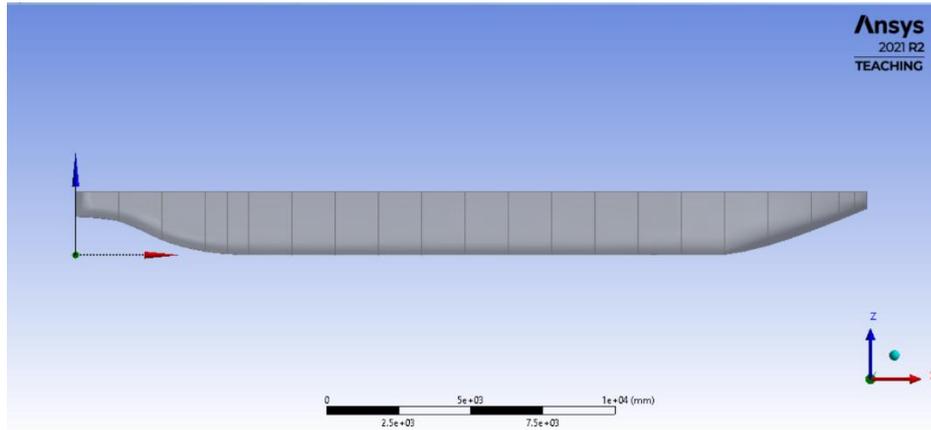
$L$  =Eslora [m]

$\zeta$  =Altura de ola [m]

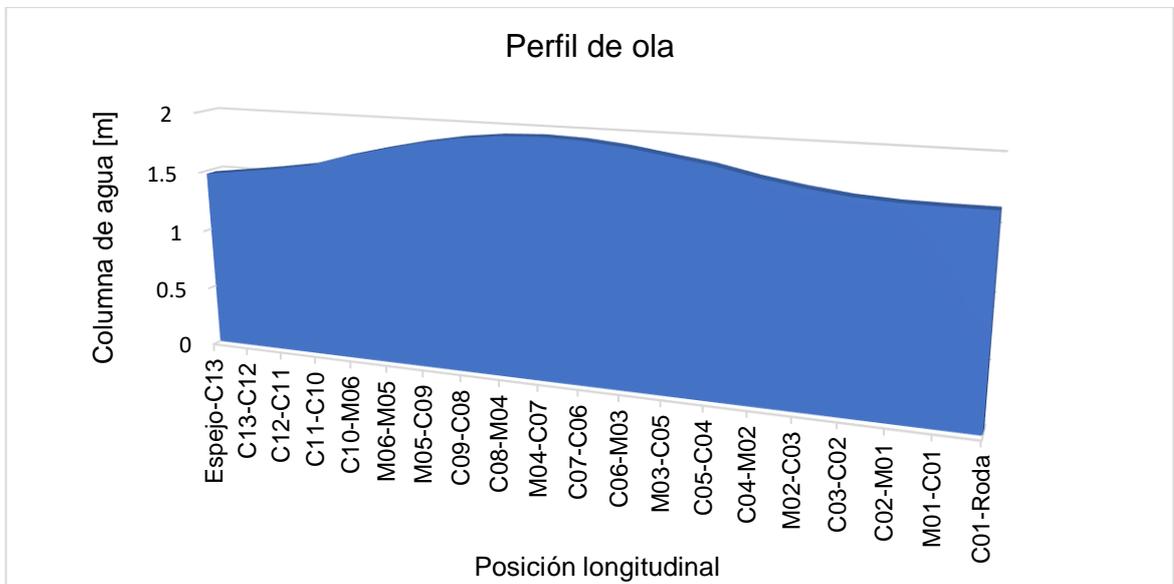
$\alpha$  =Trimado [°]

Por otro lado, para considerar la altura de la ola se tomó el valor del apartado de aguas protegidas, (DNV, Hull structural design ships with length less than 100 meters , 2021),que debe ser 1 [kN/m<sup>2</sup>], lo que equivale aproximadamente 0.1 [m] de columna de agua, sin embargo, para considerar una condición extrema se consideró 0.2 [m]. Cabe indicar que los momentos flectores de mayor magnitud en la estructura de un buque se generan cuando la longitud de ola es igual a la eslora de la embarcación (Shama, Rational structural design of Nile barges, 2019)

Como en el módulo de ANSYS STRUCTURAL no es posible modelar la presión hidrostática producida por una ola, fue necesario dividir el casco en segmentos para simular el perfil de ola, ingresando en cada división una presión tal y como se muestra en la Figura 2.12 y Figura 2.13. (Terranova, 2020)



**Figura 2.12 Paneles de casco**  
[FUENTE: Propia]

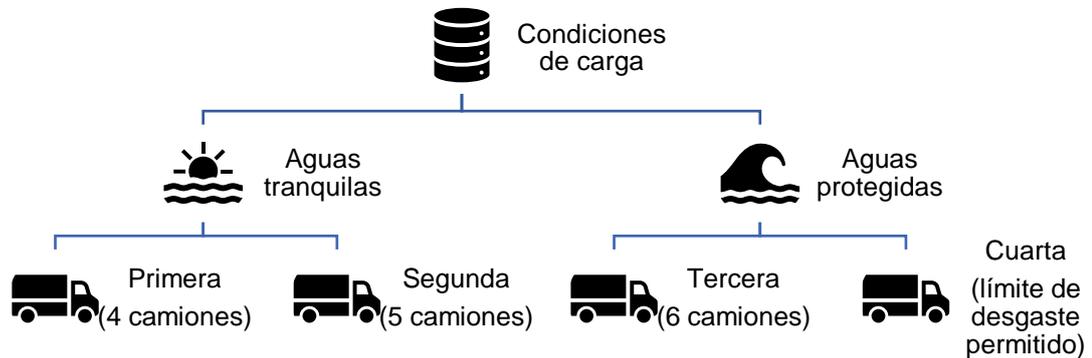


**Figura 2.13 Perfil de Ola**  
[FUENTE: Propia]

### 2.6.3 Condiciones de carga

Dado que la barcaza está destinada al transporte de camiones, el número y las posiciones de los mismos, exige implementar varias condiciones de carga. De las cuales, se estableció la condición en aguas tranquilas que ocurre cuando la barcaza está cargando en muelle, y, por otro lado, en aguas protegidas con una leve interacción de olas de baja amplitud. Además, se destaca la implementación de una

condición real que incluye un límite de reducción de espesor por corrosión que exija cambio de estructura (Lloyd's Register, 2021).



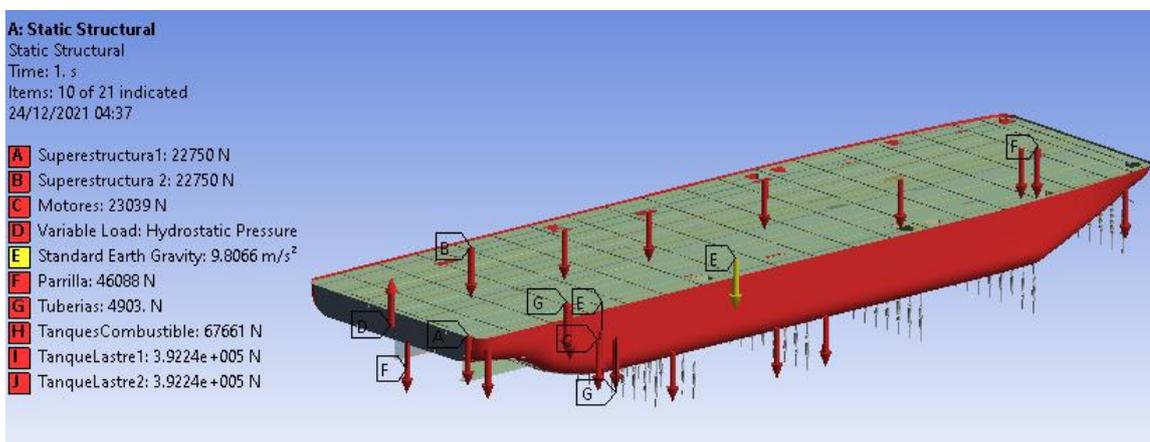
**Figura 2.14 Condiciones de carga**

[FUENTE: propia]

### 2.6.3.1 Carga estática

Para la carga estática es necesario incluir todas las cargas de la embarcación. Entre ellas están, el peso propio de las estructuras de acero incluyendo superestructura, peso de motores, tanques de combustible y lastre, tal como se puede observar en detalle en el

APÉNDICE B.



**Figura 2.15 Resumen de carga estática**

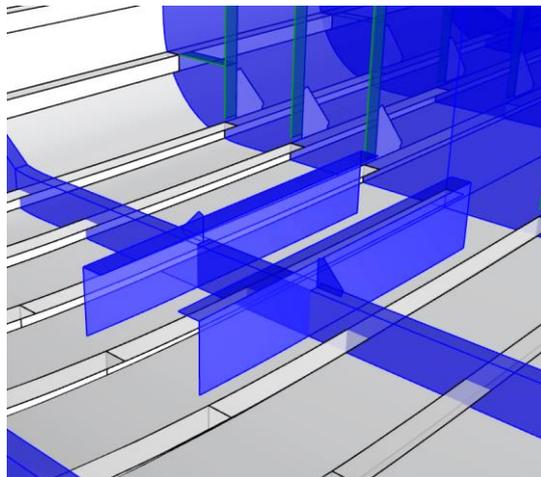
[FUENTE: Propia]

#### **2.6.3.1.1 Peso estructural**

Para considerar el peso propio de los elementos estructurales se utilizó el comando “standard gravity”, ver en la Figura F.1.

#### **2.6.3.1.2 Motores**

La carga de los motores es de 1.2 t para cada uno, y fue aplicada sobre una superficie que simula las bases del motor de la barcaza.



**Figura 2.16 Modelado de bases de motor**  
[FUENTE: Propia]

#### **2.6.3.1.3 Parrilla y Superestructura**

Para aplicar la carga de la parrilla se creó una plancha en el extremo de la proa, en el que se colocó el peso de 4,7 t. Por otro lado, el peso de la superestructura es de 4,6 t y se aplicaron sobre cuatro planchas que simulan a los pilares que soportan a la caseta.

#### **2.6.3.1.4 Tuberías**

Se estimó el centro de gravedad longitudinal del sistema de tuberías usando los planos constructivos y se aplicó la carga de forma distribuida sobre el compartimento localizado entre el mamparo 04 y 05.

### 2.6.3.1.5 Tanques

Para aplicar el peso de los líquidos de los tanques de combustible y lastre se dividió la parte del fondo del casco entre mamparos, y allí se aplicó la carga de forma distribuida.

### 2.6.3.2 Carga Rodante

La estimación de la carga rodante se realizó mediante formulaciones dadas por la regla clasificadora DNV Parte 3 Capítulo 10 denominada "Wheel load". Un factor para la estimación fue el área de contacto entre las ruedas del camión y la cubierta principal de la barcaza, la cual se modeló mediante un rectángulo. El área de cada rueda dio un valor de  $0.17 \text{ m}^2$  considerando que dos tercios de la carga total del camión está en la parte posterior y el resto en la parte delantera, como se observa en la Figura 2.17.

$$P = \frac{Q}{n_o a_1 b_1} (g + a_z) 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (2.6)$$

Donde:

$Q$  =carga máxima por eje en t

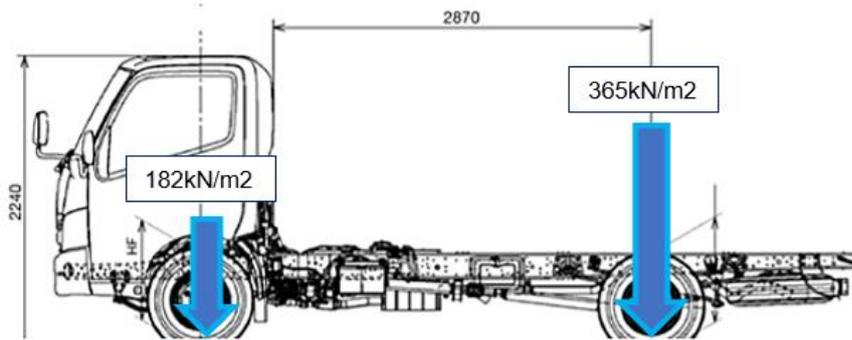
$n_o$ =número de ruedas

$a_1$ =longitud en x de área del contacto de la rueda y cubierta [mm]

$b_1$ = longitud en x de área del contacto de la rueda y cubierta [mm]

$g$ = longitud en x de área del contacto de la rueda y cubierta [mm]

$a_z$ = aceleración vertical  $9.8 \text{ m/s}^2$



**Figura 2.17 Modelado de Carga Rodante**

[FUENTE: Propia]

## 2.7 Zonas de sobredimensionamiento

En un análisis estructural se debe tener en consideración la resistencia y rigidez del material de construcción. Para los esfuerzos permisibles se consideró (DNV, Finite Element Analysis), del cual se obtuvieron los siguientes valores de 235, 130, 235 MPa son  $Y_1, Y_2, Y_3$  respectivamente. Por otro lado, para las deflexiones máximas (Lloyd's Register, 2021) como se observa en la Figura 2.18

Esfuerzo Nomal =  $Y_1$

Esfuerzo Cortante =  $Y_2$

Esfuerzo Equivalente =  $Y_3$

**Table 1.8.6 Plate deformation limits**

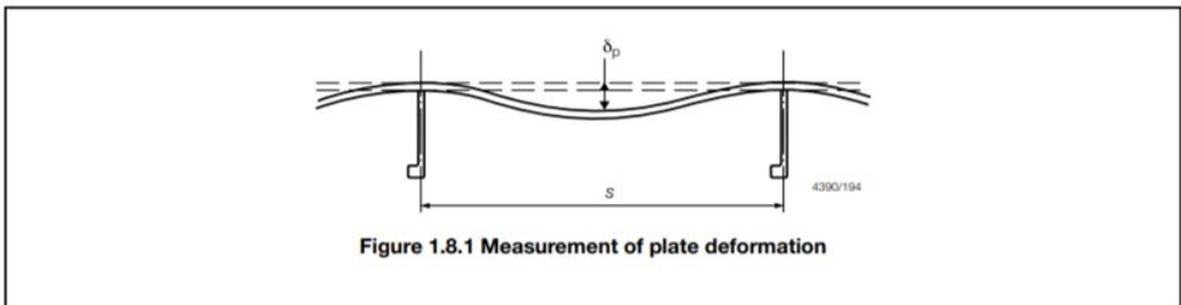
Position	$s/t$	$\delta_p/s$
in $0,6L$ amidship	$\leq 80$	1/100
	$> 80$	1/75
Remainder	all	1/50

**where**

$s$  = stiffener spacing, in mm

$t$  = plating thickness, in mm

$\delta_p$  = panel deflection, in mm

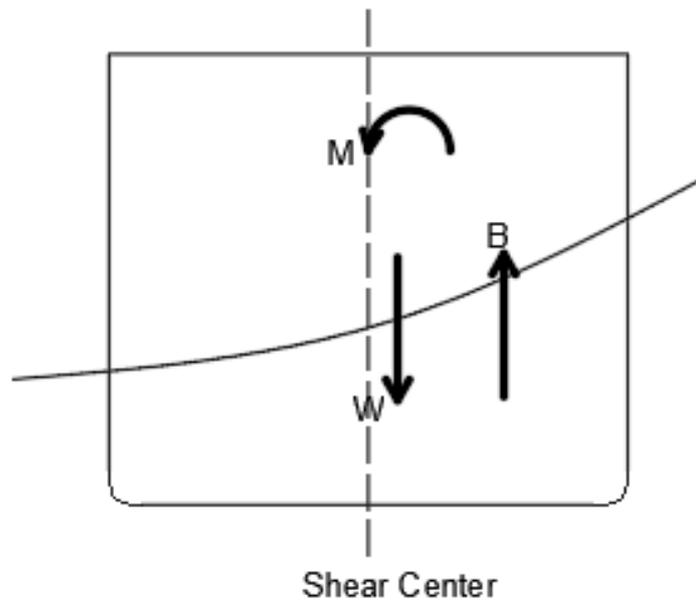


**Figura 2.18 Límite de deflexión en planchaje**  
(Lloyd's Register, 2021)

## 2.8 Correlación de efecto torsor empleando DNV

### 2.8.1 Momento Torsor por Carga Asimétrica

El efecto de torsión en los barcos se da cuando las fuerzas aplicadas de carga no atraviesan la línea de crujía. De acuerdo a este proyecto se analizará torsión debido a las condiciones de cargas asimétricas en la cubierta de la embarcación.



**Figura 2.19 Momento Torsor por Carga Asimétrica**  
**[FUENTE: Propia]**

### 2.8.2 Momento Torsor dado por DNV

Para estimar el momento Torsor por olas se usa la formulación dada por la (DNV, Hull structural design ships with length less than 100 meters , 2021):

$$M_{wt} = f_p(M_{wt1} + M_{wt2}) \quad (2.7)$$

Donde:

$$M_{wt1} = 0.4f_{t1} \cdot C_w \sqrt{L/T_{Lc}} B^2 \cdot D \cdot C_B \quad (2.8)$$

$$M_{wt1} = 0.22f_{t2} \cdot C_w \cdot L \cdot B \cdot C_B \quad (2.9)$$

$$f_{t1} = |\sin(360x/L)|$$

$$f_{t2} = |\sin^2(180x/L)|$$

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados numéricos de los esfuerzos y deflexiones de la barcaza. Para ello se consideraron criterios de aceptación de resultados (Shama, Rational structural design of Nile barges, 2019) ,por lo que fue necesario calcular de forma analítica la respuesta primaria, secundaria y terciaria para establecer el nivel de contribución sobre la respuesta estructural obtenida por el MEF.

Para el análisis de los resultados se realizó un resumen de los puntos con mayor concentración de esfuerzos en las cuatro condiciones de carga. Estos valores fueron comparados con el esfuerzo permisible de Von Mises de acuerdo a (DNV, Finite Element Analysis). Además, se realizó las gráficas de distribución de deflexiones en la zona de cubierta a lo largo de la barcaza, en donde se encuentran ubicadas las llantas de los camiones; y, en la parte de sala de máquinas se graficó la distribución de deflexión a lo largo de la quilla, los cuales fueron comparados con la deflexión permisible dada por (Lloyd's Register, 2021).

