



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

“Análisis de la estructura primaria de una lancha planeadora de 13 metros sometida a Golpe Hidrodinámico”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Cristopher Ernesto Terranova Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a mis padres Alexandra y Jimmy por todo su esfuerzo, dedicación y por estar conmigo a pesar de todas las adversidades, a mis hermanos Camilo y Gabriel por apoyarme en cada decisión que he tomado, a mi pequeño sobrino Thiago quien se ha convertido en mi mayor inspiración, a mis amigos y demás familiares por los consejos y apoyo brindado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida, la fortaleza para cumplir esta meta y por ser quien soy hoy en día, a todas las personas que colaboraron durante la elaboración de este documento y un agradecimiento especial al PhD. José R. Marín López por su paciencia, su gran ayuda e incondicional apoyo en el desarrollo de este trabajo y durante el transcurso de mi etapa de pregrado.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Cristopher Ernesto Terranova Zambrano y doy mi 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”

Cristopher Ernesto Terranova Zambrano

EVALUADORES

.....
Ing. Hugo José Jama Aveiga

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD. José Rolando Marín López

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En este trabajo, se analiza la respuesta de la estructura primaria de una lancha planeadora de 13 metros a los golpes hidrodinámicos en la zona de Proa y en Sección Media. Para ello, se desarrolla un modelo numérico empleando el método de elementos finitos con el software ANSYS MECHANICAL WORKBENCH. La lancha analizada fue construida por Astinave EP, tiene 13 metros de eslora alcanzando una velocidad de 25 nudos y su material de construcción es aluminio 5086-H116. El trabajo empieza con la modelización geométrica de la estructura de la embarcación en 3 dimensiones en el programa RHINOCEROS, incluyendo refuerzos primarios, secundarios, y detalles estructurales tales como escuadras, pases de interconexión y aligeramientos, los cuales fueron bosquejados como superficies de 3 y 4 aristas. Este modelo geométrico consta de 1373 superficies.

Para el presente análisis se considera que actúan dos tipos de cargas: las hidrodinámicas y las inerciales. Para determinar las cargas hidrodinámicas que se aplican a la estructura en cada golpe, se estiman las presiones de impacto empleando las formulaciones desarrolladas por la sociedad clasificadora ABS para embarcaciones de alta velocidad, menores a 61 metros de eslora. La distribución de esta presión actuando en el fondo de toda la embarcación es alterada simulando el golpe hidrodinámico en dos zonas: Proa y Sección Media. Para ello se asume que la carga, tiene distribución sinusoidal, y que actúa desde la Roda a la cuaderna 5, y de la cuaderna 6 al Mamparo 2, respectivamente. Las magnitudes de las cargas hidrodinámicas aplicadas en cada caso, corresponden a un tercio y a la mitad del desplazamiento. Debido a que la resultante de estas cargas actúa en una línea de acción que no coincide longitudinalmente con el CG del buque, se presenta una aceleración rotacional del cuerpo rígido. Para equilibrar dinámicamente el sistema, se aplica una aceleración vertical de 1.05 [g's] y 1.59 [g's], y, rotacional de 8.68 y 3.82 [rad/seg²], en cada golpe descrito. Las cargas inerciales, inducidas en el cuerpo por el efecto de las primeras, fueron determinadas como el producto de la masa por la aceleración vertical resultante en cada elemento. Para el desarrollo del modelo estructural, se siguen las recomendaciones de la sociedad clasificadora ABS, una de las cuales especifica que la razón de aspecto de los elementos empleados no exceda

la relación 3:1 para el modelo Global. El modelo Global de la estructura de la lancha está formado por 571921 elementos (elementos planos y barras). Los elementos planos, representan el planchaje del casco y los refuerzos primarios, secundarios, y escuadras; mientras que los elementos barras representan los puntales de la embarcación.

Dado que ABS, establece valores para el Esfuerzo de Fluencia y de Corte del material en condición soldada, se comparan los valores obtenidos en ambos golpes con los de la referencia. Se obtiene que en Golpe de Proa no se sobrepasan los valores permisibles de la sociedad clasificadora (55 % en Fluencia y 50% en Corte). Sin embargo en el Golpe de Sección Media se obtienen valores que sobrepasan los permisibles (173 % en Fluencia y 170% en Corte). Los puntos de potencial falla son las conexiones del fondo, entre las cuadernas 09 y 10, y los refuerzos longitudinales.

Palabras Clave: Lancha, Golpe Hidrodinámico, Elementos, Modelo Estructural, Sociedad Clasificadora.

ABSTRACT

In this document, the author analyze the response of the primary structure of a 13-meter speed craft to hydrodynamic impact in the Bow and Middle Section areas. For do it, he develop a numerical model using the Finite Element Method with the ANSYS MECHANICAL WORKBENCH software. Astinave EP built the analyzed speedboat, it is 13 meters long reaching a speed of 25 knots and its construction material is aluminum 5086-H116. The work begins with the geometric modeling of the ship's structure in 3 dimensions in a program called RHINOCEROS; including primary and secondary girders, and structural details such as brackets, interconnection passes and lightning, which were sketched as surfaces of 3 and 4 edges. This geometric model consists of 1373 surfaces.

For the present analysis, it considers that two types of load act on the structure of the ship: hydrodynamic and inertial. To determine the hydrodynamic loads that are applied to the structure in each stroke, the impact pressures are estimated using the formulations developed by the ABS classification society for high-speed vessels, less than 61 meters in length. The distribution of this pressure acting at the bottom of the entire vessel is altered by simulating the hydrodynamic blow in two zones: Bow and Middle Section. For this, it is assumed that the load has a sinusoidal distribution, and that it acts from the Bow to the 5th Frame, and from the 6th Frame to the Bulkhead 2, respectively. The magnitudes of the hydrodynamic loads applied in each case correspond to one third and one half of the displacement. Because the resultant of these loads acts on a line of action that does not coincide longitudinally with the CG of the ship, a rigid body rotation occurs. To dynamically balance the system, a vertical acceleration of 1.05 [g's] and 1.59 [g's] is applied, and a rotational acceleration of 8.68 and 3.82 [rad / sec²] in each impact described. The inertial loads, induced in the body by the effect of the former, were determined as the product of the mass by the resulting vertical acceleration in each element. For the development of the structural model, the recommendations of the ABS classification society are followed, one of which specifies that the aspect ratio of the elements used does not exceed the 3: 1 ratio for the Global model. The Global model of the structure of the 13-meter speed craft, consists of 571921 elements (flat elements and bars). The flat elements represent the hull

surfaces, the primary and secondary girders, included the brackets; while the bar elements represents the columns of the ship.

Since ABS, establishes values for the Fluency and Shear Stress of the material in welded condition, the values obtained in both impacts are compared with those of the reference, and it is obtained that in the Bow Impact the permissible values of the classification society (55% in Fluency and 50% in Shear). However, critical values are obtained in the Mid-Section Impact (173% in Fluency and 170% in Shear). The potential failure points are in the bottom connections, between frames 09 and 10, and the longitudinal reinforcements.

Keywords: *Craft, Hydrodynamic Impact, Elements, Structural Model, Classification Society.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE PLANOS	II
CAPÍTULO 1	3
Introducción	3
Descripción del problema	4
Justificación del problema.....	4
Objetivos.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5
Marco teórico	6
Definición de Presión de “Slammimg”.....	6
Descripción General de la Lancha.....	9
Preparación del Modelo Geométrico de la lancha planeadora	16
CAPÍTULO 2.....	20
Metodología	20
Desarrollo del modelo estructural empleando ANSYS	20
Cálculo de las Presiones por Slamming en el fondo de la estructura	26
Golpe de Proa	33

Golpe por Sección Media	35
Equilibrio Dinámico de las fuerzas aplicadas a la estructura	36
Equilibrio Dinámico tras golpe en zona de Proa	39
Determinación de las cargas inerciales de la embarcación	42
CAPÍTULO 3.....	45
Resultados y Análisis.....	45
Criterios de Aceptación en embarcaciones planeadoras.....	45
Resultados Numéricos del Golpe Hidrodinámico en ambas secciones.....	46
Resultados del Golpe Hidrodinámico por Proa.....	46
Resultados del Golpe Hidrodinámico por Sección Media.....	59
Análisis primario de la estructura de la lancha.....	60
Análisis primario de la estructura de la lancha sometida a golpe hidrodinámico por Proa	60
Análisis de la estructura de la lancha sometida a golpe hidrodinámico por Sección Media	71
CAPÍTULO 4.....	74
Conclusiones Y Recomendaciones	74
Conclusiones	74
Recomendaciones	75
BIBLIOGRAFÍA.....	77
APÉNDICES	78
APÉNDICE A	79
RESULTADOS NUMÉRICOS DEL GOLPE HIDRODINÁMICO POR SECCIÓN MEDIA	79

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ABS	American Bureau Shipping
TRB	Tonelaje de Registro Bruto
ASTM	American Society of Testing Materials
LCF	Longitudinal Center of Flotation
LCG	Longitudinal Center of Gravity
KG	Centre of Gravity
LAE	Lancha de la Armada del Ecuador
LG	Lancha Guardacostas

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
Kg	Kilogramo
N	Newton
Loa	Eslora total en metros
L	97% de Loa
B	Manga en metros
D	Puntal en metros
T	Calado en metros
Pa	Pascal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Descripción gráfica de la secuencia del Impacto Hidrodinámico del fondo del casco de un buque.....	6
Figura 1.2 Impacto de la Ola rompiente en el fondo de una embarcación.....	7
Figura 1.3 Impacto Hidrodinámico en la zona de Proa de la embarcación	8
Figura 1.4 Distribución de pesos de la LAE Río Cononaco	15
Figura 1.5 Modelo Geométrico del Casco (Líneas) de la LAE Río Cononaco	16
Figura 1.6 Casco modelado en 3D de la LAE Río Cononaco	17
Figura 1.7 Superficies del Modelo Geométrico de la embarcación planeadora	17
Figura 1.8 Detalles estructurales del Modelo Geométrico de la Lancha	19
Figura 2.1 Desarrollo del modelo estructural empleando el método de elementos finitos	21
Figura 2.2 Modelo Geométrico importado (Detalles de la estructura de la lancha)....	22
Figura 2.3 Comparación entre la Lancha y el modelo geométrico desarrollado (Casco)	23
Figura 2.4 Conexiones de los elementos de la estructura de la Lancha Planeadora.	24
Figura 2.5 Presiones debidas al Impacto Hidrodinámico y a la Carga Inercial en la LAE Río Cononaco.....	25
Figura 2.6 Diagrama de Flujo para el cálculo de la presión dinámica en el Fondo de embarcaciones planeadoras [6].....	29
Figura 2.7 Distribución de la Presión por Slamming en el fondo de la lancha	30
Figura 2.8 Distribución espacial de la Presión de Slamming en la Lancha.....	33
Figura 2.9 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Proa	34
Figura 2.10 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Sección Media	36
Figura 2.11 Diagrama de Cuerpo Libre de la lancha durante el Impacto hidrodinámico en la sección de Proa.	38
Figura 2.12 Equilibrio Dinámico en Golpe de Proa de la LAE Río Cononaco.....	41
Figura 2.13 Distribución Longitudinal de la aceleración vertical resultante en la lancha por los Golpes Hidrodinámicos en el Fondo	43
Figura 2.14 Distribución longitudinal de la Fuerza Inercial en la LAE Río Cononaco	44

Figura 2.15 Distribución de Cargas Estáticas en la LAE Río Cononaco	44
Figura 3.1 Esfuerzo normal en sentido axial (dirección “Y”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	48
Figura 3.2 Esfuerzo normal en sentido transversal (dirección “Z”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa.....	49
Figura 3.3 Esfuerzo normal en sentido vertical (dirección “X”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	50
Figura 3.4 Esfuerzos cortantes en el plano “XZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	51
Figura 3.5 Esfuerzos cortantes en el plano “YZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	52
Figura 3.6 Esfuerzos cortantes en el plano “XY” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	53
Figura 3.7 Deformación en sentido axial “Y” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	55
Figura 3.8 Deformación en sentido transversal “Z” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	56
Figura 3.9 Deformación en sentido vertical “X” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	57
Figura 3.10 Esfuerzo equivalente de von Mises en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa	58
Figura 3.11 Cortes para analizar esfuerzos normales y cortantes a nivel primario....	61
Figura 3.12 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, Corte 1.....	62
Figura 3.13 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, Corte 1.....	63
Figura 3.14 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en la Cubierta de la Lancha, Corte 1.....	64
Figura 3.15 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 50%L	65
Figura 3.16 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, 50%L	65

Figura 3.17 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 50%L	66
Figura 3.18 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 74%L	67
Figura 3.19 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, 74%L	67
Figura 3.20 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en la Cubierta de la Lancha, 74%L	68
Figura 3.21 Distribución de Esfuerzo Normal en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Proa	69
Figura 3.22 Desplazamiento del ala de la Quilla en el compartimento 3 de la LAE Río Cononaco	71
Figura 3.23 Distribución de Esfuerzo Normal en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Sección Media	73
Figura 0.1 Esfuerzo normal en sentido axial (dirección “Y”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	80
Figura 0.2 Esfuerzo normal en sentido transversal (dirección “Z”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	81
Figura 0.3 Esfuerzo normal en sentido vertical (dirección “X”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media.....	82
Figura 0.4 Esfuerzos cortantes en el plano “XZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	83
Figura 0.5 Esfuerzos cortantes en el plano “YZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Medi	84
Figura 0.6 Esfuerzos cortantes en el plano “XY” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	85
Figura 0.7 Deformación en sentido axial “Y” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	86
Figura 0.8 Deformación en sentido transversal “Z” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	87
Figura 0.9 Deformaciones en sentido vertical “X” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media	88

Figura 0.10 Esfuerzo equivalente de von Mises en la estructura primaria de la Lancha
tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media 89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características Principales de la LAE Río Cononaco [1]	10
Tabla 1.2 Escantillonado de los elementos estructurales [1]	13
Tabla 1.3 Propiedades mecánicas y físicas del aluminio 5086 H116	15
Tabla 2.2 Distribución espacial de la presión por Slamming en el fondo de la Lancha	32
Tabla 2.3 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Proa	34
Tabla 2.4 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Sección Media	35
Tabla 2.5 Distribución espacial de Presión corregida, golpe por Proa.....	39
Tabla 2.6 Presión por unidad de Longitud en el Fondo de la LAE Río Cononaco	40
Tabla 2.7 Resumen de los equilibrios dinámicos en la LG Río Cononaco.....	42
Tabla 3.1 Resumen de los valores de esfuerzos de membrana y deflexiones generadas en la LAE Río Cononaco	59
Tabla 3.2 Estimación de Carga normal y Momento Flector máximo en la Sección Media de la embarcación tras Golpe de Proa.....	70
Tabla 3.3 Estimación de Carga normal y Momento Flector máximo en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Sección Media.....	72

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1.1 Líneas de Formas de la LAE Río Cononaco [1].....	11
Plano 1.2 Distribución General de la LAE Río Cononaco [1].....	12
Plano 1.3 Detalle Estructural de la Cubierta de la LAE Río Cononaco [1].....	14

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las lanchas planeadoras alcanzan altas velocidades de navegación y sus cascos son sometidos constantemente a golpes contra el agua (“slamming”) que se ejercen cuando impactan con la superficie del mar, [1]. Las cargas generadas por las presiones de slamming, causan altos niveles de esfuerzo en el fondo, y cuando son integradas longitudinalmente, en la estructura primaria de la lancha. La sociedad clasificadora American Bureau of Shipping [2] y [3], propone un esquema para el análisis de embarcaciones de alta velocidad, empleando el método de Elementos Finitos. Dicha referencia, presenta también fórmulas para estimar las presiones por slamming y las aceleraciones que se producirán en el centro de gravedad del buque.

En el presente trabajo se va a analizar el comportamiento de la estructura primaria de una embarcación planeadora de 13 metros de eslora, y que opera a 25 nudos. Para ello se aplicarán dos tipos de cargas en la estructura de la lancha: las ejercidas por la presión de impacto y las inerciales, resultantes por la acción de las primeras. El efecto de la carga de slamming actuando en el fondo de la embarcación en forma distribuida, [2] y [5], causa una aceleración vertical en el buque. Pero, dado que la línea de acción de la integral de presión no está alineada con el centro de gravedad de la embarcación, se produce también una aceleración rotacional del cuerpo rígido. El análisis estructural se puede completar aplicando el principio de D’Alembert, [4], y considerando el equilibrio cuasiestático del sistema.

Para considerar el efecto del golpe de slamming sobre la estructura primaria se representará completamente la estructura de la lancha planeadora empleando el Método de Elementos Finitos, [7]. El modelo global de la viga buque incluirá sus principales miembros estructurales, y se considerará como cargas la presión de impacto, y las cargas inerciales producidas por las aceleraciones resultantes. A diferencia del trabajo desarrollado por Menéndez, [6], en el que se analizan los esfuerzos en el fondo del casco, en este trabajo se enfatizará en la respuesta de la estructura primaria de la embarcación planeadora al someterla a golpes hidrodinámicos en Proa, y en Sección Media.

Descripción del problema

En nuestro país la construcción de embarcaciones tanto para el sector privado como público (Defensa) está presentando un importante auge, sobretodo embarcaciones de esloras menores, las que alcanzan altas velocidades. En el sector de la Defensa, estas embarcaciones son empleadas para realizar constantes patrullajes en las zonas protegidas de nuestro mar territorial, operando en diferentes estados de mar y desarrollando velocidades muy altas. Durante su operación, la estructura de este tipo de embarcaciones, especialmente el fondo, es sometida a constantes golpes hidrodinámicos, lo que podría generar alguna avería o falla.

Justificación del problema

Las lanchas planeadoras alcanzan altas velocidades de navegación y sus cascos son sometidos constantemente a golpes contra el agua (“slamming”) que se ejercen cuando impactan con la superficie del mar, [1]. Las cargas generadas por las presiones de slamming, causan altos niveles de esfuerzo en el fondo, y cuando son integradas longitudinalmente, en la estructura primaria de la lancha. La sociedad clasificadora American Bureau of Shipping [2] y [3], propone un esquema para el análisis de embarcaciones de alta velocidad, empleando el método de Elementos Finitos. Dicha referencia, presenta también fórmulas para estimar las presiones por slamming y las aceleraciones que se producirán en el centro de gravedad del buque.

A través de este proyecto, se podrá determinar un esquema de análisis preliminar que puede ser empleado al momento de diseñar embarcaciones planeadoras, con la finalidad de que su estructura primaria no se vea afectada por las cargas externas e inerciales que actúan en la misma. Este estudio, permitirá realizar un análisis preliminar de la estructura de la embarcación que sea rápido y confiable.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el comportamiento primario de la estructura de una lancha planeadora de 13 metros al someterla a carga dinámica producida por la presión de impacto para la determinación de su resistencia estructural.

Objetivos Específicos

- Plantear un modelo numérico global de la estructura primaria de la lancha planeadora empleando el método de elementos finitos.
- Determinar las cargas estructurales e inerciales aplicadas a la estructura que resultan del golpe hidrodinámico mediante los criterios de la sociedad clasificadora American Bureau of Shipping (ABS).
- Identificar la respuesta de la estructura primaria de la lancha al someterse a golpe hidrodinámico en Proa y en sección Media.

Marco teórico

Definición de Presión de “Slamming”

Las cargas de “slamming” que se producen en el casco de un buque, son cargas dinámicas que resultan del impacto de una ola con el fondo de la sección de proa y otras partes de su estructura. Cuando una embarcación opera a altas velocidades, especialmente en mar abierto, la proa puede emerger ocasionalmente de una ola y re-ingresar a la siguiente ola con una fuerte carga de impacto en la sección de la proa que está en contacto con el agua.

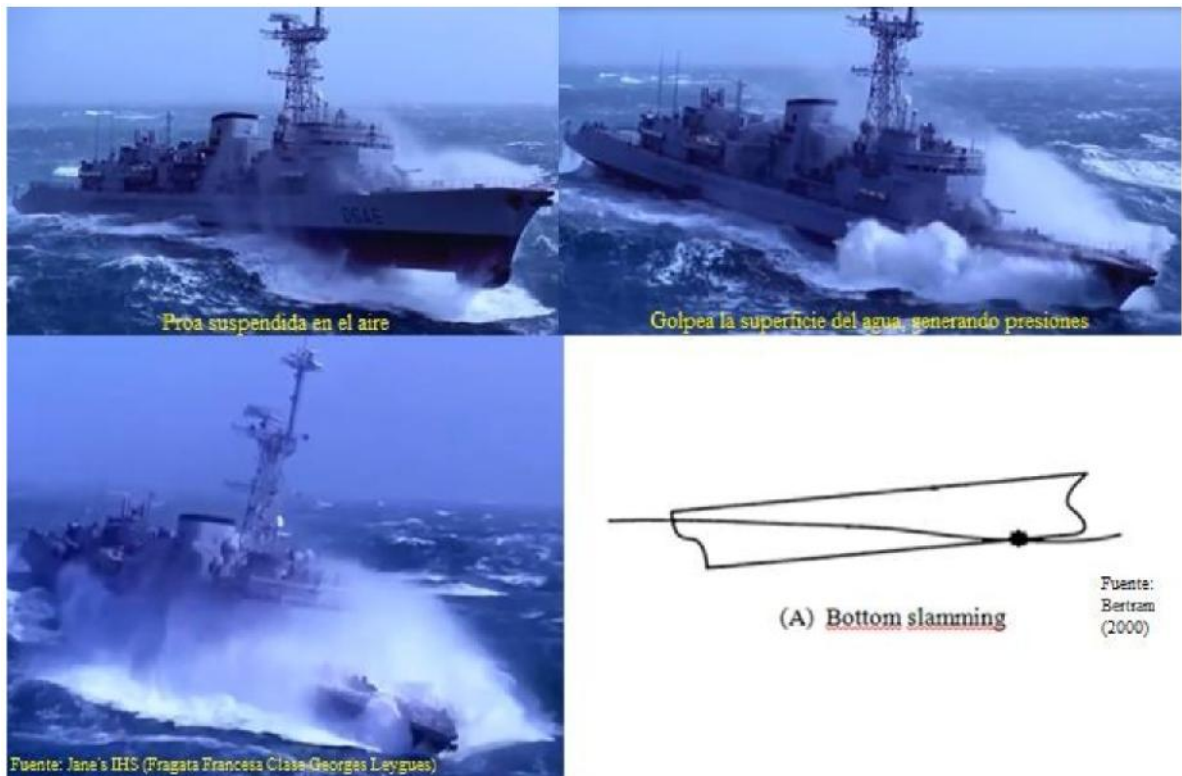


Figura 1.1 Descripción gráfica de la secuencia del Impacto Hidrodinámico del fondo del casco de un buque.

A lo largo del tiempo, varios autores han estudiado en diferentes épocas este fenómeno, el cual se resume en los siguientes análisis:

Von Karman (1929), formuló el golpe de una cuña contra aguas tranquilas (simulando así el impacto del pontón de un hidroavión).

Satavovy & Chuang (1976), formularon la presión de slamming como el cuadrado de la velocidad al momento del impacto, según como se muestra a continuación:

$$P(x, y, z, t) = k V^2 \quad (1.1)$$

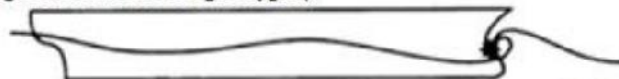
Donde k es un factor adimensional de presión que depende de la forma del casco y V^2 es el cuadrado de la velocidad instantánea.

Bertram (2000), realizó las siguientes afirmaciones:

- El slamming es un fenómeno no lineal y aleatorio. Los impactos con un alto nivel de esfuerzo sumado a un alto número de ciclos acumulan fatiga.
- Las predicciones del comportamiento de las rutas marítimas son procesos estocásticos.
- El atrapamiento del aire ocasiona flujos compresibles – supersónicos.



Fuente: Jane's IHS (Fragata Francesa Clase Georges Leygues)



(C) Breaking wave impact

Fuente:
Bertram
(2000)

Figura 1.2 Impacto de la Ola rompiente en el fondo de una embarcación

Según Salas (2001), el slamming depende principalmente de dos parámetros:

- a. Velocidad relativa de impacto del casco contra el agua, (dependiendo de la elevación).
- b. Geometría instantánea del casco relativa a la superficie libre, (a $<$ ángulo de impacto $>$ presión, siendo la mayor a 2°), (a 0° la presión disminuye por el aire que queda atrapado).

Wang (2011), determinó que el slamming no solo afecta la zona donde golpea sino todo el casco.



Fuente: Jane's IHS (Fragata Francesa Clase Georges Leygues)



(B) Bow-flare slamming

Fuente:
Bertram
(2000)

Figura 1.3 Impacto Hidrodinámico en la zona de Proa de la embarcación

Localmente, varios autores han realizado publicaciones relacionadas a este fenómeno. Menéndez C. (2014), determinó la respuesta del fondo estructural de una embarcación planeadora de 11 m de eslora generada por la presión de impacto (slamming) construyó dos modelos estructurales: uno global y otro local. Townsend P. (2018), analizó el comportamiento a impacto de materiales compuestos bajo el fenómeno de slamming en embarcaciones de alta velocidad, para ello propuso la inserción de una capa viscoelástica en un panel laminado de GFRP de una embarcación planeadora con la finalidad de disminuir la propagación del daño producido por el impacto repetitivo del fenómeno de slamming.

Descripción General de la Lancha

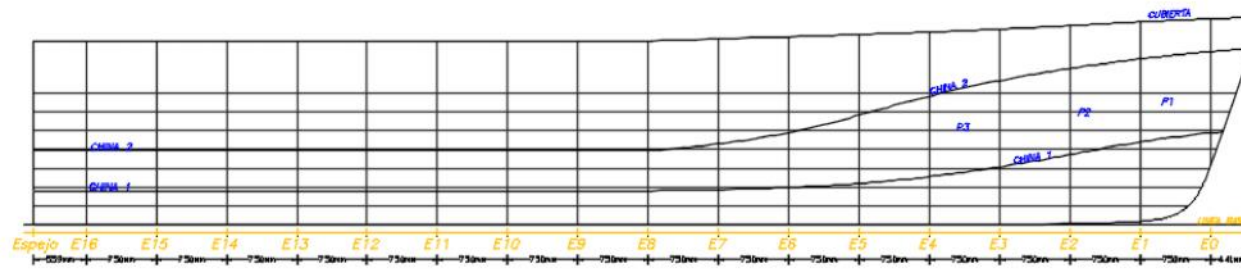
La lancha analizada en este trabajo tiene 13 metros de eslora y por su alta velocidad se la considera de tipo planeador, por lo que la estructura del fondo soporta elevadas presiones. Esta embarcación, desplaza aproximadamente 18 toneladas en agua salada, tiene un ángulo de astilla muerta de 12.3° medido a la altura del centro de gravedad y opera con un Froude volumétrico de 2.6. Está diseñada con cuadernaje longitudinal, con espaciamiento entre longitudinales de 0.45 metros, y, transversalmente variando entre 0.50 y 0.75 metros. El material de construcción de la estructura del casco es aluminio de uso naval, aleación 5086 y su espesor es de 1/4" en el fondo. Dadas las condiciones de trabajo de la lancha, la estructura primaria de la embarcación podría verse afectada por los continuos golpes del fondo contra la superficie del mar.

Las lanchas LP-AST 1304 fueron construidas por ASTINAVE EP, prestan servicio en las costas del Ecuador, y forman parte del Cuerpo de Guardacostas de nuestro país. Una de las cuatro lanchas de esta serie, es la LAE Río Cononaco y su estructura primaria es causa de este estudio. Las características principales y las líneas de formas de la embarcación se presentan en la Tabla 1.1 y Plano 1.1, respectivamente.