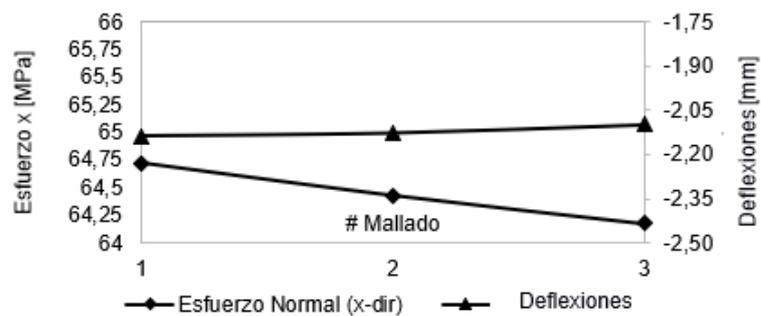
### 3.1 Criterios de aceptación de Resultados

En un análisis global de una embarcación es necesario desarrollar criterios que permitan la validación de resultados debido a que se tiene demasiada información. Por lo que, se debe validar una convergencia de malla, y el equilibrio estático para todas las condiciones de carga.

#### 3.1.1 Convergencia de Malla

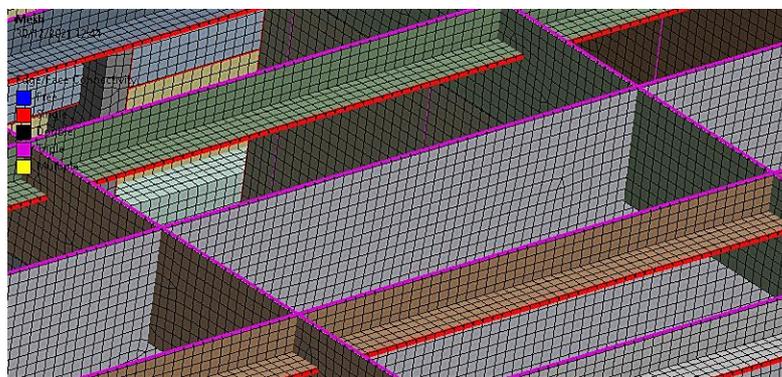
Para la convergencia de malla se utilizó tres tamaños diferentes de elementos como se observa en la Tabla C.1. De acuerdo con la Figura 3.1 la variación de esfuerzos normales y deflexiones son relativamente bajas, debido a que disminuyen 0.29 MPa y 0.01mm respectivamente. Por lo tanto, se decidió emplear el tamaño de malla de 40 mm para todas las condiciones del proyecto.

A continuación, en la Figura 3.1, ya se observa que la malla seleccionada requirió un tiempo de ejecución de resultados de 12 minutos 30 segundos y un uso de memoria de 9.19 GB, además su calidad de malla es aceptable, dado que se encuentra próximo a 1, lo cual indica que la mayoría de los elementos son cuadrados dado que logran capturar la curvatura en la solución a lo largo de bordes y caras del elemento.



**Figura 3.1 Convergencia de malla 2da condición**  
[FUENTE: Propia]

Además, se cumple con el tamaño de la malla ya que se es menor al recomendado con la regla de (DNV, Finite Element Analysis) cómo se observa en la Figura 3.2.



**Figura 3.2 Tamaño de malla 40 mm**  
[FUENTE: Propia]

### 3.1.2 Condiciones de Contorno

De la Tabla 3.1 se observa que las cuatro condiciones de carga se encuentran en equilibrio estático, debido a que la suma de las fuerzas de desbalance que desarrollan los resortes es menor al 1% del desplazamiento total como lo menciona (E.D. Wang, J.S. Bone, . M. Ma, & A. Dinovitzer, 2019), esto quiere decir que el peso de la embarcación se contrarresta con la boyantez.

**Tabla 3.1 Resumen Fuerzas totales de desbalance en cada condición**

[FUENTE: Propia]

	[N]	%
Primera Cond.	12236,39	0,42
Segunda Cond.	24791,8	0,83
Tercera y Cuarta Cond.	8136,81	0,26

## 3.2 Resultados

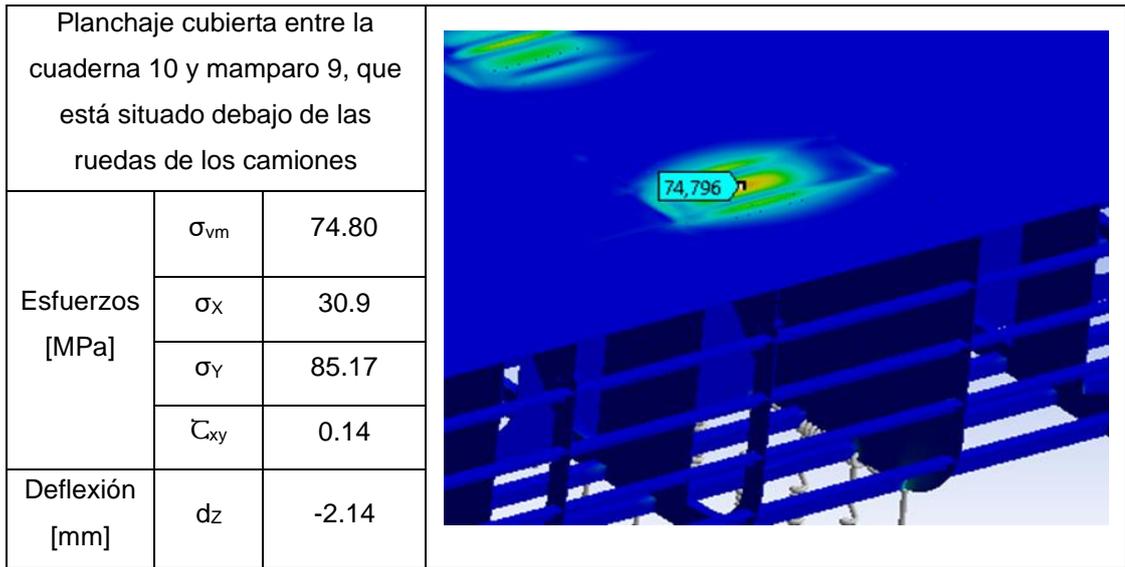
Para la obtención de los máximos esfuerzos, se consideró como primer paso el esfuerzo de Von Mises, puesto que es proporcional a la energía de distorsión en un punto particular del sistema, lo que lo hace útil para determinar fallas en materiales dúctiles.

### 3.2.1 Distribución de esfuerzos

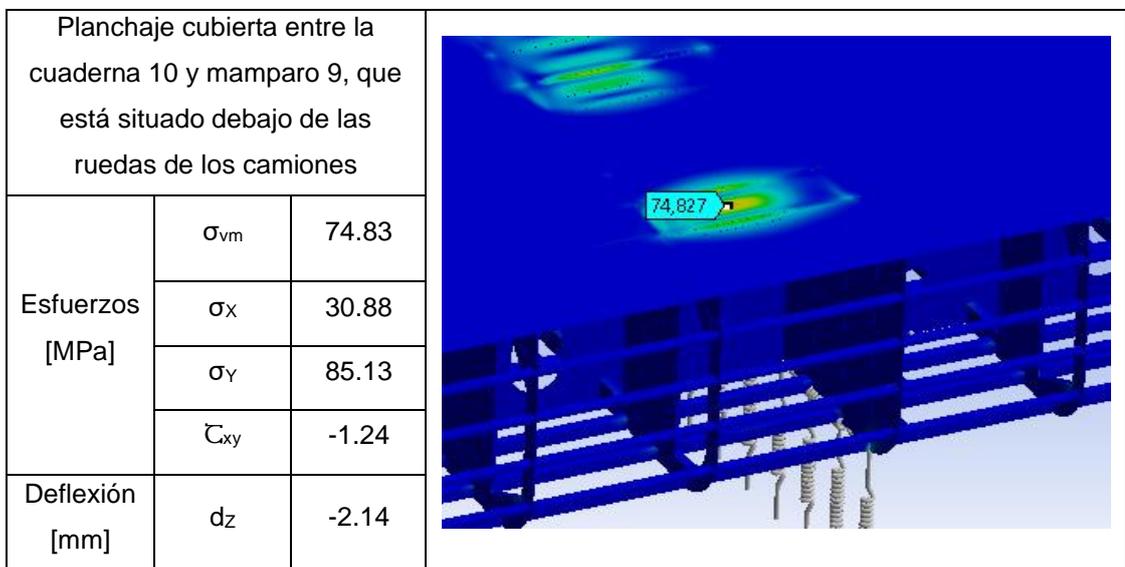
#### 3.2.1.1 Barcaza flotando en aguas tranquilas

##### 3.2.1.1.1 Primera y Segunda condición – 4,5 camiones

Del APÉNDICE D se seleccionó los nodos donde la barcaza presentó mayor concentración de esfuerzos de Von Mises.



**Figura 3.3** Respuesta en sección media en planchaje en la primera condición  
[FUENTE: propia]



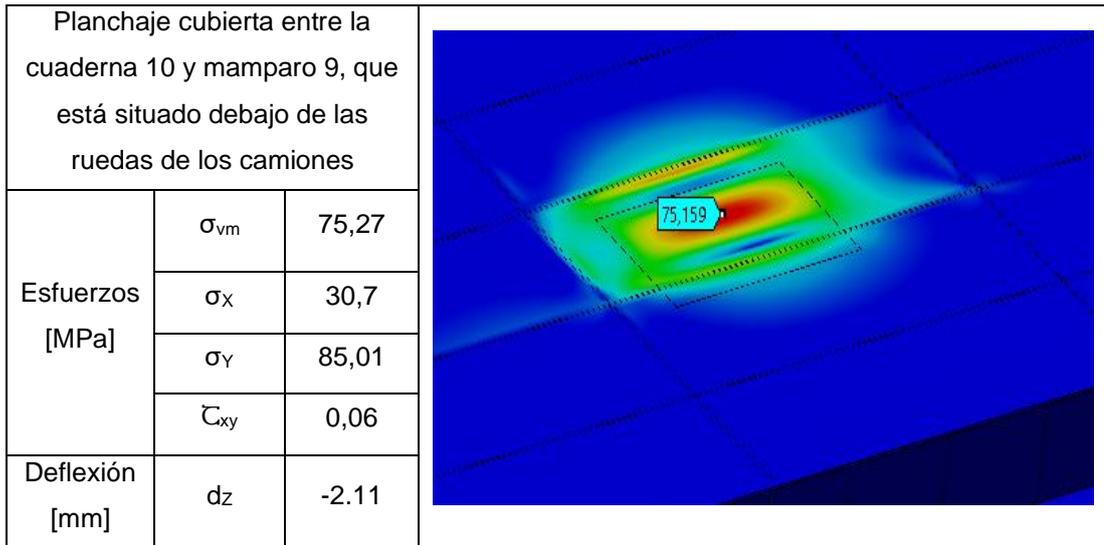
**Figura 3.4** Respuesta en sección media en planchaje en la segunda condición  
[FUENTE: propia]

### 3.2.1.2 Barcaza en aguas protegidas

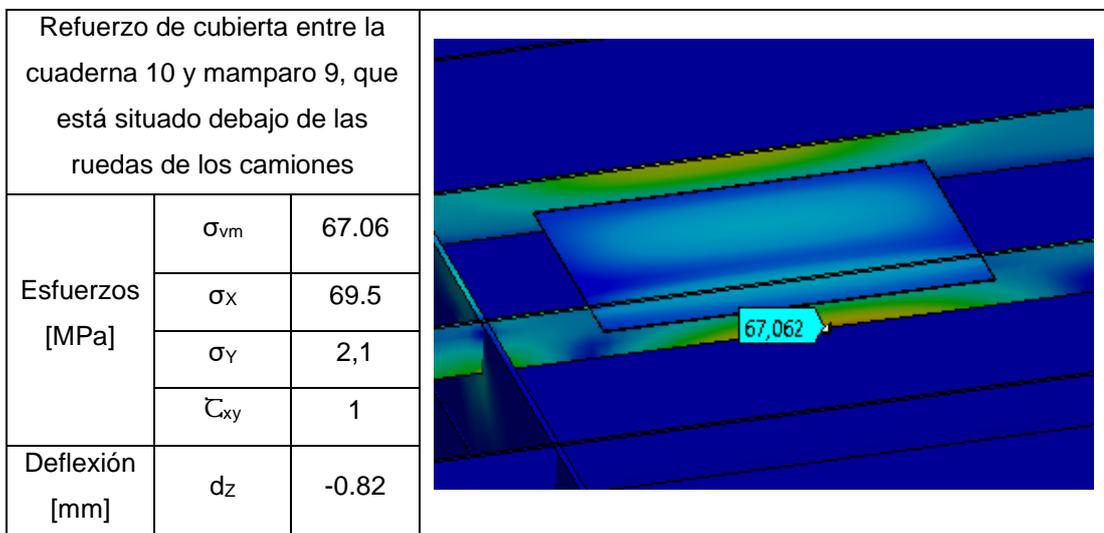
Para el caso de aguas protegidas en la tercera y cuarta condición se incluye la influencia de olas en quebranto.

#### 3.2.1.2.1 Tercera Condición (6 camiones)

Del APÉNDICE D se seleccionó los nodos donde la barcaza presenta la mayor concentración de esfuerzos de Von Mises.



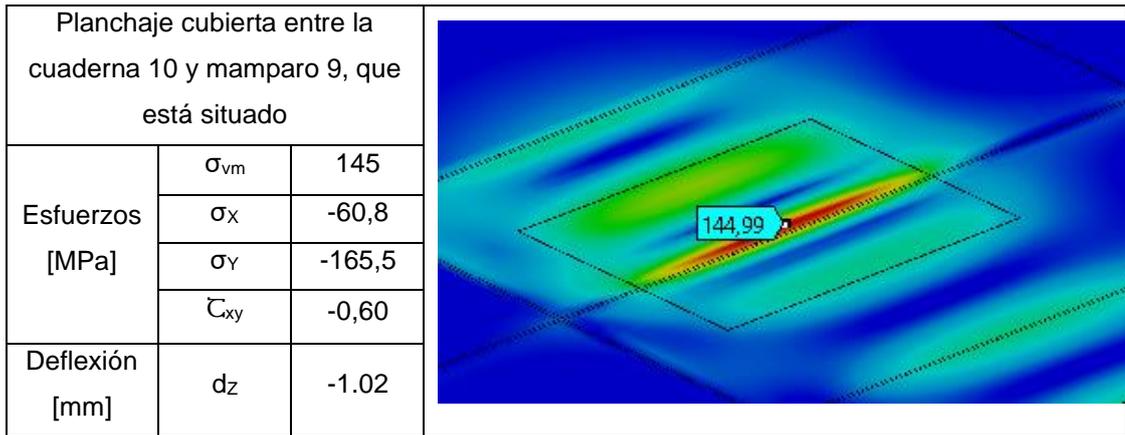
**Figura 3.5 Respuesta máxima en la plancha de cubierta de sección media**  
[FUENTE: propia]



**Figura 3.6 Respuesta máxima en el refuerzo longitudinal de cubierta**  
[FUENTE: propia]

### 3.2.1.2.2 Cuarta Condición (Limite de desgaste de espesores y sin esfuerzos extras)

Del APÉNDICE D se seleccionó, los nodos donde la barcaza presenta mayor concentración de esfuerzos de Von Mises. El límite de desgaste de espesor por corrosión va de acuerdo con lo establecido por (Lloyd's Register, 2021), que se encuentran en detalle en el APÉNDICE A.



**Figura 3.7 Respuesta en tercera condición sobre plancha de sección media**  
 [FUENTE: propia]

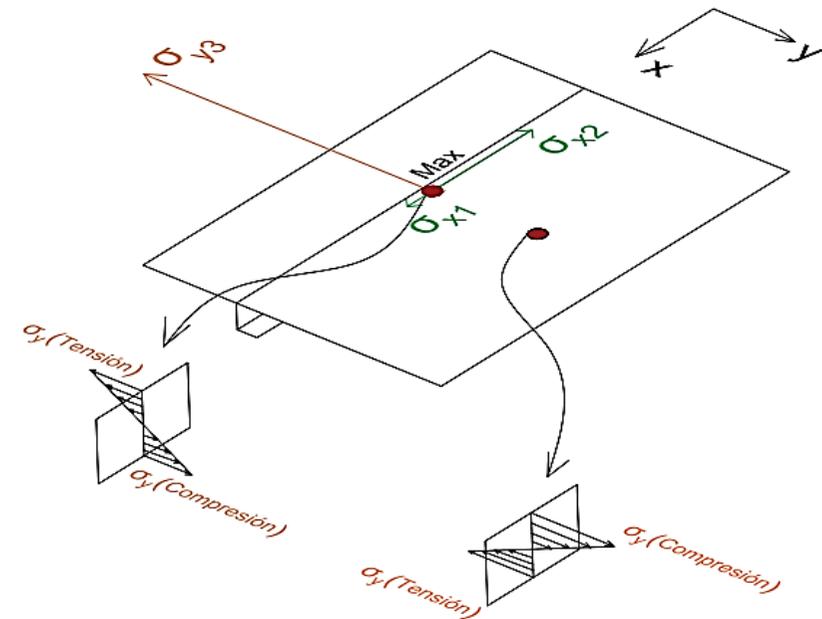
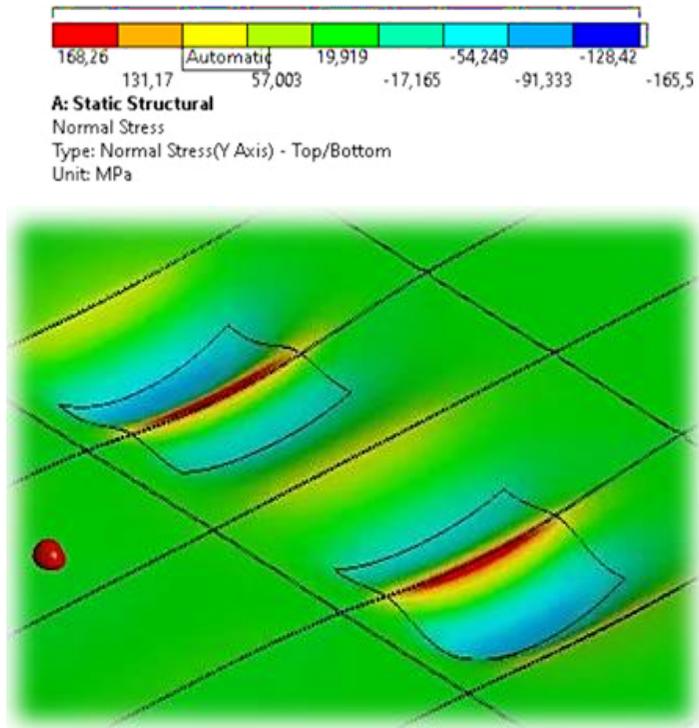
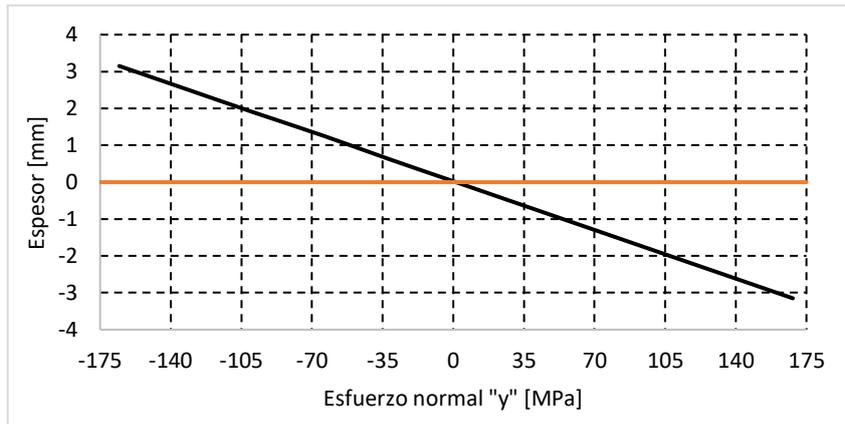


Figura 3.8 Descomposición de esfuerzos principales en el punto máximo  
 [FUENTE: Propia]



**Figura 3.9 Distribución de esfuerzo “y” en el punto máximo**  
**[FUENTE: Propia]**

### 3.2.2 Distribución de deflexiones

#### 3.2.2.1 Zona de cubierta (tercera condición)

En la Figura 3.10 se realizó una comparación entre la tercera y cuarta condición, donde se observó que la máxima deflexión ocurre en las llantas posteriores del 3er y 4to camión.