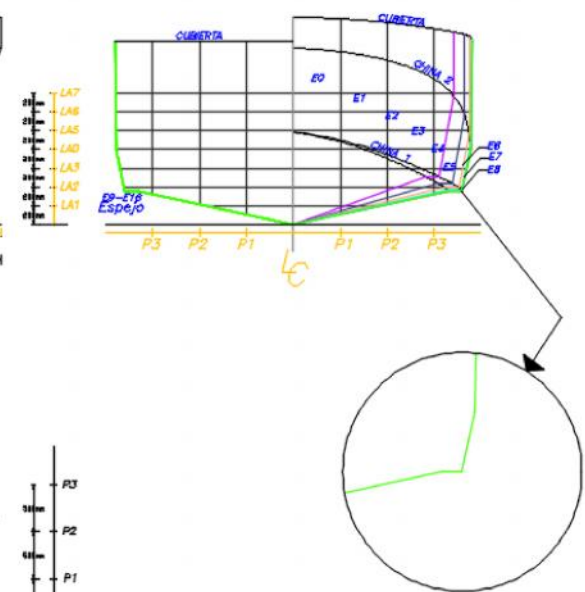
Tabla 1.1 Características Principales de la LAE Río Cononaco [1]

Descripción	Dimensiones	Unidades
Eslora Total	13.00	[m]
Manga	3.80	[m]
Puntal	1.96	[m]
Calado de Diseño	0.80	[m]
Desplazamiento	18.00	[ton]
Velocidad máxima	25.00	[nudos]
Ángulo de astilla muerta	12.32	[°]
Capacidad de tripulantes	4	

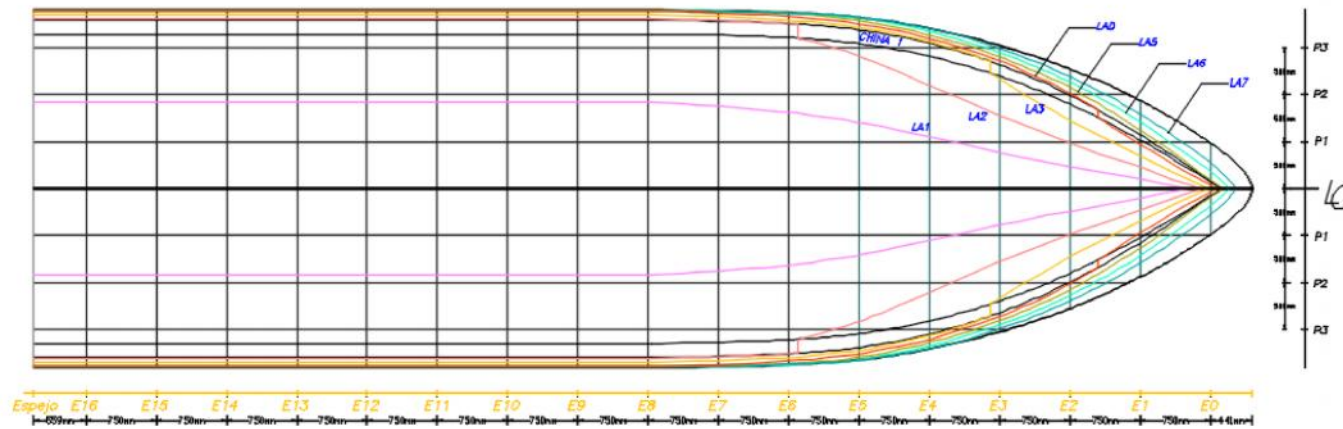
VISTA LONGITUDINAL DE PERFIL



VISTA TRANSVERSAL

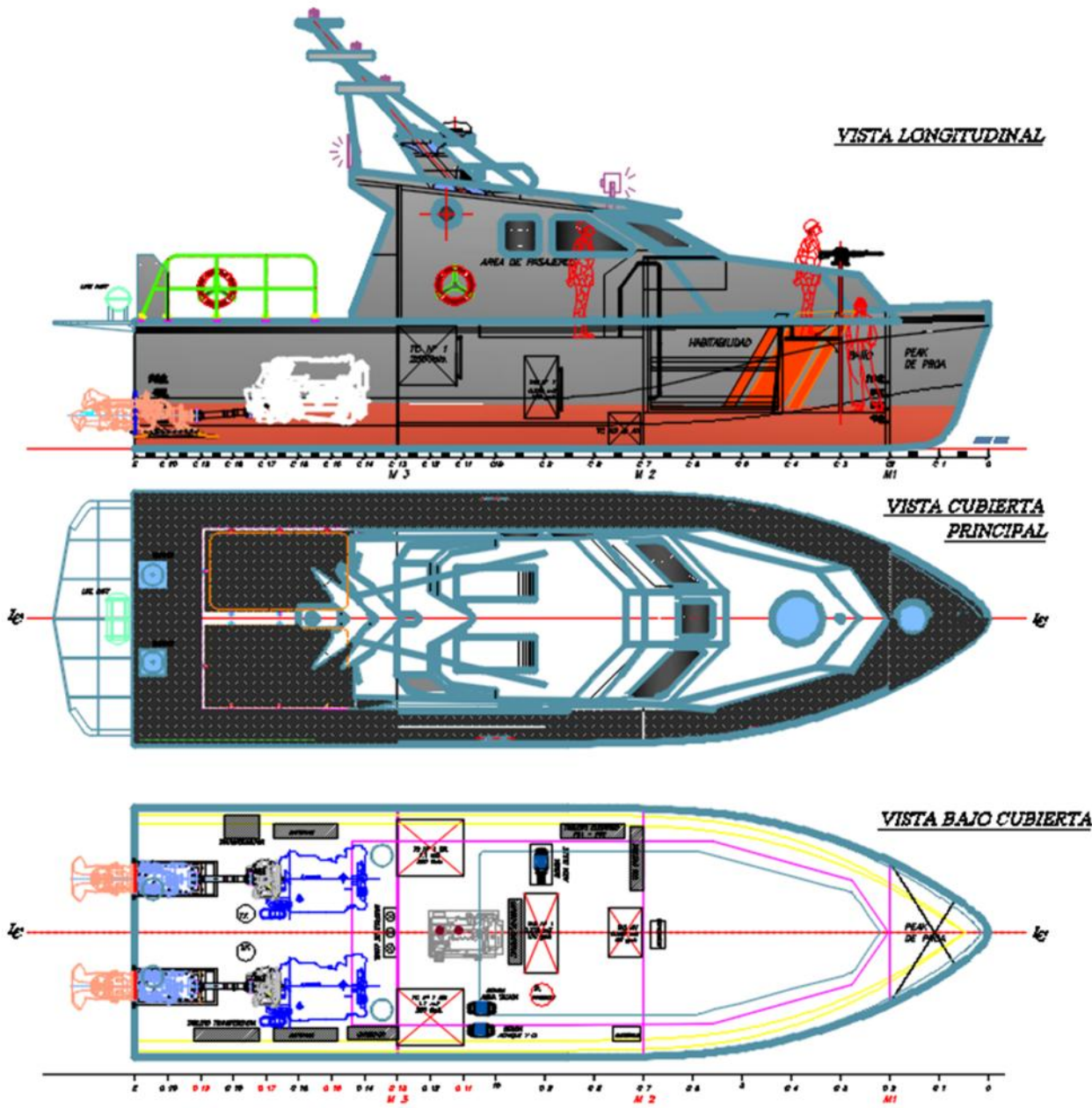


VISTA LONGITUDINAL DE PLANTA



Plano 1.1 Líneas de Formas de la LAE Río Cononaco [1]

Uno de los detalles del diseño de esta lancha, es la doble china que posee, típica en embarcaciones de tipo planeador (Véase en Plano 1.1). Su casco, está compartimentado por 3 mamparos transversales que delimitan las áreas de: péak de proa, zona de habitabilidad de la tripulación, puente de gobierno y sala de máquinas. Posee una cubierta intermedia destinada para uso del puente de mando y habitabilidad.



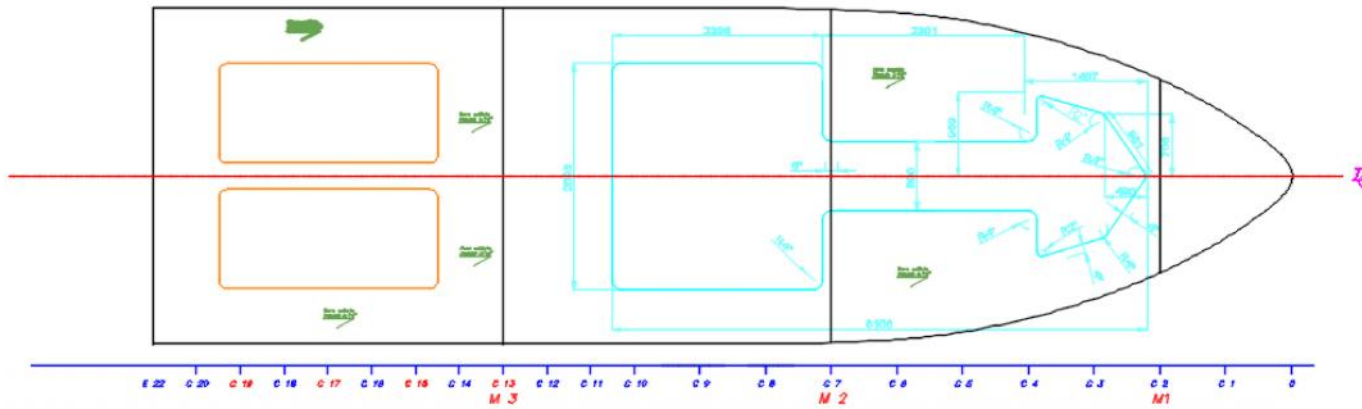
Plano 1.2 Distribución General de la LAE Río Cononaco [1]

La estructura de la embarcación está reforzada por 17 cuadernas, las que están espaciadas 500 [mm] desde sección media hacia popa (entre las cuadernas 10 y 20), y 750 [mm] desde sección media hasta proa (entre las cuadernas 01 y 09), como se muestra en el Plano 1.3. En sentido longitudinal está reforzada por 6 ángulos y la quilla tipo Rub Rail, los cuales equidistan entre sí 450 [mm]. En sala de máquinas, 4 de estos ángulos que refuerzan longitudinalmente la estructura del fondo se convierten en las bases de los dos motores de combustión interna que alimentan el sistema de propulsión de la embarcación. En la Tabla 1.2 se presenta el escantillonado de la embarcación analizada.

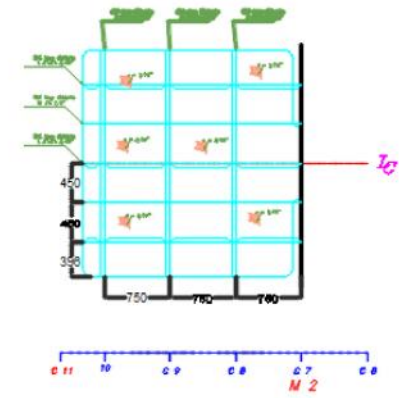
Tabla 1.2 Escantillonado de los elementos estructurales [1]

	Ubicación	Elemento Estructural	Descripción	Dimensiones [mm]
ENTRE ESPEJO Y MAMPARO 3	FONDO	Planchaje		6.35
		Varenga		Espesor: 12.7
		Base de Máquinas	Ángulo	348 x 127 x 12.7
		Refuerzo Longitudinal	Ángulo	50.8 X 50.8 X 6.35
		Quilla	Rub Rail	127 X 25.4 X 12.7 X 8
	COSTADO	Planchaje		4.76
		Cuaderna	Ángulo	76.2 x 76.2 X 6.35
		Refuerzo Longitudinal	Platina	76.2 x 6.35
	CUBIERTA	Planchaje		4.76
		Refuerzo Longitudinal	T	101.6 x 50.8 x 6.35
		Bao	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Puntales	Tubo	76.2 X 6.35
	ESPEJO	Planchaje		6.35
		Refuerzo Vertical	Ángulo	76.2 x 76.2 x 6.35
		Refuerzo Transversal	Platina	76.2 x 6.35
ENTRE MAMPARO 3 Y PROA	FONDO	Planchaje		6.35
		Varenga		Espesor: 6.35
		Refuerzo Longitudinal	Ángulo	50.8 X 50.8 X 6.35
		Quilla	Rub Rail	127 X 25.4 X 12.7 X 8
	COSTADO	Planchaje		4.76
		Cuaderna	Ángulo	50.8 x 50.8 X 4.76
		Refuerzo Longitudinal	Platina	50.8 x 6.35
	CUBIERTA	Planchaje		4.76
		Refuerzo Longitudinal	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Bao	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Puntales	Tubo	50.8 X 4.76
	MAMPAROS	Planchaje		4.76
		Refuerzo Vertical	Ángulo	50.8 x 50.8 x 6.35
		Refuerzo Transversal	Platina	50.8 x 6.35
	ESCUADRAS			

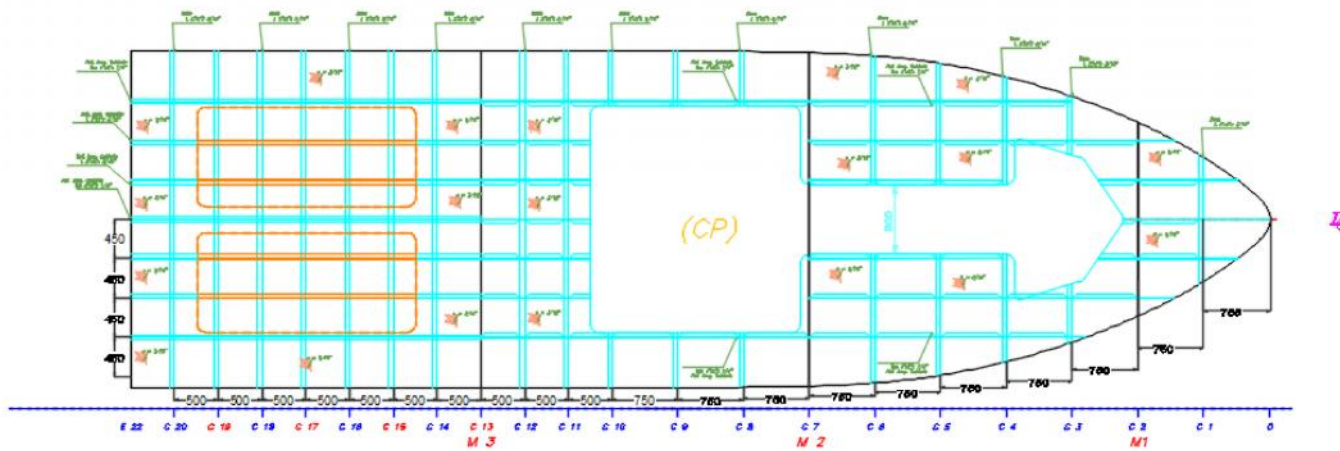
VISTA EN PLANTA DE CUBIERTA



CUBIERTA DE PUENTE (CP)



ESTRUCTURALES DE CUBIERTA



Plano 1.3 Detalle Estructural de la Cubierta de la LAE Río Cononaco [1]

La distribución de los pesos de la embarcación, se muestra en la Figura 1.4. Esta gráfica se obtuvo de la referencia [1], a partir de planos estructurales, de distribución y lista de materiales que constan en la memoria técnica de la Lancha.

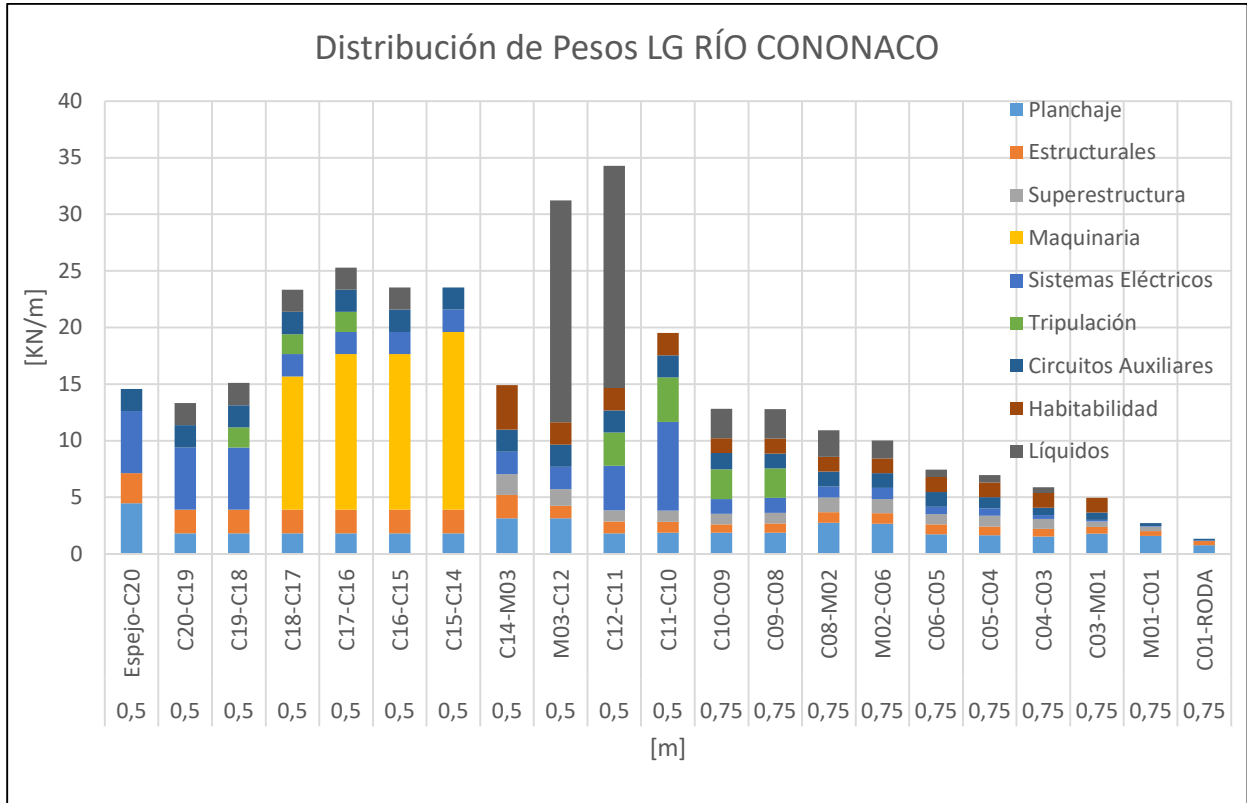


Figura 1.4 Distribución de pesos de la LAE Río Cononaco

El material de construcción del casco de la embarcación planeadora es aluminio de tipo marino, con especificación 5086 H116 y sus propiedades se muestran en la Tabla 1.3.

Característica		Dimensiones	Unidades
Densidad		2660	[Kg/m ³]
Límite Elástico	y	207.80	[N/mm ²]
Módulo de Elasticidad	E	7.10E+04	[N/mm ²]
Módulo de Corte	G	2.50E+04	[N/mm ²]
Razón de Poisson		0.33	

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas y físicas del aluminio 5086 H116

Preparación del Modelo Geométrico de la lancha planeadora

Para su posterior análisis estructural, el casco de la LAE Río Cononaco fue modelado en 3 dimensiones empleando el software Rhinoceros. Por ello, se empezó trazando las líneas de formas de la embarcación, y posteriormente se crearon superficies. Las superficies generadas representan el planchaje del fondo, costado, cubierta, espejo, mamparos, escuadras, refuerzos longitudinales y transversales de la embarcación. Este plano será importado posteriormente desde el programa ANSYS MECHANICAL WORKBENCH 17.2 para completar el modelo estructural y analizarlo empleando el Método de Elementos Finitos.

En la Figura 1.5 se muestran las líneas que forman la geometría del casco en 3D de la embarcación planeadora generadas en Rhinoceros. Las líneas de color rojo representan las estaciones (cuadernas) de la lancha; las verdes los perfiles y las azules las líneas de agua del plano en 2 dimensiones.

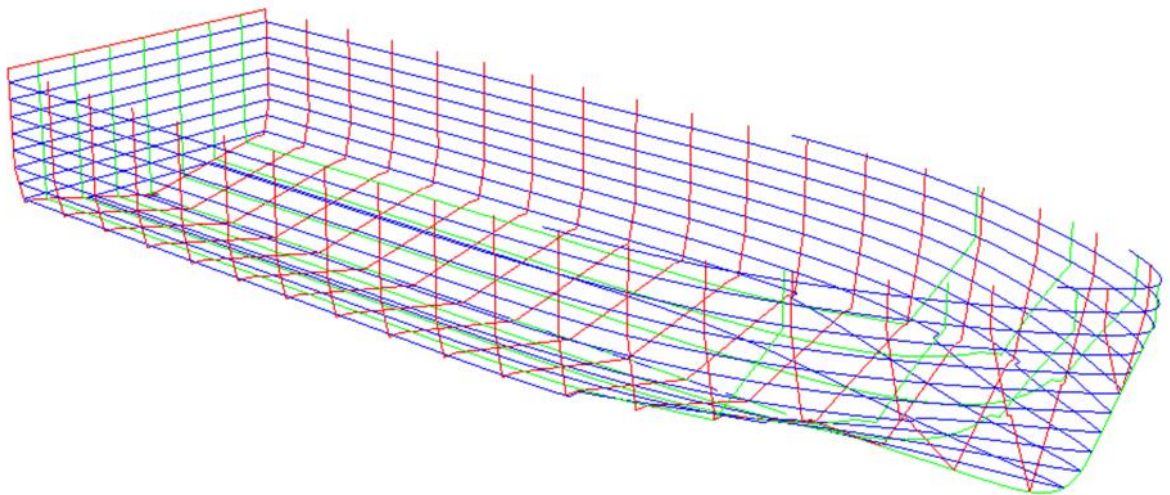


Figura 1.5 Modelo Geométrico del Casco (Líneas) de la LAE Río Cononaco

Posteriormente, se generan las superficies que forman el casco de la embarcación (véase Figura 1.6).

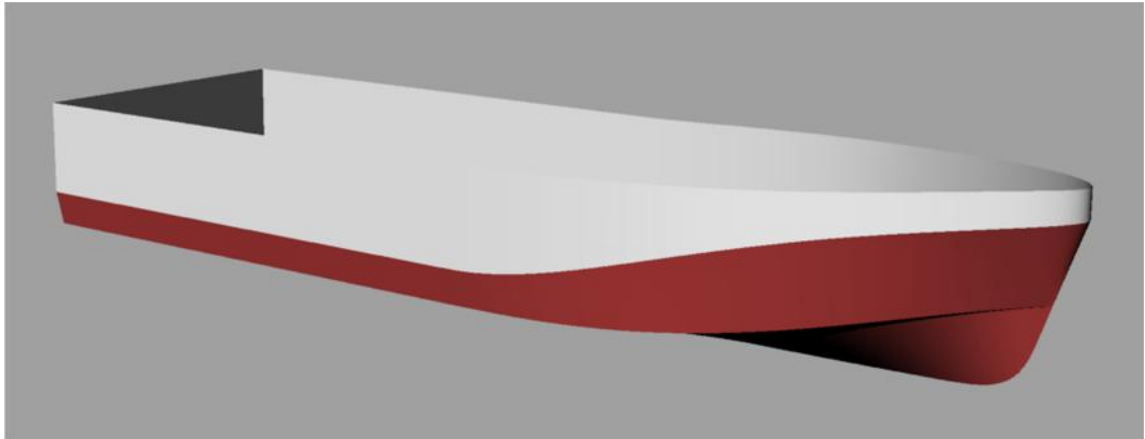


Figura 1.6 Casco modelado en 3D de la LAE Río Cononaco

En el modelo geométrico (Figura 1.7) se representa únicamente la mitad de la embarcación, puesto que se aprovechará la simetría del problema. El origen del sistema de coordenadas está ubicado en la intersección del espejo con la quilla y el fondo, con el eje “x” en dirección Popa-Proa, el “y” en sentido Crujía-Babor, y el eje “z” direccionado hacia arriba.

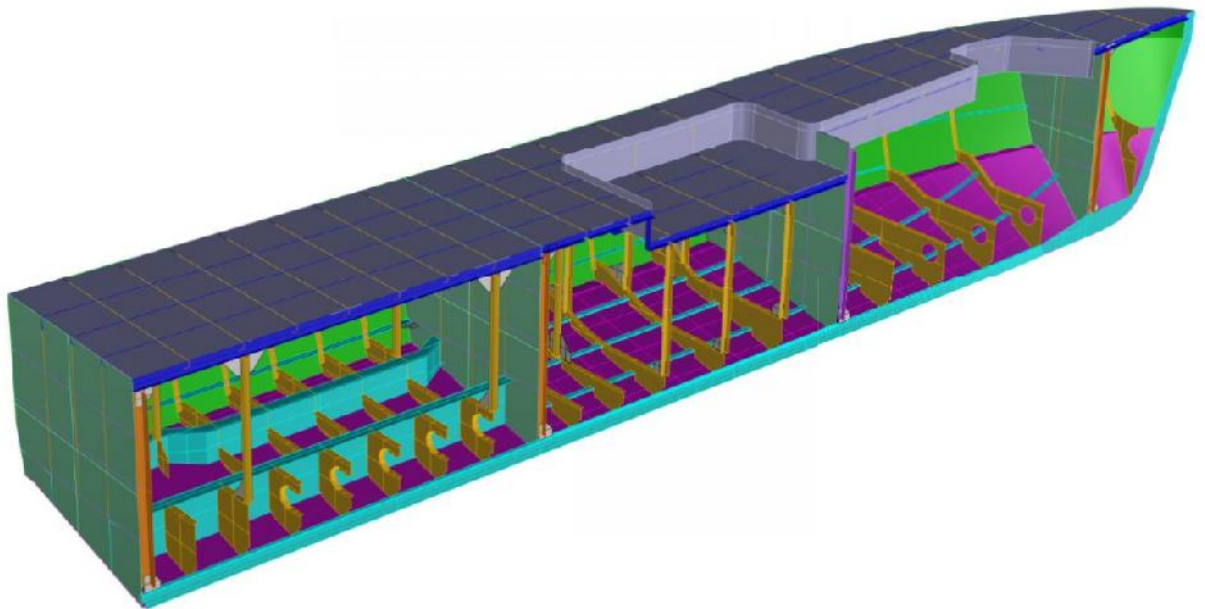


Figura 1.7 Superficies del Modelo Geométrico de la embarcación planeadora

Con las líneas empleadas para realizar el bosquejo de las formas en 3 dimensiones de la lancha, se generan superficies con las cuales se desarrolla el modelo geométrico de la embarcación planeadora, como se muestra en la Figura 1.7. Para dicho modelo, se usan superficies poligonales de 3 y 4 aristas, dando énfasis en las conexiones estructurales del fondo, costado y cubierta. El tipo de superficie recomendado en este tipo de análisis, es superficie por red de curva “network surface”, puesto que la genera directamente por las aristas que la van a formar. Esto hace que al momento de ser importada desde un programa de análisis estructural (Ansys Mechanical Workbench), se reconozca apropiadamente la geometría y no se genere conflicto con el interfaz gráfico.

En la Figura 1.8, se muestran algunos detalles de las conexiones de la estructura de la lancha planeadora. Se hace énfasis en las uniones del fondo, costado y cubierta de los elementos estructurales.

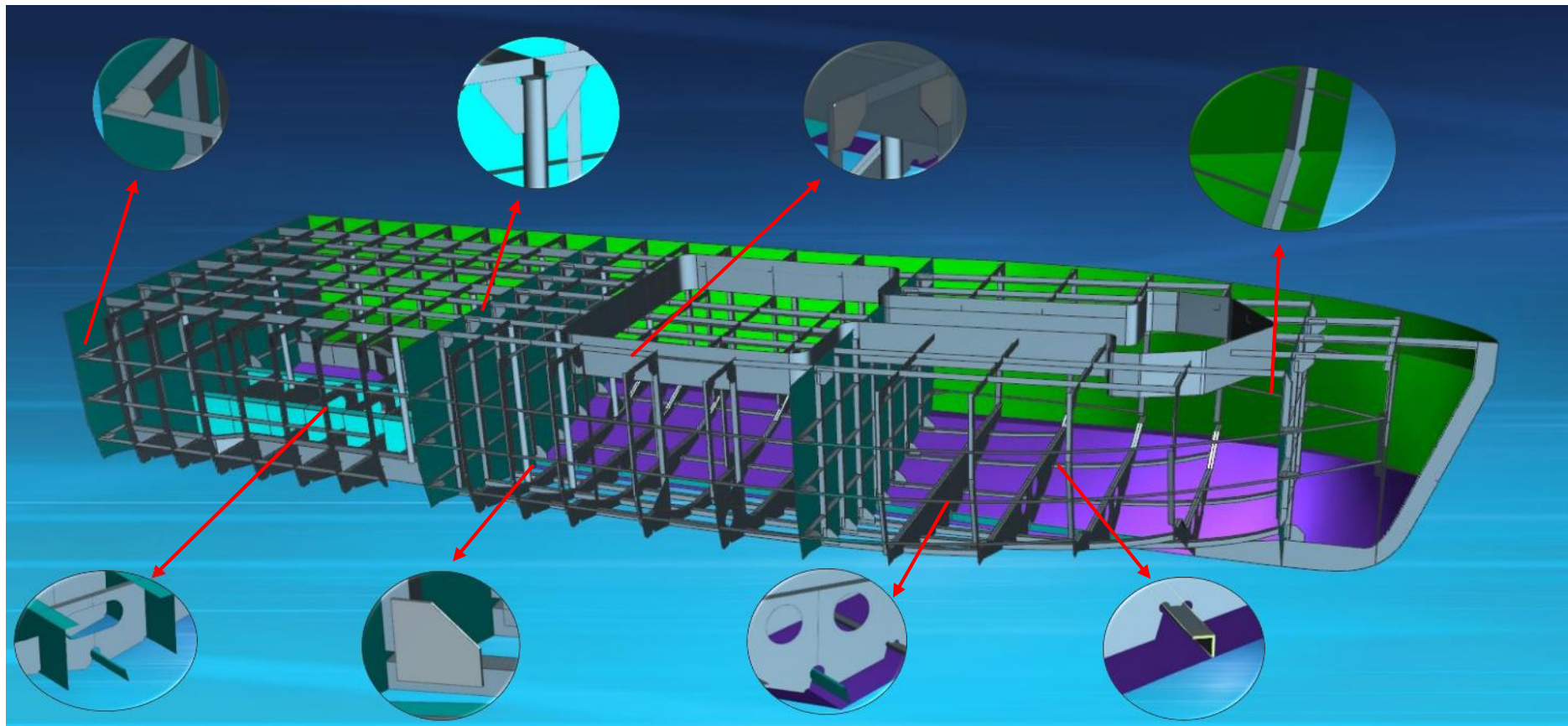


Figura 1.8 Detalles estructurales del Modelo Geométrico de la Lancha

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

Para analizar la estructura global de la lancha en forma discreta, se desarrolló un modelo estructural empleando el método de Elementos Finitos. Se empleó un software de análisis estructural en el que se definieron las propiedades del material. Se aplicaron las condiciones de carga (fuerzas externas e inerciales), las velocidades y aceleraciones angulares empleando las formulaciones de ABS [2] y [3]. Posteriormente se establecieron las condiciones de frontera en el modelo global que permitieron determinar los niveles de esfuerzos primarios y deformaciones en la estructura.

Desarrollo del modelo estructural empleando ANSYS

El modelo geométrico con formato IGES es importado desde el programa ANSYS MECHANICAL WORKBENCH 17.2, [7], para el desarrollo del modelo estructural. En este proceso, se siguen las recomendaciones de la sociedad clasificadora American Bureau of Shipping, [3], para la máxima razón de aspecto de los elementos recomendada en el análisis de embarcaciones de alta velocidad. Finalmente, el planchaje del casco, mamparos y los estructurales de la embarcación incluyendo las escuadras se representan con elementos Planos. Por su parte los puntales, son representados con elementos Barras, [6].

Para disminuir el esfuerzo computacional se aprovecha la simetría del modelo y se restringen las áreas en el plano de crujía de modo que se permite la flexión longitudinal de la embarcación. La estructura fue restringida con resortes, ubicados en el fondo de los mamparos y el espejo, para evitar la singularidad del problema. Las cargas aplicadas al modelo son la distribución del peso de la lancha, la presión de impacto producida en ciertas zonas del fondo de la embarcación al momento de golpear contra la superficie del mar, y la carga inercial generada por las aceleraciones resultantes (masa por aceleración vertical).

De acuerdo a las recomendaciones de ABS, [2] y [3], para realizar el estudio del comportamiento estructural de una embarcación de alta velocidad en forma

adecuada empleando el método de Elementos Finitos, es necesario hacer el análisis con dos tipos de modelos: Global y Local. Debido al enfoque de este trabajo, se analizarán los niveles de esfuerzo generados en la estructura primaria de la embarcación Río Cononaco en el modelo global, empleando un mallado prudencialmente fino. El tamaño de los elementos empleados no superó 1 centímetro de longitud, y se procura en lo posible, que la razón de aspecto de los elementos planos del modelo no fuese mayor a 3, como se describe en [3].

En la Figura 2.1, se describe el proceso para el desarrollo del modelo estructural empleando Elementos Finitos. Una vez importado el modelo desde el software ANSYS MECHANICAL WORKBENCH, es necesario definir el material y los tipos de elementos empleados. Luego se procede a asignar las propiedades a cada elemento del modelo importado y se discretiza el dominio de los elementos a través de los comandos para enmallar superficies. Posteriormente es necesario establecer las restricciones geométricas del caso a analizar, es decir las condiciones de frontera del modelo estructural. A continuación, se aplican las cargas en el modelo y finalmente se obtiene una aproximación numérica al problema planteado.