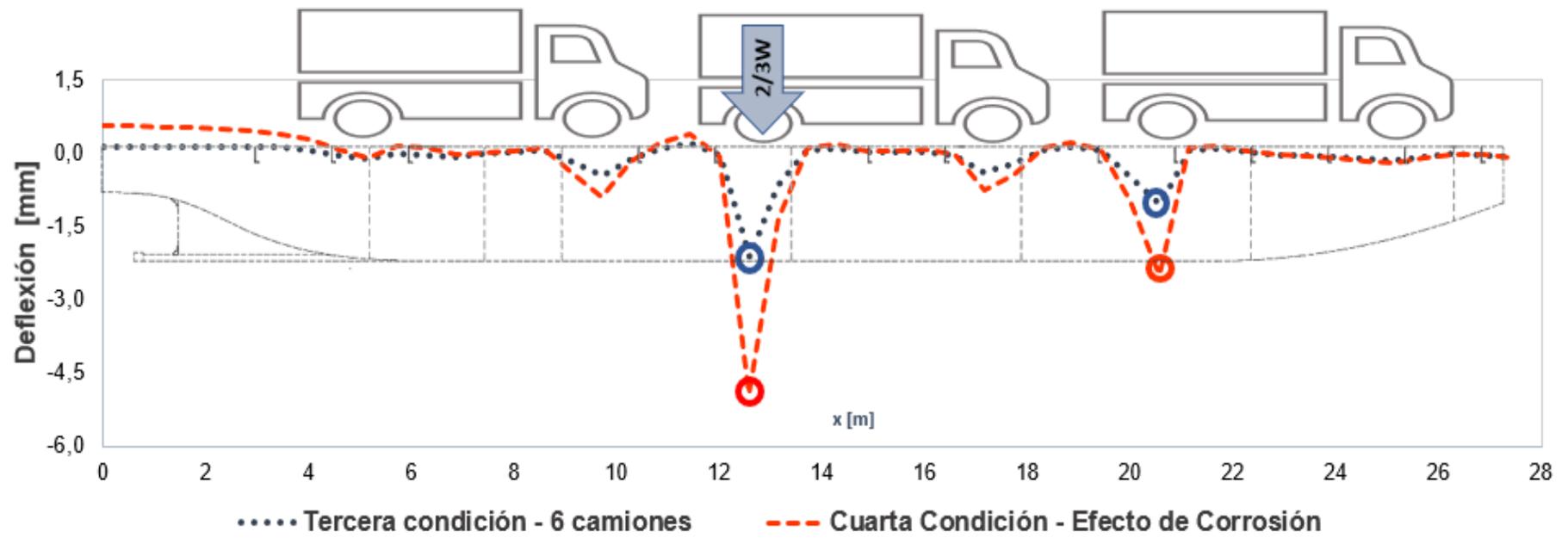


Figura 3.10 Deflexión de cubierta en tercera y cuarta condición  
[FUENTE: Propia]

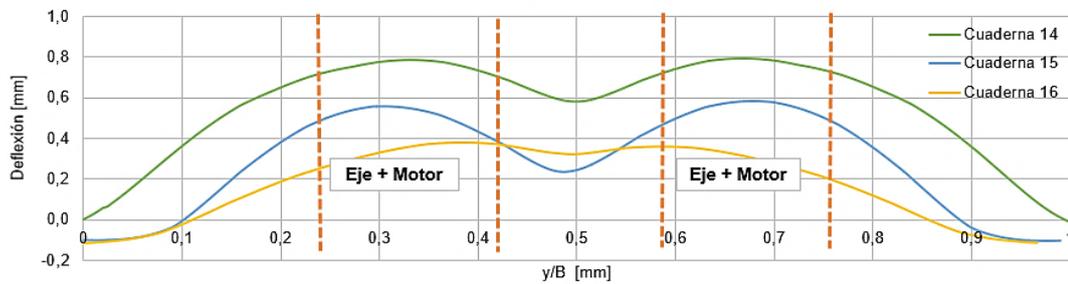
**Tabla 3.2 Comparación de valores máximos de deflexión en la 3ra y 4ta condición**

[FUENTE: propia]

Posición [m]	Deflexión z [mm] Tercera Condición	Deflexión z [mm] Cuarta Condición	Lloyd Rule Def. Permitida
12,57	-2.11	-4,91	5 mm
20,57	-1,06	-2.49	

### 3.2.2.2 Sala de máquinas (tercera condición)

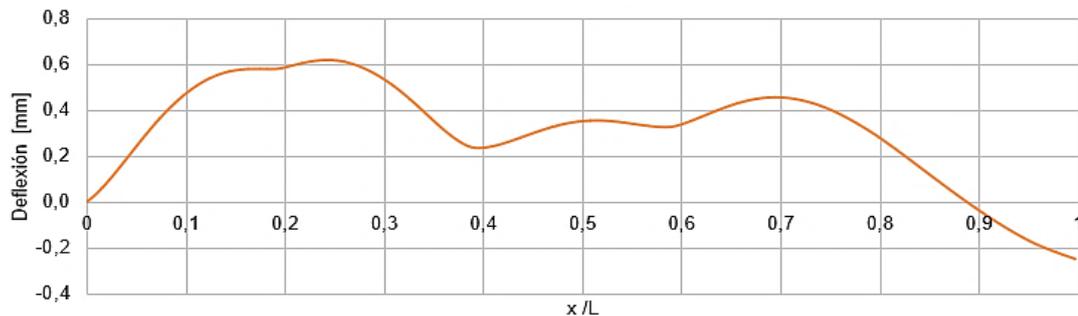
En esta sección se evaluó la distribución de deflexiones en la sala de máquina, tomando en consideración las varengas de las cuadernas 14,15 y 16, obteniendo un valor máximo de 0.8 mm.



**Figura 3.11 Distribución de deflexión en las varengas de la sala de maquinas**

[FUENTE: Propia]

Luego se obtuvo la distribución de deflexión a lo largo de la quilla, en el cual, el cero corresponde al mamparo donde inicia la sala de máquinas y el numero uno al espejo.



**Figura 3.12 Distribución de deflexión en sala de máquinas a lo largo de la quilla**

[FUENTE: Propia]

### 3.2.2.3 Zona de modificación estructural

En esta sección, se evaluó la respuesta estructural en la cubierta de la barcaza luego de haber extraído los refuerzos extras, Figura 1.2.

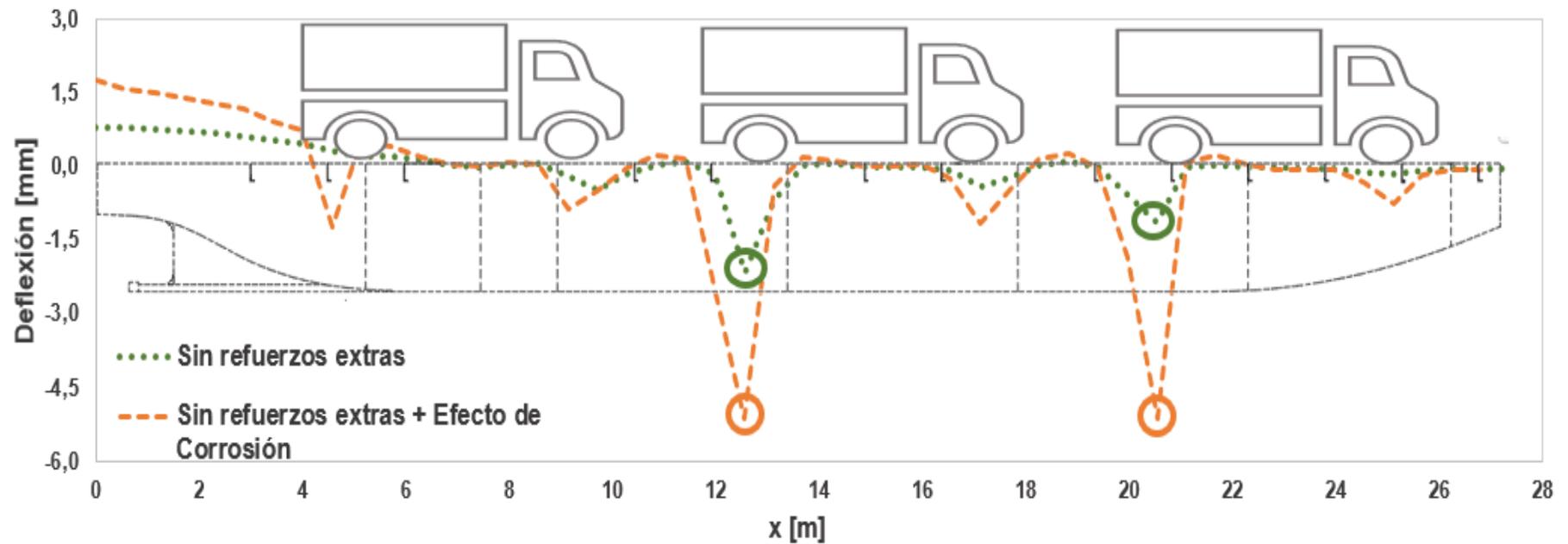


Figura 3.13 Deflexión en cubierta sin esfuerzos extras en cuadernas

[FUENTE: Propia]

**Tabla 3.3 Comparación de valores máximos de considerando modificación estructural**

[FUENTE: propia]

Posición	Deflexión z [mm] 3ra condición (sin refuerzos extras)	Deflexión z [mm] 4ra condición (sin refuerzos extras + corrosión)	Lloyd Rule Def. Permitida
12,57	-2.15	-5.19	5 mm
20,57	-1,13	-5.19	

### 3.3 Análisis de Resultados de Esfuerzos y Deflexiones

Dado que se obtuvo una gran cantidad de resultados fue necesario validar el orden de magnitud de la respuesta del efecto primario, y a su vez, verificar su grado de contribución. Por esta razón, se comparó los esfuerzos normales obtenidos con el método de viga-buque y los resultados del MEF, donde se obtuvo una diferencia porcentual promedio de 29.4%, lo que permite comprobar que los resultados obtenidos tienen sentido. Por otro lado, se cuantificó la contribución de la respuesta primaria, donde se obtuvo un esfuerzo normal máximo de -25 MPa, afirmándose que el efecto primario para todas las condiciones resultó despreciable, lo cual tiene sentido dado que un barco de con eslora menor a 30 metros es pequeño, y por ello se esperan momentos de flexión relativamente bajos, APÉNDICE C.

Por otro lado, se validó el orden de magnitud del comportamiento secundario y terciario en la tercera condición de carga, además se cuantificó la contribución de estos sobre la respuesta estructural. Para ello, se consideró la zona de sección media, localizada en cubierta donde se aplica la carga rodante. En la validación de los efectos secundarios y terciarios, se comparó los esfuerzos normales entre el método analítico y el MEF, donde se obtuvieron diferencias porcentuales de 35% y 20.7 % respectivamente, lo que permite afirmar que los resultados obtenidos son consistentes. Luego, para evaluar la contribución de esfuerzos principales en la resistencia, se analizó parte del refuerzo de cubierta y el centro de la plancha. Por lo que, de la Figura 3.6 se obtuvo que la mayor contribución de esfuerzos ocurre en dirección “x”, dado que la carga esta aplicada de forma lateral sobre el refuerzo, lo que lleva al elemento a fletarse en esa dirección, evidenciándose así el efecto

secundario. Por otro lado, cuando se considera un punto en el centro de la plancha, Figura 3.5, se obtiene que la mayor contribución de esfuerzo se da dirección “y”, debido a que, el lado más corto del panel está en esa dirección, corroborándose la influencia del comportamiento terciario. En definitiva, si se toma el conjunto del arreglo estructural de cubierta, los niveles de esfuerzos tanto secundario y terciario poseen el mismo orden de magnitud, dando como resultado una concentración de esfuerzos muy localizada.

Luego de validar los resultados en las tres primeras condiciones de carga con cuatro, cinco y seis camiones a bordo, se obtuvo que los esfuerzos máximos de Von Mises varían con 0.5 MPa entre condiciones. Por lo que se puede afirmar que la máxima respuesta estructural ocurre en cubierta de forma localizada, en la zona de aplicación de carga rodante. De manera que para la tercera condición se obtuvo un esfuerzo de 75.27 MPa, por lo que se puede afirmar que la estructura es segura, ya que la resistencia estructural se encuentra por debajo del valor permisible dado por la regla clasificadora (235 MPa). Con respecto a la condición de carga con cinco camiones a bordo, se obtuvo la correlación entre el momento torsor producido por olas (DNV), y por carga asimétrica, en el cual, se evidenció que este efecto resulta despreciable dado que el orden de magnitud es menor que el valor referencial, ver APÉNDICE C.

Una vez que se analizó las tres primeras condiciones de carga, se determinó que las máximas repuestas de resistencia ocurren de manera localizada. Esto sucede específicamente en las llantas posteriores de los camiones debido a que en esa posición se encuentra concentrada dos tercios de la carga total de cada uno (10 t). Es por ello que se desarrolló la Tabla E.4, la cual muestra la eficiencia cuando se coloca el peso de las llantas sobre mamparos, baos y refuerzos, donde se obtuvieron los siguientes valores, 62.19, 50.9, 75.17 MPa, respectivamente, de modo que se puede considerar el hecho de distribuir los camiones de tal forma que las llantas queden sobre bao. Finalmente, con los valores obtenidos se puede afirmar que si la barcaza tuviera la eslora suficiente podría soportar la adición de dos camiones sin problemas.

La condición de carga más extrema para la estructura fue la cuarta condición, que consideraba seis camiones a bordo, influencia de olas en quebranto, desgaste por corrosión entre el 25-30% y además se omitieron refuerzos extras de las cuadernas, Figura 3.10. De la condición mencionada, se obtuvo un esfuerzo máximo en “y” de 165 MPa, y para evidenciar que realmente se trataba de la condición crítica se comparó con la resistencia máxima de la tercera condición que fue de 85 MPa, obteniéndose un factor de 2 entre ellas. Además, para establecer la dirección del esfuerzo que presenta mayor contribución se analizó el punto máximo mostrado en la Figura 3.8. De la Figura 3.7, se obtuvo que el comportamiento terciario es mayor siendo 40% más que el esfuerzo en dirección x (combinación del esfuerzo primario y secundario). Los signos del esfuerzo en “y” del punto analizado indican que la parte superior de la cara de la plancha está en tensión y por ende la inferior en compresión, siendo consistente debido a que debajo del punto analizado se encuentra un refuerzo que aporta rigidez al panel, caso contrario con el punto del centro de la plancha donde las fibras de la cara superior estaban en compresión y el otro lado en tensión. Finalmente, con todo lo anterior descrito se mostró la importancia del comportamiento terciario cuando se aplica una reducción de espesores, esto se debe también a que en el esfuerzo máximo está relacionado inversamente está relacionado inversamente proporcional al espesor al cuadrado.

Como posible escenario se cuantificó el nivel de esfuerzo en una situación de encallamiento combinada con las variables de la condición más exigente y considerando 50 cm de pérdida de calado. Dada la forma y aplicación de la fuerza, se puede comparar con la condición de Quebranto, afirmándose que los elementos y el planchaje de fondo se encuentran en compresión dando origen a un posible pandeo. Sin embargo, la intensidad máxima de esfuerzo fue de 165 MPa. Concluyendo, que en este escenario la estructura no fallaría dado que se encuentra por debajo del valor permisible.

Luego de examinar la rigidez completa de la respuesta estructural, y dado a que las intensidades de la resistencia ocurrieron en zonas locales se procedió a analizar la distribución de la deflexión en la cubierta entre la tercera y cuarta condición. Por lo que, de acuerdo, a la Tabla 3.2 se determinó que la cuarta condición presentó la

deflexión máxima en las llantas posteriores de los camiones en sección media de -4,91 mm, debido a que la carga está soportada únicamente por un panel. Además, en la Figura 3.13 se observó que la deflexión en las llantas de los camiones que están ubicados en el extremo de popa es menor en un 80% comparado con la deflexión máxima, debido a que está soportada por una pared de compartimentación y un bao, el cual aumenta su rigidez estructural. Finalmente, todas las deflexiones máximas locales se encuentran por debajo del valor permisible, dado que la deflexión en el planchaje no debe ser superior a 5 mm, valor referencial dado por el Surveyor at Lloyd's Register Juan Moreno.

Otra zona para analizar la rigidez estructural fue la sala de máquinas, dado que en ocasiones se suele tener deflexiones excesivas y pueden ser transmitidas al eje propulsor. En resumen, de la Figura 3.11 y Figura 3.12 se observó que las estructuras son bastante rígidas, debido a que las deflexiones no superan el milímetro y de acuerdo a (Lloyd's Register, 2021) el valor máximo de deflexión permitida en el planchaje es 5mm. Cabe mencionar que las deflexiones son positivas, esto se debe a la influencia de la presión hidropática dado que la embarcación está sentada. Con los máximos valores se puede descartar problema de cizallamiento en el eje propulsor a causa de la transmisión de grandes deflexiones.

Finalmente, se analizó el comportamiento de la rigidez en la condición más extrema, y a su vez se omitieron los refuerzos extras, Figura 3.13. Donde, se obtuvo una deflexión máxima de -5,19 mm, a pesar de que el valor está por encima en un 2% del permisible, muestra que estos refuerzos, no brindan la suficiente rigidez para mitigar las máximas deflexiones, debido a que llega hasta -4.91 mm. Por lo que, lo más eficiente sería distribuir correctamente la posición de las llantas de los camiones para que coincidan con baos y extraer los elementos adicionales.