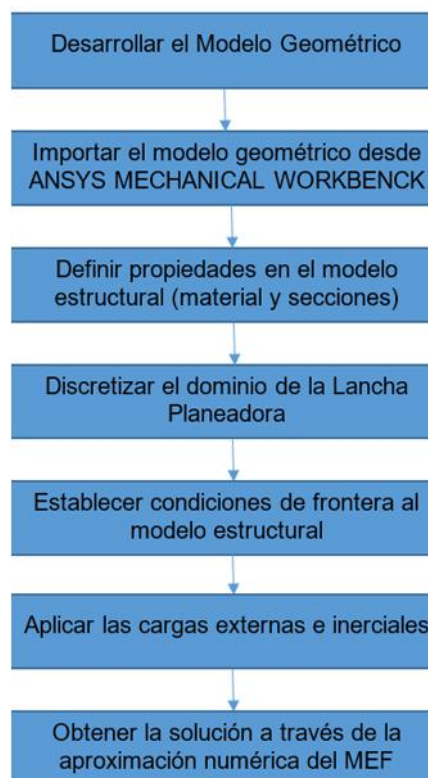


Figura 2.1 Desarrollo del modelo estructural empleando el método de elementos finitos

Para desarrollar el modelo estructural global, fue necesario verificar la similitud geométrica entre este y la lancha planeadora. En la Figura 2.2 se presenta el modelo geométrico importado desde el módulo “*Design Modeler*” de ANSYS MECHANICAL WORKBENCH 17.2. El origen del sistema de coordenadas está ubicado en la intersección del espejo con la quilla y el fondo, con el eje “y” en dirección Popa-Proa, el “z” en sentido Crujía-Babor, y el eje “x” direccionado hacia arriba.

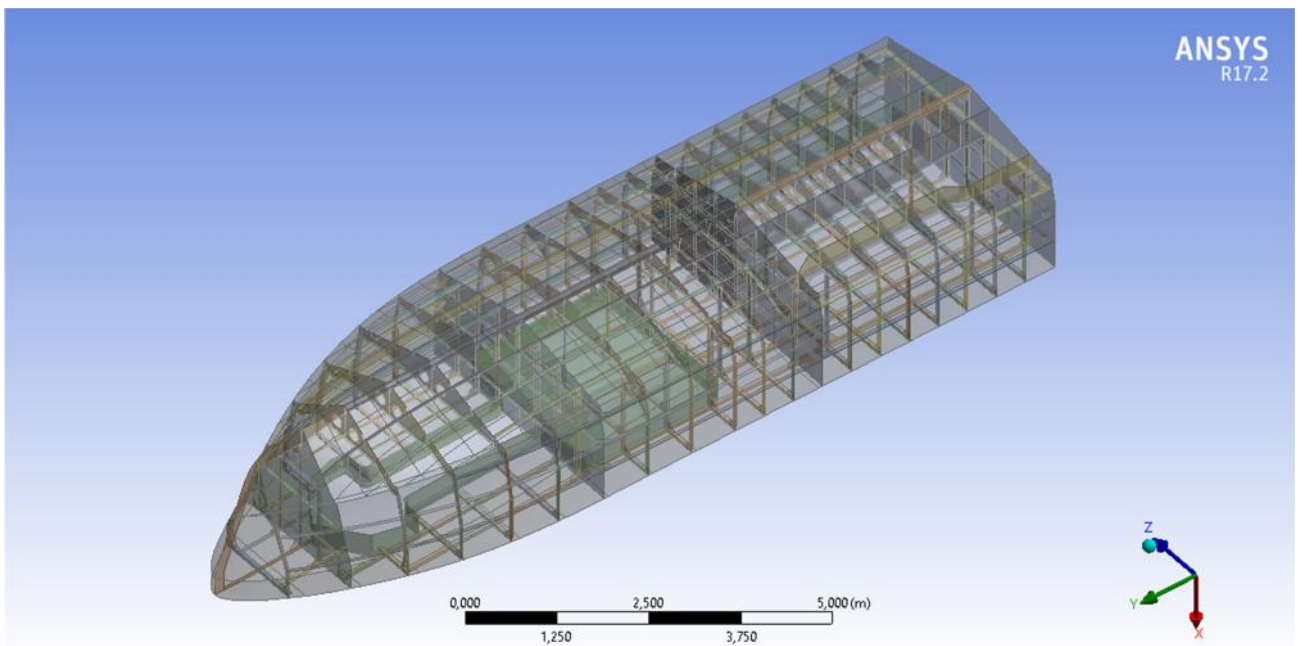


Figura 2.2 Modelo Geométrico importado (Detalles de la estructura de la lancha)

En la Figura 2.3 se compara la embarcación real y el modelo geométrico global de la lancha, y la similitud parece adecuada. El modelo geométrico importado cuenta con 1373 superficies de 3 y 4 aristas, las cuales forman el planchaje del casco y los detalles estructurales de la lancha.

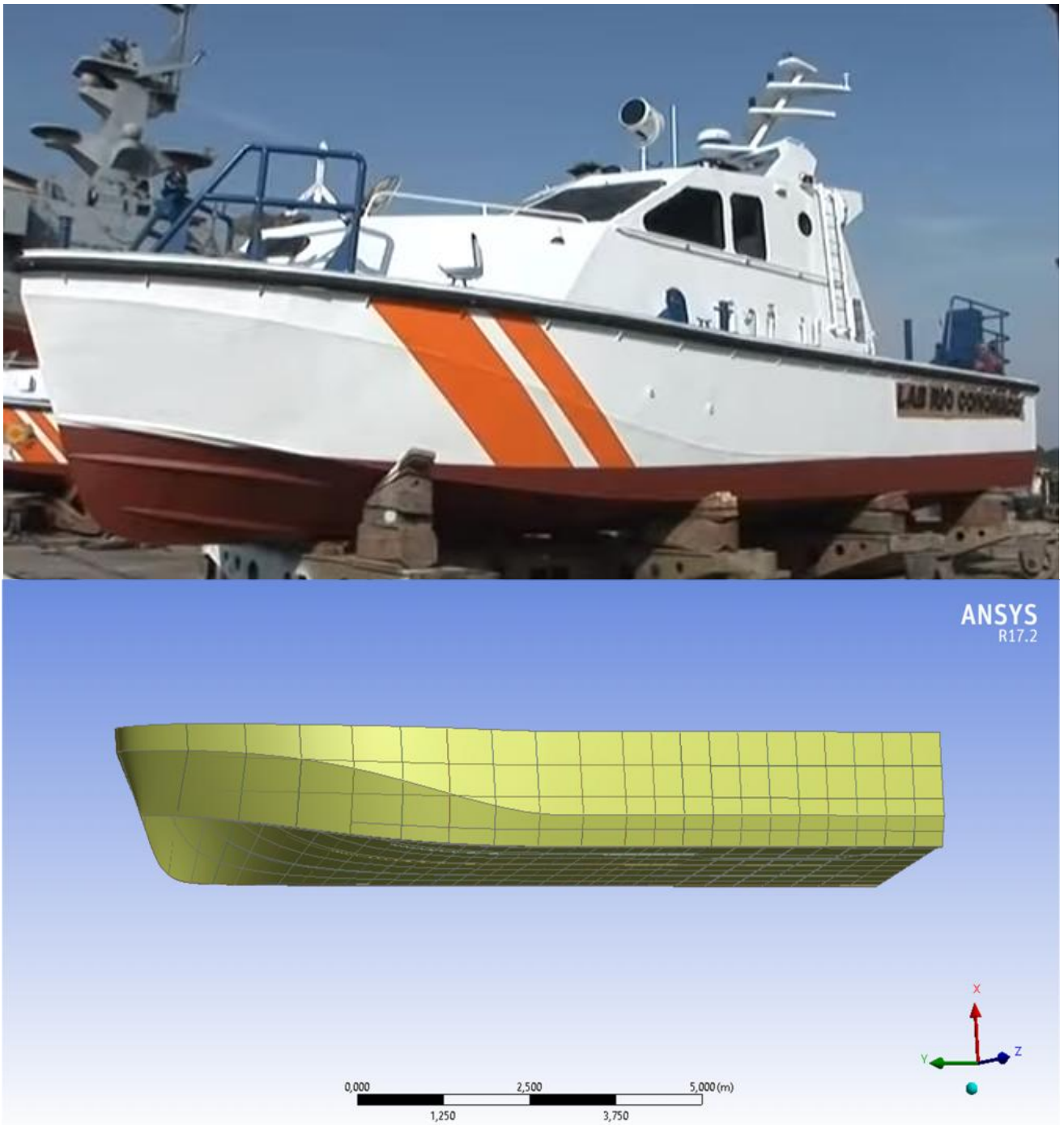


Figura 2.3 Comparación entre la Lancha y el modelo geométrico desarrollado (Casco)

Luego de importar el modelo geométrico, fue necesario verificar las conexiones de todos los elementos de la estructura de la lancha; es decir, se procedió a comprobar que se encuentren conectados entre sí: los estructurales y el planchaje del casco.

Para el efecto, fue necesario realizar manualmente 296 conexiones. En la Figura 2.4, se muestra un ejemplo del detalle de las conexiones realizadas.

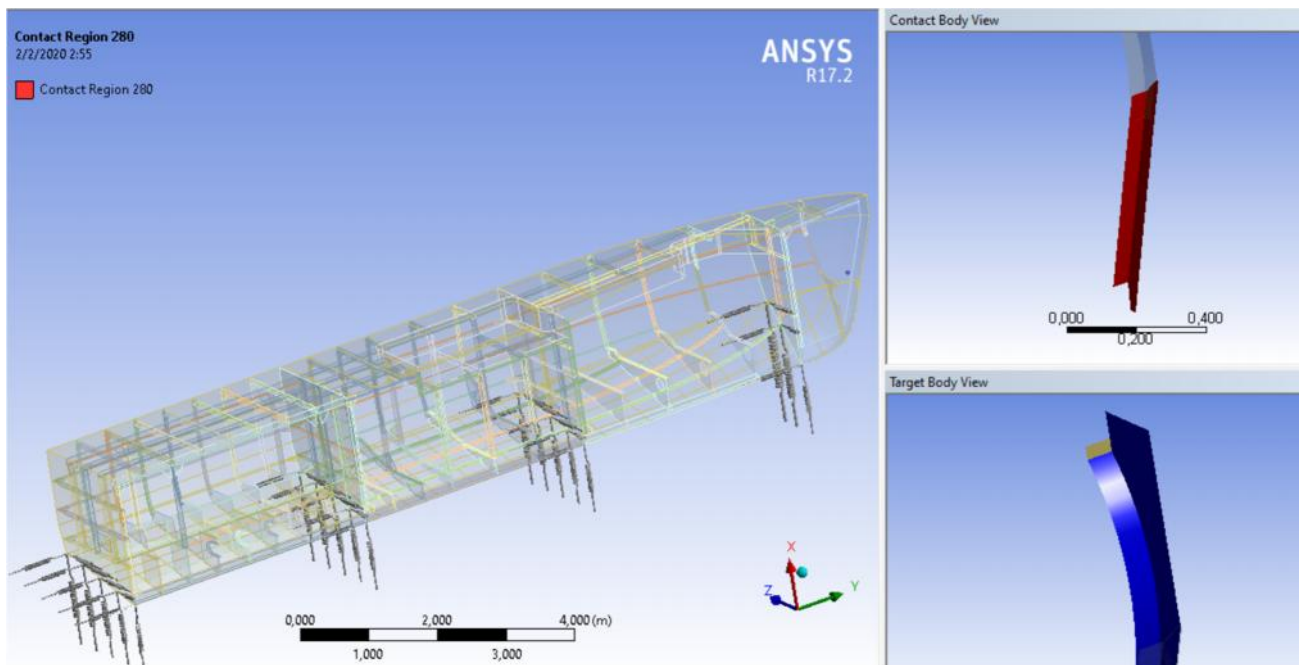


Figura 2.4 Conexiones de los elementos de la estructura de la Lancha Planeadora

Así mismo, se aplicaron restricciones a los nodos del plano de simetría (XY) a fin de que no se desplacen en dirección perpendicular al plano y evitar así la flexión lateral. De la misma forma, esos nodos no pueden rotar en las direcciones X e Y, debido a la flexión que se investiga de la viga buque. Además, para reflejar las condiciones de soporte de la estructura y evitar la singularidad del problema, se colocan resortes con constante de rigidez igual a $10 \text{ E}10 \text{ N/m}$ en puntos rígidos ubicados en el fondo de la estructura. Esta última restricción fue aplicada en 20 nodos, 5 en cada mamparo incluyendo el espejo, en las direcciones X, Y y Z. (Véase en Figura 2.4).

Las cargas que se aplicaron en la estructura son de dos tipos: la primera debido a la presión de impacto que se ejerce en el fondo de la estructura al golpear contra la superficie del mar, y la segunda, las cargas inerciales producidas en la embarcación por efecto de las aceleraciones resultantes, ambas calculadas en detalle en los siguientes subcapítulos.

La presión debida al impacto hidrodinámico, se aplica como carga distribuida actuando sobre la superficie del fondo de la embarcación. Debido a que son dos los análisis que se van a realizar debido a las situaciones consideradas (choque hidrodinámico por Proa y por Sección Media), esta presión no será aplicada en todo el planchaje del fondo, sino en secciones de paneles que simulen simplificadaamente el golpe.

Las cargas inerciales producidas en la embarcación, se generan por la aceleración vertical resultante entre las aceleraciones gravitacional y rotacional, esta última es inducida por la acción de las presiones hidrodinámicas en el fondo de la lancha. Estas cargas son aplicadas como fuerza por unidad de área, y actúan en los elementos del fondo y bases de máquinas. La carga inercial del peso real de la superestructura, es aplicada en los elementos primarios de la cubierta principal, entre el mamparo 3 y el mamparo 1, según [1]. La aplicación de los dos tipos de cargas, se muestra en la Figura 2.5.

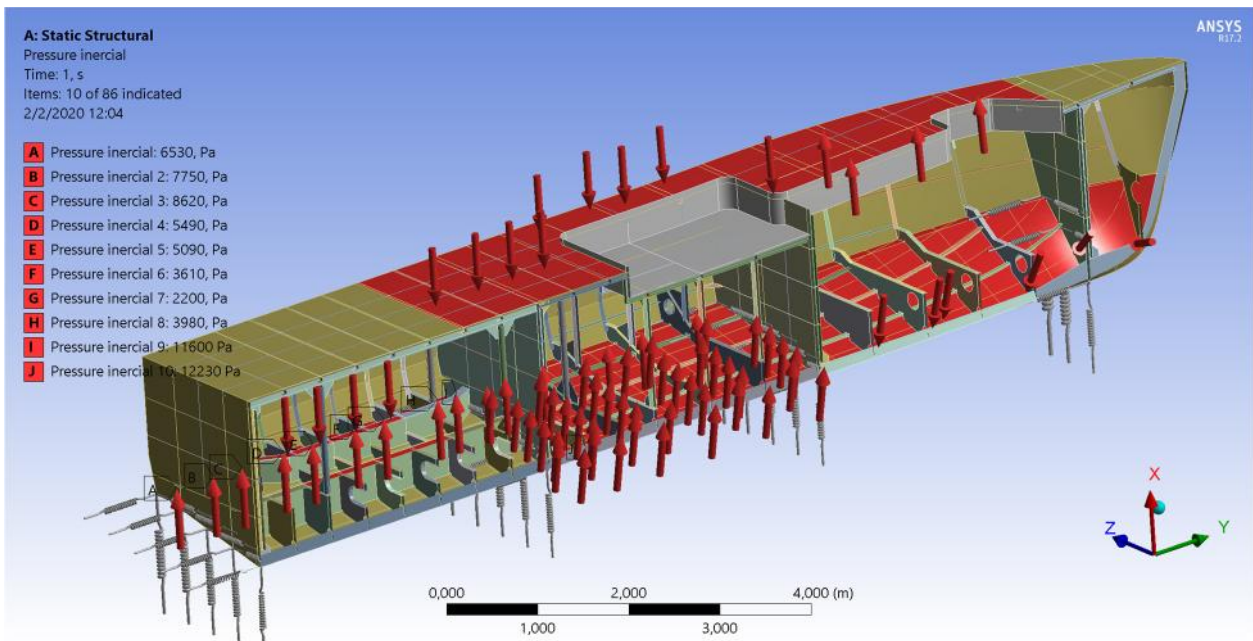


Figura 2.5 Presiones debidas al Impacto Hidrodinámico y a la Carga Inercial en la LAE Río Cononaco.

Cálculo de las Presiones por Slamming en el fondo de la estructura

La estimación de las presiones por slamming que actúan en el fondo de la embarcación se realizó aplicando las formulaciones de la sociedad clasificadora ABS para lanchas planeadoras, [2]. Un factor que se consideró en esta formulación es la aceleración del centro de gravedad, el cual tiene un valor estimado de 3.17 g's cuando opera a una velocidad de 25 nudos. Esta aceleración se debe a la acción de una presión máxima de 118 KN/m² en el fondo de la lancha. Para simular el impacto hidrodinámico por Proa y por Sección Media de la embarcación, se tomó el valor máximo estimado por las formulaciones y se dispuso una distribución sinusoidal en sentido longitudinal, en las zonas antes descritas.

De acuerdo a la formulación desarrollada por ABS, [2], para determinar la presión por slamming en el fondo de una embarcación planeadora, primero se debe obtener una presión de referencia obtenida por el cociente entre el desplazamiento de diseño y el área del fondo limitado por la china. Luego, este valor se incrementa en forma directa por la aceleración vertical del centro de gravedad debido al golpe hidrodinámico que se genera mientras la embarcación navega. Finalmente, el valor resultante es corregido por dos coeficientes: F_V, el cual depende de la posición longitudinal donde se desee determinar la presión hidrodinámica actuante, y F_D, el cual será descrito posteriormente. La ecuación correspondiente, se muestra a continuación:

$$P_{b_{xx}} = \frac{N_1 \Delta}{L_w B_w} (1 + n_{CG}) F_D F_V \quad [\text{KN/m}^2] \quad (2.1)$$

donde:

N₁: Constante igual a 0.1

Δ: Desplazamiento a la línea de diseño

L_w: Eslora de flotación

B_w: Manga de flotación

n_{CG}: Aceleración vertical del Centro de Gravedad de la embarcación, [g's]

F_D: Factor de área de diseño

F_V: Factor de distribución longitudinal de la aceleración vertical

La constante N_1 , es obtenida de la conversión de unidades para el Sistema Internacional. El desplazamiento a la línea de diseño, aproximadamente 18 [toneladas], la eslora y la manga de flotación, son tomados de la Memoria Técnica de la lancha planeadora, [1]. El factor de área de diseño F_D , depende de la separación entre los refuerzos longitudinales secundarios, y de acuerdo a la referencia [2], tiene un valor de 0.72 para un espaciamiento de 0.45 [m]. El factor de distribución de la aceleración vertical a lo largo de la embarcación, toma el valor de 1.0 desde el 11 hasta el 44.5% de L , tomando como referencia la intersección de la línea de flotación con la roda. Entonces, en dicha zona se desarrollará la máxima presión en el fondo de la lancha, y disminuye linealmente hacia los extremos. La aceleración del centro de gravedad, n_{CG} , tiene unidades de g 's, es decir, n veces la aceleración gravitacional, y es determinada empleando la siguiente formulación semi-empírica:

$$n_{CG} = N_2 \left(\frac{12h_{1/3}}{B_w} + 1.0 \right) \tau (50 - \beta_{CG}) \frac{V^2 (B_w)^2}{\Delta} \quad [g's] \quad (2.2)$$

donde:

N_2 : Constante igual a 0.0078

$h_{1/3}$: Altura significativa de la ola para el estado de mar correspondiente, [m]

τ : Ángulo de asiento a la velocidad V , [°]

β_{CG} : Ángulo de astilla muerta a la altura del LCG, [°]

V : Velocidad de la embarcación, [nudos]

La constante N_2 , es obtenida de la conversión de unidades para el Sistema Internacional. El ángulo de asiento, τ , para embarcaciones menores a 50 metros de eslora, es recomendado no tomarlo menor a 4°, [2]. El ángulo de astilla muerta, β_{CG} , es medido en el plano de líneas de formas de la lancha, y tiene un valor de 12.32° en la posición longitudinal del centro de gravedad, el cual está ubicado a 15.3% de L , tomado desde la sección media hacia popa. La altura significativa de la ola, $h_{1/3}$, se refiere al promedio del 1/3 de los valores más altos registrados en una serie en un determinado periodo de tiempo. Debido a que en las costas de nuestro país, específicamente al norte de las playas de Manta, no se tiene un registro estadístico para la estimación de este factor, en los cálculos efectuados

se emplean valores recomendados por la sociedad clasificadora ABS para embarcaciones de costeras ($h_{1/3}$: 2.5 metros), referencia [2], la cual establece que este valor no debe ser menor al cociente $L/12$ (1.1 metros). Este valor, $h_{1/3}$: 2.5 metros, corresponde a un estado de mar 5, de acuerdo a la escala de Beaufort. De acuerdo con ABS, [2], el valor estimado de la aceleración vertical del centro de gravedad estimado con la ecuación (2.2), no debe exceder al valor calculado con la siguiente relación:

$$n_{CG} = 1.39 + K_n \frac{V}{\sqrt{L}} \quad [g's] \quad (2.3)$$

donde:

K_n : Constante igual a 0.256 para el Sistema Internacional.

Para la L.G. Río Cononaco, la estimación de la aceleración del centro de gravedad que se obtuvo a partir de la ecuación (2.2) producida por el impacto hidrodinámico fue de aproximadamente 8.0 g's, es decir 78.4 [m/seg²]. Este valor es considerado como extremo para esta embarcación, puesto que por sus dimensiones, no está diseñada para navegar en olas de 2.5 metros, como lo recomienda ABS. Empleando la ecuación (2.3), se obtuvo una aceleración vertical del centro de gravedad de 3.17 g's, es decir, aproximadamente 31.1 [m/seg²]. Este último valor, resulta físicamente razonable para la embarcación analizada en este estudio, y fue el empleado en las estimaciones realizadas. En la Figura 2.2, se muestra el esquema desarrollado Menéndez, [6], para el cálculo de la distribución de presión en el fondo de una lancha planeadora, el cual fue aplicado en el presente trabajo.

Los resultados del proceso desarrollado para la estimación de las presiones por slamming en el fondo de la LG Río Cononaco, son presentados en la Tabla 2.1 y graficados en la Figura 2.7 teniendo como origen el extremo de Proa.

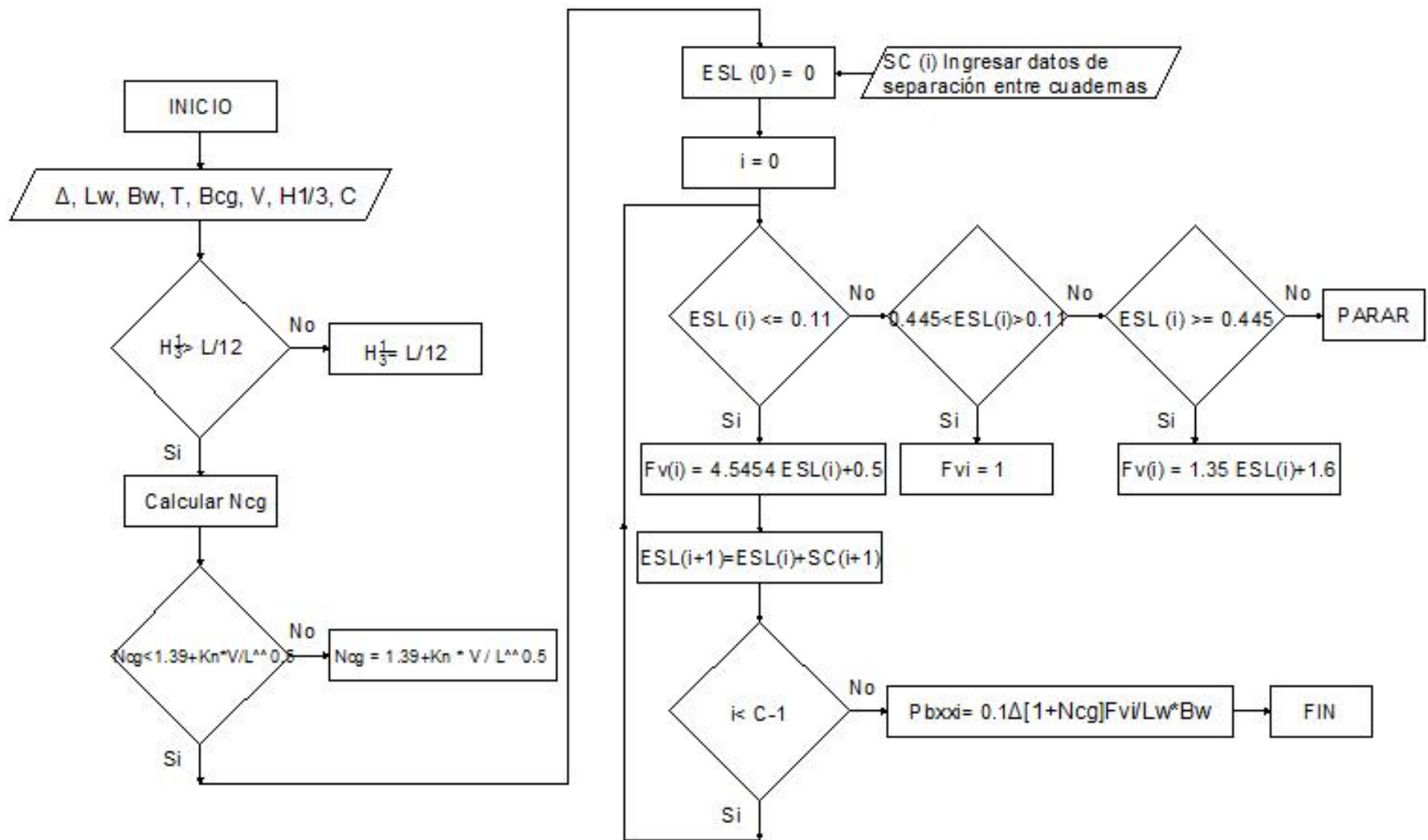


Figura 2.6 Diagrama de Flujo para el cálculo de la presión dinámica en el Fondo de embarcaciones planeadoras [6]

Tabla 2.1 Resultado del cálculo de la presión por Slamming en el fondo de la lancha

	L [m]	% de L	FV	Pb _{xx} [KN/m ²]	Pb _{xx} [psi]
ESPEJO - C20	12,8	0,98	0,28	32,5	4,7
C20 - C19	12,3	0,94	0,33	38,7	5,6
C19 - C18	11,8	0,90	0,38	44,8	6,5
C18 - C17	11,3	0,87	0,43	50,9	7,4
C17 - C16	10,8	0,83	0,48	57,0	8,3
C16 - C15	10,3	0,79	0,54	63,2	9,2
C15 - C14	9,8	0,75	0,59	69,3	10,1
C14 - M3	9,3	0,71	0,64	75,4	10,9
M3 - C12	8,8	0,67	0,69	81,5	11,8
C12 - C11	8,3	0,63	0,74	87,7	12,7
C11 - C10	7,8	0,60	0,80	93,8	13,6
C10 - C09	7,1	0,55	0,86	101,5	14,7
C09 - C08	6,4	0,49	0,94	110,6	16,1
C08 - M2	5,6	0,43	1,00	117,9	17,1
M2 - C06	4,9	0,38	1,00	117,9	17,1
C06 - C05	4,1	0,32	1,00	117,9	17,1
C05 - C04	3,4	0,26	1,00	117,9	17,1
C04 - C03	2,6	0,20	1,00	117,9	17,1
C03 - M1	1,9	0,14	1,00	117,9	17,1
M1 - C01	1,1	0,09	0,89	105,3	15,3
C01 - ORIGEN	0,4	0,03	0,63	74,1	10,7
ORIGEN	0,0	0,00	0,56	66,0	9,6

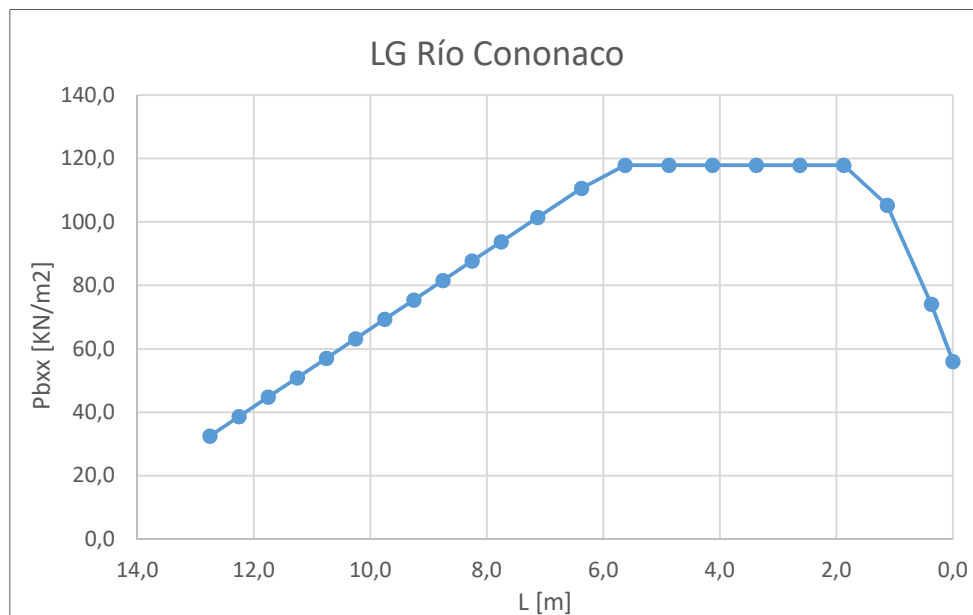


Figura 2.7 Distribución de la Presión por Slamming en el fondo de la lancha

En la Figura 2.7, se muestra la distribución de la presión por slamming en el fondo de la LG Río Cononaco a lo largo de la eslora, con un rango de valores entre 34 y 118 [KN/m²], cuando la embarcación navega a 25 nudos al calado de diseño y su centro de gravedad desarrolla una aceleración vertical de 3.17 g's.

Hasta ahora, se ha calculado la distribución longitudinal de la presión hidrodinámica en el fondo de la embarcación, empleando las formulaciones desarrolladas por ABS, [2]. Para obtener el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan en la embarcación, también es necesario determinar la distribución transversal de dichas presiones. Para ello, se emplea el estudio desarrollado por Heller y Jasper en la referencia [5], clásica en el estudio de embarcaciones planeadoras. La siguiente ecuación, tomada de dicha referencia, describe la distribución transversal de la presión (en la dirección de la manga de la embarcación), desde la quilla hasta la china:

$$P_{b_{xy}} = \frac{P_{b_{xx}}}{2} \left[1 + \text{Cos} 2\pi \left(\frac{Y}{G} - \frac{B}{2} \right) \right] \quad [\text{KN/m}^2] \quad (2.4)$$

donde:

- P_{b_{xy}}: Presión pico en la posición longitudinal x, estimada por ABS, [2]
- Y: Ubicación transversal en cada sección donde se va a evaluar la función
- G: Distancia entre la quilla y la china en cada sección
- B: % de separación entre refuerzos longitudinales

De acuerdo a la referencia [6], el valor tomado para la estimación de la distribución longitudinal de la presión en el fondo de la lancha, F_D igual a 0.75, será revisado en el siguiente subcapítulo para cumplir el equilibrio dinámico en dirección vertical. Este parámetro será ajustado en forma tal que la fuerza resultante ejercida por la presión de impacto se equilibre con masa de la embarcación y la aceleración vertical resultante. La distribución de la presión de impacto ejercida en el fondo de la embarcación tanto en sentido longitudinal (segmentos entre cuadernas) como transversal (a porcentajes de la distancia entre la quilla y la china en cada sección), se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1 Distribución espacial de la presión por Slamming en el fondo de la Lancha

	Pb_{xy} [KN/m²]				
	0%	12,5%	25%	37,5%	50%
ESPEJO - C20	0,0	3,2	11,0	18,8	22,0
C20 - C19	0,0	3,8	13,1	22,3	26,2
C19 - C18	0,0	4,4	15,2	25,9	30,3
C18 - C17	0,0	5,1	17,2	29,4	34,5
C17 - C16	0,0	5,7	19,3	33,0	38,6
C16 - C15	0,0	6,3	21,4	36,5	42,8
C15 - C14	0,0	6,9	23,5	40,0	46,9
C14 - M3	0,0	7,5	25,5	43,6	51,1
M3 - C12	0,0	8,1	27,6	47,1	55,2
C12 - C11	0,0	8,7	29,7	50,7	59,4
C11 - C10	0,0	9,3	31,8	54,2	63,5
C10 - C09	0,0	10,1	34,4	58,6	68,7
C09 - C08	0,0	11,0	37,4	63,9	74,9
C08 - M2	0,0	11,7	39,8	68,0	79,6
M2 - C06	0,0	11,6	39,6	67,6	79,2
C06 - C05	0,0	11,5	39,2	66,9	78,4
C05 - C04	0,0	11,2	38,2	65,2	76,3
C04 - C03	0,0	10,8	35,8	61,0	71,5
C03 - M1	0,0	9,0	30,8	52,6	61,6
M1 - C01	0,0	6,9	23,5	40,2	47,0
C01 - ORIGEN	0,0	2,3	7,9	13,4	15,8

En la Tabla 2.2, se presentan los valores hasta el 50% de la longitud entre la quilla y la china en cada sección, puesto que la distribución transversal es simétrica respecto de este valor. El gráfico correspondiente a esta distribución, se muestra en la Figura 2.8.

Un proceso similar al implementado hasta ahora, fue desarrollado previamente por Menéndez, [6], para analizar la estructura de una lancha rápida sometida al impacto en todo el fondo. En el presente trabajo, se va a analizar el comportamiento de la estructura primaria tras recibir el golpe hidrodinámico de un impacto en un segmento de Proa, y otro en Sección Media.

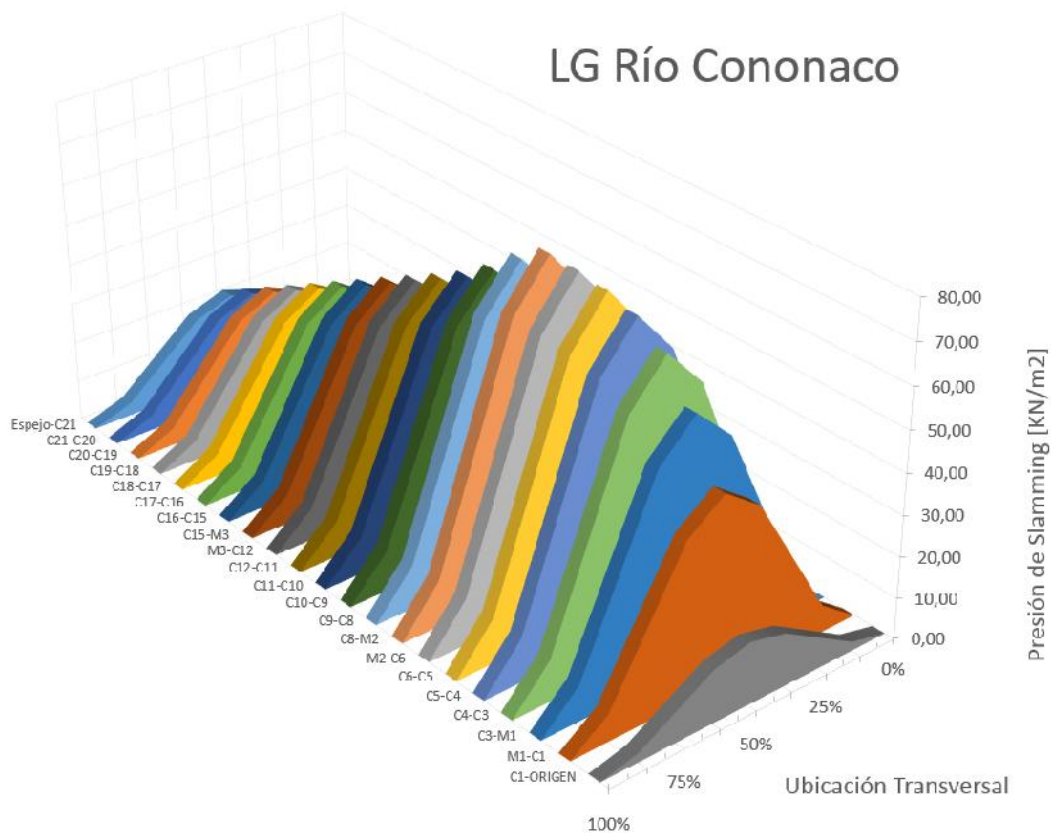


Figura 2.8 Distribución espacial de la Presión de Slamming en la Lancha

Golpe de Proa

Siguiendo el procedimiento descrito, se va a considerar que la embarcación se eleva fuera del agua, se impacta en la región de Proa, y las presiones en el fondo producidas por el golpe hidrodinámico son equivalentes a un tercio del desplazamiento de la lancha analizado en la etapa previa, afectado por la aceleración vertical del centro de gravedad, n_{CG} . La aceleración vertical del centro de gravedad de la estructura toma un valor proporcional a la fuerza hidrodinámica aplicada a la estructura, puesto que el desplazamiento de la embarcación no varía.

En este trabajo se consideró que las presiones generadas debidas al slamming en la zona de Proa, actúan entre el Mamparo 2 y la intersección de la línea de flotación con la roda. Longitudinalmente se asumió que la presión tiene distribución sinusoidal, tomando el valor de cero en los extremos y creciendo suavemente hacia el centro del intervalo; transversalmente su variación es

descrita por la ecuación 2.4. El factor F_D asumido en los cálculos es de 0.72 con la finalidad de equilibrar las fuerzas verticales que actúan en la lancha planeadora. Se consideró que únicamente la presión hidrodinámica actuó en la zona de proa en el intervalo anteriormente descrito, mientras que en el resto de la embarcación la presión que se ejerce en el fondo es nula. Los resultados de este cálculo, se muestran en la Tabla 2.3, y son graficados en la Figura 2.9, teniendo como origen el extremo de Proa.

Tabla 2.2 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Proa

	$P_{b,xy}$ [KN/m ²]				
	0%	12,5%	25%	37,5%	50%
ESPEJO - C20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C20- C19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
....	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C08 - M2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M2 - C06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C06 - C05	0,0	4,1	14,1	24,1	28,3
C05 - C04	0,0	12,1	41,3	70,5	82,6
C04 - C03	0,0	15,1	51,6	88,1	103,2
C03 - M1	0,0	9,8	33,3	56,9	66,7
M1 - C01	0,0	2,8	9,5	16,2	19,0
C01 - ORIGEN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

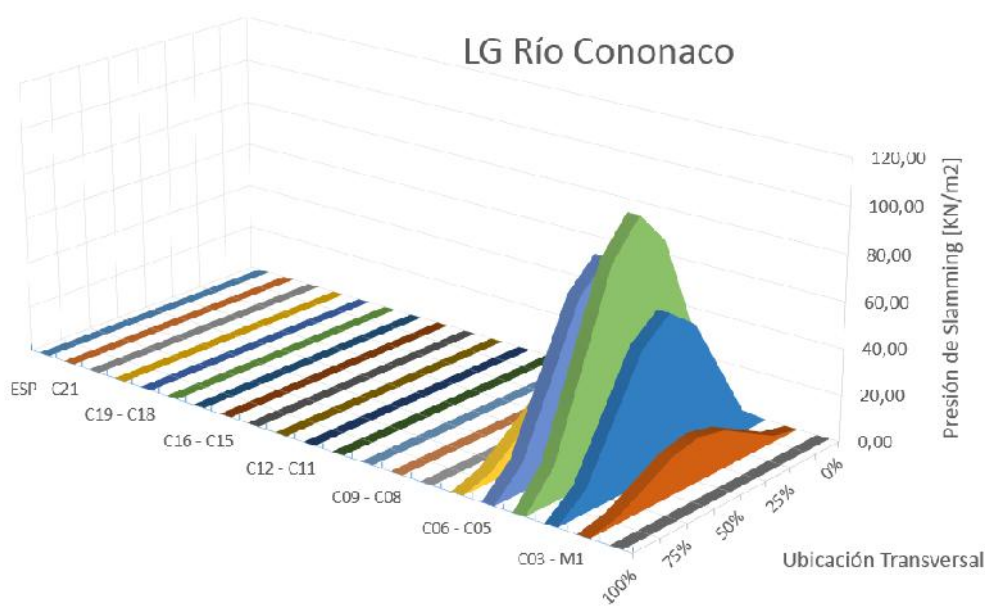


Figura 2.9 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Proa

Golpe por Sección Media

Siguiendo un esquema similar al anterior, se asumió que la magnitud de las presiones ejercidas en el fondo producto del choque hidrodinámico es proporcional a la mitad del desplazamiento de la lancha, puesto que el golpe es central. El golpe hidrodinámico, se aplicó en la región de Sección Media de la lancha planeadora. Debido a la condición de linealidad del presente trabajo, la aceleración vertical del centro de gravedad, es directamente proporcional a la fuerza excitadora, es decir 1/2 de la aceleración vertical de la condición original.

En este trabajo, se consideró que las presiones generadas por slamming en la zona de Sección Media actúan entre el Mamparo 3 y la Cuaderna 05. Longitudinalmente, se asumió que tienen distribución sinusoidal, tomando el valor de cero en los extremos y creciendo suavemente hacia el centro del intervalo; transversalmente su variación es descrita por la ecuación 2.4. El factor F_D asumido en los cálculos es de 0.80, el cual fue empleado para equilibrar las fuerzas verticales que actúan en la lancha planeadora. Los resultados de esta estimación, se muestran en la Tabla 2.4, y son graficados en la Figura 2.6, teniendo como origen el extremo de Proa.

Tabla 2.3 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Sección Media

	$P_{b,xy}$ [KN/m ²]				
	0%	12,5%	25%	37,5%	50%
M3 - C12	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
C12 - C11	0,0	3,17	10,84	18,50	21,68
C11 - C10	0,0	10,31	35,19	60,08	70,39
C10 - C09	0,0	16,03	54,73	93,42	109,45
C09 - C08	0,0	16,02	54,71	93,39	109,42
C08 - M2	0,0	10,28	35,11	59,94	70,23
M2 - C06	0,0	3,15	10,76	18,37	21,52
C06 - C05	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

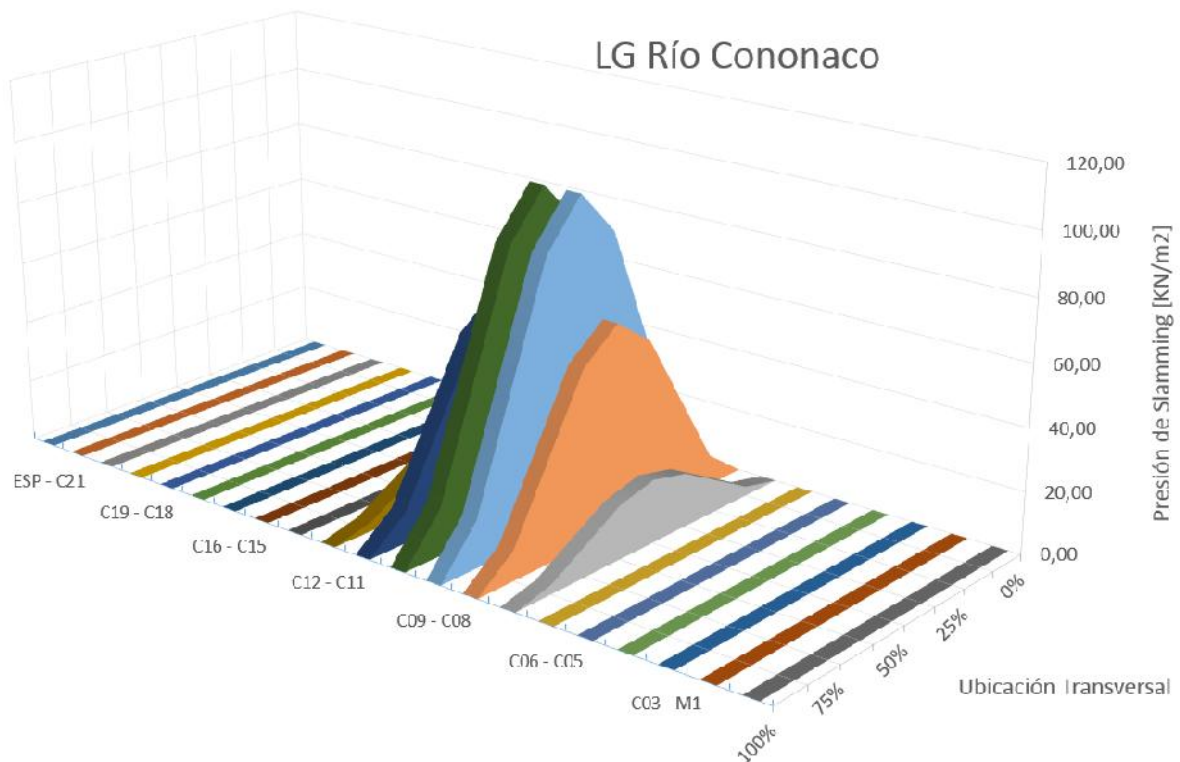


Figura 2.10 Distribución espacial de la Presión por Slamming en el fondo de la Lancha, golpe por Sección Media

Equilibrio Dinámico de las fuerzas aplicadas a la estructura

Para establecer el equilibrio dinámico de fuerzas aplicadas a la embarcación en el instante del golpe con una ola, se determina primero la distribución transversal y longitudinal de presión en el área de impacto y la aceleración vertical resultante del CG y angular de la viga-buque. Estas distribuciones son determinadas mediante las formulaciones propuestas por Heller y Jasper, [5], y ABS, [2] en sentido transversal y longitudinal, respectivamente. Se aplican las ecuaciones de Newton para estimar la aceleración angular del cuerpo rígido, causada por el desequilibrio longitudinal entre el CG de la embarcación y la línea de acción de la resultante de las fuerzas hidrodinámicas. Luego se considera el sistema equilibrado en forma dinámica y se aplica el Principio de D'alembert, el cual considera que la suma de las fuerzas externas aplicadas a la embarcación son iguales a las fuerzas inerciales que actúan en el cuerpo producto de la aceleración vertical y rotacional.

De acuerdo a la referencia [5], el equilibrio dinámico es alcanzado cuando se cumplen simultáneamente las dos ecuaciones de Newton para cuerpos rígidos:

$$\text{Fuerza:} \quad \int_0^L P(x) dx = \int_0^L [1 + n_{CG}] * g * w(x) dx \quad (2.5)$$

$$\text{Momento:} \quad \int_{-\bar{X}}^{L-\bar{X}} x' P(x') dx' = I \ddot{\theta} \quad (2.6)$$

donde:

$P(x)$: Fuerza por unidad de longitud debido a la presión, [N/m]

$w(x)$: Masa de la embarcación por unidad de longitud, [Kg/m]

\bar{X} : Distancia del centro de gravedad medida desde el espejo. [m]

I_C : Momento de Inercia de la masa de la lancha respecto del CG, [Kg.m²]

$\ddot{\theta}$: Aceleración angular resultante, [rad/seg²]

La lancha planea, y en el instante que cae y el fondo se golpea con la superficie del mar, actúan las Fuerzas que se muestran en el DCL de la Figura 2.11. En el análisis realizado se asume que el casco de la lancha se comporta como un cuerpo rígido, y solo se consideraron las componentes verticales de las fuerzas que actúan en la embarcación: el peso propio del cuerpo y la resultante de la fuerza hidrodinámica. Al no estar las fuerzas en equilibrio produce la aceleración vertical y rotacional de toda la lancha.

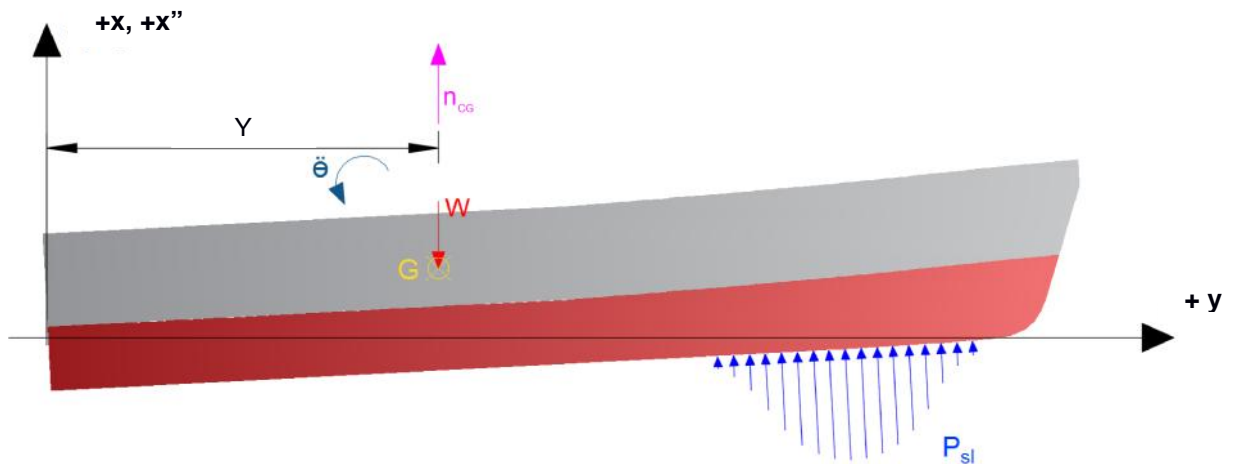


Figura 2.11 Diagrama de Cuerpo Libre de la lancha durante el Impacto hidrodinámico en la sección de Proa.

La ecuación (2.5) fue empleada para determinar los valores de F_D que satisfacen el equilibrio dinámico de las fuerzas verticales que actúan en la lancha. Para ello, se integraron longitudinalmente las curvas de presión hidrodinámica y del peso de la embarcación, ambas descritas por unidad de longitud. Luego, se determinaron los valores del coeficiente F_D que corrigen la distribución de presión de tal manera que se satisfaga dicho equilibrio dinámico en ambas condiciones. Los valores encontrados de la ecuación referida, son 0.75 y 0.72, para los golpes producidos por las cargas de slamming en la zona de Proa y Sección Media, respectivamente. Con estos valores estimados de F_D , se procede a realizar las correcciones en las distribuciones de las presiones de slamming que se ejercen en las dos condiciones antes mencionadas, mostradas en las Tablas 2.4 y 2.5.

Una vez corregidas las distribuciones de presión, se calculan las magnitudes de éstas actuando en el fondo de la embarcación. De esta forma, se determina que el golpe producido en la región de Proa, genera una fuerza hidrodinámica resultante de 245 [KN], y su punto de aplicación está ubicado a 28.3%L (3.67 metros), medido desde la Sección Media hacia Proa. Esta magnitud de la fuerza hidrodinámica, es causada por la acción de un tercio del desplazamiento en la condición de diseño de la embarcación. Por otro lado, el golpe en la zona de Sección Media, causa una fuerza hidrodinámica resultante de 368 [KN], y su centro de presión está ubicado a 1.3%L (0.18 metros), medido desde la Sección Media hacia Popa. Como se lo

mencionó anteriormente, esta magnitud de fuerza hidrodinámica, es generada por la acción de un medio del desplazamiento del barco en su condición de diseño.

El centro de gravedad de la embarcación está ubicado a 15.3%L, medido desde la sección media hacia el espejo. Debido a que el peso de la embarcación no se encuentra en la misma línea de acción de ninguno de los centroides de las fuerzas hidrodinámicas resultantes, el par de fuerzas desequilibra el sistema en forma rotacional. Para satisfacer el equilibrio de los momentos dinámicos, se aplica la ecuación (2.6), y de esta forma, se determina la aceleración rotacional del cuerpo rígido que balancea en forma dinámica el sistema.

Equilibrio Dinámico tras golpe en zona de Proa

Los valores mostrados en la Tabla 2.3, fueron corregidos mediante el factor FD correspondiente, 0.75, y se presentan en la Tabla 2.5. Luego, estos valores son integrados transversalmente, como se muestra en la Tabla 2.6, para obtener una distribución longitudinal de presión.

Tabla 2.4 Distribución espacial de Presión corregida, golpe por Proa

	Pbxy [KN/m ²]				
	0%	12,5%	25%	37,5%	50%
ESPEJO - C20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
....	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M2 - C06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C06 - C05	0,0	3,4	11,7	20,0	23,4
C05 - C04	0,0	10,0	34,2	58,3	68,3
C04 - C03	0,0	12,5	42,7	72,9	85,4
C03 - M1	0,0	8,1	27,6	47,1	55,1
M1 - C01	0,0	2,3	7,9	13,4	15,7
C01 - ORIGEN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 2.5 Presión por unidad de Longitud en el Fondo de la LAE Río Cononaco

	L [m]	Pbxx [KN/m²]	b_x	Pbxy*G*Cos(b_x) [KN/m]
ESPEJO - C21	12,75	0,0	12,3	0,0
...	...	0,0	12,3	0,0
M2 - C06	4,88	0,0	14,1	0,0
C06 - C05	4,13	23,4	16,4	39,5
C05 - C04	3,38	68,3	20,9	104,1
C04 - C03	2,63	85,4	28,9	108,3
C03 - M1	1,88	55,1	41,1	51,1
M1 - C01	1,13	15,7	49,9	9,8
C01 - ORIGEN	0,37	0,0	72,1	0,0

En la Tabla 2.6, se muestra la presión de impacto integrada transversalmente a lo largo de la manga en cada sección, empleando la ecuación (2.4). Dado que este estudio del impacto hidrodinámico es estrictamente vertical, la presión efectiva se tomó como la componente vertical de la presión perpendicular actuando en el fondo.

La distribución de los pesos, se la determinó en el capítulo 1, a partir de la referencia [1]. Sin embargo, ya que en la estimación de la presión hidrodinámica se consideró que la magnitud de esta corresponde a un tercio del desplazamiento de la embarcación, para el equilibrio dinámico se empleará únicamente este valor. Una vez determinadas las fuerzas resultantes que actúan en la embarcación con sus respectivos puntos de aplicación, se evidenció que ambas fuerzas no se encuentran en la misma línea de acción. Para la resultante de la fuerza hidrodinámica producida por la presión de slamming en el fondo se obtuvo una magnitud de 245 [KN] y su centro de presión está ubicado a 28.3%L, medido desde sección media hacia Proa. Por otro lado, el peso virtual de la embarcación tiene un valor de 244.9 [KN], y su centro de gravedad se encuentra a 15.3% L tomado hacia Popa desde sección media, como se muestra en la Figura 2.12.

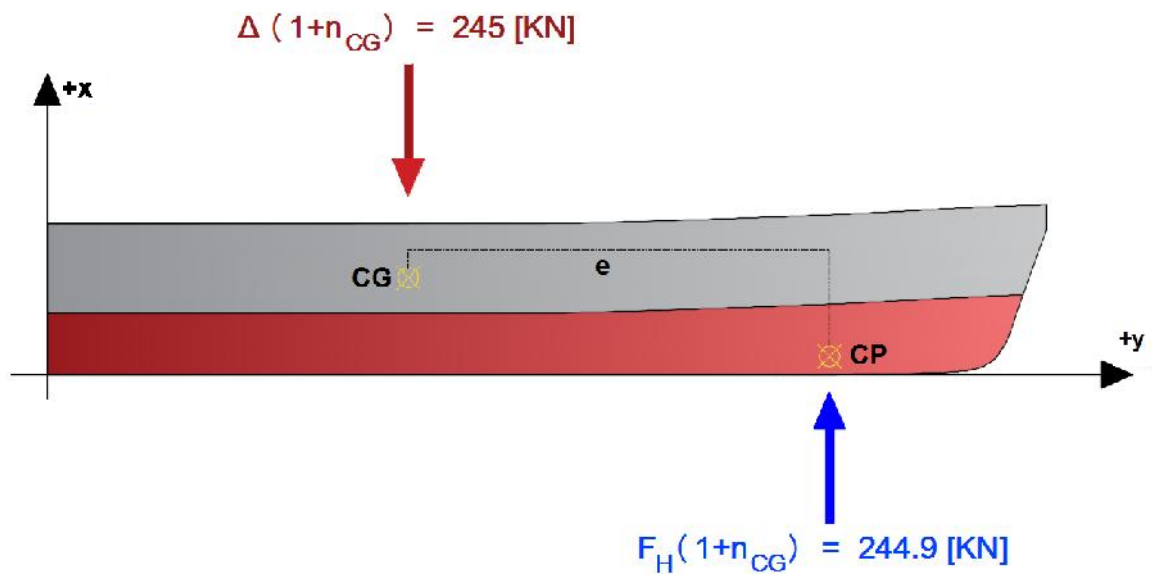


Figura 2.12 Equilibrio Dinámico en Golpe de Proa de la LAE Río Cononaco

Integrando la distribución de pesos mostrada en el capítulo anterior Figura 1.4, el momento de inercia de la masa resultante de la LG Río Cononaco, I_c , es de $1.74E+05$ [Kgm²], respecto al CG de la embarcación. Para satisfacer el equilibrio de momentos dinámicos se aplicó la ecuación (2.6), y se determinó la aceleración rotacional de la embarcación en esta condición:

$$\ddot{\theta} = \frac{F_p * e}{I_c}$$

$$\ddot{\theta} = 8.68 \text{ [rad/seg}^2\text{]}$$

Aplicando un procedimiento similar cuando el impacto hidrodinámico es en la zona de Sección Media, pero producido por la mitad de su desplazamiento, se obtuvo que la aceleración rotacional del cuerpo rígido es 3.82 [rad/seg²].

En la Tabla 2.7, se muestra el resumen del equilibrio dinámico de la LG Río Cononaco, tras impactarse por Proa y por Sección Media contra la superficie del mar.

Tabla 2.6 Resumen de los equilibrios dinámicos en la LG Río Cononaco

		GOLPE POR ZONAS EN EL FONDO		
		TOTAL	PROA	SECCIÓN MEDIA
Desplazamiento	[KN]	734,7	244,9	367,4
Fuerza Hidrodinámica	[KN]	738,4	245,0	368,3
Aceleración vertical del CG	[g's]	3,17	1,05	1,59
Aceleración rotacional del CG	[rad/seg ²]	10,31	8,68	3,82

Determinación de las cargas inerciales de la embarcación

Las cargas inerciales son producidas por la masa multiplicada por la aceleración resultante que se genera en toda la embarcación debido al golpe hidrodinámico contra la superficie del mar. En este trabajo se han considerado dos situaciones: slamming en la zona de Proa y en Sección Media. Estos desequilibrios producen aceleraciones verticales y rotacionales que actúan sobre la estructura de la embarcación. Si se combinan las dos aceleraciones considerando la posición longitudinal de un elemento medido desde el centro de gravedad, se puede determinar la aceleración vertical resultante de ese elemento. La masa de cada porción multiplicada por dicha aceleración, da como resultado la fuerza inercial, que actúa en cada elemento.

Siguiendo el esquema descrito previamente, se determinan primero aceleraciones verticales producidas por cada golpe hidrodinámico, en la región de Proa y de Sección Media. En la Figura 2.13 se muestran las distribuciones longitudinales de la aceleración vertical resultante de cada sección transversal de la embarcación, producidas tras cada uno de los Golpes mencionados. Estas fueron determinadas a partir de la combinación de las aceleraciones verticales del CG y las aceleraciones rotacionales que se generaron tras cada impacto.

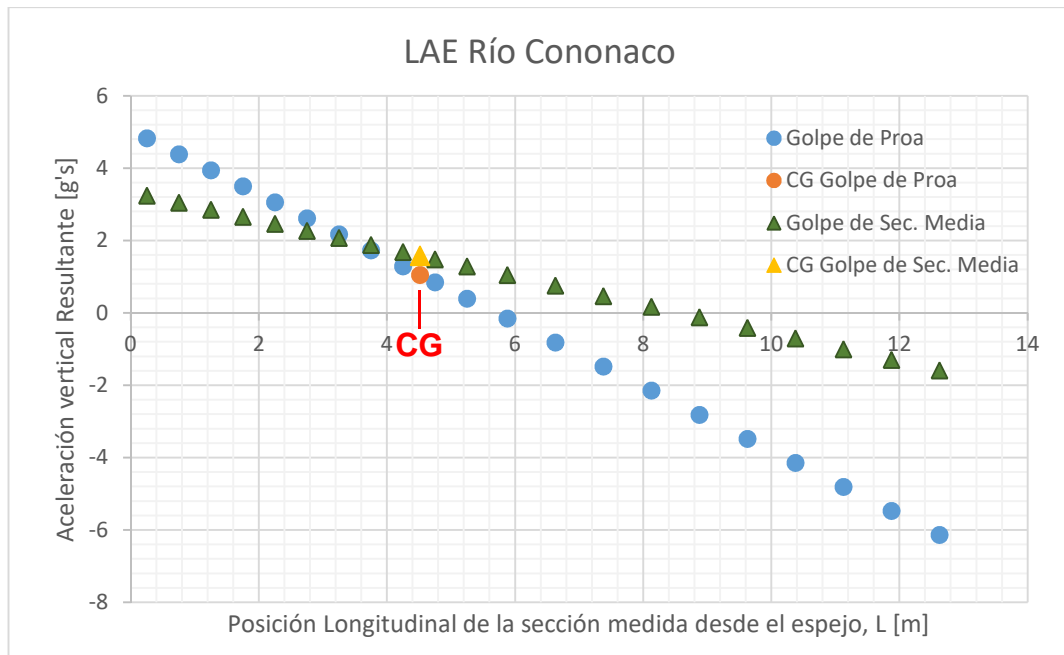


Figura 2.13 Distribución Longitudinal de la aceleración vertical resultante en la lancha por los Golpes Hidrodinámicos en el Fondo

En la Figura 2.13, la serie de puntos de color azul, representa la distribución longitudinal de la aceleración vertical resultante en la lancha planeadora, al tener un impacto en la zona de Proa, mientras que la de color verde, representa la aceleración vertical resultante por impacto en la zona de Sección Media. Las aceleraciones del CG de la embarcación, se muestran en la Figura 2.13, de color naranja y amarillo para el golpe por Proa y Sección Media, respectivamente. Estos valores pueden ser comparados con los que se muestran en la Tabla 2.7, medidos en [g's]. La diferencia entre ellos se debe principalmente a la aceleración rotacional que se produce en el Golpe de Proa. Posteriormente, estas aceleraciones verticales resultantes en cada condición de impacto hidrodinámico, son multiplicadas por la distribución de masa de la embarcación planeadora, descrita en el Capítulo 1. Este producto, representa las Fuerzas Inerciales que actúan en la embarcación, las cuales son aplicadas como $[Fuerza / \text{Área}]$ en cada uno de los elementos de dichas secciones. En la Figura 2.14, se muestran las distribuciones de fuerza inercial tras el Golpe de Proa y de Sección Media, integradas transversalmente. En esta distribución se puede observar el factor de incidencia de la aceleración vertical resultante actuando en la masa de la embarcación.