En definitiva, después de analizar por completo la resistencia y rigidez en todas las condiciones de carga se puede establecer lo siguiente. Las dimensiones estructurales pueden ser optimizadas dado que únicamente se tienen máximas respuestas de esfuerzo y deflexión de forma localizada en la cubierta de carga,

dejando abierta la posibilidad que en un futuro se realice una optimización estructural de los paneles de cubierta.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo, se analizó la estructura completa de una barcaza en acero de 27 metros de eslora, en diferentes condiciones de carga empleando el método de Elementos Finitos. El modelo se lo desarrolló aplicando elementos planos de 4 nodos, usando el software ANSYS Workbench 2021 R2. Por otro lado, se implementaron condiciones de operación en aguas tranquilas y olas que incluyen cargas actuantes de tipo flexural y torsional. Finalmente, luego de analizar la respuesta estructural de la barcaza se puede concluir lo siguiente:

### 4.1 Conclusiones

Se logró modelar de manera adecuada la estructura global de la barcaza empleando elementos finitos. Las dimensiones del plano estructural fueron corroboradas con una visita técnica, y a partir de ello se aplicó un proceso combinado, generando las superficies en el programa Rhino e importándolo desde ANSYS R2 2021 para la implementación de cargas. Para la representación de pesos se definieron áreas de acuerdo al plano de distribución y luego se colocaron fuerzas distribuidas como lo indica el APÉNDICE A. La aplicación de carga rodante sobre cubierta se emplearon paneles de planchas con dimensiones del área de contacto recomendadas por la sociedad DNV; además se logró simular la condición de olas mediante la división longitudinal del casco en paneles. Por otro lado, para evitar problemas de singularidad en la solución, se emplearon resortes en cada condición de carga, los cuales desarrollaron fuerzas totales de desbalance menores al 1% del desplazamiento total de la embarcación. El tamaño de malla utilizado fue de 40 mm, valor aceptable de acuerdo a (DNV, Finite Element Analysis), lo que fue corroborado empleando tres tamaños de malla para garantizar la convergencia. Todo esto lleva a la conclusión que la discretización de la estructura produjo un modelo numérico adecuado para el trabajo propuesto.

Para identificar la condición crítica de la embarcación en diferentes formas de operación, se consideró la influencia del efecto de corrosión. Este desgaste se lo consideró de acuerdo al máximo permitido por una sociedad de clasificación antes de exigir cambio de planchaje. En la condición de carga con 6 camiones a bordo, cuando se analizó la respuesta con los espesores nominales de acuerdo al plano constructivo se obtuvo un factor de seguridad de 3.3; el máximo esfuerzo flexural se presentó en sección media, en una plancha de cubierta debajo de las llantas posteriores de los camiones. Luego de aplicar el desgaste por corrosión el factor de seguridad disminuyó a 1.6. Por lo que se puede concluir que es muy importante considerar el estado real de las dimensiones de los estructurales, dado que las embarcaciones están expuestas constantemente a un ambiente salino corrosivo.

La resistencia de la estructura se analizó aplicando la intensidad de esfuerzo de Von Mises. Se encontró que la condición de carga más exigente para la estructura fue en la que se cargaban seis camiones, en condición de navegación de olas; para este caso se incluyó el desgaste por corrosión y además se omitieron ciertos refuerzos verticales extras de las cuadernas, debido a que estos no se encontraban especificados en el plano constructivo. Del análisis global de todas las condiciones de carga, se observó que los máximos esfuerzos coinciden donde se asientan las llantas de los camiones. El máximo valor de intensidad de esfuerzo fue de 145 MPa, el cual está ubicado en la zona de cubierta en sección media, debajo de las llantas posteriores, esto se debe a que en este caso la carga esta soportada por un refuerzo, a diferencia de las otras llantas que coinciden con un bao o mamparo. Por otro lado, con respecto a la rigidez en esta ubicación la deflexión fue de 5.19 mm, la cual supera la máxima deflexión permitida por la regla clasificadora. Con el análisis de la respuesta estructural de forma analítica se obtuvo que el efecto primario de la estructura del buque dio como resultado un esfuerzo normal máximo de 29 MPa; dicho cálculo para los efectos secundario y terciario produjeron efectos de nivel similar entre sí. Por lo que se puede concluir que la estructura es confiable y que el efecto primario es muy pequeño, típico de embarcaciones de eslora menor, lo que resulta una respuesta estructural máxima de forma muy localizada.

De acuerdo a los resultados del análisis desarrollado, se obtuvieron valores relativamente bajos de esfuerzo y deflexión para todas las condiciones de carga, presentándose los esfuerzos máximos de manera localizada en la zona de cubierta por la carga rodante. Debido a esto se puede concluir que para buscar una posible reducción en peso de la estructura se podría realizar una optimización de un panel reforzado tomando como restricción la resistencia secundaria y terciaria.

## **4.2 Recomendaciones**

Considerando que las embarcaciones navegan en canales con profundidades irregulares se sugiere analizar una condición extrema de encallamiento. Se podría disminuir el área de contacto con el lodo, para llegar a una situación de falla y determinar su efecto sobre la estructura.

Debido a que las respuestas estructurales de resistencia y rigidez resultaron muy localizadas en la zona de cubierta, se recomienda distribuir de forma adecuada las llantas de los camiones, de manera que se asienten sobre elementos de mayor rigidez, como baos o mamparos.

El proceso desarrollado en este trabajo abarca únicamente el análisis de la resistencia y rigidez, por lo que si en un futuro se desea realizar una optimización de los elementos estructurales se sugiere verificar la estabilidad del buque para todas sus condiciones de carga.

# BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed M. H., A. M. (2016). Weight optimization of offshore supply vessel based on structural analysis using finite element method. *Alexandria Engineering Journal*.
- Carvalho, S. J. (2015). *Structural analysis of open deck ship hulls subjected to bending*. Lisboa.
- Cristian M. Salazar-Dominguez. (2021). Structural Analysis of a Barge Midship Section considering the still water and wave load effects. *Journal of Marine Science and Engineering*, 21.
- DNV. (2021). *Hull structural design ships with length less than 100 meters* .
- DNV. (s.f.). Finite Element Analysis.
- E.D. Wang, J.S. Bone, . M. Ma, & A. Dinovitzer. (2019). Guidelines for evaluation of marine finite element analysis.
- Holguín, V. S. (2015). *Memoria Técnica de Barcaza G4*. Posorja.
- INOCAR. (08 de 11 de 2021). *Cartas Náuticas Vigentes* . Obtenido de <https://www.inocar.mil.ec/cartografia/listado.php>
- INOCAR. (07 de 11 de 2021). *Tabla de mareas en puertos del Ecuador*. Obtenido de <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/tabla-mareas#busqueda-de-datos-de-mareas>
- Lewis, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture Volumen I*. Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Lloyd's Register. (2021). Rules and Regulations for Clasifications all ships. En *Rules and Regulations for the Clasifications of ships*. London.
- M.A. Shama, Y. A.-N.-R. (2019). Rational structural design of Nile barges. *Alexandria Engineering Journal*, 1029.
- Marín, J. (1997). Shear Stress MultiCell. Ecuador.
- Rahman, M. M. (2017). *Structural Analysis of a ship on Global Aspect using ANSYS*. Mirpur, Dhaka.
- Sánchez, D. M. (2018). *Análisis y optimización de la cuaderna maestra de un quimiquero mediante el método de los elementos finitos (FEM)*. Coruña.
- Selvaganapthi, K. (12 de Mayo de 2021). Batch connection in Ansys. *Batch connection: Never use share topology again*. Australia.

- Shama, M. (2010). *Torsion and Shear Stresses*. Egypt: Springer.
- Shama, M. (2013). Compounding of Stresses in Ship Strength Members. En *Buckling of Ship Structures* (págs. 192-209). Springer.
- Shama, M. (2019). Rational structural design of Nile barges.
- SNAME. (s.f.). *Ship Design and Construction*. New Jersey.
- Taggart, R. (1980). *Ship Design and Construction*. New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers .
- Tenorio, A. B. (2015). *Simulación Numérica a través de elementos finitos de una barcaza fluvial*. Lima.
- Terranova, C. (2020). *Análisis de la estructura primaria de una lancha planeadora de 13 metros sometido a Golpe Hidrodinámico*. Guayaquil.
- Timoshenko, S. (1975). *Teoría de placas y láminas*. Urmo S.A de Ediciones.

# **APÉNDICES**

# APÉNDICE A

## DEFLEXIÓN PERMISIBLE DE ACUERDO CON LLOYDS REGISTER

Acceptance Criteria Part 1, Chapter 5

1.5.5 Maximum Permissible Disminution of Individual Plates and Stiffeners for non-CSR Ships (Section 5)

**Tabla A.1 Deflexión permitida por categorías**  
(Lloyd's Register, 2021)

Structural item	Category 1 ships See Note 5	Category 2 & 3 ships See Note 5	TM Report Form
<b>Hull envelope:</b> individual plates, shell and deck plating recorded along the strake (deck, bottom, side, wind and water)	20% See Note 2	30%	TM 1 See Note 3
<b>Hull envelope:</b> transverse section, plates recorded by frame number and strake position (deck and sheer/bottom and side)	20%	30%	TM 2~3
<b>Longitudinal structural members</b> (including deck and shell longitudinal stiffeners, longitudinal bulkhead plating and stiffeners, inner bottom plating and stiffeners, hopper sloping plating and stiffeners. (See Note 4.2 for additional bulk carrier diminution criteria)	Plating 20% Stiffeners 25%	Plating 30% Stiffeners 25%	TM 2~3 See Note 3
<b>Transverse structural members in C.O. and W.B. tanks</b> (including web frame plating and face plates)	20%	25%	TM 4

<b>Structural item</b>	<b>Category 1 ships</b> See Note 5	<b>Category 2 &amp; 3 ships</b> See Note 5	<b>TM Report Form</b>
<b>W.T. and O.T. transverse bulkheads including deep tank bulkheads</b> (See Note 4.1 for additional bulk carrier diminution criteria)	Plating 25%  Stiffeners and corrugated bulkhead plating 25%	Plating 30%  Stiffeners and corrugated bulkhead plating 25%	TM 5, TM 5 UR S18, TM 5 UR S19, TM 5 UR S19%  See Note 4.1 (f), (g)
<b>Miscellaneous structural members</b> (including deck plating inside the line of cargo hatch openings)	Plating 25%  Stiffeners 25%	Plating 30%  Stiffeners 25%	TM 6, TM 6UR S21, TM 6UR S21A  See Note 3 , 7
<b>Cargo hold transverse frames and end brackets</b> (See Note 4 for additional bulk carrier diminution criteria)	20%	25%	TM 7

A continuación, en las siguientes tablas se muestra la reducción de espesor por corrosión de acuerdo con el elemento.

**Tabla A.2 Resumen de reducción de espesores**

[FUENTE: Propia]

Espesores nominales de acuerdo con el plano estructural		Espesor reducido por efecto de corrosión en el límite		% de reducción
Elementos	Espesor [mm]	Elementos	Espesor [mm]	
Planchaje Cubierta	9	Planchaje Cubierta	6,3	30%
Planchaje Fondo	9	Planchaje Fondo	6,3	
Planchaje Costado	9	Planchaje Costado	6,3	
PI Mamparo longitudinal	9	PI Mamparo longitudinal	6,3	

Espesores nominales de acuerdo con el plano estructural		Espesor reducido por efecto de corrosión en el límite		
Elementos	Espesor [mm]	Elementos	Espesor [mm]	% de reducción
Cartela	9	Cartela	6,3	25
Ref. Fondo -ala	9	Ref. Fondo -ala	6,75	
Ref. Fondo -alma	9	Ref. Fondo -alma	6,75	
Ref. Cubierta -ala	9	Ref. Cubierta -ala	6,75	
Ref. Cubierta -alma	9	Ref. Cubierta -alma	6,75	
Ref. Costado -ala	9	Ref. Costado -ala	6,75	
Ref. Costado -alma	9	Ref. Costado -alma	6,75	
Baos	12	Baos	9	
Cuaderna	12	Cuaderna	9	
Varenga	12	Varenga	9	

## APÉNDICE B

### DISTRIBUCIÓN DE PESO EN LAS TRES CONDICIONES

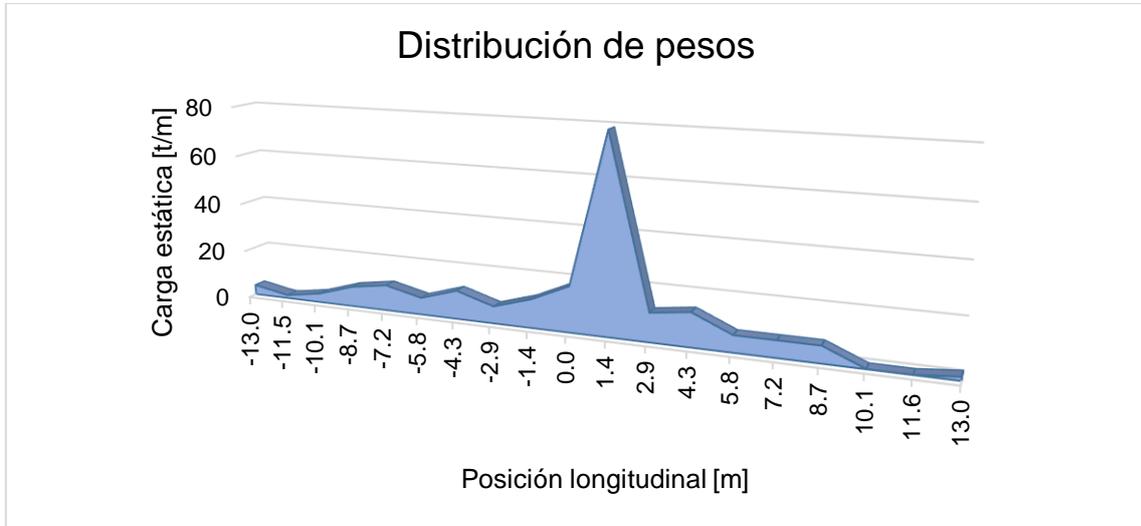


Figura B.1 Primera condición- 4 camiones

[FUENTE: Propia]

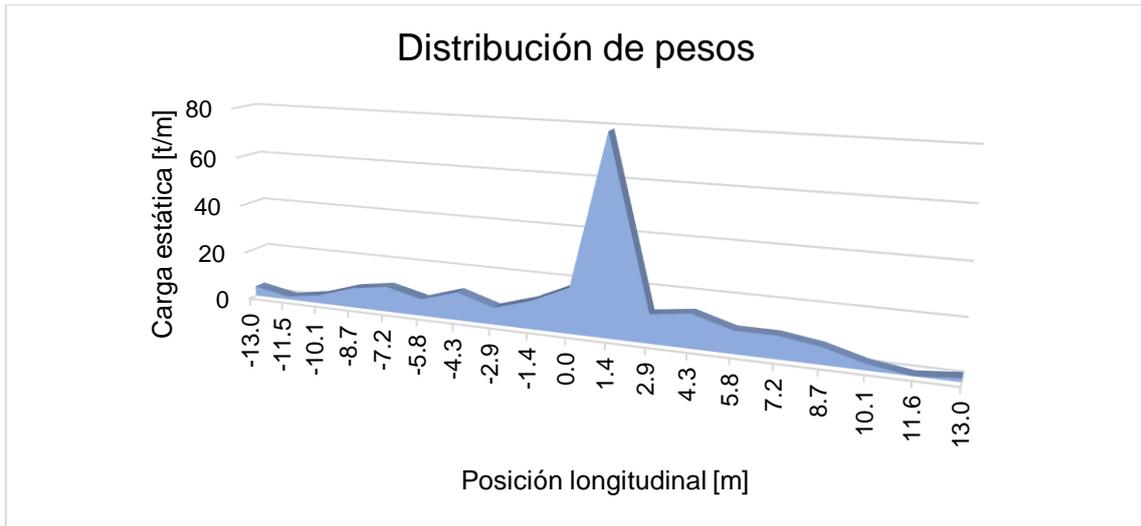
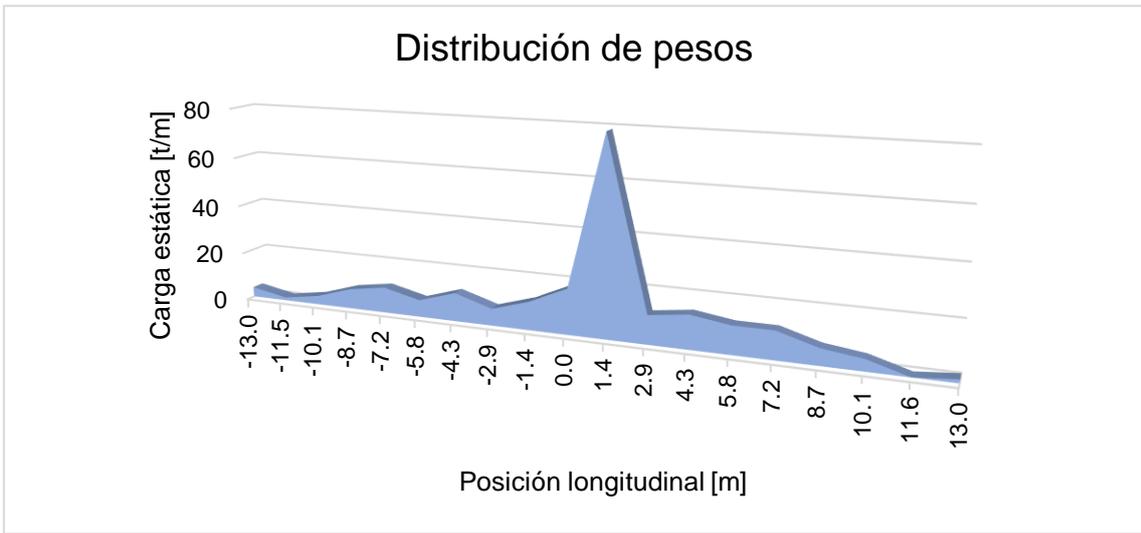


Figura B.2 Segunda condición – 5 camiones

[FUENTE: Propia]



**Figura B.3 Tercera condición -6 camiones**

**[FUENTE: Propia]**







# APÉNDICE C

## CRITERIOS DE CONVERGENCIA

**Tabla C.1 Características de cada mallado**

[FUENTE: Propia]

Malla	1	2	3
Tamaño [mm]	30	40	50
# Nodos	1250738	713103	430319
# Elementos	1267822	725541	439236
Tiempo	25 m 22s	12 m 30 s	7m 29 s
Memoria Utilizada [GB]	13,97	9.198	14,47
Calidad de Malla Métrica			
Mínimo	0,05	0,15905	0,2706
Máximo	0,999977	0,9999	0,99999
Calidad Promedio	0,97714	0,9733	0,9768
Desviación Estándar	0,04	0,041	0,042
Convergencia			
Esfuerzo Normal	64,718	64,428	64,175
Deflexión [mm]	-2,139	-2,129	-2,099

**Tabla C.2 Fuerzas de desbalance en la primera condición**

[FUENTE: Propia]

	Desbalance en dirección vertical				
		[N]			[mm]
M1	R1	13267	0,46%	z1	1,32E-03
	R2	10464	0,36%	z2	1,04E-03
	R3	14056	0,48%	z3	-4,20E-04
M2	R1	-4201,5	-0,14%	z1	-2,00E-04
	R2	-2677,6	-0,09%	z2	-2,60E-04
	R3	-3016,6	-0,10%	z3	3,00E-03
M3	R1	-6013,6	-0,21%	z1	-6,00E-04
	R2	570,29	0,02%	z2	5,70E-05
	R3	-5774,2	-0,20%	z3	-5,70E-04
M4	R1	17320	0,60%	z1	1,73E-03
	R2	11724	0,40%	z2	1,17E-03
	R3	16826	0,58%	z3	1,80E-04

M5	R1	5860	0,20%	z1	5,86E-04
	R2	5567,7	0,19%	z2	5,56E-04
	R3	5415,9	0,19%	z3	5,40E-04
M6	R1	-24843	-0,86%	z1	-2,48E-03
	R2	-17600	-0,61%	z2	-1,76E-03
	R3	-24708	-0,85%	z3	-2,47E-03
SUMA		12236,39	0,42%		

**Tabla C.3 Fuerzas de desbalance en la segunda condición**

[FUENTE: Propia]

	Desbalance en dirección vertical				
		[N]			[mm]
M1	R1	7990,5	0,27%	z1	8,0E-04
	R2	8088	0,27%	z2	8,0E-04
	R3	10547	0,35%	z3	1,0E-03
M2	R1	-2162,6	-0,07%	z1	-2,0E-04
	R2	1227,6	0,04%	z2	1,2E-04
	R3	2861,1	0,10%	z3	2,8E-04
M3	R1	-1212,6	-0,04%	z1	2,5E-04
	R2	5009,1	0,17%	z2	5,0E-04
	R3	2516,8	0,08%	z3	-1,0E-04
M4	R1	16384	0,55%	z1	1,6E-03
	R2	-22733	-0,76%	z2	2,3E-03
	R3	18878	0,63%	z3	1,8E-04
M5	R1	-11890	-0,40%	z1	1,9E-03
	R2	14400	0,48%	z2	1,4E-03
	R3	15191	0,51%	z3	1,5E-03
M6	R1	-15203	-0,51%	z1	-1,5E-03
	R2	-8681,1	-0,29%	z2	-8,6E-04
	R3	-16419	-0,55%	z3	-1,5E-03
SUMA		24791,8	0,83%		

**Tabla C.4 Fuerzas de desbalance en la tercera y cuarta condición**

[FUENTE: Propia]

	Desbalance en dirección vertical				
		[N]			[mm]
M1	R1	-30503	-0,98%	z1	-3,15E-03
	R2	-27628	-0,89%	z2	-2,77E-03

Desbalance en dirección vertical					
		[N]			[mm]
	R3	-30651	-0,99%	z3	-3,06E-03
M2	R1	-222,07	-0,01%	z1	-2,220E-05
	R2	-842,82	-0,03%	z2	-8,42E-05
	R3	2996,1	0,10%	z3	2,99E-04
M3	R1	21564	0,70%	z1	2,15E-03
	R2	10859	0,35%	z2	1,08E-03
	R3	20720	0,67%	z3	2,072E-03
M4	R1	8649,3	0,28%	z1	8,64E-04
	R2	6651,7	0,21%	z2	6,65E-04
	R3	8102,3	0,26%	z3	8,1E-04
M5	R1	3780,2	0,12%	z1	3,78E-03
	R2	5644,3	0,18%	z2	5,64E-04
	R3	3745,6	0,12%	z3	3,74E-04
M6	R1	1109,8	0,04%	z1	1,09E-04
	R2	2837,2	0,09%	z2	2,83E-04
	R3	1324,2	0,04%	z3	1,32E-04
SUMA		8136,81	0,26%		

## APÉNDICE D

### VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### Respuesta Primaria

Dentro de los criterios de aceptación de resultados se determinó la respuesta primaria de forma analítica calculando los esfuerzos normales y cortantes. Para los esfuerzos normales se calculó la distribución del momento flector con un análisis de viga buque, por otro lado, los esfuerzos cortantes fueron calculados con teoría celdas y flujo de corte. Con la finalidad de compararlos con las respuestas obtenidas por el método de elementos finitos, se logró establecer una correlación y orden de magnitud relativamente cercanas.

Para la distribución del momento flector se generó tres curvas, considerando las distribuciones de peso y boyantez de las tres condiciones de carga, tal y como se puede observar en el APÉNDICE C. Es evidente que en la sección media embarcación se alcanza el máximo momento flector, corroborando lo mencionado por (Cristian M. Salazar-Dominguez, 2021)

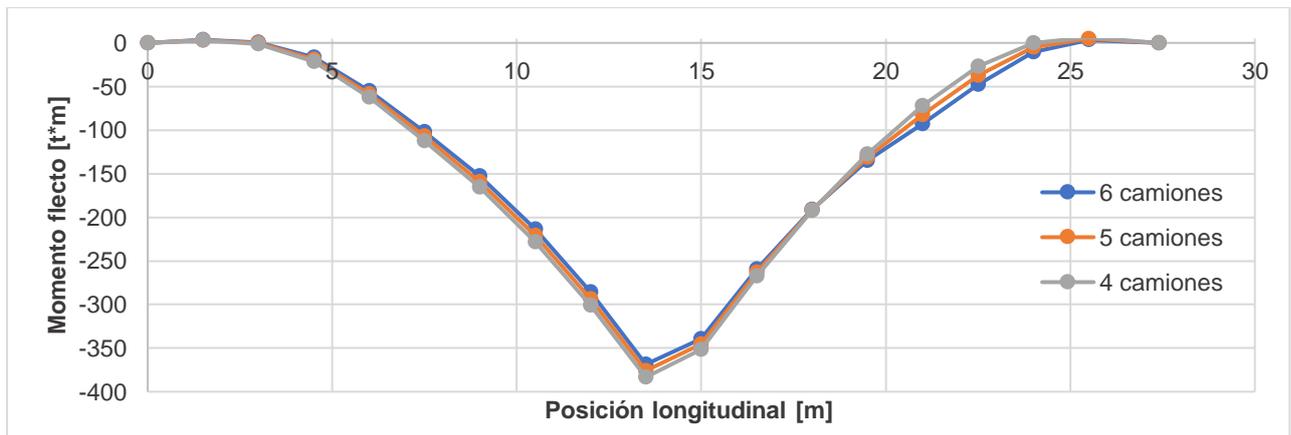


Figura D.1 Distribución de Momento Flector

[FUENTE: Propia]

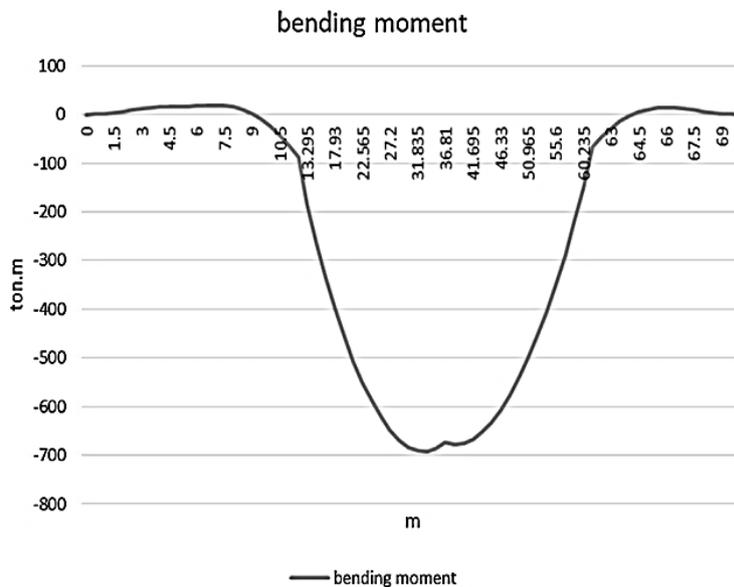
**Tabla D.1 Comparación de Esfuerzos Primarios**

[FUENTE: Propia]

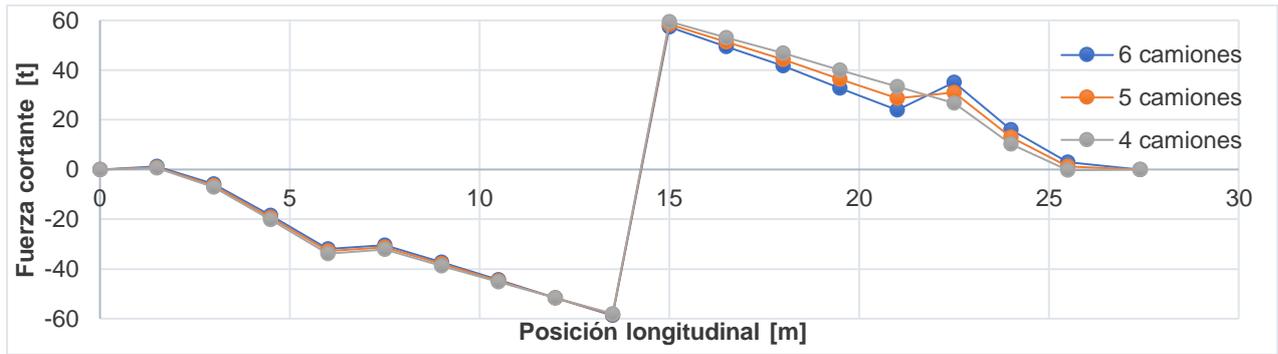
Condición	Descripción	Viga-Buque	3D MEF	Diff. %
Primera	Esfuerzo Normal [N/mm <sup>2</sup> ]	-17.96	-24.63	27.08
Segunda		-17.62	-24.97	29.4
Tercera		-17.28	-13.95	19.27
Cuarta		-23.37	-21.34	8.29

De acuerdo a la Tabla D.1, se considera que el orden de magnitud de los resultados obtenidos por el MEF están dentro del mismo rango que los calculados analíticamente, además el signo negativo para ambos casos indica que la cubierta se encuentra en tensión y la quilla en compresión.

Para asegurar que los valores de momento flector calculados estén dentro de rangos reales de barcasas existentes, se consideró la distribución de momento flector de una barcaza de 70 [m] de eslora (M.A. Shama, 2019), como se muestra en la Figura D.2.

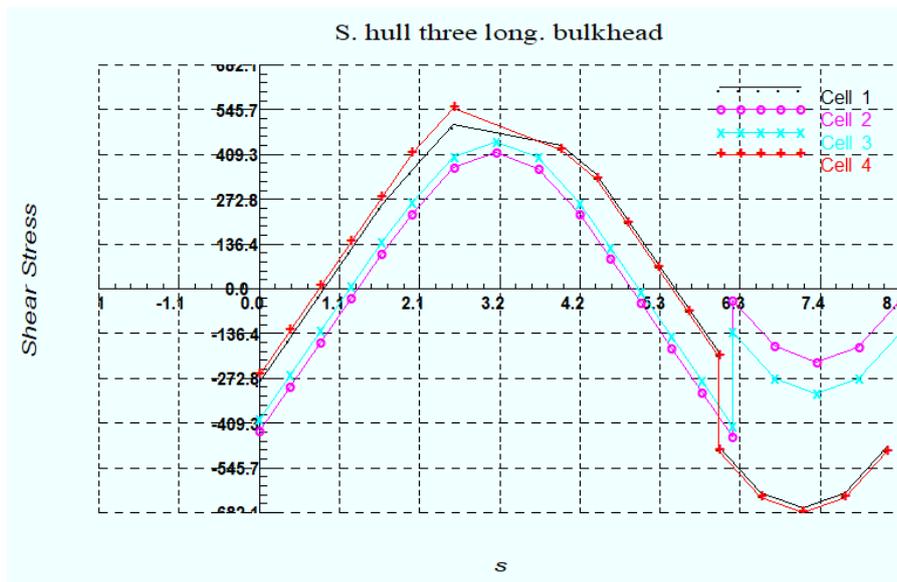


**Figura D.2 Momento flector de buque de 70 [m] de eslora (Shama, Rational structural design of Nile barges, 2019)**



**Figura D.3 Distribución de Fuerza Cortante**  
[FUENTE: Propia]

Por otro lado dentro del análisis de viga-buque, se calculó la distribución de esfuerzo cortante en la sección media de la barcaza, y para ello se utilizó el programa de (Marín, 1997), con el cual se obtuvo la Figura D.4. De allí se obtiene que el esfuerzo máximo de toda la sección es 5.069 MPa, el cual ocurre en los elementos de planchaje del costado a la altura del eje neutro, siendo este valor muy por debajo del valor permisible de 110 MPa (DNV, Finite Element Analysis) y al ser este valor pequeño se podría despreciar el efecto de cizallamiento.



**Figura D.4 Distribución de Esfuerzo Cortante de la Barcaza G4**  
(Marín, 1997)

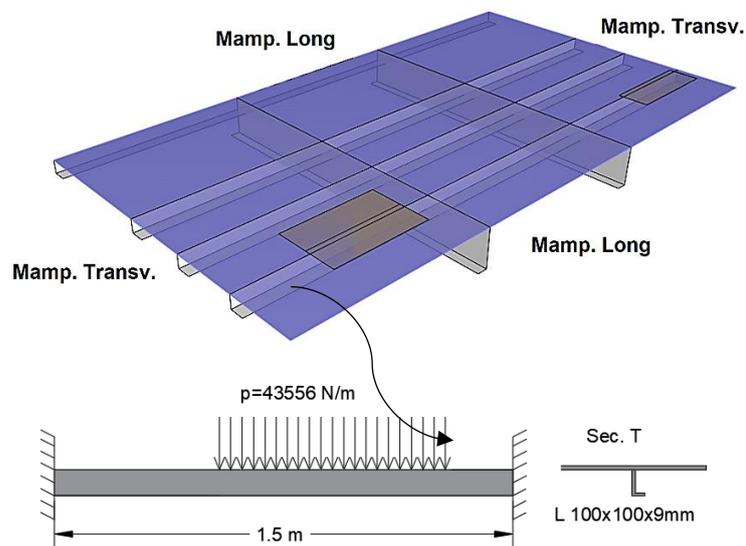
**Tabla D.2 Comparación de Repuesta primaria con Análisis 3D**

[FUENTE: Propia]

Descripción	Viga-Buque	3D MEF	Diff. %
Esfuerzo Cortante [N/mm <sup>2</sup> ]	5.069	3,35	33,9%

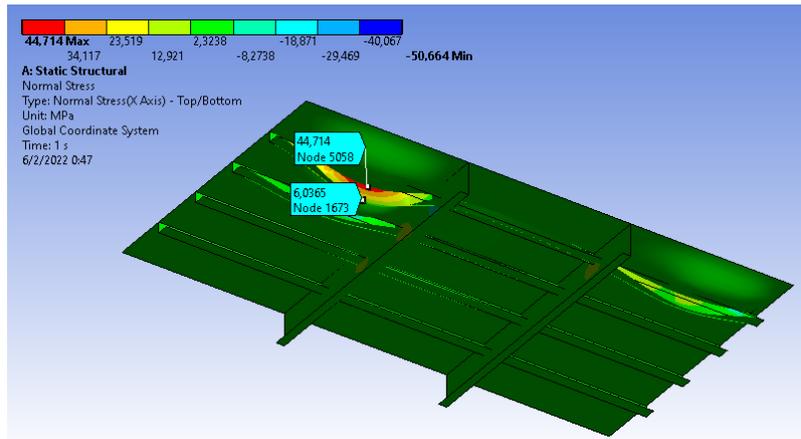
### Respuesta Secundaria- Tercera Condición

Para comparar la contribución de la respuesta secundaria con respecto al análisis global, se consideró la combinación de un refuerzo asociado a la plancha incluyendo el ancho efectivo como se indica en la Figura D.5. Del cual se obtuvo valores de esfuerzos normales de 19.8MPa y 43,7 MPa, cuando el refuerzo tiene la carga de una y dos llantas respectivamente. Estos resultados indican que el fondo está en tensión y la parte superior en compresión lo cual tiene sentido ya que al aplicar una carga local en la mitad del refuerzo provoca la flexión de las planchas individuales y los refuerzos longitudinales.



**Figura D.5 Repuesta Secundaria en refuerzo de cubierta**

[FUENTE: Propia]



**Figura D.6 Respuesta Secundaria FEM**  
**[FUENTE: Propia]**

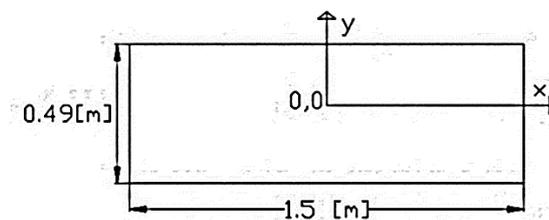
Con la comparación de resultados entre el método analítico y MEF, Tabla D.3, se validó los resultados del programa del cual se obtuvo una diferencia porcentual del 35.6%, esto se origina ya que al realizar el análisis en ANSYS existe una contribución adicional de esfuerzos terciarios.

**Tabla D.3 Comparación de Repuesta Secundario entre FEM y método analítico**  
**[FUENTE: Propia]**

Ubicación	Esfuerzo Normal x [MPa]		Diferencia %
	FEM	Método analítico	
Refuerzo (superior)	44,335	36.9	19 %

### Respuesta Terciaria empleando Timoshenko

Para validar la respuesta estructural, se comparó la respuesta terciaria de forma analítica empleando las formulaciones de (Timoshenko, 1975) con MEF. Con la finalidad de validar los resultados obtenidos en elementos finitos.