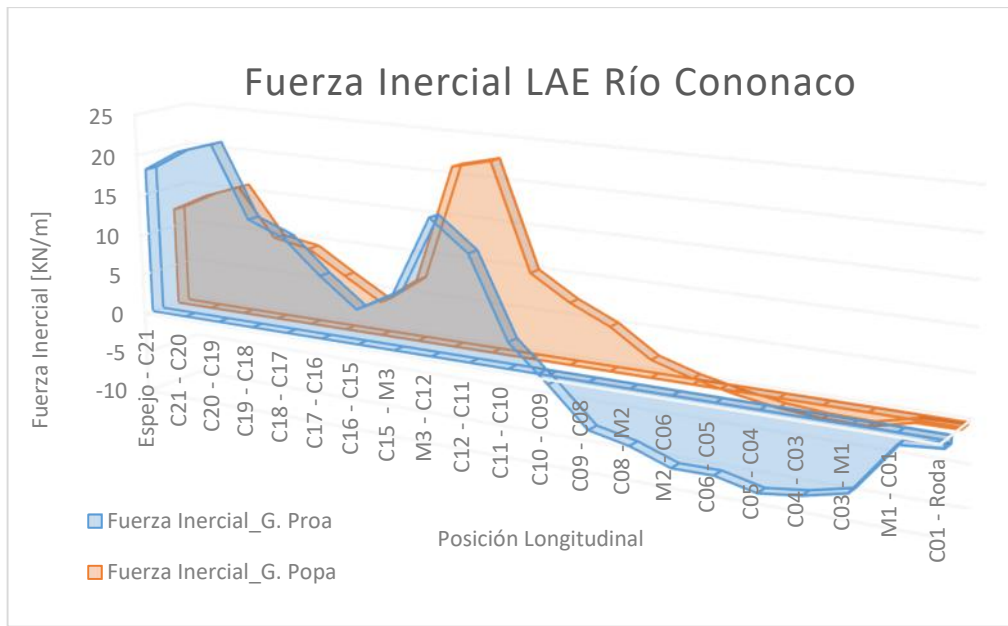


Figura 2.14 Distribución longitudinal de la Fuerza Inercial en la LAE Río Cononaco

Para comparar la contribución de las fuerzas dinámicas con las estáticas, a continuación en la Figura 2.15, se grafica la distribución de pesos de la embarcación. Al contrastar las Figuras 2.10 y 2.11, se evidencia la magnificación de la fuerza inercial en los extremos de la lancha, en los cuales se cuadruplica el efecto causado por la aceleración vertical resultante del CG de la viga-buque.

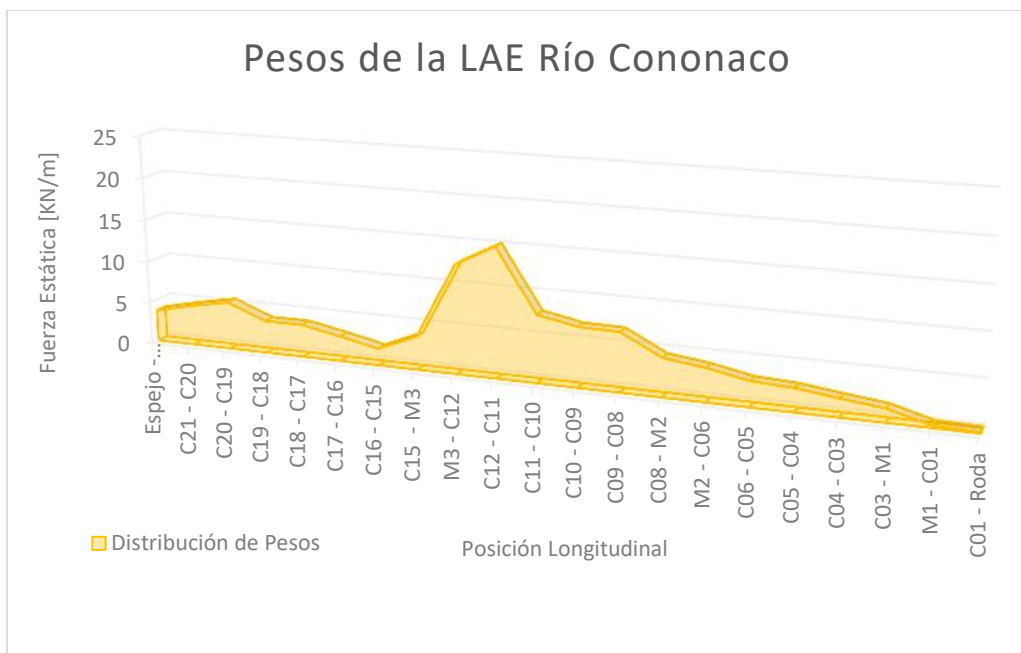


Figura 2.15 Distribución de Cargas Estáticas en la LAE Río Cononaco

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Criterios de Aceptación en embarcaciones planeadoras

Los elementos primarios de las lanchas planeadoras al estar sometidos a condiciones extremas de navegación, experimentan importantes deformaciones, y en algunos de ellos se desarrollan concentraciones de esfuerzos que ameritan ser analizadas. La sociedad clasificadora ABS recomienda, que luego de un análisis estructural empleando el Método de Elementos Finitos, se realicen estudios de los modos de falla comúnmente presentados en este tipo de embarcaciones [3]: Fluencia del material, Inestabilidad (Pandeo), Flexibilidad (deformaciones excesivas), Fatiga, y Vibración. Dicha referencia, establece valores permisibles de deformaciones y niveles de esfuerzo normal y de corte en la estructura de las embarcaciones de esta naturaleza, los cuales deben ser tomados en cuenta en las etapas finales del diseño, previo a la construcción.

Las reglas de ABS para lanchas planeadoras, [3] y [4], establecen que para las aleaciones de aluminio 5086-H116, típicamente usadas en la construcción de botes planeadores, el esfuerzo de fluencia del material soldado varía entre 96.5 y 131 [N/mm²], tomando el extremo superior para espesores de plancha menores o iguales a 6 [mm]. Este valor, representa únicamente un 60% del esfuerzo de fluencia del material en estado puro, mencionado en el capítulo 1 (207.8 [N/mm²]). Por su parte, el esfuerzo en corte del material soldado de dicha aleación, varía entre 55 y 76 [N/mm²] en forma equivalente al esfuerzo de fluencia. Esto equivale a un 48% de la resistencia a la cizalladura de la aleación original, 160 [N/mm²]. Por otra parte, la deformación máxima permitida en esta aleación varía entre 9 y 12 [mm] para una separación entre refuerzos de 450 [mm], siendo mayor para espesores de plancha menores o iguales a 6 [mm].

Una vez descritos los valores permisibles de deformaciones y de esfuerzos de fluencia y corte, se procede a la revisión y discusión de los niveles de esfuerzo y deflexiones producidas en la estructura primaria de la LAE Río Cononaco, luego del impacto hidrodinámico por Proa, y por Sección Media.

Resultados Numéricos del Golpe Hidrodinámico en ambas secciones

Después de desarrollar los modelos estructurales de la embarcación planeadora simulando los golpes hidrodinámicos en ambas secciones, se aplica el Método de Elementos Finitos para determinar los niveles de esfuerzo (en la membrana central de los elementos) y deformaciones que se generan en su estructura primaria.

Resultados del Golpe Hidrodinámico por Proa

En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, se muestran los niveles de esfuerzos en la mitad del espesor desarrollados en la estructura primaria de la embarcación en dirección “y” (axial), “z” (transversal) y “x” (vertical), respectivamente. En estas figuras, la lancha del fondo en el área donde se desarrolla el golpe hidrodinámico se encuentra en compresión, mientras que la cubierta, en tensión. Además se obtuvo que los valores absolutos máximos de esfuerzos normales desarrollados en las direcciones “y”, “z” y “x” fueron 49.7, 71.5 y 65.9 [N/mm²], respectivamente. Estos valores extremos representan el 38, 55 y 50% del valor del esfuerzo permisible del material de la lancha en las direcciones mencionadas. Estos resultados determinan que la respuesta primaria de la estructura debido al golpe hidrodinámico en la sección de Proa, es importante.

Los máximos valores absolutos de esfuerzo normal en dirección axial “y” se presentan en el fondo de la embarcación, en la zona cercana al impacto. El máximo valor de esfuerzo normal (42.08 [N/mm²]) se presentó en el refuerzo longitudinal entre las cuadernas 4 y 5, mientras que el mínimo valor de esfuerzo (-49.7 [N/mm²]) se registró en el detalle estructural de la conexión de la varenga 4 con el refuerzo longitudinal, (véase en la Figura 3.1). En dirección transversal “eje z”, el máximo valor de esfuerzo normal que se alcanzó en el ala de varenga 4, debido al cambio de sección en esta zona de la proa (71.5 [N/mm²]); por su parte el mínimo valor de esfuerzo (-39.9 [N/mm²]) se presentó en la conexión de la china con la varenga 4, en la sección del fondo (Figura 3.2). En dirección vertical “eje x” (Figura 3.3), el máximo valor de esfuerzo normal que se alcanzó la conexión de la varenga 4 con el refuerzo longitudinal del fondo (39.0 [N/mm²]); mientras que el

mínimo valor de esfuerzo (-65.9 [N/mm²]) se presentó en la conexión entre la varenga y la cuaderna 4, en la sección del fondo - costado. Todos los valores de esfuerzos normales obtenidos en la estructura primaria, hacen notar la importancia de los detalles de soldadura en las conexiones de las estructuras (aligeramientos, conexiones, cambios de secciones, etc.). Sin embargo, estos valores representan hasta el 55% del valor permisible del esfuerzo de fluencia del material soldado.

En la Figura 3.4, se muestra los niveles de esfuerzo cortante desarrollados en el corte XZ (S_{xz}). El máximo valor registrado en este análisis (31 [N/mm²]) se presentó en la conexión del alma de la varenga 4 con el refuerzo longitudinal, mientras que el mínimo valor encontrado (-37 [N/mm²]) se generó en la conexión del alma de la varenga 5 con la china (fondo) de la embarcación. Los máximos valores absolutos de esfuerzo cortante en los planos YZ y XY (S_{yz} y S_{xy}) se registraron en las alas de las bases de máquinas de la embarcación (20.66 y 26.1 [N/mm²]), respectivamente. (Véase Figuras 3.5 y 3.6).

Debido a que la magnitud del golpe hidrodinámico considerado en la zona de proa no es tan considerable, los valores de esfuerzos normales y cortantes están dentro de los rangos considerados por la sociedad clasificadora ABS, esto es algo que se esperaba. Considerando la linealidad del problema, podríamos ser capaces de determinar con qué magnitud de golpe hidrodinámico ocurriría la falla en la estructura tras el golpe de proa.

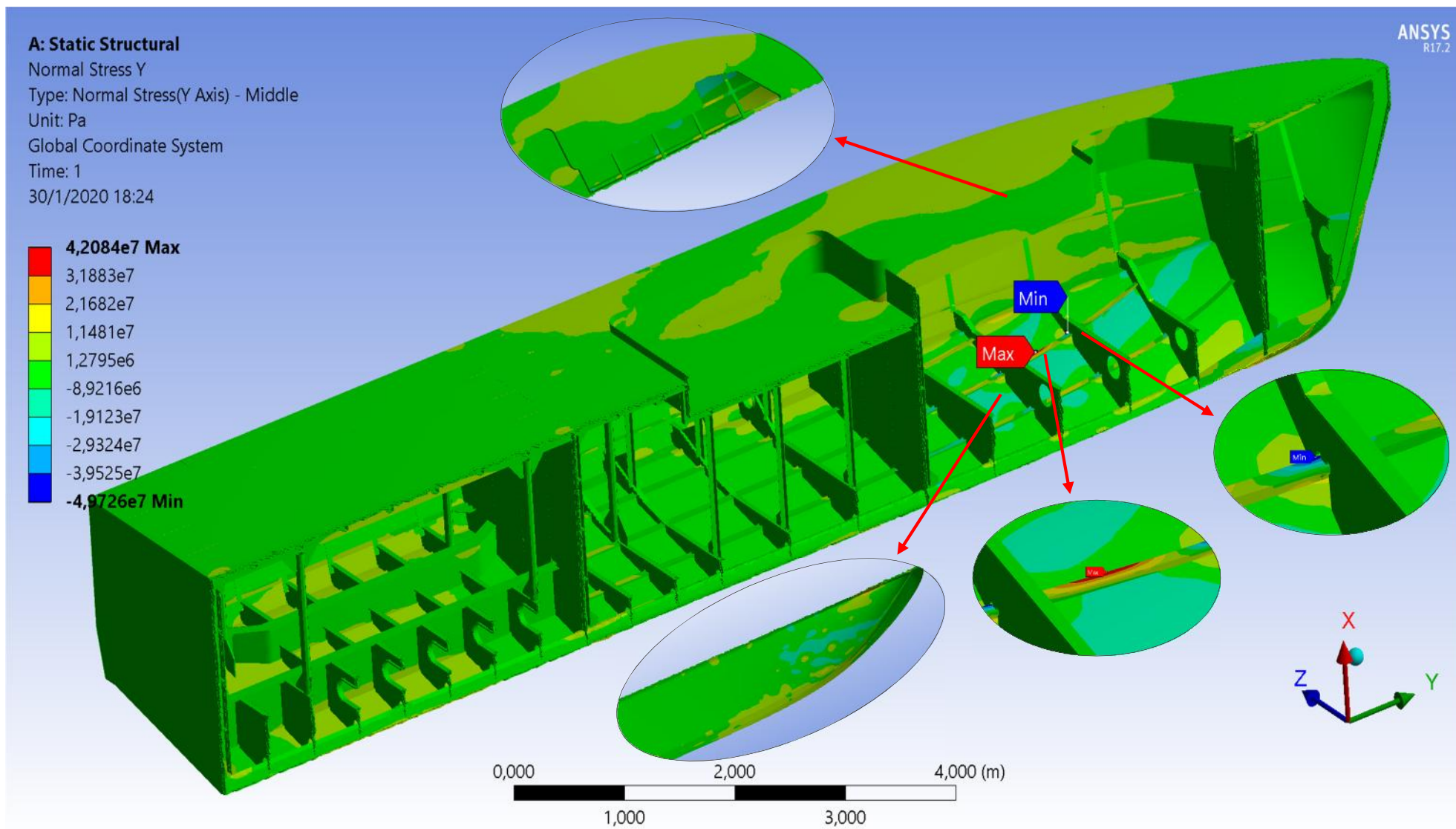


Figura 3.1 Esfuerzo normal en sentido axial (dirección "Y") en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

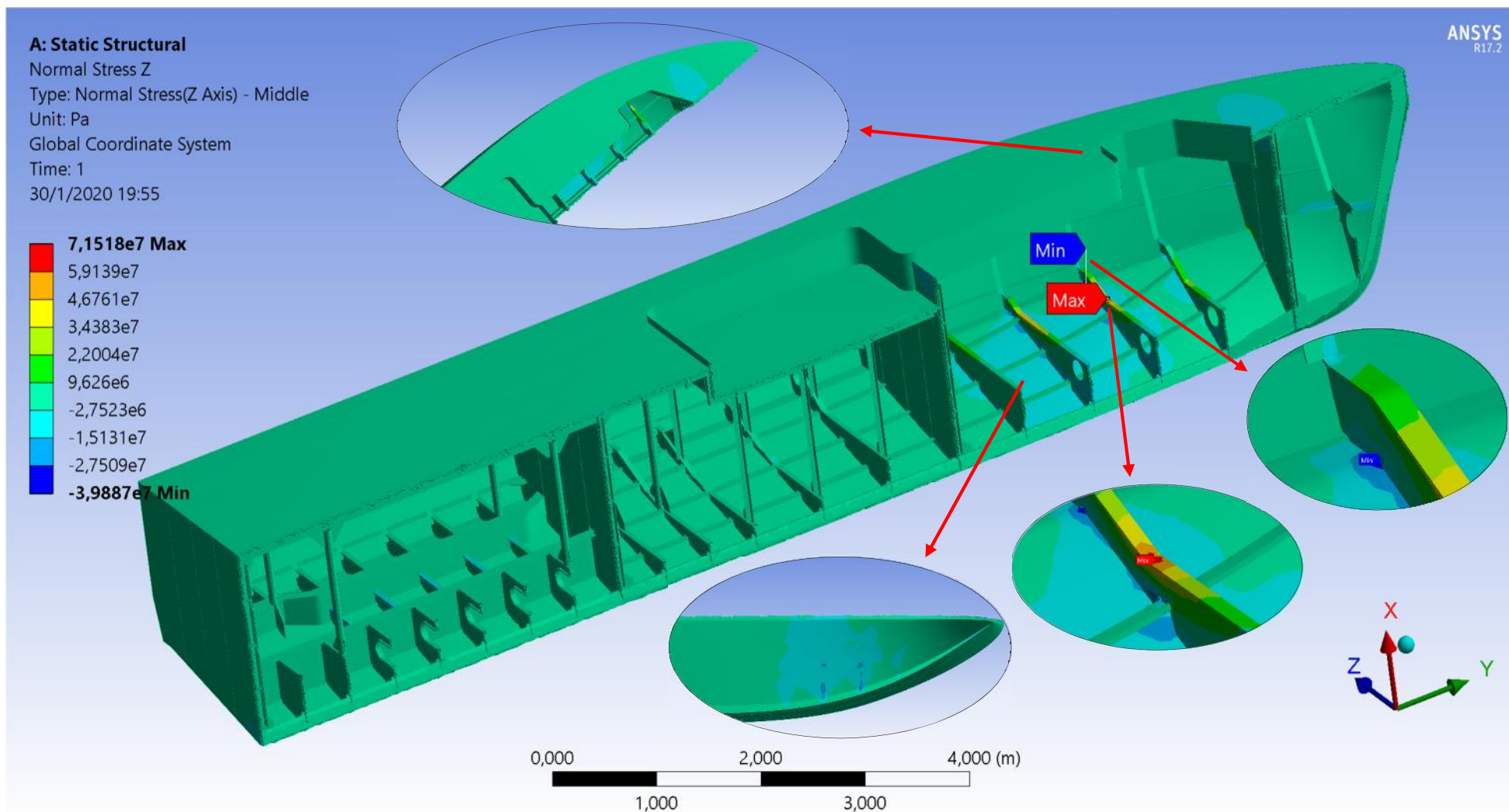


Figura 3.2 Esfuerzo normal en sentido transversal (dirección "Z") en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

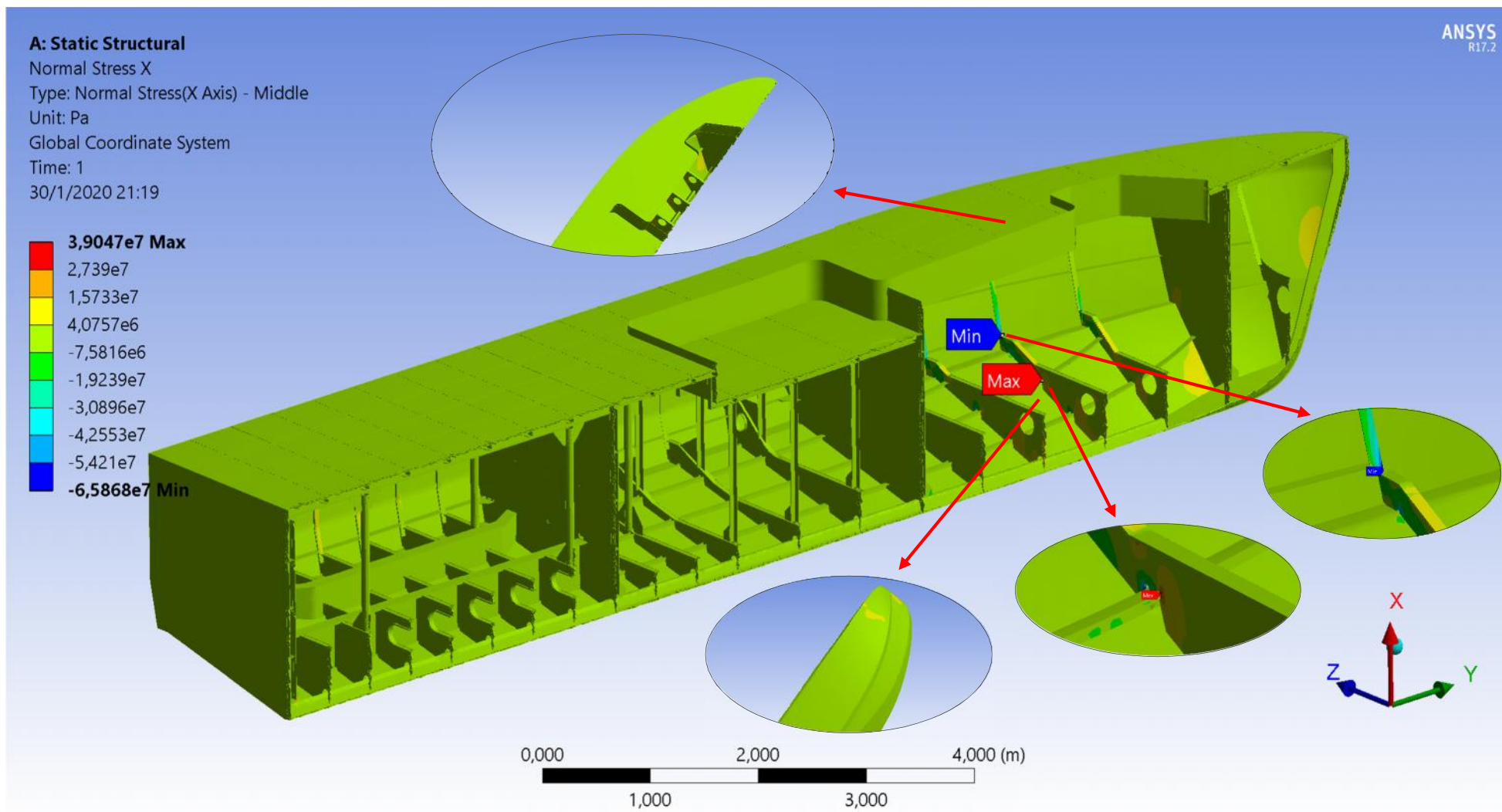


Figura 3.3 Esfuerzo normal en sentido vertical (dirección "X") en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

A: Static Structural

Shear Stress XZ

Type: Shear Stress(XZ Plane) - Middle

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 1

30/1/2020 21:35

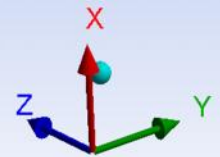
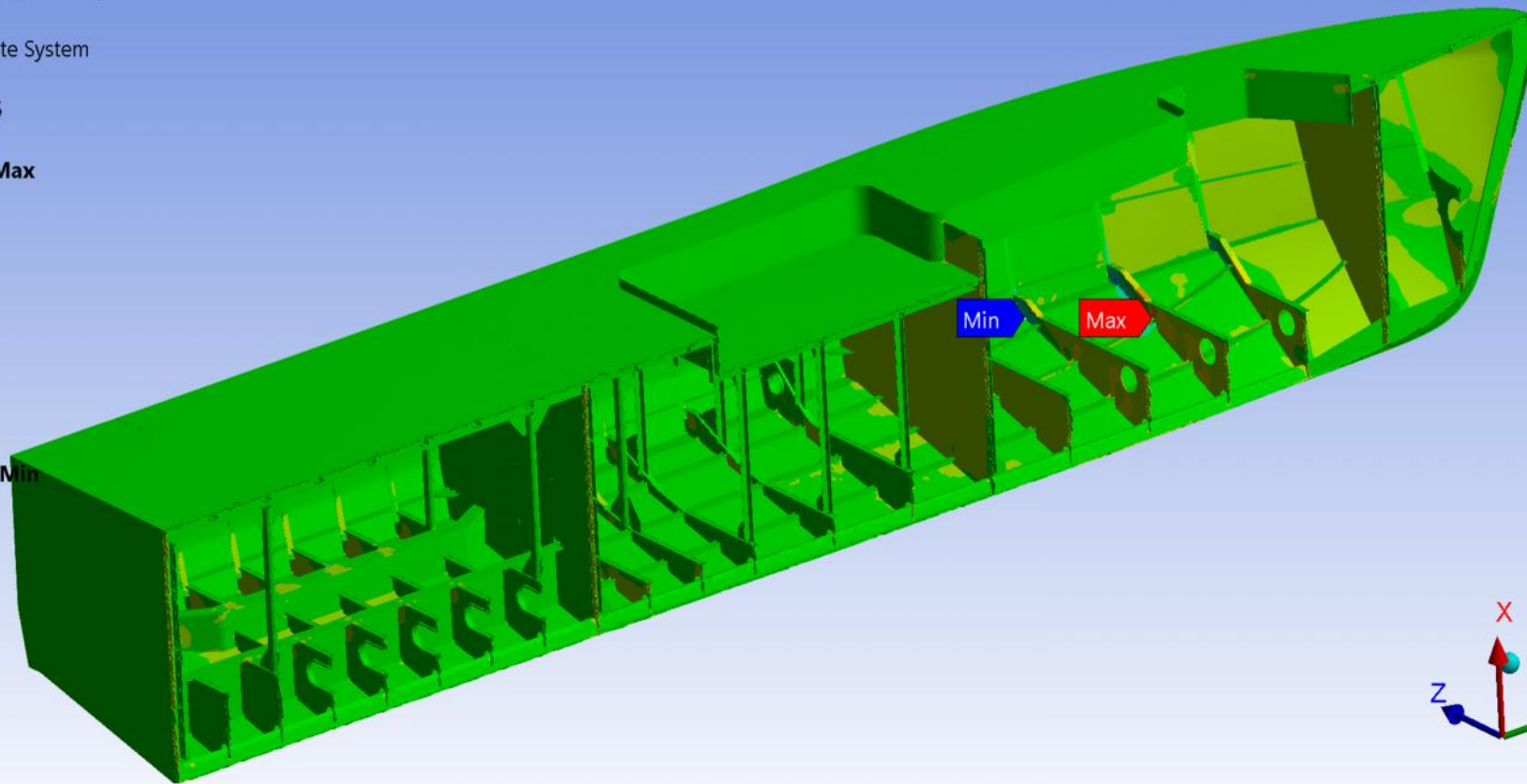
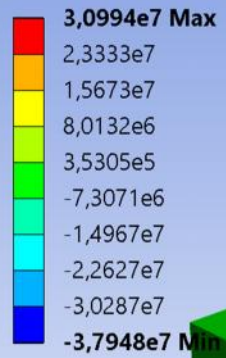


Figura 3.4 Esfuerzos cortantes en el plano "XZ" en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

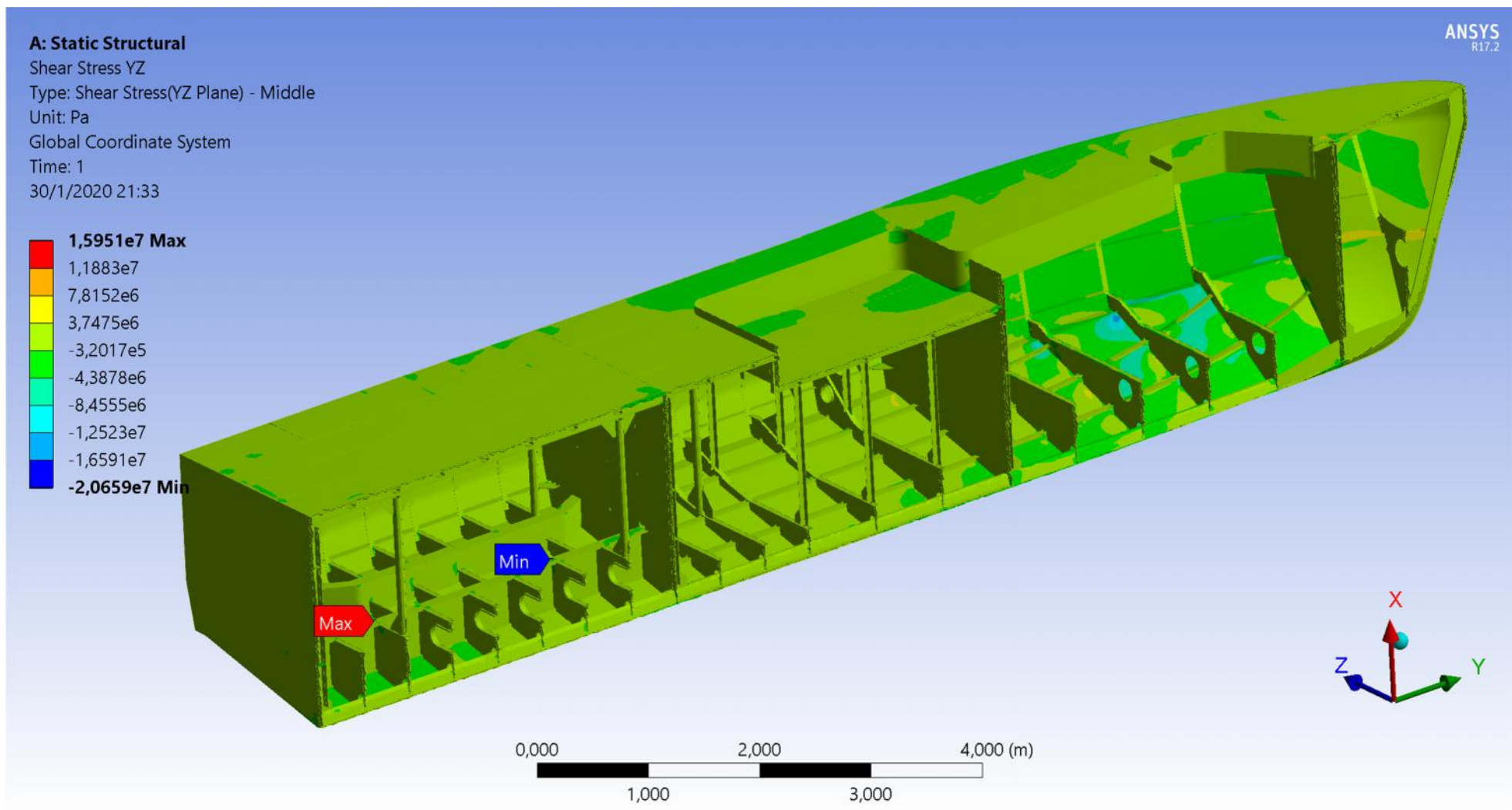


Figura 3.5 Esfuerzos cortantes en el plano “YZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

A: Static Structural
Shear Stress XY
Type: Shear Stress(XY Plane) - Middle
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1
30/1/2020 21:37