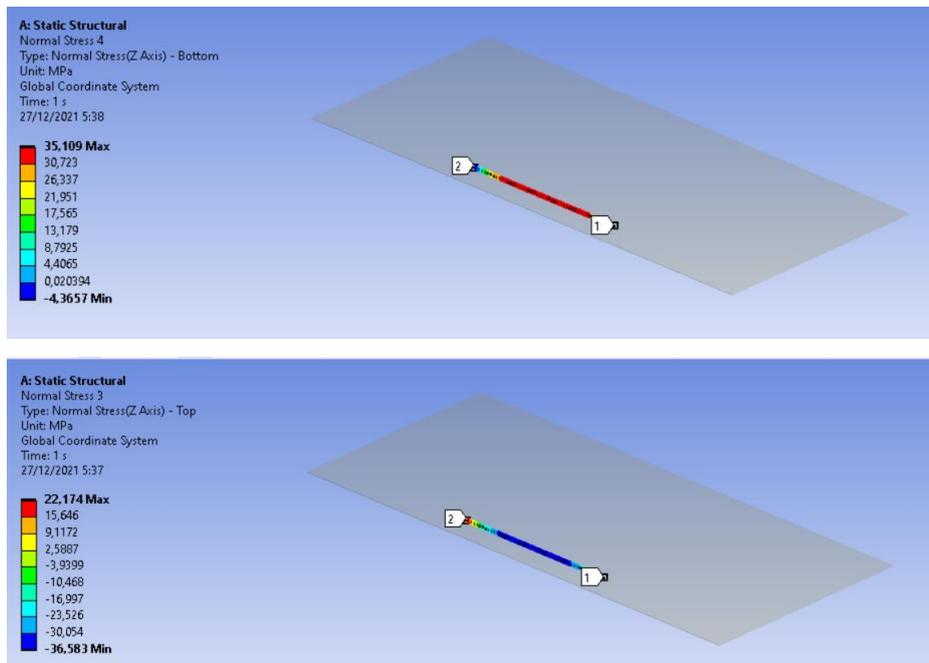


**Figura D.7 Sistema de referencia empleado por Timoshenko**  
**[FUENTE: Propia]**

**Tabla D.4 Diferencias porcentuales entre el método analítico y el método numérico**

[FUENTE: Propia]

Timoshenko vs FEM	Diferencia %
$M_x(0,0)$ [Nm]	20,76
$M_y(0,0)$ [Nm]	8,56
deflexión [mm]	5,77



**Figura D.8 Path en el centro de plancha analizado**

[FUENTE: Propia]

Finalmente se puede evidenciar en la Tabla D.4 que el orden de magnitud entre el método analítico y el numérico están relativamente cercanos. Es importante acotar que se espera que el método numérico sea levemente mayor dado que en este se superponen los demás efectos, tanto el terciario y secundario.

### Respuesta terciaria empleando Timoshenko

**Tabla D.5 Valores empleados para el método de Placas -Timoshenko**

[FUENTE: Propia]

$q$ [N/m <sup>2</sup> ]	44930,58
$a$ [m]	0,485
$b$ [m]	1,5

E [N/m <sup>2</sup> ]	2,10E+11
t [mm]	0,009
$\nu$	0,3
D [Nm]	1,40E+04
w [m]	4,61E-04
w (0,0) [mm]	-0,46
M <sub>x</sub> (0,0) [Nm]	-440,72
M <sub>y</sub> (0,0) [Nm]	132,11

El método de placas de Timoshenko es el método práctico para estimar la respuesta estructural de una placa sometida a una carga uniforme. Se basa principalmente en el sistema de referencia de la Figura D.7, además, este método permitió obtener las deflexiones y momentos generados en dirección "x" y "y" en el centro de la plancha de forma analítica tal y como se muestra en la Figura D.8.

Por el método de elementos finitos:

**Tabla D.6 Resumen de esfuerzos normales por el método de Timoshenko**

[FUENTE: Propia]

Esfuerzos en dirección x		Esfuerzos en dirección y	
$\sigma_{top}$ [MPa]	-36.6	$\sigma_{top}$ [MPa]	-13.2
$\sigma_{fondo}$ [MPa]	34.8	$\sigma_{fondo}$ [MPa]	11.5
$\sigma_{top-fondo}$ [MPa]	-71.4	$\sigma_{top-fondo}$ [MPa]	24.7
M <sub>x</sub> (0,0) [Nm]	-481,95	M <sub>y</sub> (0,0) [Nm]	166,725

TABLE 35. DEFLECTIONS AND BENDING MOMENTS IN A UNIFORMLY LOADED RECTANGULAR PLATE WITH BUILT-IN EDGES (FIG. 91)  
 $\nu = 0.3$

$b/a$	$(w)_{x=0,y=0}$	$(M_x)_{x=a/2,y=0}$	$(M_y)_{x=0,y=b/2}$	$(M_x)_{x=0,y=0}$	$(M_y)_{x=0,y=0}$
1.0	$0.00126qa^4/D$	$-0.0513qa^2$	$-0.0513qa^2$	$0.0231qa^2$	$0.0231qa^2$
1.1	$0.00150qa^4/D$	$-0.0581qa^2$	$-0.0538qa^2$	$0.0264qa^2$	$0.0231qa^2$
1.2	$0.00172qa^4/D$	$-0.0639qa^2$	$-0.0554qa^2$	$0.0299qa^2$	$0.0228qa^2$
1.3	$0.00191qa^4/D$	$-0.0687qa^2$	$-0.0563qa^2$	$0.0327qa^2$	$0.0222qa^2$
1.4	$0.00207qa^4/D$	$-0.0726qa^2$	$-0.0568qa^2$	$0.0349qa^2$	$0.0212qa^2$
1.5	$0.00220qa^4/D$	$-0.0757qa^2$	$-0.0570qa^2$	$0.0368qa^2$	$0.0203qa^2$
1.6	$0.00230qa^4/D$	$-0.0780qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0381qa^2$	$0.0193qa^2$
1.7	$0.00238qa^4/D$	$-0.0799qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0392qa^2$	$0.0182qa^2$
1.8	$0.00245qa^4/D$	$-0.0812qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0401qa^2$	$0.0174qa^2$
1.9	$0.00249qa^4/D$	$-0.0822qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0407qa^2$	$0.0165qa^2$
2.0	$0.00254qa^4/D$	$-0.0829qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0412qa^2$	$0.0158qa^2$
$\infty$	$0.00260qa^4/D$	$-0.0833qa^2$	$-0.0571qa^2$	$0.0417qa^2$	$0.0125qa^2$

Figura D.9 Teoría de plancha  
(Timoshenko, 1975)

### Análisis del efecto torsor en la estructura de la barcaza

Se estimó el momento torsor dado a que se tiene una la distribución de carga asimétrica. Para ello se emplearon dos métodos, primero se utilizaron los datos numéricos aplicando FEM y por otro lado, se calculó analíticamente, tal como se observa en la Figura D.11. Estos resultados tienen una diferencia porcentual del 34.68%, además, con estos valores se puede afirmar que el efecto de torsión resulta despreciable, debido a que está muy por debajo del valor referencial dado por la regla como se muestra en la Tabla D.8.

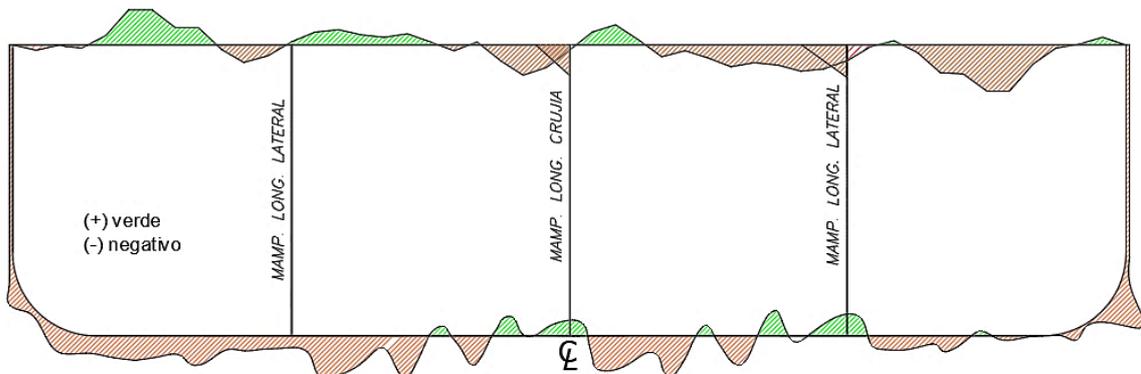
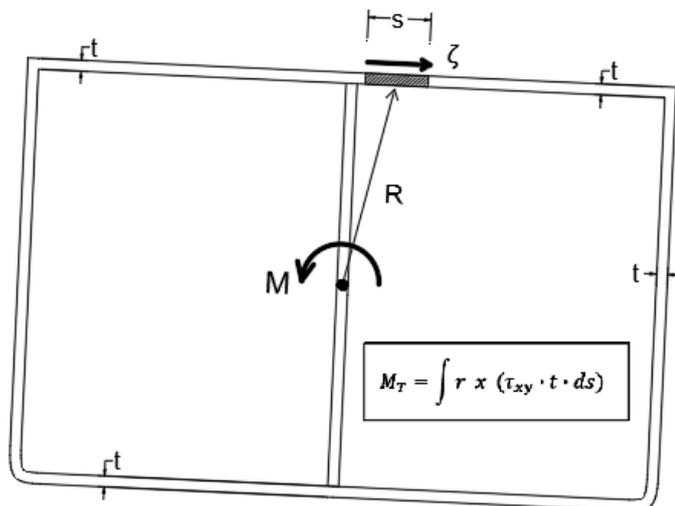


Figura D.10 Elementos para análisis de momento Torsor  
[FUENTE: Propia]



**Figura D.11 Elementos para análisis de momento Torsor**  
**[FUENTE: Propia]**

**Tabla D.7 Momento Torsor por carga asimétrica**  
**[FUENTE: Propia]**

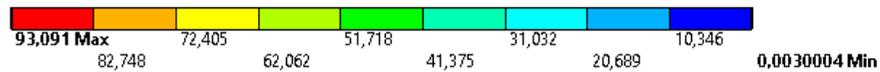
Momento Torsor [Nm]	
Teórico	-2,29E+03
Numérico	-3,50E+03
Relación %	34,68

**Tabla D.8 Relacion de momento torsor por olas y carga asimétrica**  
**[FUENTE: Propia]**

Momento Torsor [kNm]	
Olas	429,3
Carga Asimétrica	-3,5
Relacion	122,7

# APÉNDICE E

## RESULTADOS GLOBALES DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES



**A: Static Structural**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1 s

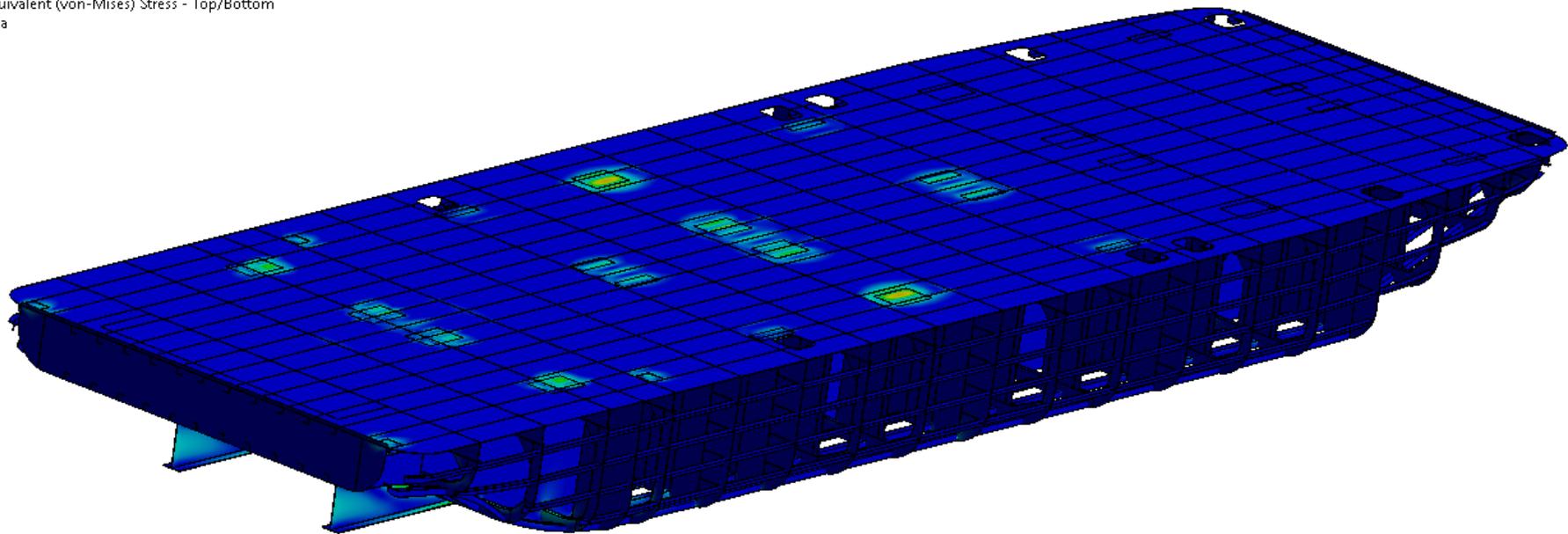
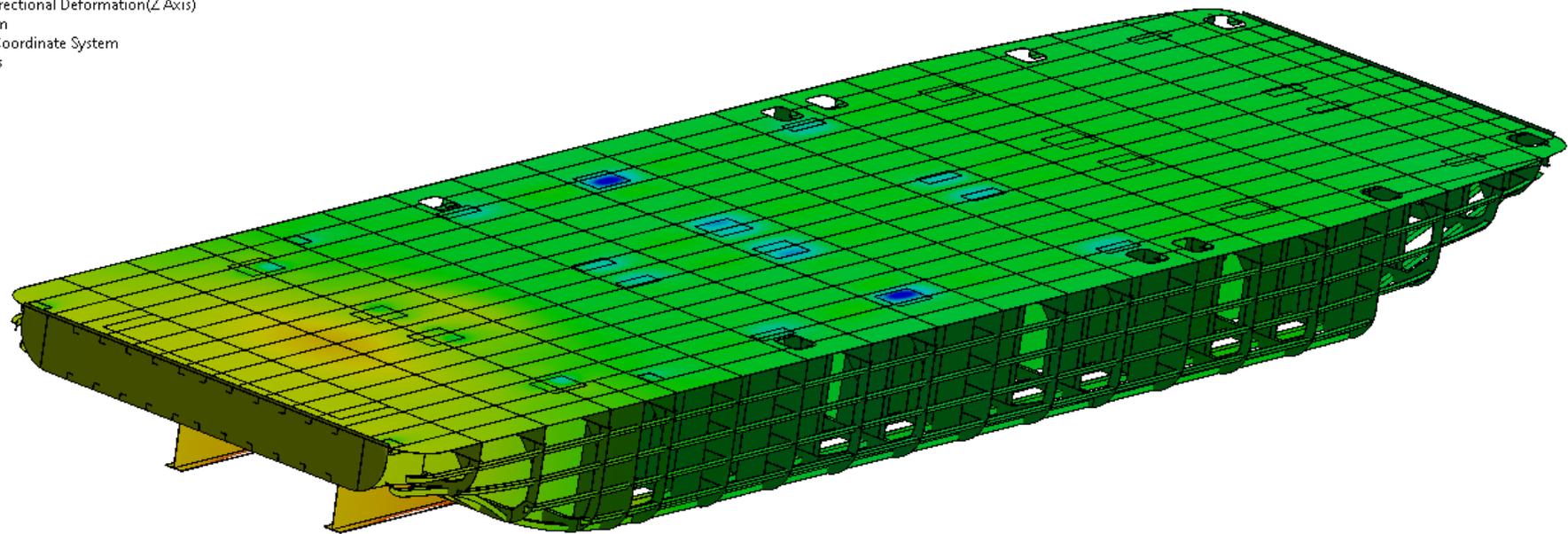
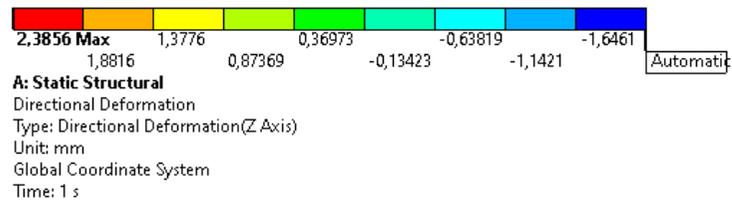


Figura E.1 Distribución de Esfuerzo equivalente de Von Mises en la primera condición – 4 camiones  
[FUENTE: Propia]



**Figura E.2 Distribución de deflexiones en la primera condición – 4 camiones**

[FUENTE: Propia]

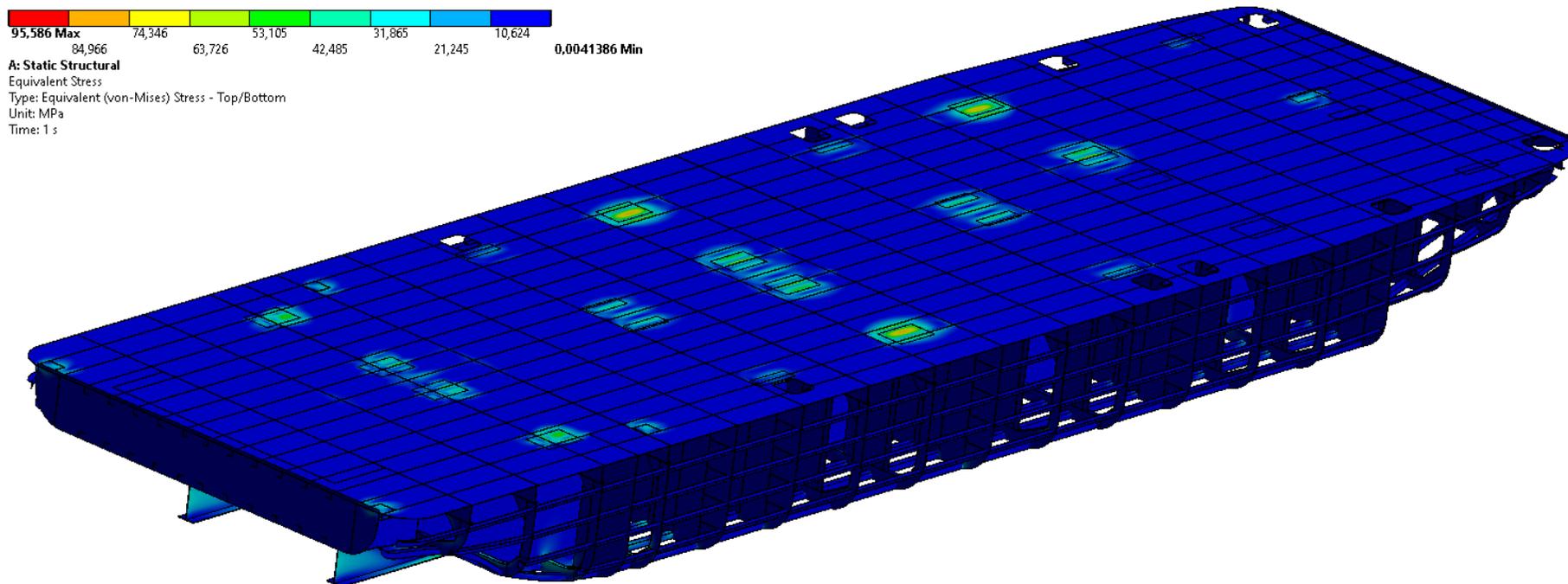


Figura E.3 Distribución de Esfuerzo equivalente de Von Mises en la segunda condición – 5 camiones

[FUENTE: Propia]

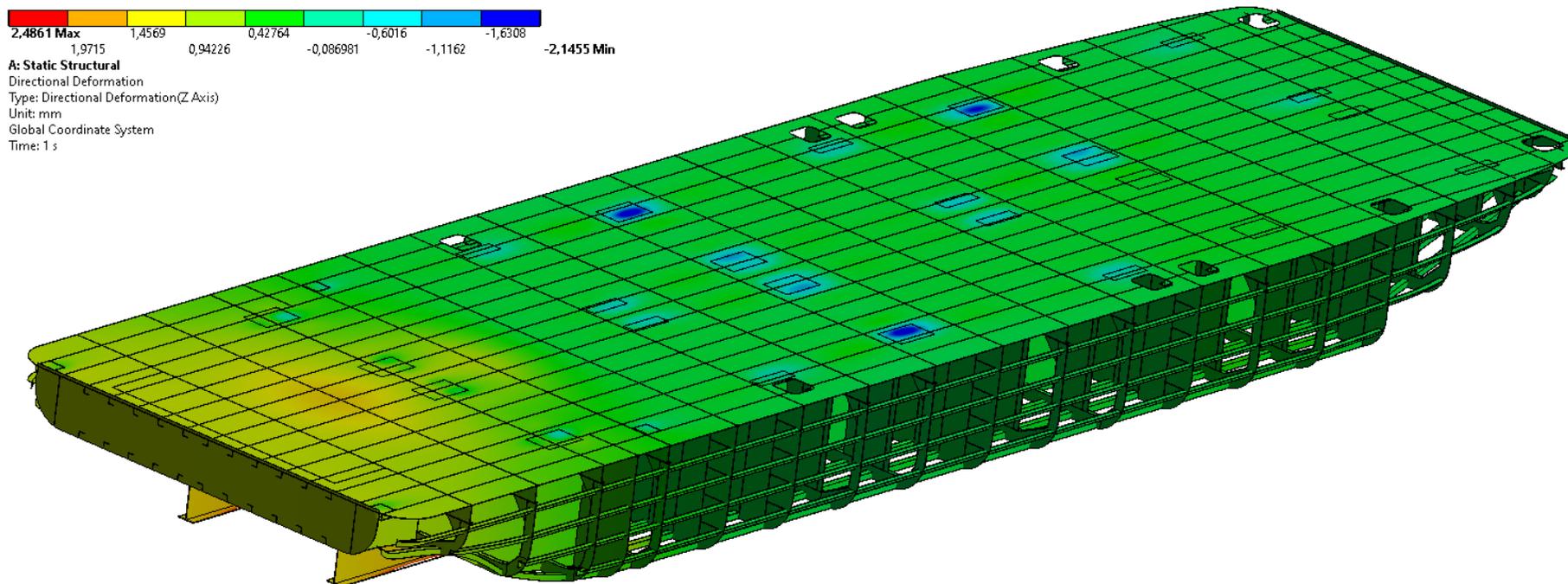
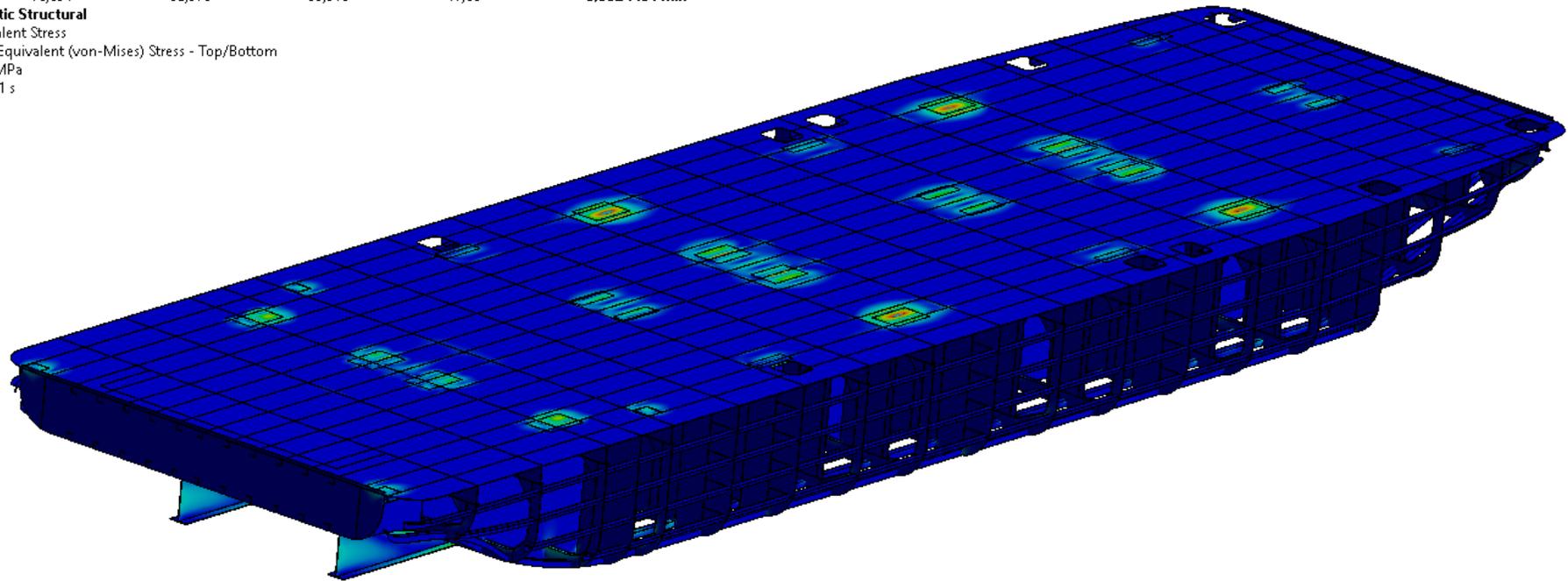
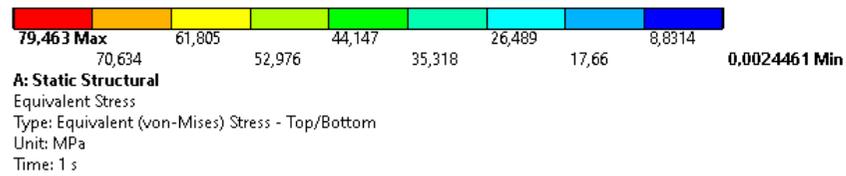


Figura E.4 Distribución de deflexiones en la segunda condición – 5 camiones

[FUENTE: Propia]



**Figura E.5 Distribución de Esfuerzo equivalente de Von Mises en la segunda condición – 6 camiones**

[FUENTE: Propia]

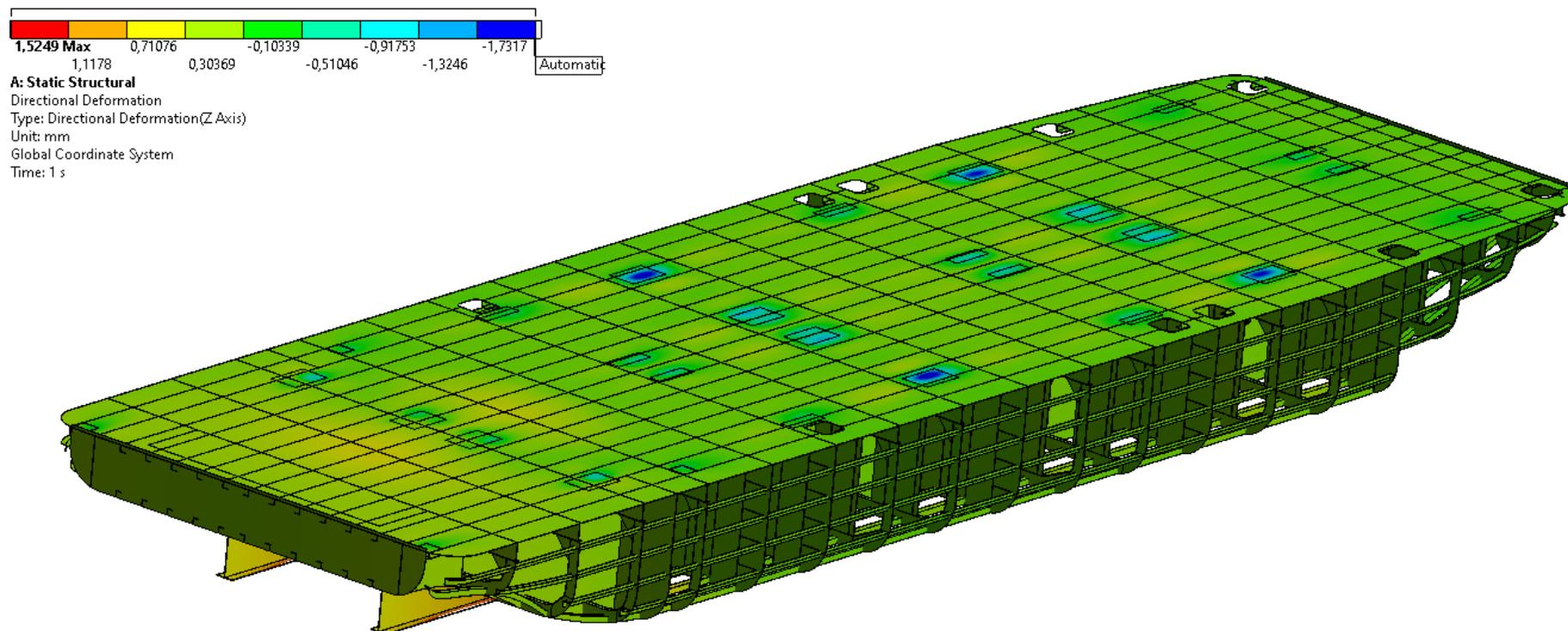
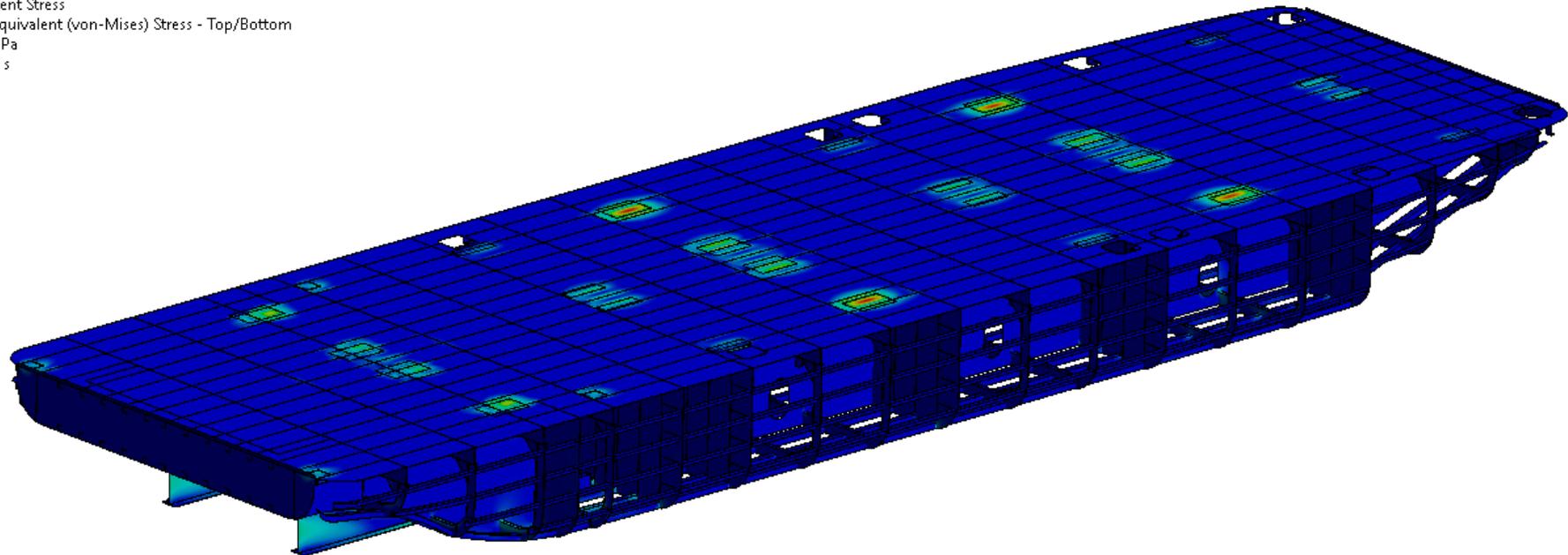
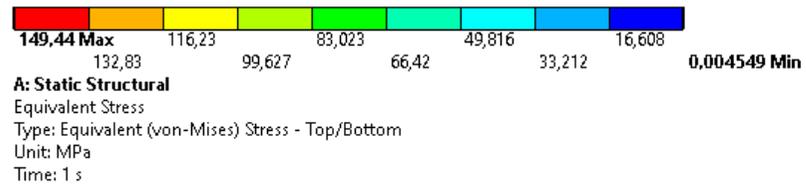
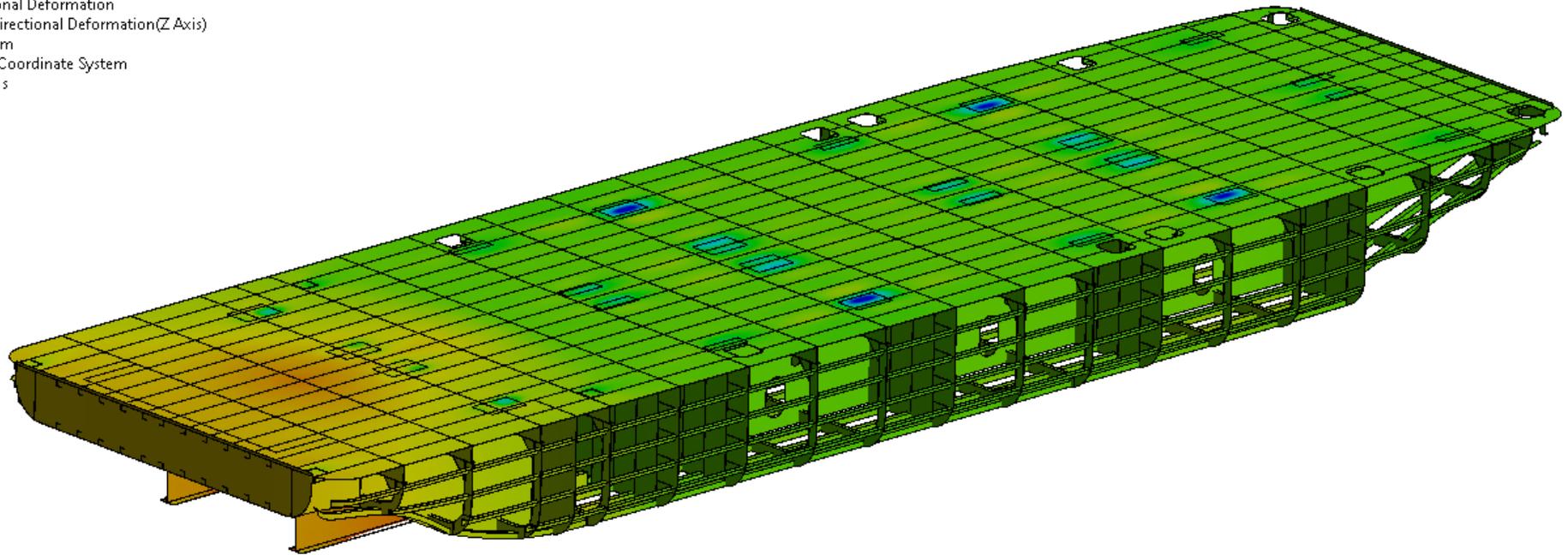
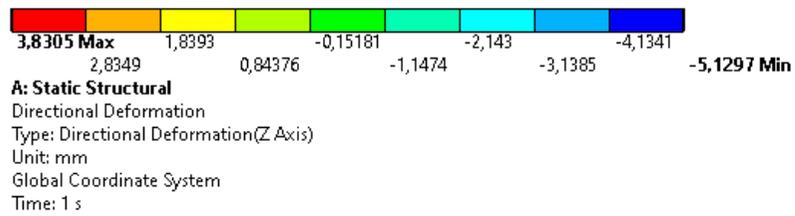


Figura E.6 Distribución de deflexiones en la tercera condición – 6 camiones

[FUENTE: Propia]



**Figura E.7 Distribución de Esfuerzos de Von Mises en la cuarta condición – 6 camiones + efecto de corrosión+ omitir refuerzos extras**  
 [FUENTE: Propia]

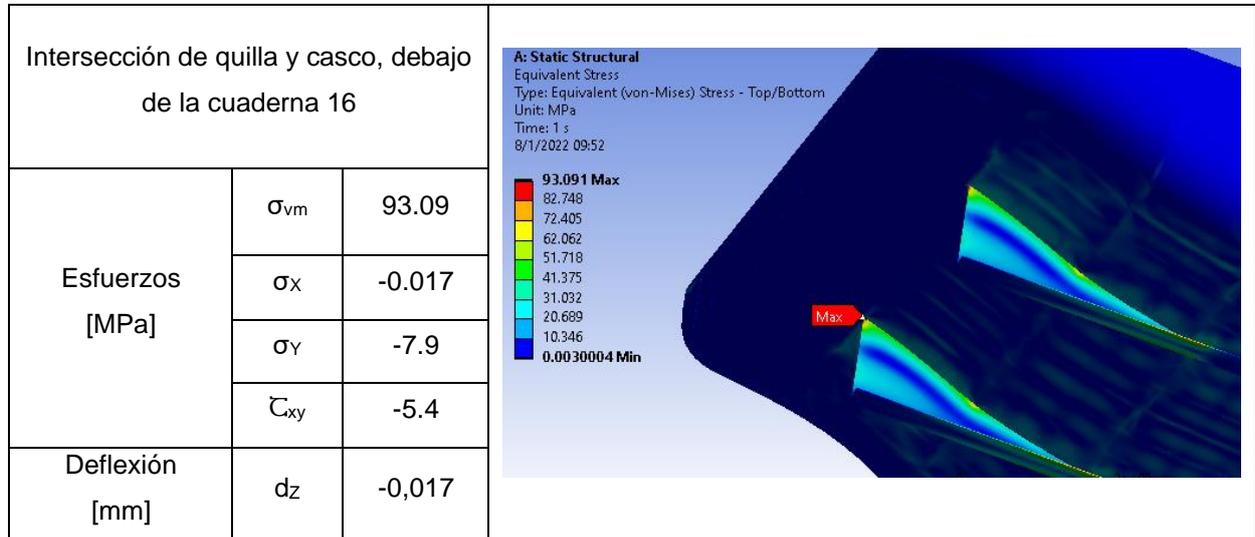


**Figura E.8 Distribución de deflexiones en la cuarta condición – 6 camiones + efecto de corrosión+ omitir refuerzos extras**

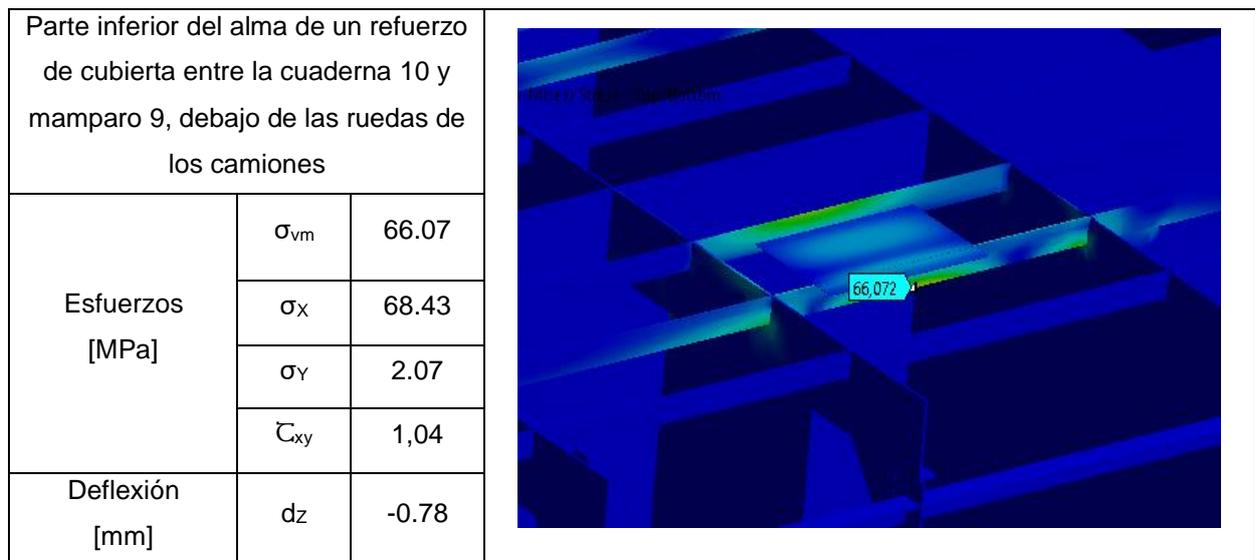
[FUENTE: Propia]

### Primera condición

De la Figura E.9 se observa que hay concentración de esfuerzo en la parte de la quilla esto se debe a que la embarcación en esta asentada por lo que presenta mayor presión hidrostática en popa debido a que el LCG es negativo como se observa en el APÉNDICE A.