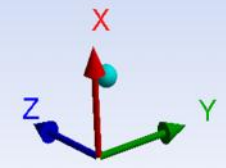
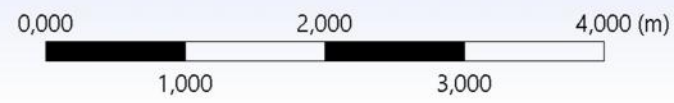
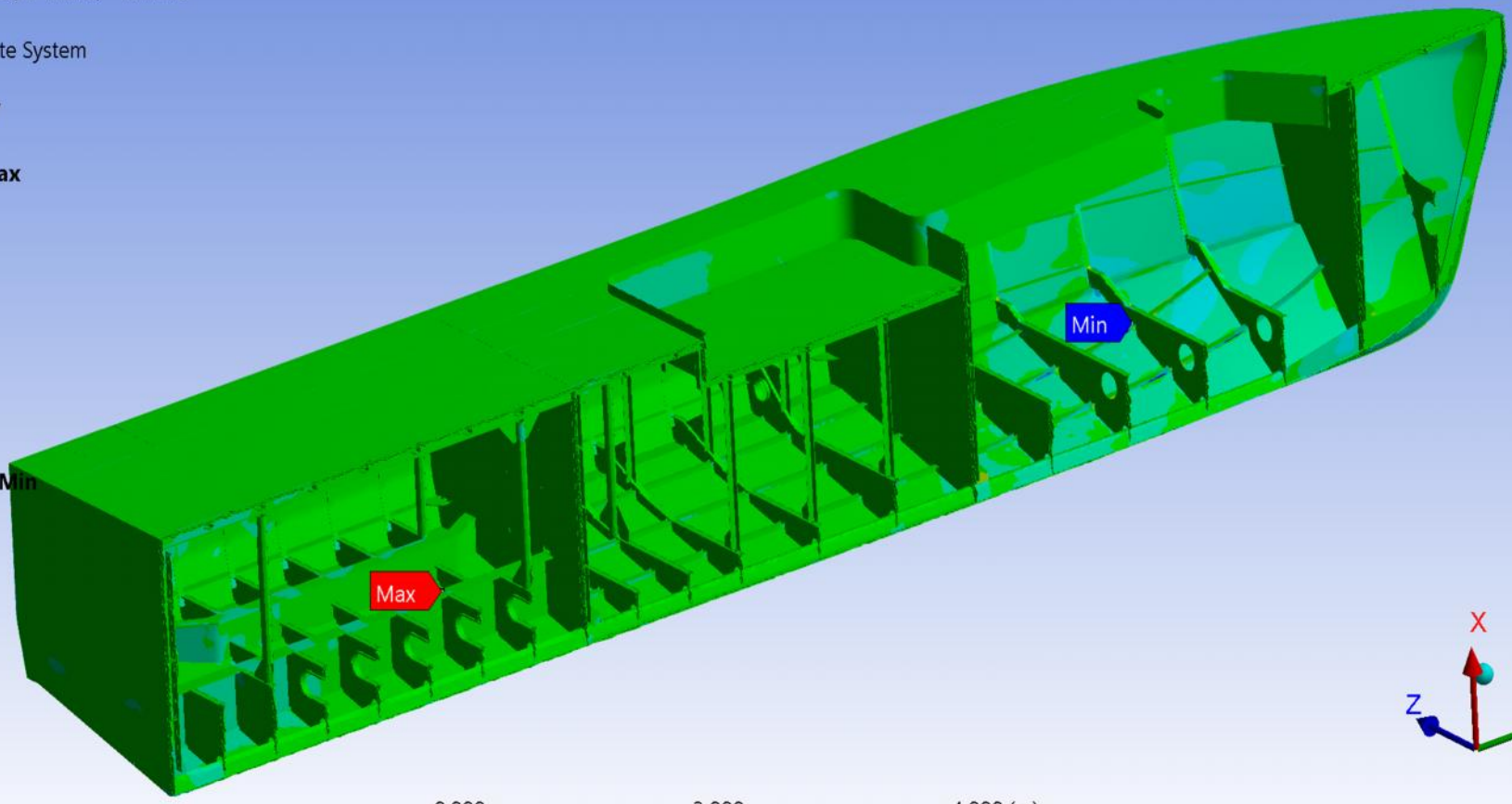
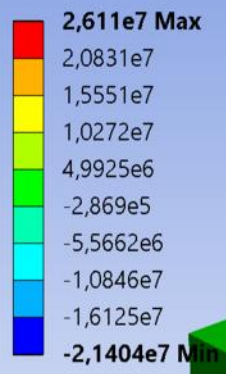


Figura 3.6 Esfuerzos cortantes en el plano “XY” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

Para comparar respecto de lo establecido por ABS, [3], en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9, se muestran las deflexiones en dirección “y”, “z”, y “x” que se desarrollan en el modelo global de la lancha planeadora. Se obtienen valores absolutos extremos de 0.9, 0.8 y 5.5 [mm] en sentido longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. Estos valores se presentan en los paneles del fondo y las alas de las varengas, en la zona de Impacto de la Lancha. Los valores reportados, corresponden al 8, 7 y 46% en cada caso mencionado, respecto del valor permitido.

Posteriormente, en la Figura 3.10, se muestran los niveles de esfuerzo equivalente de von Mises. El máximo valor que se generó tras realizar la combinación de los esfuerzos normales en dirección axial “y”, transversal “z” y esfuerzo cortante en el plano YZ, fue de 83.5 [N/mm²], el cual se presentó en la conexión de la varenga 4 con la china (fondo de la lancha planeadora). Este valor representa a su vez, el 64% del valor permitido por ABS [3], el cual equivale a 111.35 [N/mm²].

A: Static Structural

Directional Deformation Y
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: m
Global Coordinate System
Time: 1
30/1/2020 21:43

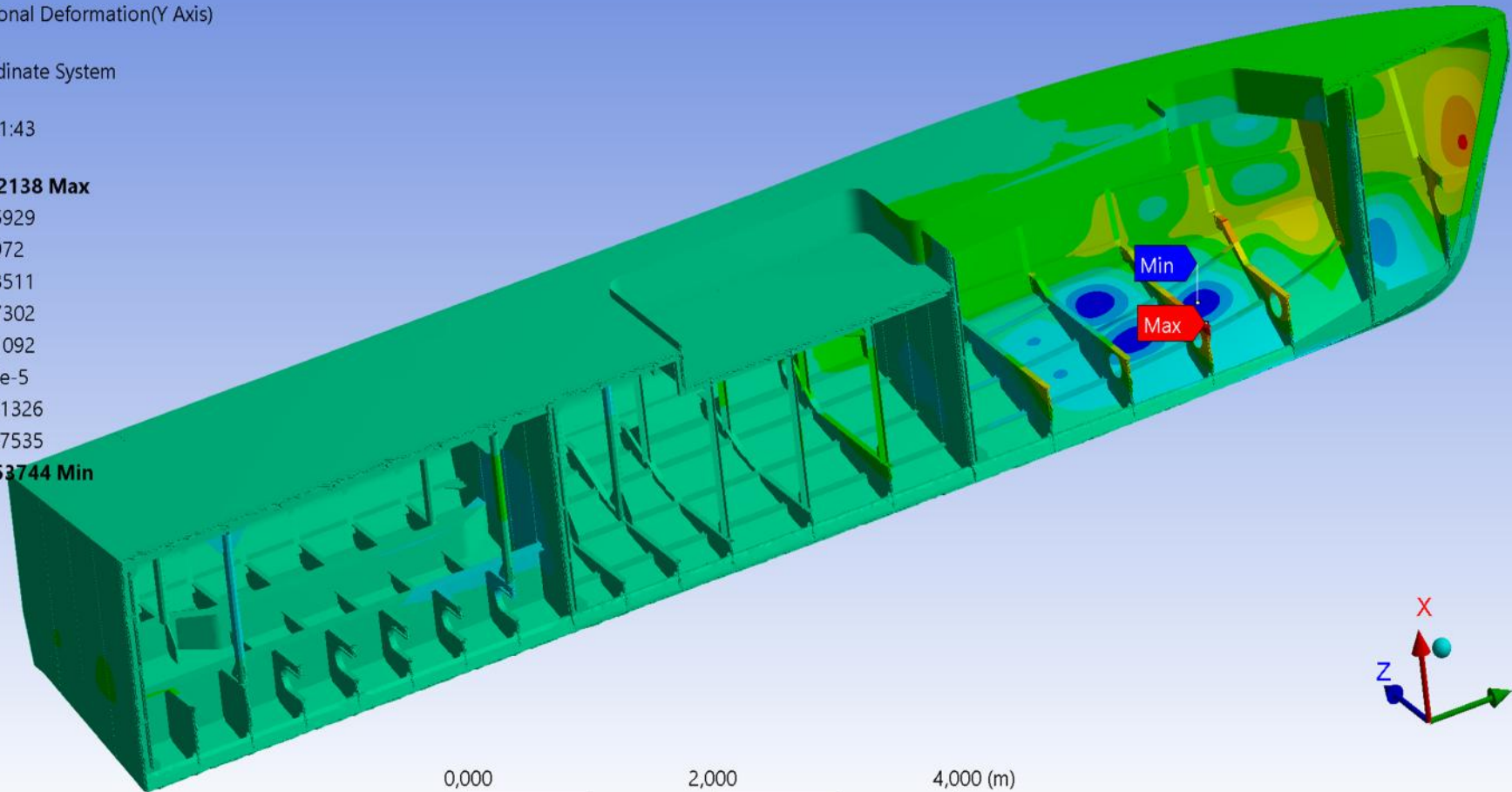
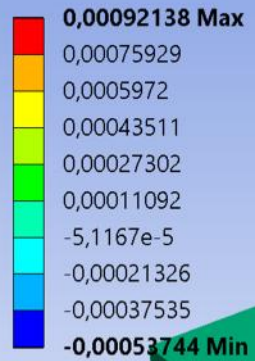


Figura 3.7 Deformación en sentido axial “Y” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

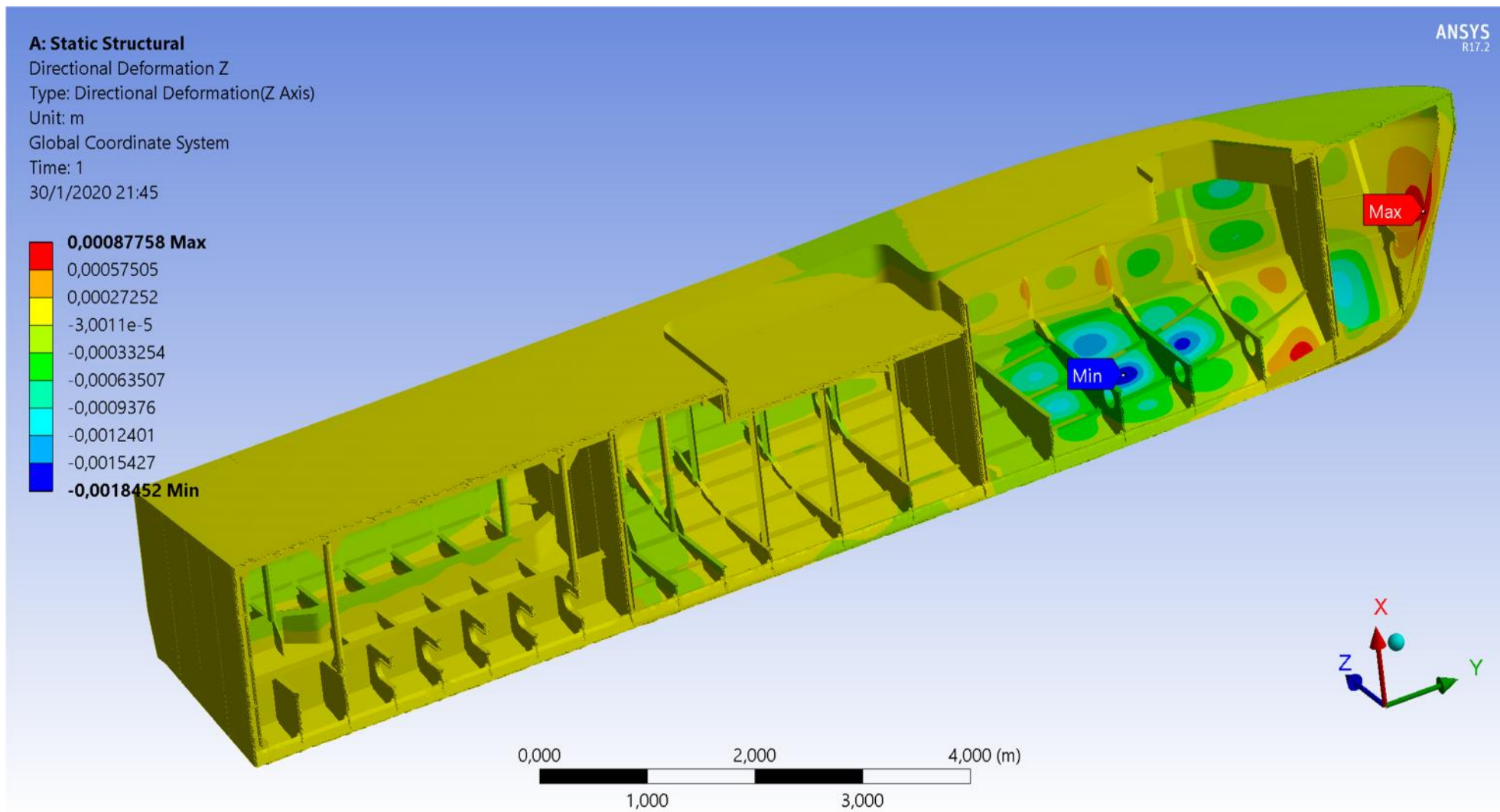


Figura 3.8 Deformación en sentido transversal “Z” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

A: Static Structural

Directional Deformation X
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: m
Global Coordinate System
Time: 1
30/1/2020 21:41

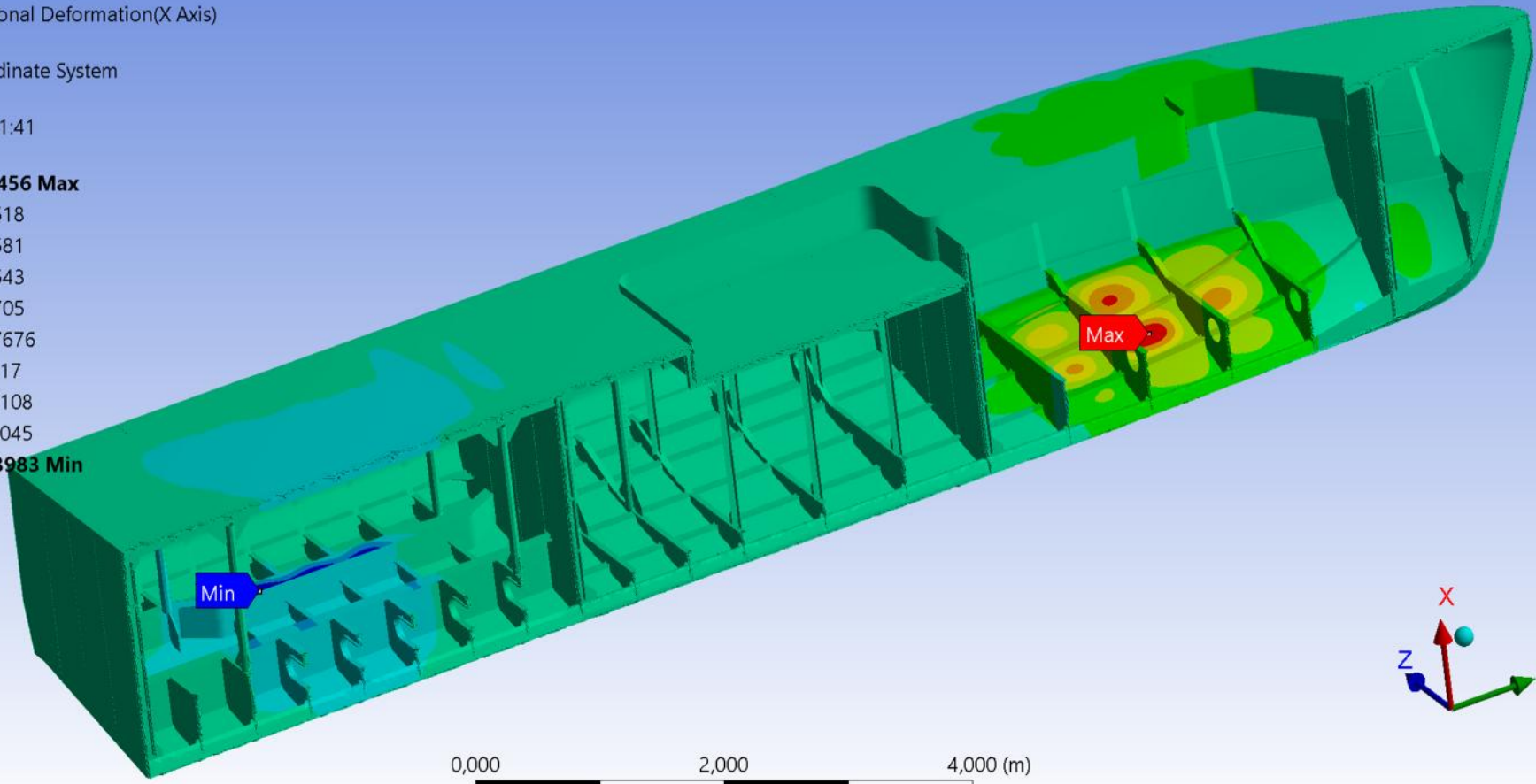
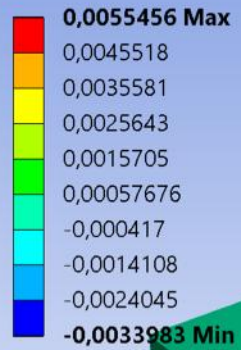


Figura 3.9 Deformación en sentido vertical “X” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

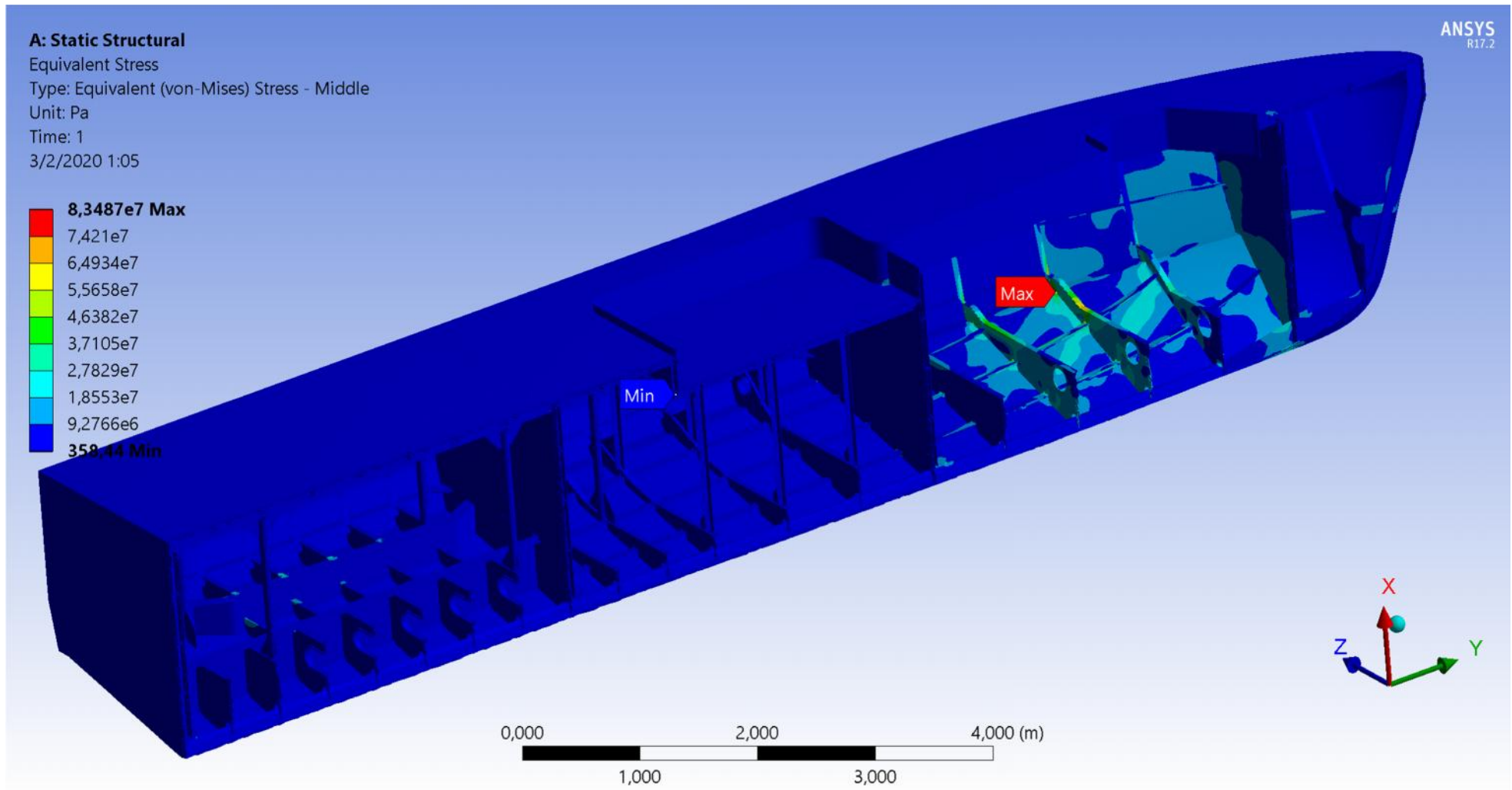


Figura 3.10 Esfuerzo equivalente de von Mises en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Proa

Resultados del Golpe Hidrodinámico por Sección Media

En forma análoga a lo presentado con los resultados numéricos del golpe hidrodinámico por Proa, se determinaron los valores extremos de los niveles de esfuerzo de fluencia y de corte, así como también las deflexiones en la estructura primaria de la embarcación planeadora al ser sometida a golpe hidrodinámico en la zona de Sección Media. El reporte de estos valores, es presentado en el apéndice, y, el resumen de los resultados obtenidos en este análisis se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los valores de esfuerzos de membrana y deflexiones generadas en la LAE Río Cononaco

		Golpe Hidrodinámico por Proa (1/3)		Golpe Hidrodinámico por Sección Media (1/2)		Valor Permissible ABS, [3] y [4]
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Esfuerzo Normal [N/mm ²]	Sx	-65.9	39.1	-153.4	136.1	[96.5 - 131]
	Sy	-49.7	42.1	-95.2	116.2	
	Sz	-39.9	71.5	-227.0	166.1	
Esfuerzo Cortante [N/mm ²]	Sxy	-21.4	26.1	-41.1	40.0	[55 - 76]
	Syz	-20.7	15.9	-28.6	45.2	
	Sxz	-37.9	31.0	-76.4	129.8	
Esfuerzo equivalente [N/mm ²]	Se	-	83.5	-	256.0	111.35
Deformación [mm]	x	-3.4	5.5	-3.3	14.7	[9 - 12]
	y	-0.5	0.9	-2.1	1.3	
	z	-0.2	0.8	-3.3	4.0	

Los valores registrados en la Tabla 3.1, tanto para el golpe Hidrodinámico producido por la carga de slamming en la zona de Proa, como de Sección Media, son generados por las correspondientes cargas equivalentes que se estimaron en el Capítulo 2, un tercio y la mitad del desplazamiento de la embarcación, respectivamente. Al comparar los valores obtenidos para el esfuerzo normal, esfuerzo de corte, esfuerzo de von Mises y deflexiones generadas en la lancha con los valores presentados en la referencia [4], se puede verificar que la estructura primaria de la embarcación cumple con los criterios de aceptación que

detalla la sociedad clasificadora ABS para este tipo de análisis cuando el golpe se genera en la zona de Proa con la magnitud descrita. Sin embargo, cuando el golpe hidrodinámico es inducido en la zona de Sección Media con una magnitud igual o mayor a la mitad del desplazamiento, los valores encontrados son mayores a los de la referencia.

Análisis primario de la estructura de la lancha

Los resultados del análisis estructural del modelo global de la lancha planeadora sometida a Golpe Hidrodinámico por Proa se analizan en un nivel: primario. Se analizaron tres secciones en la embarcación: una entre cada compartimento limitado por los tres mamparos, incluyendo el espejo.

Análisis primario de la estructura de la lancha sometida a golpe hidrodinámico por Proa

En el análisis estructural a nivel primario, se resumen los esfuerzos normales y cortantes en tres secciones de la lancha planeadora Río Cononaco. El primer corte corresponde a una sección ubicada entre el espejo y el Mamparo 3 (compartimento de sala de máquinas) 21.15% de L medida desde el espejo. El segundo corte, está ubicado en sección Media (50% L medida desde el espejo) entre los mamparos 3 y 2; en un sector ubicado entre las cuadernas 9 y 8. Por su parte, el tercer corte de este análisis está en una sección ubicada a 74% de L medida desde el espejo, entre los mamparos 1 y 2. En la Figura 3.11, se muestra un esquema de los cortes transversales realizados para este análisis. En cada corte, se analizan los esfuerzos normales y cortantes generados en el fondo, costado y cubierta de la embarcación.

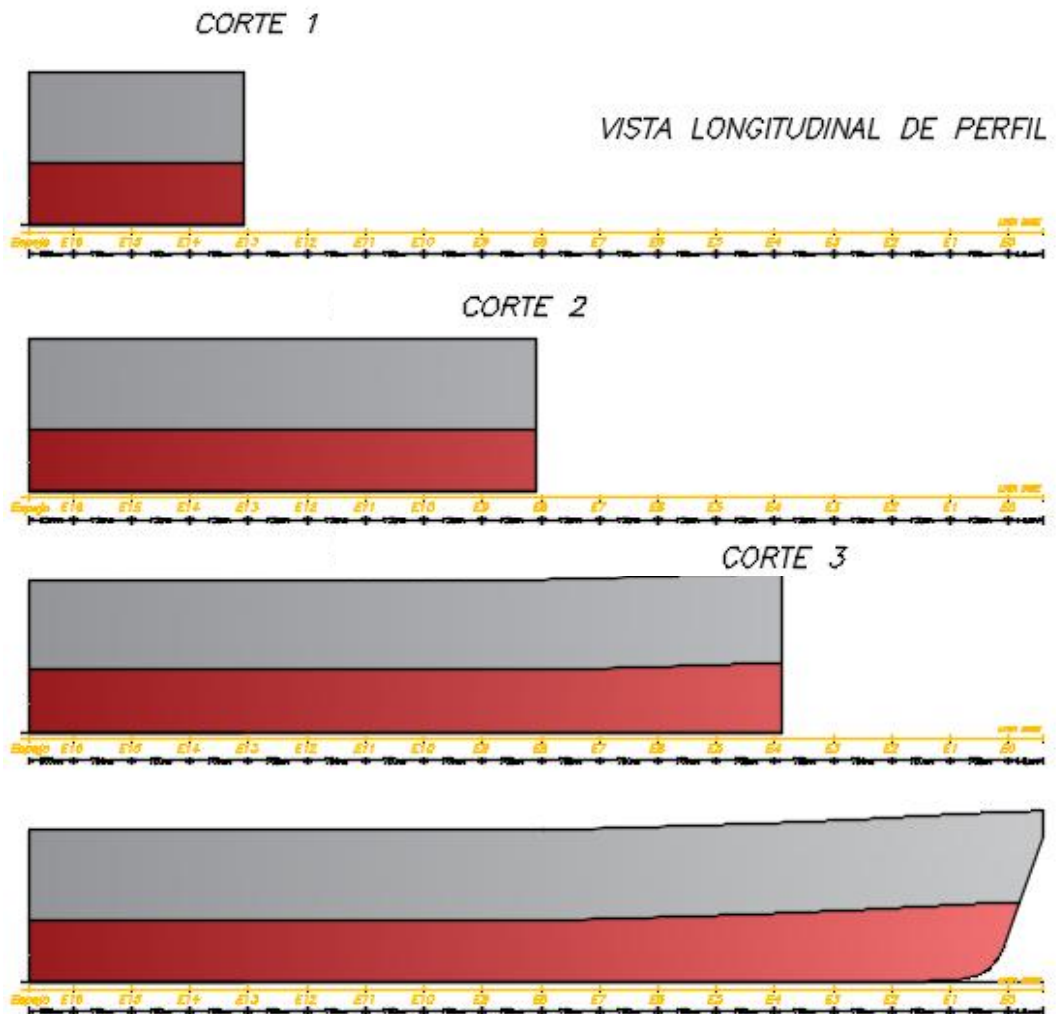


Figura 3.11 Cortes para analizar esfuerzos normales y cortantes a nivel primario

A continuación, se presentan los valores de esfuerzos normales (S_y) y cortantes (S_{yz}), obtenidos en el corte 1 de la figura anterior. Los valores presentados en las siguientes figuras, corresponden a los esfuerzos desarrollados en el fondo, costado, y cubierta, respectivamente.

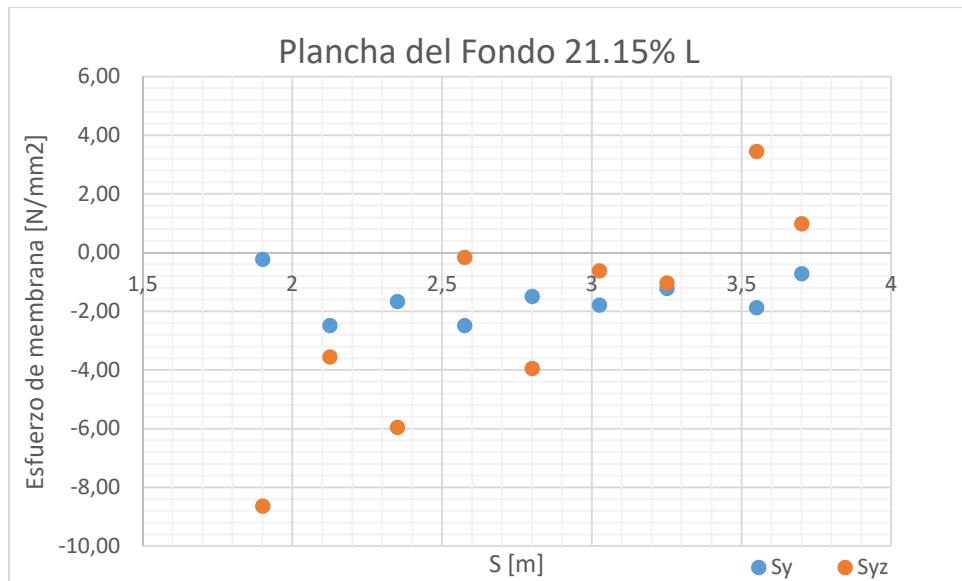


Figura 3.12 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, Corte 1

En la Figura 3.12, se muestra la distribución de esfuerzo normal y cortante generados en el fondo de la lancha en el corte realizado a 21.15% L medido desde el espejo. Los valores ubicados en la posición $S=1.9$ [m], en el eje de las abscisas, corresponden a los registrados en la quilla, luego, saltando una posición pertenecen a las conexiones fondo-refuerzo. Los intermedios entre estos, representan un nodo del planchaje ubicado entre refuerzos. El corte realizado, corresponde a una región entre cuadernas de la sala de máquinas. Se observa, que los mayores niveles de esfuerzos normales, se desarrollan en la región cercana a la quilla (compresivos), y se reducen en magnitud a medida que se aproximan a la china, donde se desarrollan valores de esfuerzo normales positivos. Los valores de esfuerzos cortantes registrados en esta zona de la sección, no son importantes, generándose un valor máximo de -8.63 [N/mm²].

En la Figura 3.13, se muestra la distribución de esfuerzo normal y cortante en el costado de la lancha en el corte mencionado anteriormente. Los primeros valores registrados, corresponden a los ubicados en la zona más baja del costado en ese corte, y se distribuyen verticalmente hasta llegar a la cubierta principal. De acuerdo con los valores registrados, se puede observar que existe una concentración de

esfuerzos normales en el fondo de la sección y disminuyen hasta llegar a cubierta, sin cambiar la orientación (esfuerzos de tensión). La máxima magnitud del esfuerzo cortante presentada en la sección, es de 0.8 [N/mm²], y se presenta cerca del fondo de la sección.

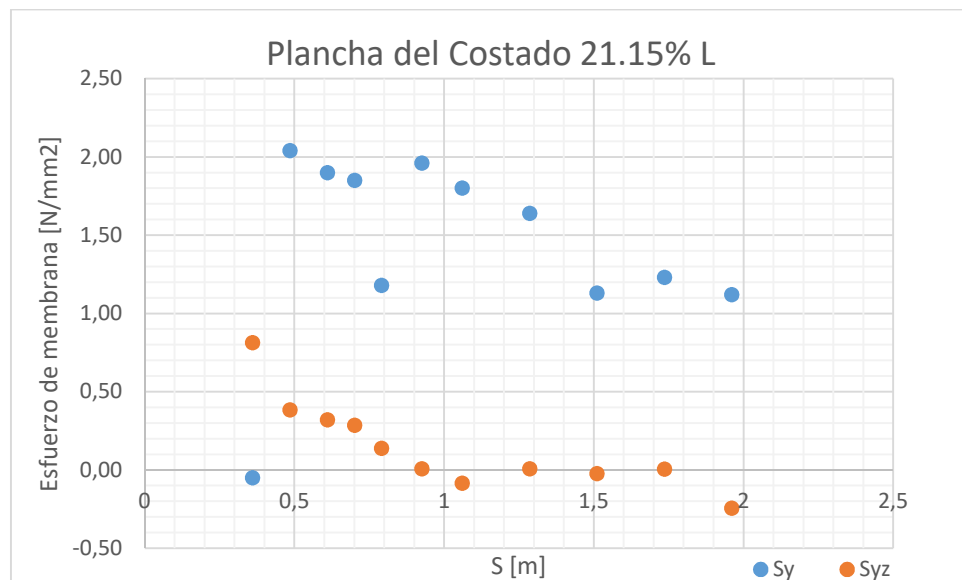


Figura 3.13 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, Corte 1.

Comparando los valores de esfuerzo, registrados en las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14, se puede observar que existen dos zonas de concentración de esfuerzos normales: en las cercanías a la quilla (fondo), y la conexión fondo-costado, donde se generan magnitudes de esfuerzo de: -2.5 y 2.0 [N/mm²], respectivamente. En la sección, se verifica que la zona del fondo está sometida a compresión, mientras que el costado y la cubierta experimentan esfuerzos tensionales.

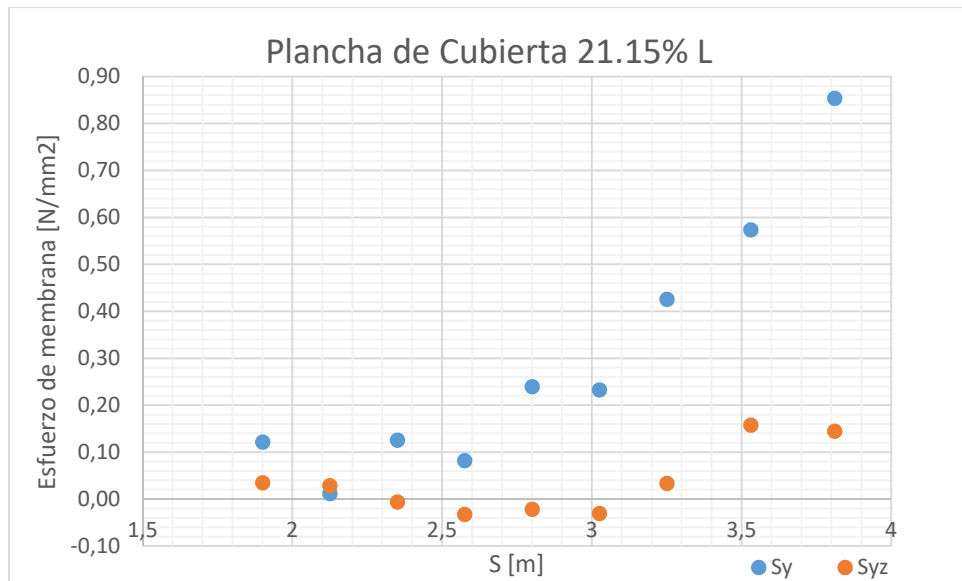


Figura 3.14 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en la Cubierta de la Lancha, Corte 1

En las Figuras 3.15, 3.16 y 3.17 se muestran las Distribuciones de Esfuerzo Normal y Cortante en el Fondo, Costado y Cubierta de la lancha planeadora, respectivamente, tras realizar un corte entre las cuadernas 09 y 08, en sección media (50% L). En estos diagramas, se verifica que el esfuerzo normal máximo es 2.39 [N/mm²], y se genera en la zona del fondo de la embarcación. Por su parte los esfuerzos cortantes que se generan en Sección Media tras el Golpe de Proa, casi nulos. De acuerdo a estas distribuciones, se puede verificar que el Fondo y se encuentran en compresión; mientras que el costado y Cubierta se encuentra en tensión.

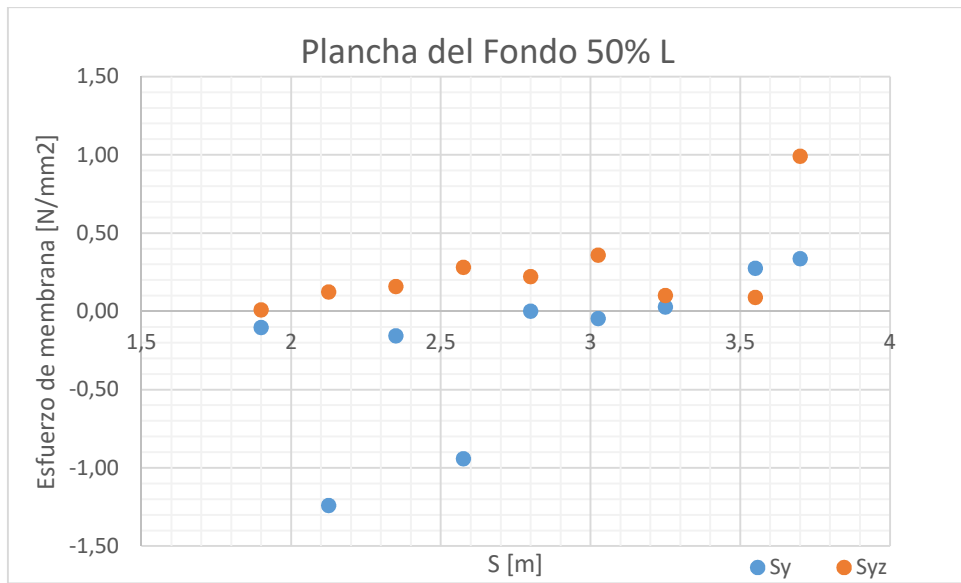


Figura 3.15 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 50%L

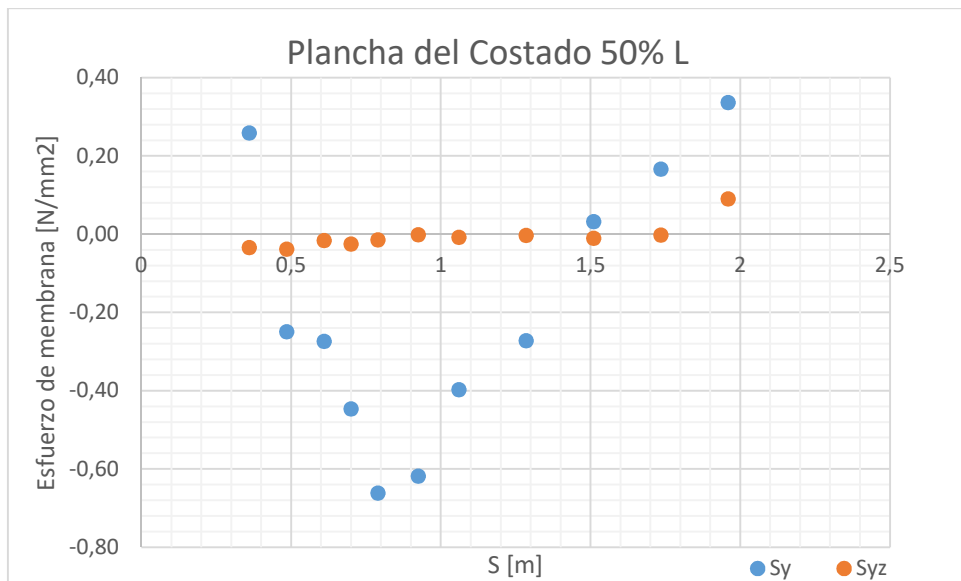


Figura 3.16 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, 50%L

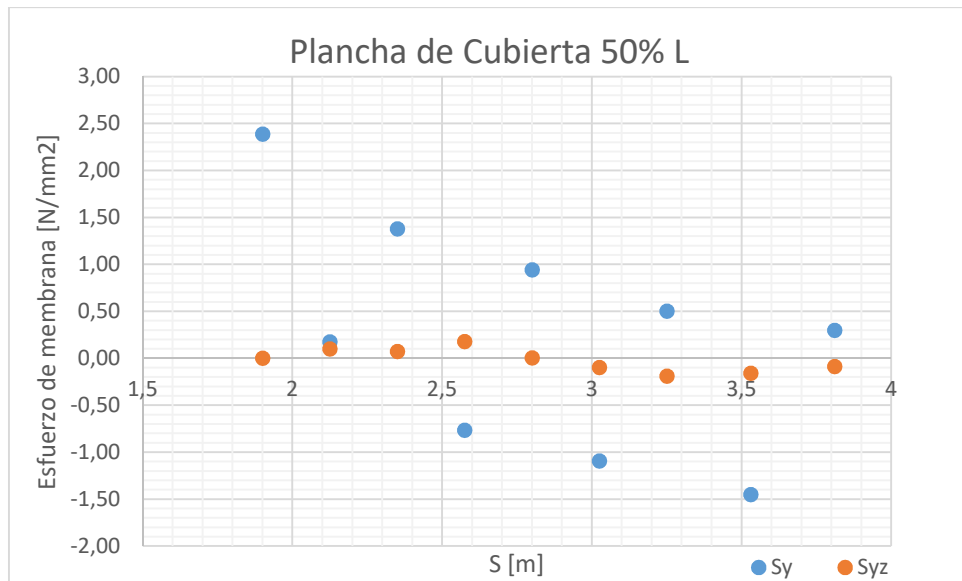


Figura 3.17 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 50%L

En las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20, se muestra la distribución de Esfuerzos Normales y cortantes en el Fondo, Costado y Cubierta de la lancha planeadora en un corte ubicado a 74% L medido desde el espejo. En estos diagramas, se verifica que el máximo esfuerzo normal desarrollado en las tres zonas analizadas, se desarrolla en la cubierta principal (-4.9 [N/mm²]), aunque también se generan esfuerzos considerables en el fondo (2.0 [N/mm²] y -2.6 [N/mm²], en la quilla y en la china de esta sección, respectivamente). Los esfuerzos cortantes más significativos se desarrollan en el fondo, con una magnitud de 0.9 [N/mm²].

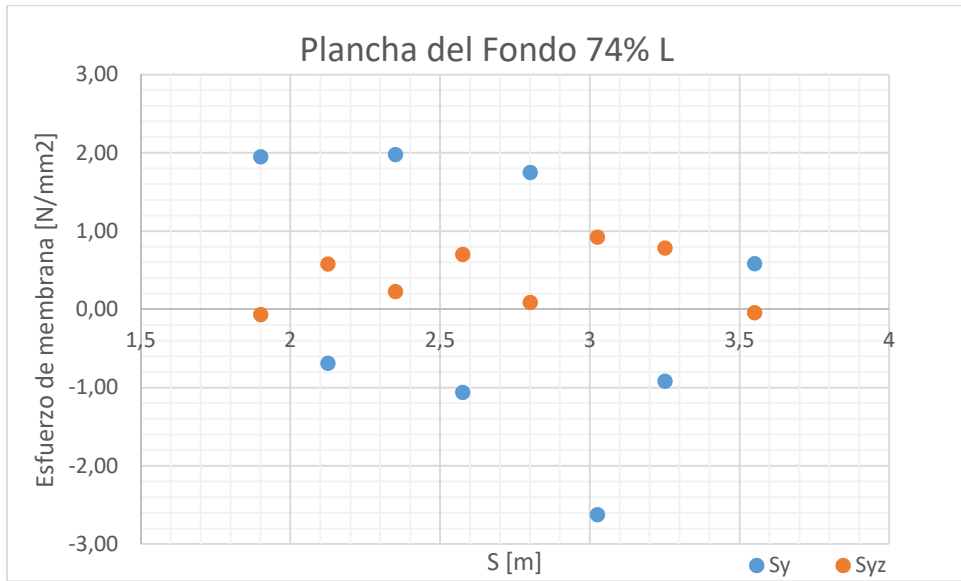


Figura 3.18 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Fondo de la Lancha, 74%L

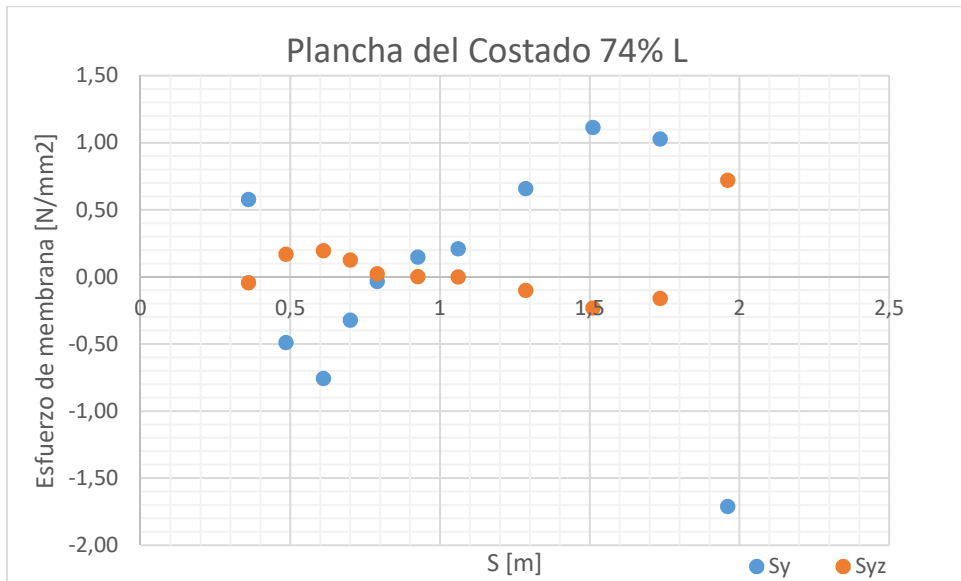


Figura 3.19 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en el Costado de la Lancha, 74%L

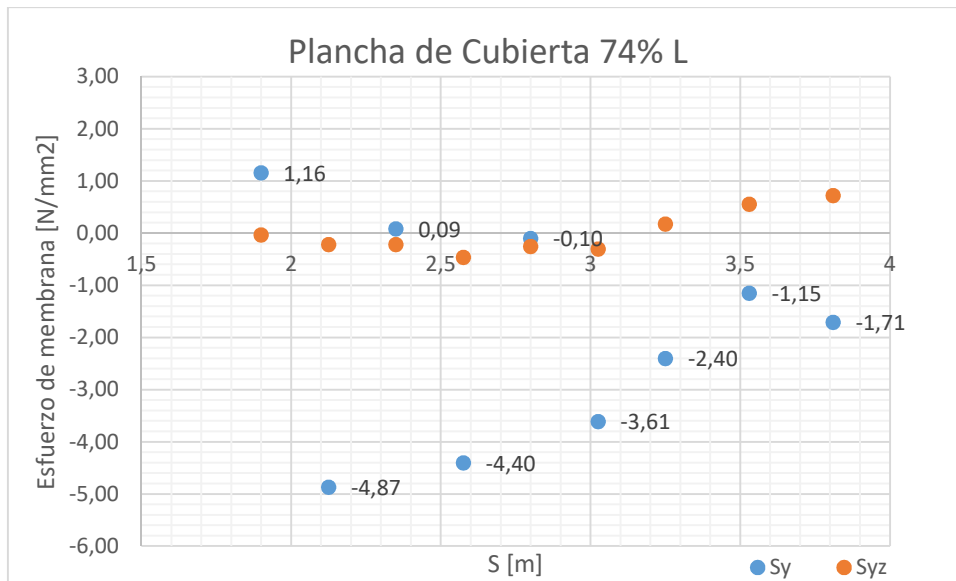


Figura 3.20 Distribución de Esfuerzo de membrana Normal y Cortante en la Cubierta de la Lancha, 74%L

En resumen, los valores determinados de esfuerzos a nivel primario tras el Golpe de Proa en los 03 cortes realizados, son relativamente bajos. Sin embargo, en la Figura 3.21, se muestra el corte 2 con los esfuerzos normales en dirección axial “y” (correspondiente al 50%L). Como se puede observar, el esfuerzo es negativo en todo el fondo hasta llegar a la china, donde vuelve a ser positivo al igual que en toda la sección del costado. Esto se debe a que el comportamiento de la viga-buque. La concentración de esfuerzos, se da en dos puntos: entre la quilla y el fondo, y la conexión entre fondo y costado.

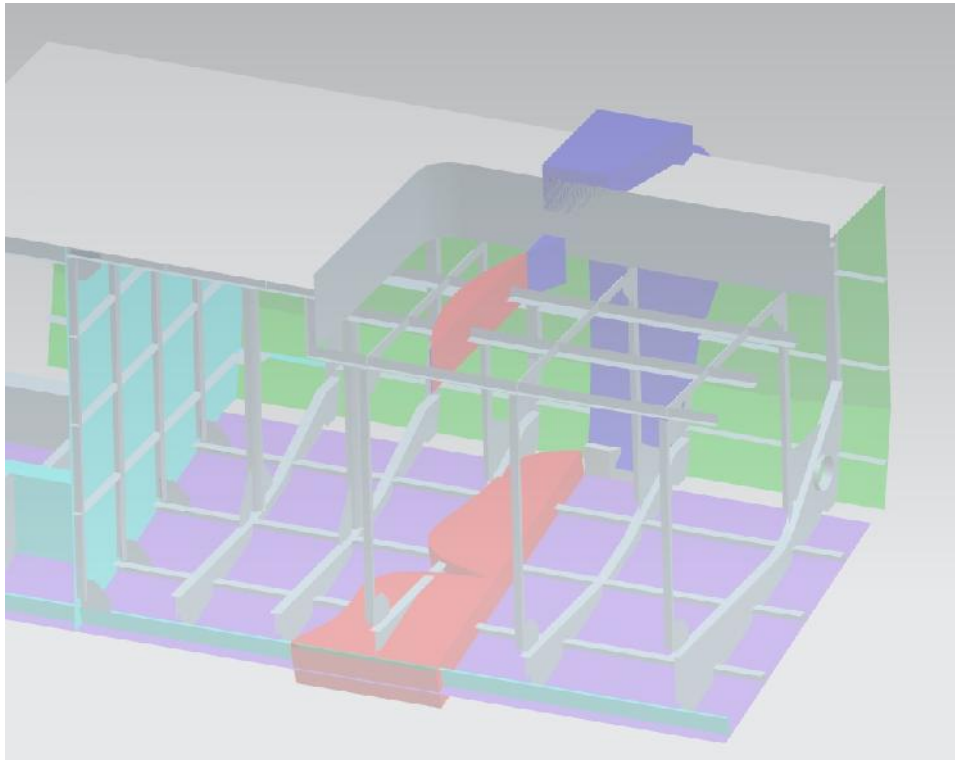


Figura 3.21 Distribución de Esfuerzo Normal en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Proa

En la Tabla 3.2, se presentan los valores integrados transversalmente en la sección del corte 2 (50%L) para determinar el equilibrio que se planteó en el Capítulo 2. La sumatoria de las cargas P_i estimada en cada punto del corte (que actúan en dirección normal al plano de corte), da como resultado 0. Así mismo, el máximo momento flector generado en esta sección corresponde a la sumatoria de todos los momentos en cada uno de los puntos analizados.

Tabla 3.2 Estimación de Carga normal y Momento Flector máximo en la Sección Media de la embarcación tras Golpe de Proa.

(i)	x(i) [mm]	z(i) [mm]	t(i) [mm]	$\sigma_{y(i)}$ [N/mm ²]	$\Delta s_{(i)}$ [mm]	P _(i) [N]	Mz _(i) [N.m]
0	0	0	6,35	-1,457	0,00	0,0	0
1	52	255,6	6,35	-1,349	260,84	-2234,0	-116,2
2	100	453,2	6,35	-1,210	203,35	-1562,5	-75,0
3	146	660	6,35	-1,158	211,85	-1557,8	-71,7
4	200	902	6,35	-0,105	247,95	-165,3	-8,9
5	244	1124	6,35	-0,862	226,32	-1238,8	-54,5
6	298	1350	6,35	-0,742	232,36	-1094,8	-59,1
7	360	1645	6,35	-0,645	301,44	-1234,6	-76,5
8	360	1798	6,35	0,251	153,00	243,9	0,0
9	700	1860	4,76	0,545	345,61	896,6	304,8
10	1070	1900	4,76	0,845	372,16	1496,9	553,8
11	1270	1905	4,76	0,961	200,06	915,2	183,0
12	1527	1907	4,76	1,186	257,01	1450,9	372,9
13	1973	1910	4,76	0,953	446,01	2023,2	902,4
14	1973	1300	4,76	0,642	610,00	1864,1	0,0
15	1076	1300	4,76	0,215	897,00	918,0	-823,4
16	1076	650	4,76	-0,248	650,00	-767,3	0,0
17	1076	0	4,76	0,015	650,00	46,4	0,0
P [N]:						0,0	
Mz [N.m]:							1031,6

Otra consideración importante en el análisis primario, es el desplazamiento que se genera en la estructura a partir de la aplicación de la carga. Para esta consideración, se presenta en la Figura 3.21, el desplazamiento del ala de la quilla en el compartimento 3, limitado por el espejo, y el mamparo 3.

Si se considera el casco de la embarcación como un cuerpo rígido, en forma simplista, los elementos de la quilla ubicados entre el Espejo y el Mamparo 3, deben desplazarse siguiendo la trayectoria de la línea recta (curva azul). Dado que el modelo estructural, representa el esquema de la viga-buque, los elementos ubicados en el ala de la quilla en la zona mencionada, presentan los desplazamientos de la curva naranja (estimados con ANSYS).

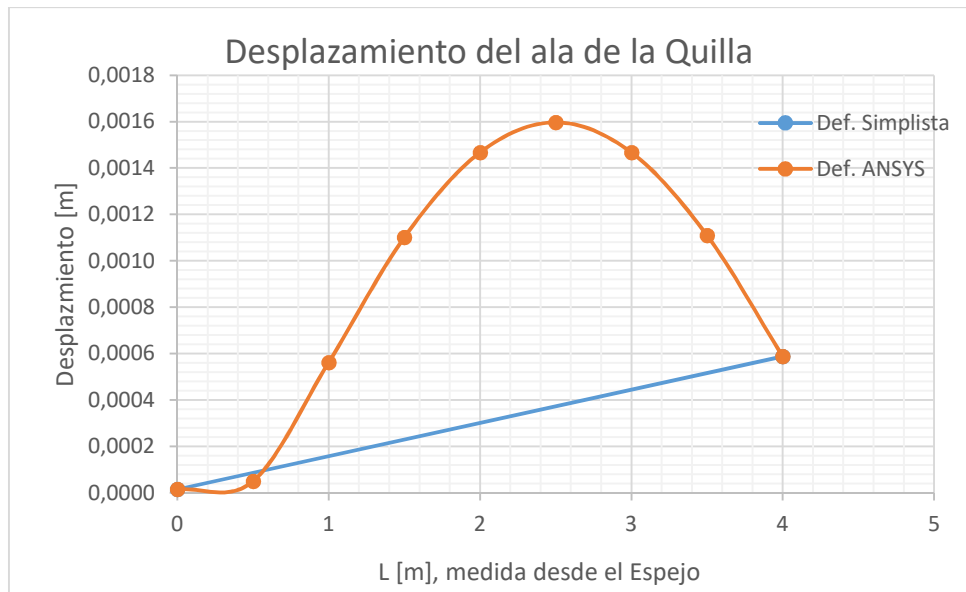


Figura 3.22 Desplazamiento del ala de la Quilla en el compartimento 3 de la LAE Río Cononaco

Análisis de la estructura de la lancha sometida a golpe hidrodinámico por Sección Media

En forma análoga, en la Tabla 3.3, se presentan los valores integrados transversalmente en la sección del corte 2 (50%L) cuando el Golpe Hidrodinámico actúa en la Sección Media, para determinar el equilibrio que se planteó en el Capítulo 2. La sumatoria de las cargas P_i estimada en cada punto del corte (que actúan en dirección normal al plano de corte), da como resultado valores próximos a cero. Así mismo, el máximo momento flector generado en esta sección corresponde a la sumatoria de todos los momentos en cada uno de los puntos analizados.

Tabla 3.3 Estimación de Carga normal y Momento Flector máximo en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Sección Media.

(i)	x(i) [mm]	z(i) [mm]	t(i) [mm]	$\sigma_{y(i)}$ [N/mm ²]	$\Delta s_{(i)}$ [mm]	P _(i) [N]	Mz _(i) [N.m]
0	0	0	6,35	-8,954	0,00	0,0	0
1	52	255,6	6,35	-11,302	260,84	-18719,6	-973,4
2	100	453,2	6,35	-15,302	203,35	-19758,7	-948,4
3	146	660	6,35	-10,614	211,85	-14278,7	-656,8
4	200	902	6,35	-19,010	247,95	-29931,1	-1616,3
5	244	1124	6,35	-11,716	226,32	-16837,3	-740,8
6	298	1350	6,35	-4,126	232,36	-6087,9	-328,7
7	360	1645	6,35	8,520	301,44	16309,5	1011,2
8	360	1798	6,35	7,463	153,00	7250,7	0,0
9	700	1860	4,76	6,416	345,61	10554,9	3588,7
10	1070	1900	4,76	7,441	372,16	13181,4	4877,1
11	1270	1905	4,76	11,65	200,06	11094,3	2218,9
12	1527	1907	4,76	10,262	257,01	12554,1	3226,4
13	1973	1910	4,76	9,857	446,01	20926,5	9333,2
14	1973	1300	4,76	5,252	610,00	15249,7	0,0
15	1076	1300	4,76	-2,153	897,00	-9192,7	8245,9
16	1076	650	4,76	0,594	650,00	1837,8	0,0
17	1076	0	4,76	1,89	650,00	5847,7	0,0
					P [N]:	0,5	
					Mz [N.m]:		27236,8

De acuerdo a los valores presentados en el Apéndice A de este documento, los valores determinados de esfuerzos a nivel primario tras el Golpe de Sección Media son considerablemente altos. En la Figura 3.23, se muestra el corte 2 con los esfuerzos normales en dirección axial “y” (correspondiente al 50%L). Como se puede observar, el esfuerzo es negativo en todo el fondo hasta llegar a la china, donde vuelve a ser positivo al igual que en toda la sección del costado. Esto se debe a que el comportamiento de la viga-buque. La concentración de esfuerzos, se da en dos puntos: entre la quilla y el fondo, y la conexión entre fondo y costado. El comportamiento es similar al producido por el Golpe de Proa, pero, en mayor magnitud.

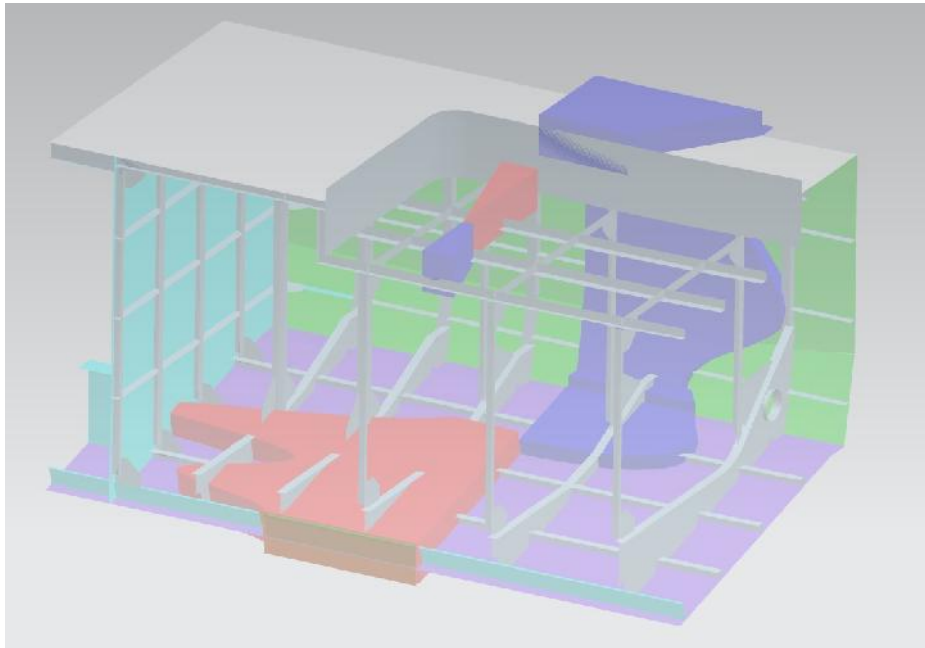


Figura 3.23 Distribución de Esfuerzo Normal en la Sección Media de la embarcación, tras Golpe de Sección Media.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se determinaron los niveles de esfuerzo y deflexiones que se producen en la estructura primaria de una embarcación planeadora de 13 metros al estar sometida a golpe hidrodinámico en la zona de Proa y Sección Media. El modelo numérico se lo desarrolló empleando elementos finitos planos de 3 y 4 nodos, y barras, usando el software Ansys Mechanical APDL. Para considerar el efecto dinámico se aplicó el principio de D'Alembert a partir de las aceleraciones resultantes asumiendo al casco como rígido. Finalmente, tras analizar el comportamiento de la estructura primaria de la lancha planeadora, se puede concluir lo siguiente:

Conclusiones

El modelo geométrico bosquejado en 3 dimensiones a partir de los planos estructurales de la embarcación incluyó todos los detalles constructivos en este tipo de diseños. Los resortes incluidos para eliminar la traslación como cuerpo rígido se aplican en los mamparos, lo que evita alteración significativa de la respuesta estructural. Esto permitió analizar su comportamiento primario tras aplicar los golpes hidrodinámicos en el fondo de la estructura.