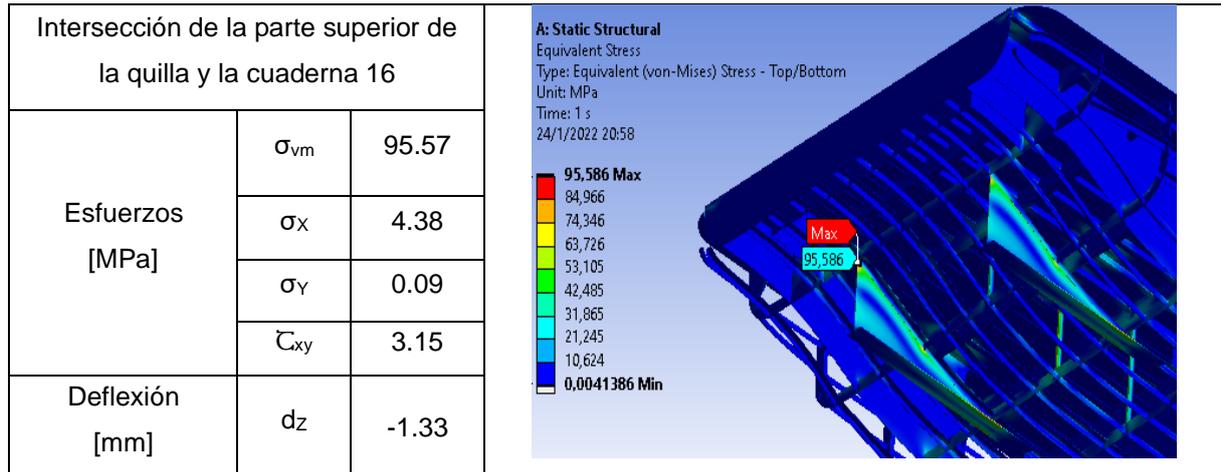


**Figura E.9 Respuesta máxima en popa**  
[FUENTE: Propia]



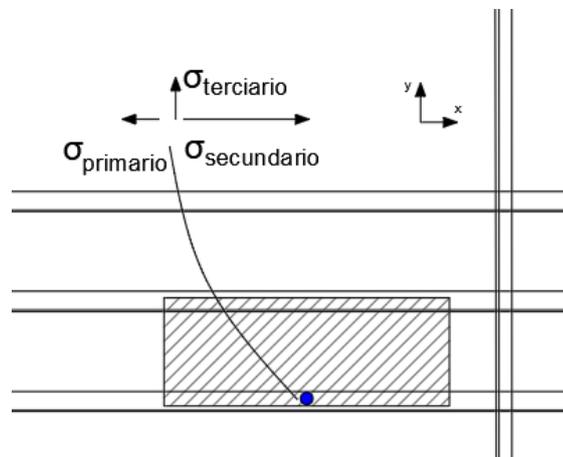
**Figura E.10 Respuesta máxima en sección media en refuerzo longitudinal**  
[FUENTE: Propia]

## Segunda Condición



**Figura E.11 Respuesta máxima en Popa de la segunda condición**

[FUENTE: Propia]



**Figura E.12 Diagrama de Combinación de Esfuerzos en refuerzo longitudinal de sección media**

[FUENTE: Propia]

De acuerdo a la Figura E.12 se afirmó que existe mayor contribución de la respuesta secundaria, debido a que desarrolló mayor esfuerzo en dirección "x" en el refuerzo, y los esfuerzos primarios resultaron despreciables.

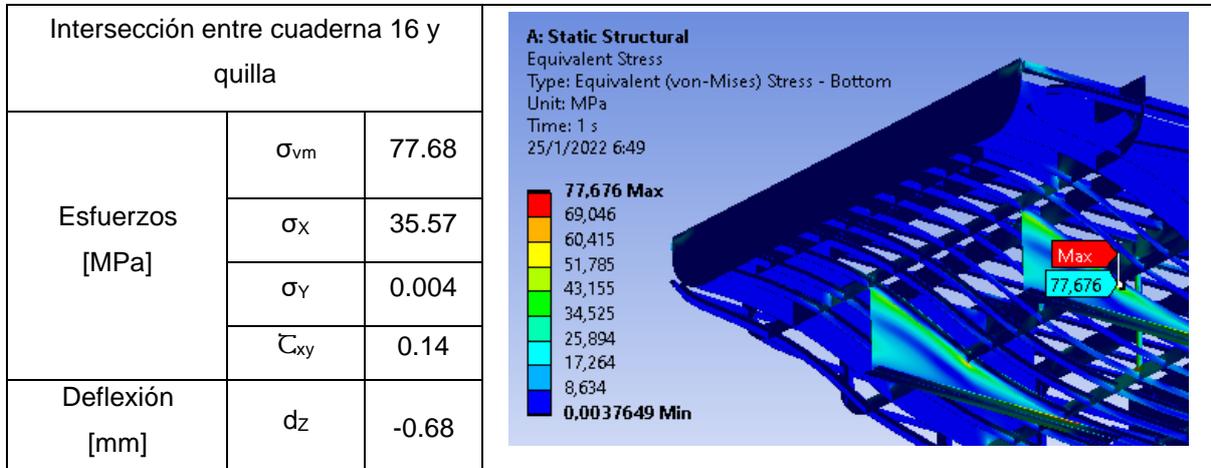
## Tercera condición

Dado que, los niveles de esfuerzos normales por respuesta primaria son despreciables se espera que los resultados de arrufo y quebranto sean relativamente cercanos.

**Tabla E.1 Esfuerzo máximo considerando olas en planchaje de cubierta**

[FUENTE: propia]

Esfuerzo de Von Mises	[MPa]
Quebranto	77.27
Arrufo	76.85



**Figura E.13 Respuesta máxima en la quilla**

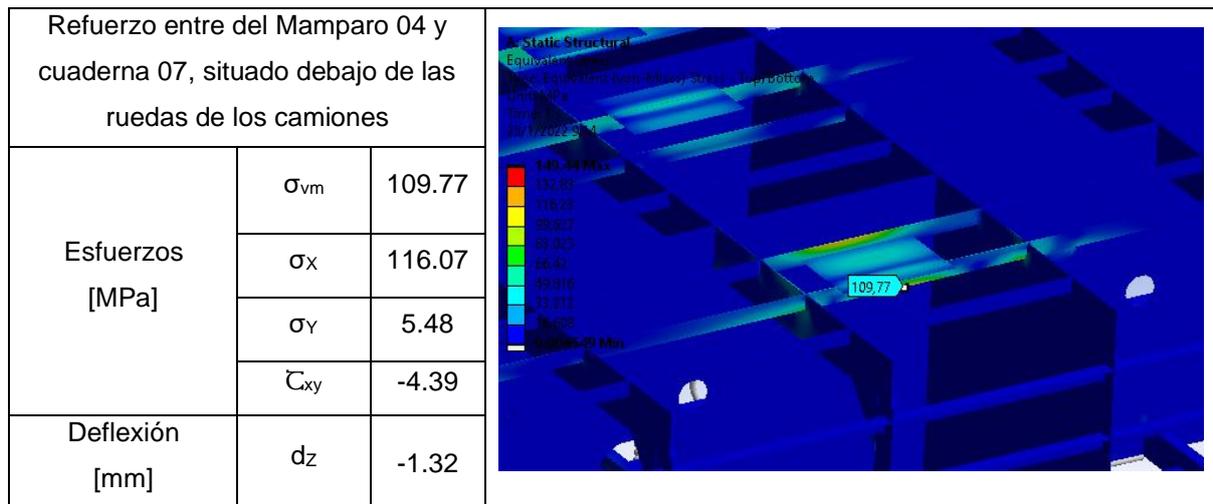
[FUENTE: Propia]

**Tabla E.2 Variación de Esfuerzo Von Mises cuando se adiciona un camión**

[FUENTE: Propia]

Máximo Esfuerzo Von Mises [MPa]		
Condiciones		
Primera	Segunda	Tercera
74,79	74.83	75.27

### Cuarta condición



**Figura E.14 Respuesta en desgaste sobre refuerzo de sección media**  
[FUENTE: Propia]

Los mayores esfuerzos locales de Von Mises que desarrollaron en la sección media, en la zona de Cubierta para la cuarta condición fueron los siguientes 145.0 MPa y 109.77 MPa, respectivamente; valores que están 1.67 y 2.14, debajo del esfuerzo de fluencia 235 MPa.

El aumento del esfuerzo de Von Mises de la tercera condición a la cuarta como se muestra en la Tabla E.3, resulta significativo debido a que ha aumentado 1.88 veces, sin embargo, no resulta peligroso dado que está por debajo del permisible 235 MPa.

**Tabla E.3 Comparación de esfuerzo máximo**

[FUENTE: Propia]

Máximo Esfuerzo Von Mises [MPa]	
Tercera Condición	Cuarta Condición
75.23	145.0

### Influencia de la posición de las llantas

A continuación, se presenta la Tabla E.4 donde se detalla los esfuerzos máximos que se dan en el lugar donde se asientan las llantas de los camiones. Por lo que se observa que hay una influencia de aumento del 32% cuando las llantas están asentadas en los baos.

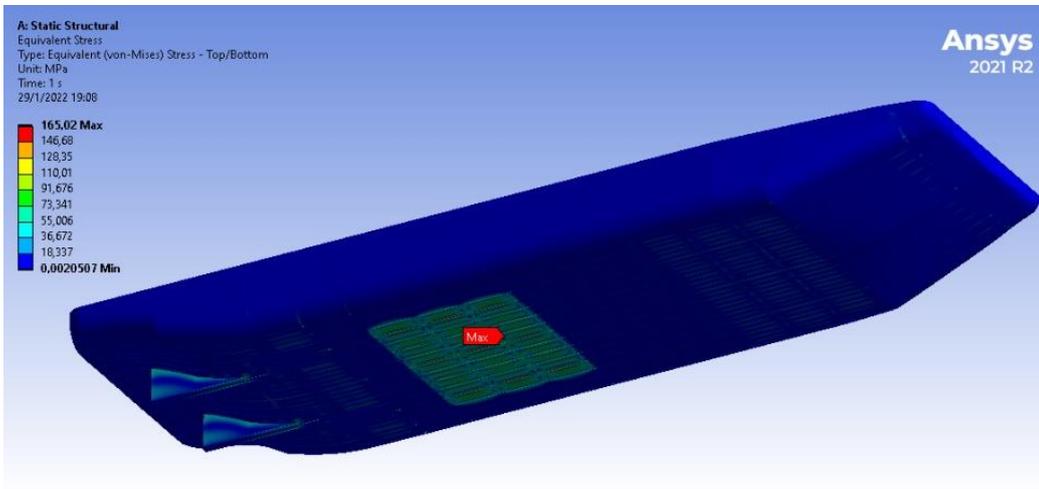
**Tabla E.4 Esfuerzos máximos en la tercera condición**

[FUENTE: Propia]

	Soportado		
	Bao	Refuerzo	Mamparo
Esfuerzo Von Mises [MPa]	50.9	75.17	62.19

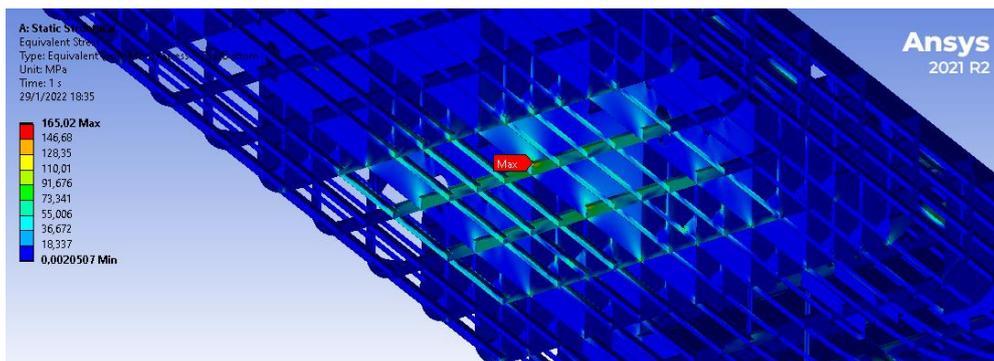
**Condición Adicional -Encallamiento - 50 cm**

El análisis de encallamiento se lo realizo en condición más crítica (seis 6 camiones a bordo, efecto de corrosión y omitiendo los refuerzos extras de las cuadernas), para ello se asumió una reducción de calado de 50 centímetros, donde la aplicación de la fuerza producida por la pérdida de boyantez se la realizo en 1/3 de área de fondo en sección media como lo indica la Figura E.15.



**Figura E.15 Modelado de encallamiento 50 cm**

[FUENTE: Propia]



**Figura E.16 Esfuerzo máximo de condición de encallamiento**

[FUENTE: Propia]

# APÉNDICE F

## IMPLEMENTACIÓN DE COMANDOS ANSYS WORKBENCH 2021 R2

### Standard Earth gravity

Comando que define el peso de los elementos estructurales.

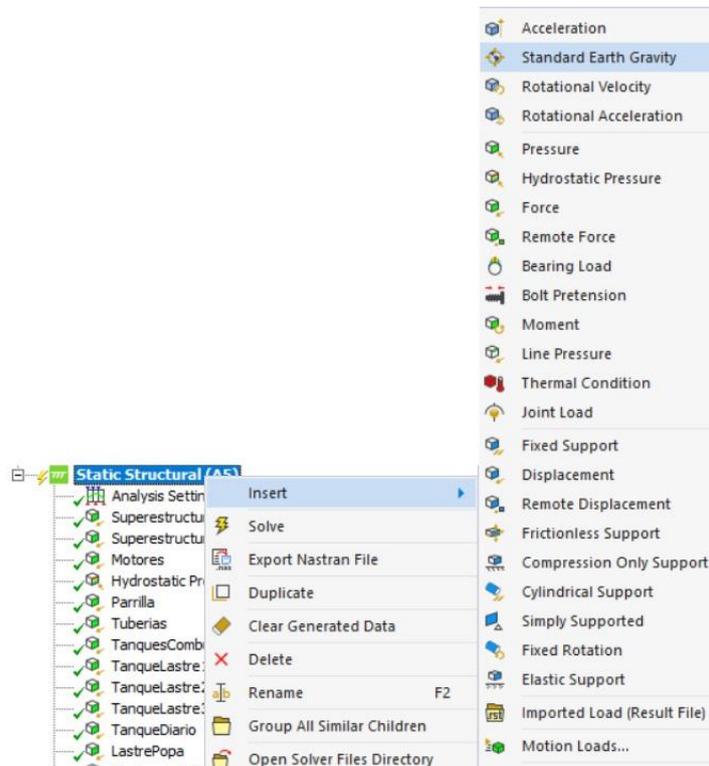


Figura F.1 Implementación de comando Standard earth gravity

[FUENTE: Propia]

### Batch connection

Comando que realiza conexiones automáticas, ajustar la tolerancia.

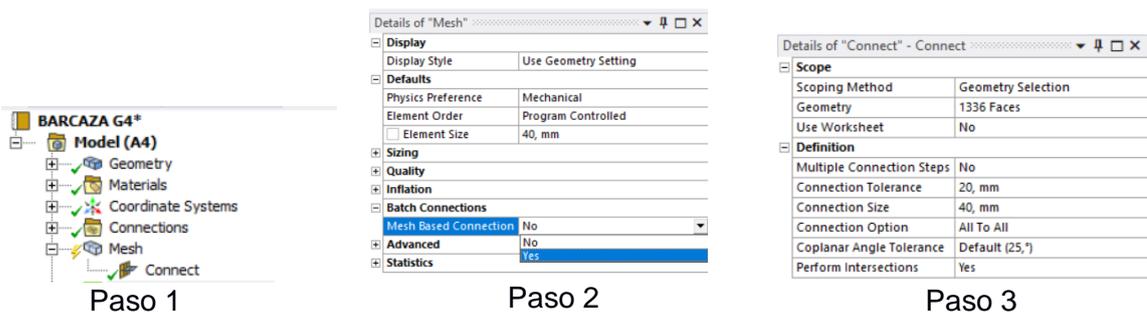


Figura F.2 Esquema de Implementación de Batch Connection

[FUENTE: Propia]