A partir de las formulaciones desarrolladas por la sociedad clasificadora ABS, se logró determinar las cargas hidrodinámicas que indujeron las cargas inerciales en el modelo estructural analizado en el presente trabajo. Las cargas inerciales fueron calculadas a partir del producto de la masa en cada partición longitudinal por la aceleración vertical que se produjo en el cuerpo rígido. Cuando el impacto hidrodinámico ocurre en la sección de proa, la embarcación se acelera 1.05 veces la gravedad en sentido vertical; por su parte, cuando el golpe se produce en la sección media del buque, el cuerpo rígido experimenta 1.59 veces la aceleración gravitacional. Al no encontrarse en la misma línea de acción la fuerza resultante de las cargas hidrodinámicas e inerciales, se produce una aceleración rotacional del cuerpo rígido para alcanzar el equilibrio dinámico. Para el caso del golpe de

Proa la aceleración angular que experimenta la lancha es 8.68 [rad/seg²]. En el golpe de Sección Media este valor se reduce a 3.82 [rad/seg²]. De manera que las cargas hidrodinámicas e inerciales fueron representadas en forma adecuada.

Una vez obtenida la respuesta de la embarcación por golpe hidrodinámico en ambas secciones, se concluye que los esfuerzos de membrana por la flexión primaria de la embarcación no son despreciables. Esto es algo singular porque la lancha analizada es de baja eslora y no se espera que los efectos primarios sean importantes. Con la combinación de esfuerzos de von Mises, los puntos donde se presentan los mayores niveles de esfuerzo son las uniones de los detalles estructurales del fondo: conexión de varengas con refuerzos longitudinales. Específicamente en el caso del golpe de Sección Media con el nivel de carga considerado, se determina que las deformaciones no alcanzan los valores máximos establecidos por la Sociedad Clasificadora. Sin embargo, la estructura falla por fluencia, al sobrepasar los valores permisibles especificados por la Sociedad Clasificadora ABS.

Recomendaciones

El alcance del presente trabajo, fue determinar la respuesta de la estructura primaria al someterla a un golpe hidrodinámico por Proa y Sección Media, considerando el equilibrio cuasiestático y que el cuerpo se comportaba como rígido. Sin embargo, al acelerarse el cuerpo verticalmente hacia arriba por la acción de la fuerza hidrodinámica, se empieza a desacelerar al tiempo que se deforma, pero no como rígido. Dado este antecedente, para complementar este trabajo, se podría realizar una simulación en el tiempo, que permita analizar el comportamiento real de la estructura, incluyendo la combinación estructural y acción hidrodinámica.

Antes de desarrollar el modelo geométrico de la embarcación a analizar, es necesario identificar la naturaleza de las cargas que se van a aplicar en el modelo estructural y los puntos en los cuales estas actuarán. Esto permitirá desarrollar un modelo eficiente que permita aprovechar el tiempo que se invierte en la elaboración del mismo en función de los resultados esperados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTINAVE, Memoria Técnica de la Lancha de Patrullaje LP AST1304. Astinave EP, 2011.
- [2] ABS 2014, High Speed Craft, Part 3, Chapters 1 and 2. ABS 2014.
- [3] ABS 2014, Guidance Notes on Structural Direct Analysis for High-Speed Craft. ABS 2014.
- [4] ROSÉN, A. & GARME, K., Slamming studies for High-Speed Planning Craft Full - Scale Trials and Simulations. FAST 1999.
- [5] HELLER, S. R. & JASPER, N. H., On the Structural Design of Planning Craft. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1960.
- [6] MENÉNDEZ, C., Respuesta del fondo estructural de una embarcación planeadora de 11 m debida a la presión de impacto. Tesis de Grado de Ingeniería Naval, ESPOL-FIMCBOR, 2014.
- [7] ANSYS, Academic 17.2 Ansys Mechanical APDL Licensing. www.ansys.com, ANSYS 2017.
- [8] SOLANO, C., Análisis estructural de un buque tipo OPV utilizando el método de elementos finitos para evaluación de cargas de slamming. Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, 2015.

APÉNDICES

APÉNDICE A

RESULTADOS NUMÉRICOS DEL GOLPE HIDRODINÁMICO POR SECCIÓN MEDIA

En las Figuras 0.1, 0.2 y 0.3, se muestran los niveles de esfuerzo desarrollados en la estructura primaria de la embarcación en dirección “y” (axial), “z” (transversal) y “x” (vertical), respectivamente. En estas figuras, la zona del fondo en el área donde se desarrolla el golpe hidrodinámico se encuentra en compresión, mientras que la cubierta, en tensión. Además se obtuvo que los valores absolutos máximos de esfuerzos normales desarrollados en las direcciones “y”, “z” y “x” fueron 116.2, 227.0 y 153.0 [N/mm²], respectivamente. Estos valores extremos representan el 89, 173 y 117% del valor del esfuerzo permisible del material de la lancha en las direcciones mencionadas. Estos resultados determinan que la respuesta primaria de la estructura debido al golpe hidrodinámico en la sección de Proa, es importante.

Los máximos valores absolutos de esfuerzo normal en dirección axial “y” se presentan en el fondo de la embarcación, en la zona cercana al impacto. El máximo valor de esfuerzo normal (116.2 [N/mm²]) se presentó en la conexión de la cubierta de interperie con el Mamparo 2, mientras que el mínimo valor de esfuerzo (-95.18 [N/mm²]) se registró en el detalle estructural de la conexión del refuerzo vertical del Mamparo 3 y el refuerzo longitudinal, (véase en la Figura 0.1). En dirección transversal “eje z”, el máximo valor de esfuerzo normal que se alcanzó en el ala de varenga 9, debido a los aligeramientos (166.1 [N/mm²]); por su parte el mínimo valor de esfuerzo (-227.0 [N/mm²]) se presentó en la conexión de una escuadra con una cuaderna, en la sección de cubierta (Figura 3.2). En dirección vertical “eje x” (Figura 3.3), el máximo valor de esfuerzo normal que se alcanzó la conexión de una escuadra con el bao de la cuaderna 9 (136.1 [N/mm²]); mientras que el mínimo valor de esfuerzo (-153.4 [N/mm²]) se presentó en la conexión entre la varenga 8 y el refuerzo longitudinal, en la sección del fondo. Todos los valores de esfuerzos normales obtenidos en la estructura primaria, hacen notar la importancia de los detalles de soldadura en las conexiones de las estructuras (aligeramientos, conexiones, cambios de secciones, etc.). Sin embargo, estos valores sobrepasan el valor permisible del esfuerzo de fluencia del material soldado.

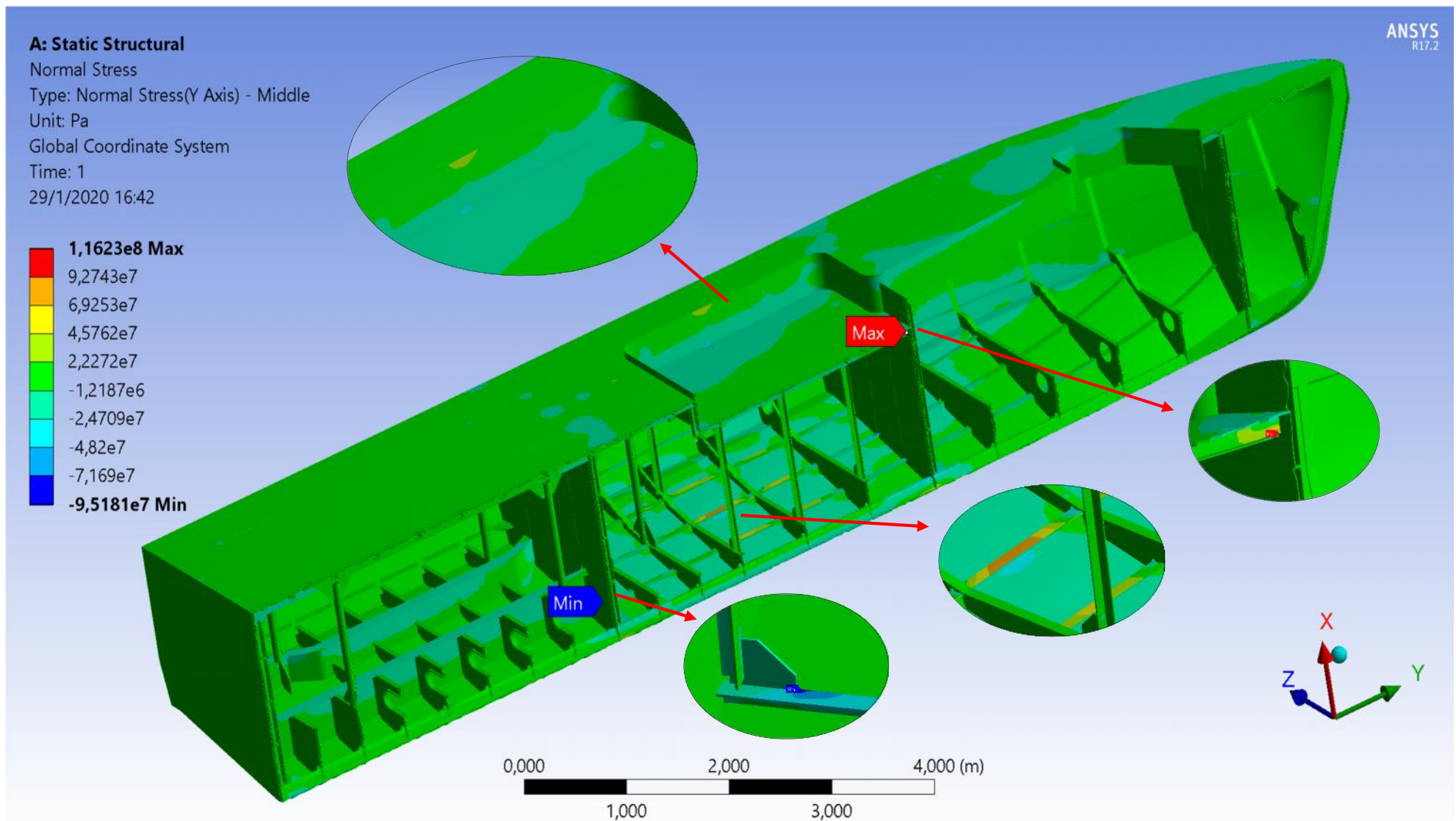


Figura 0.1 Esfuerzo normal en sentido axial (dirección "Y") en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

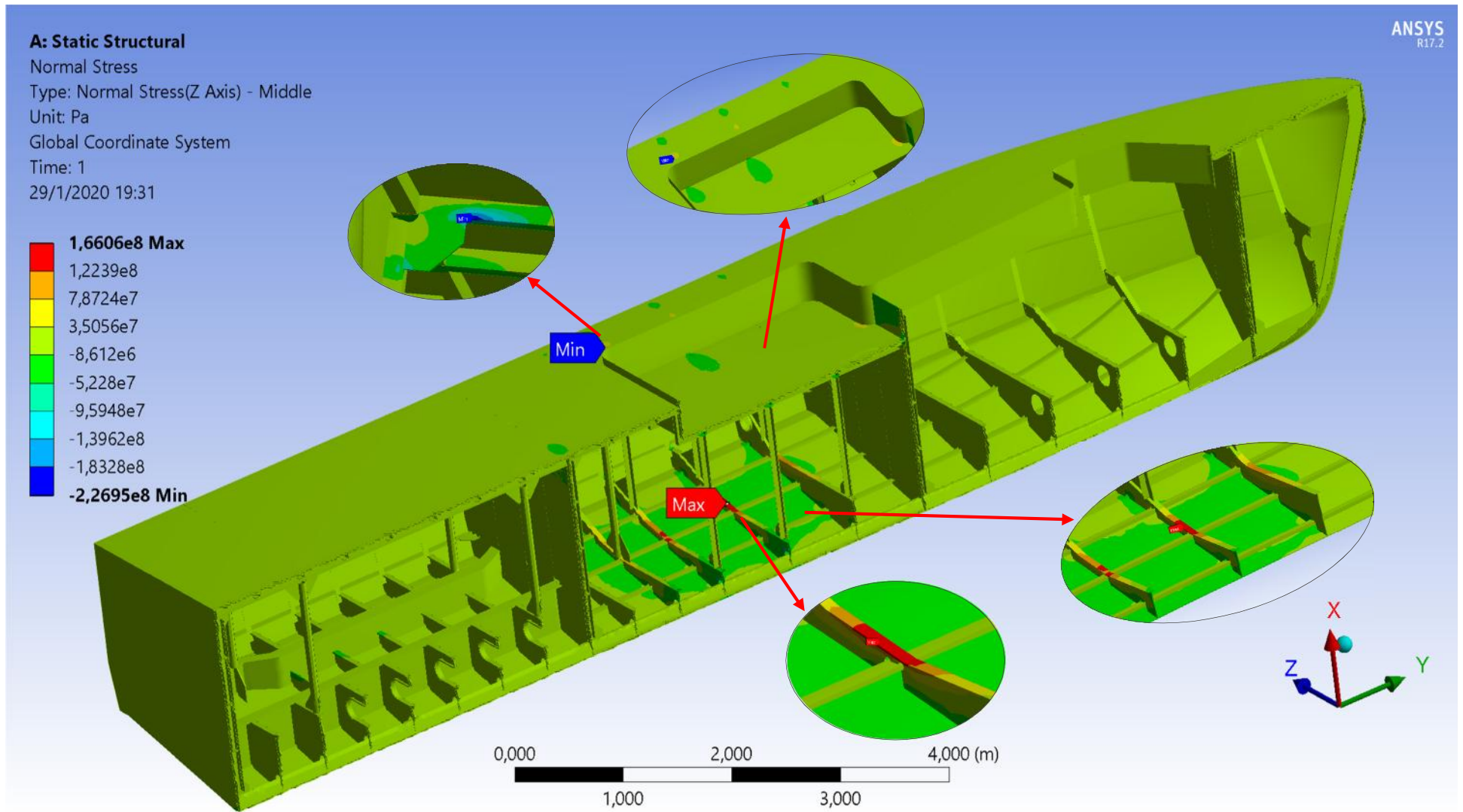


Figura 0.2 Esfuerzo normal en sentido transversal (dirección “Z”) en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

A: Static Structural

Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis) - Middle
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1
29/1/2020 22:29

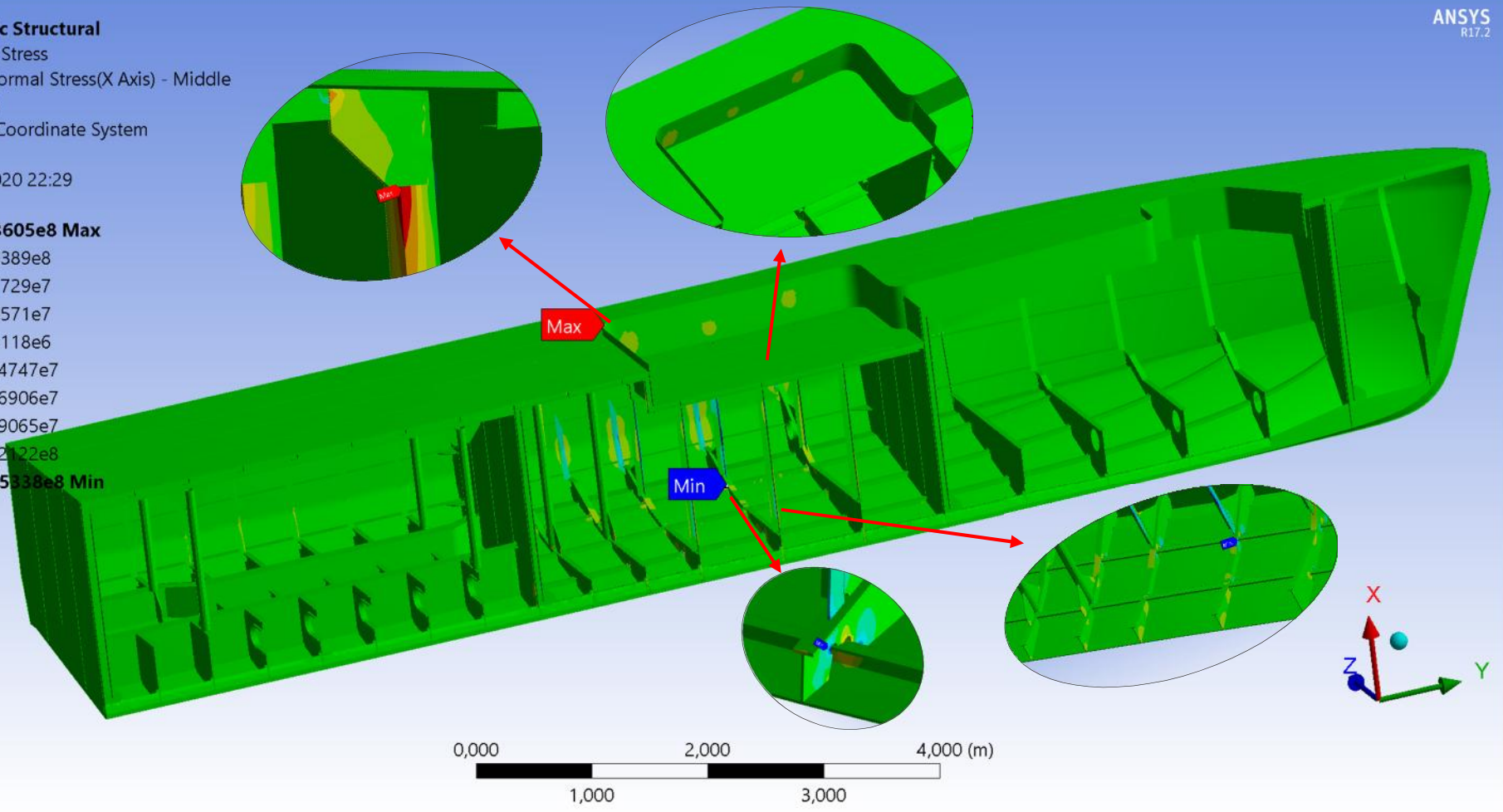
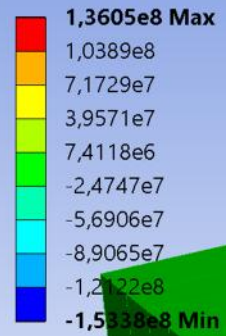


Figura 0.3 Esfuerzo normal en sentido vertical (dirección "X") en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

A: Static Structural
Shear Stress 2
Type: Shear Stress(XZ Plane) - Middle
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1
30/1/2020 2:33

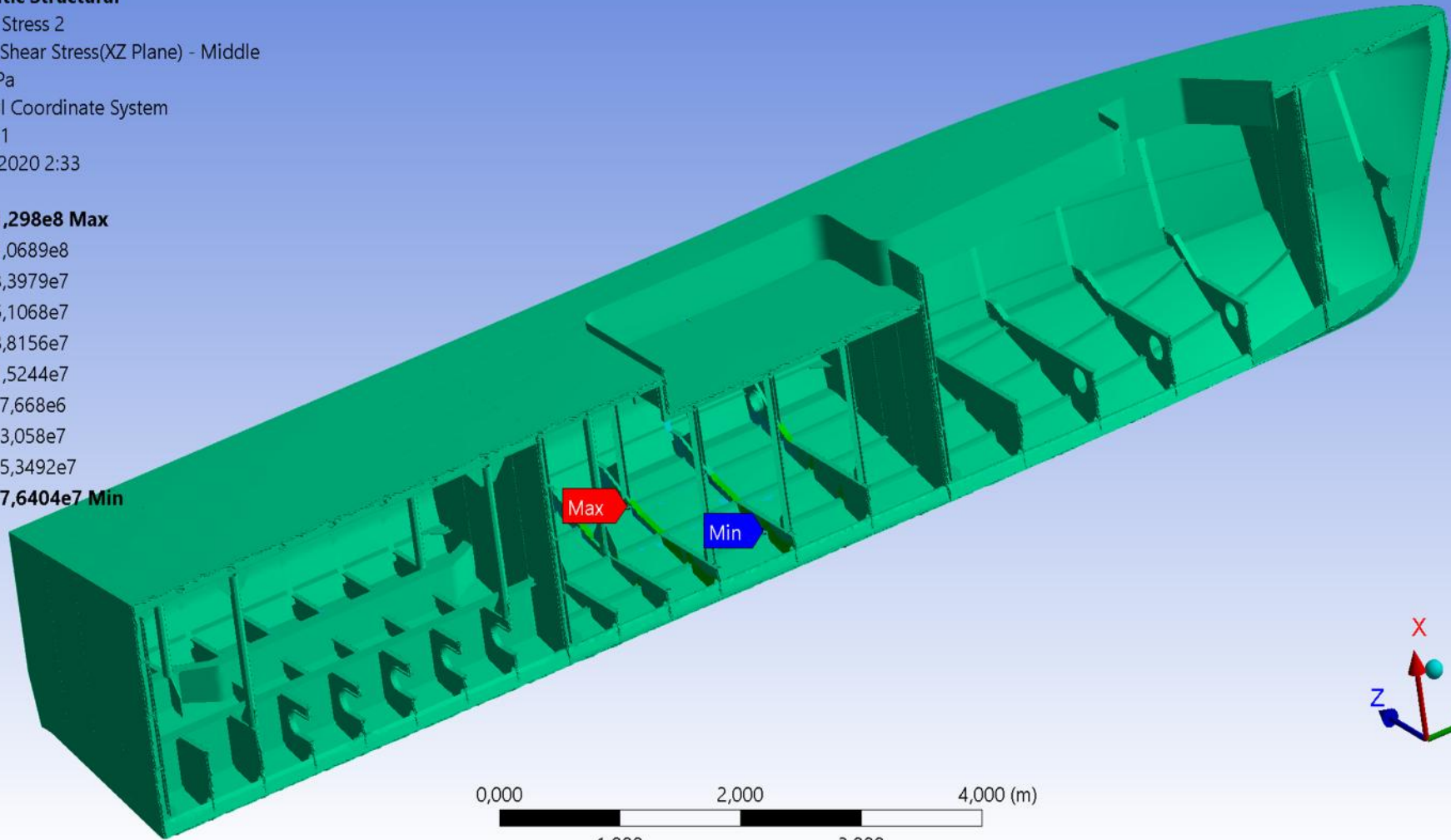
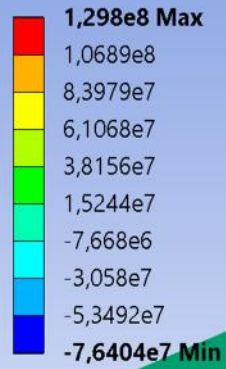


Figura 0.4 Esfuerzos cortantes en el plano "XZ" en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

A: Static Structural

Shear Stress

Type: Shear Stress(YZ Plane) - Middle

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 1

30/1/2020 2:26

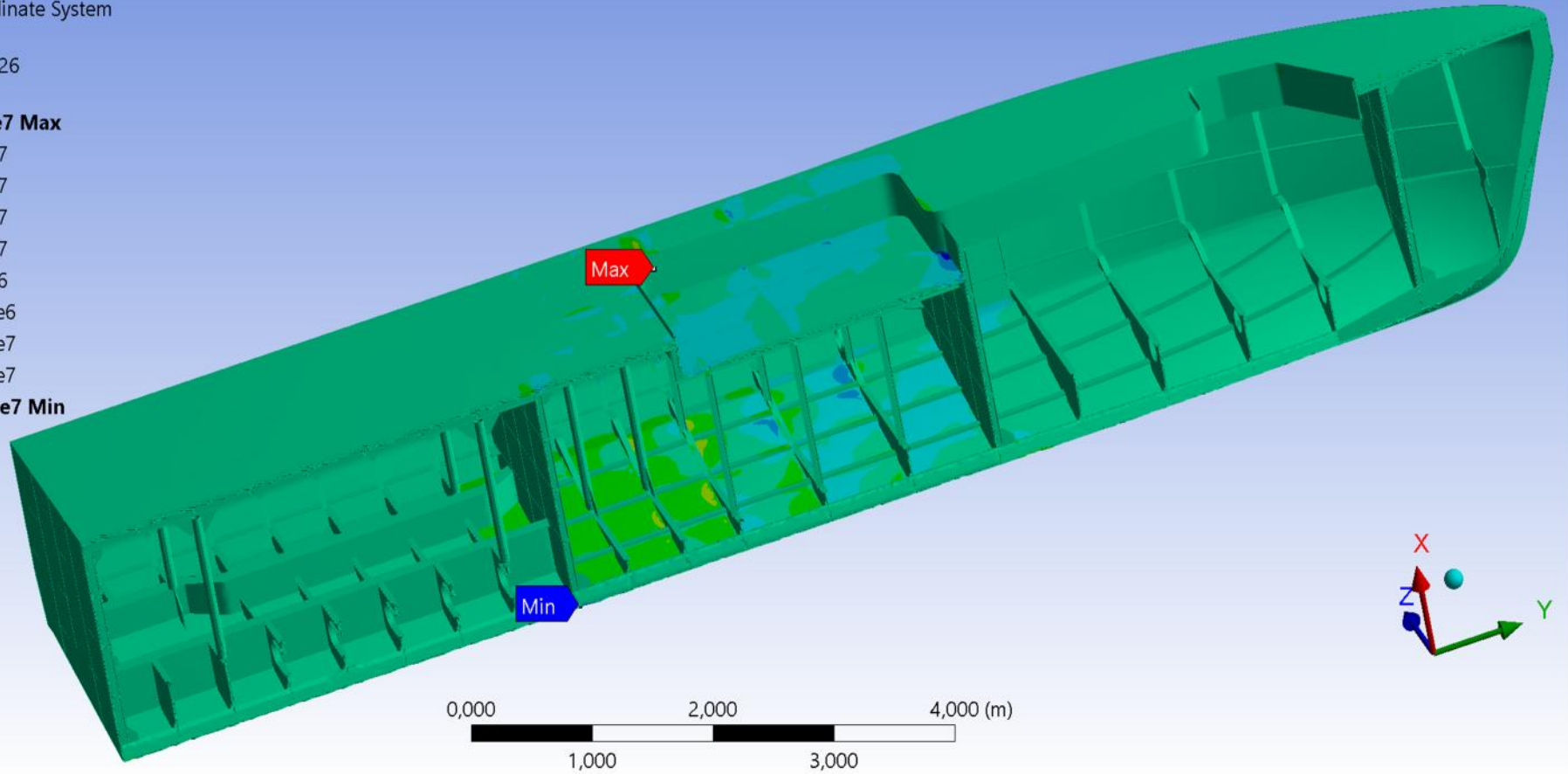
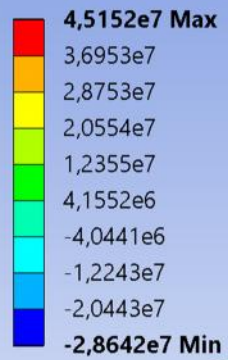


Figura 0.5 Esfuerzos cortantes en el plano “YZ” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Medi

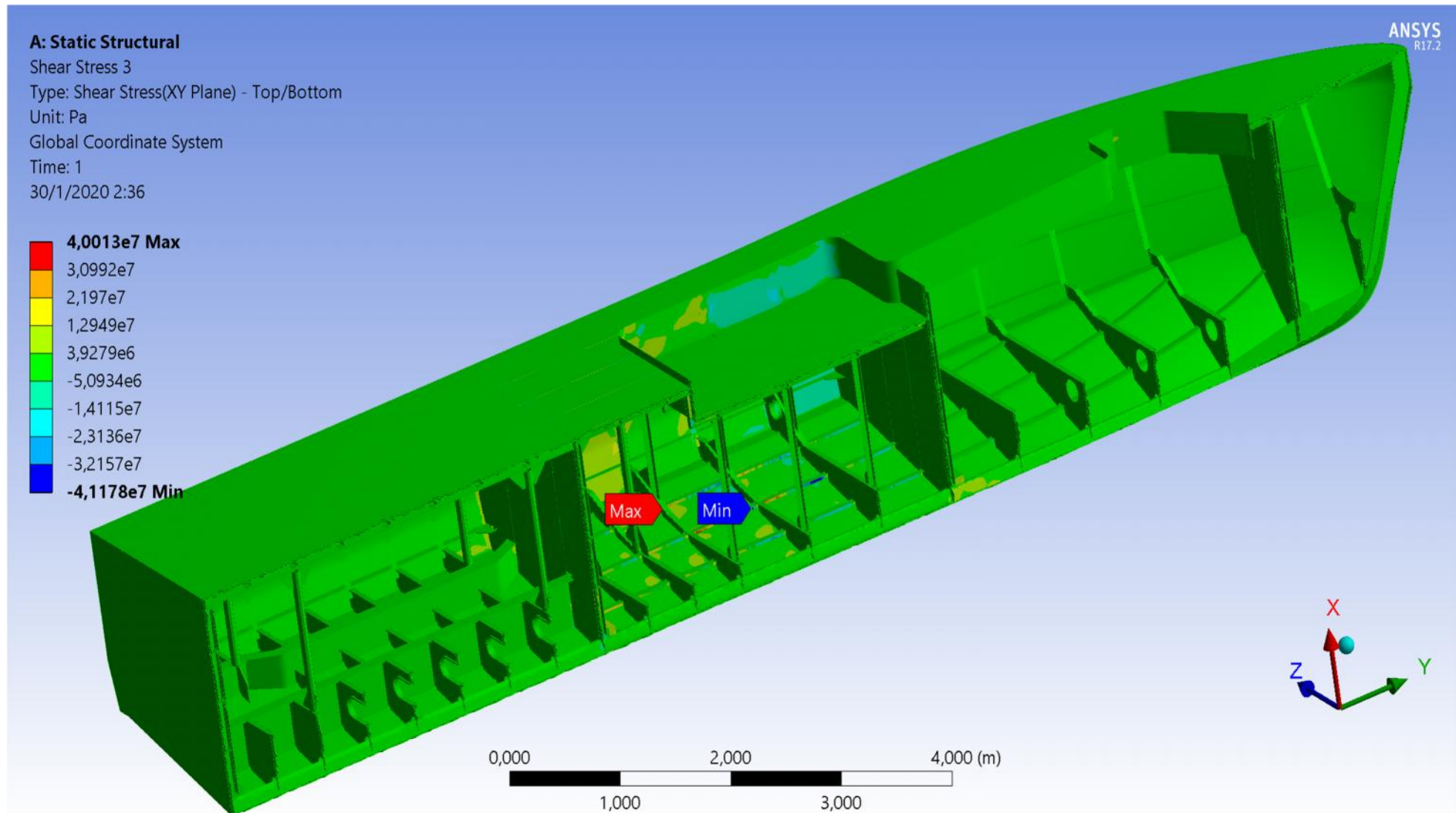


Figura 0.6 Esfuerzos cortantes en el plano “XY” en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

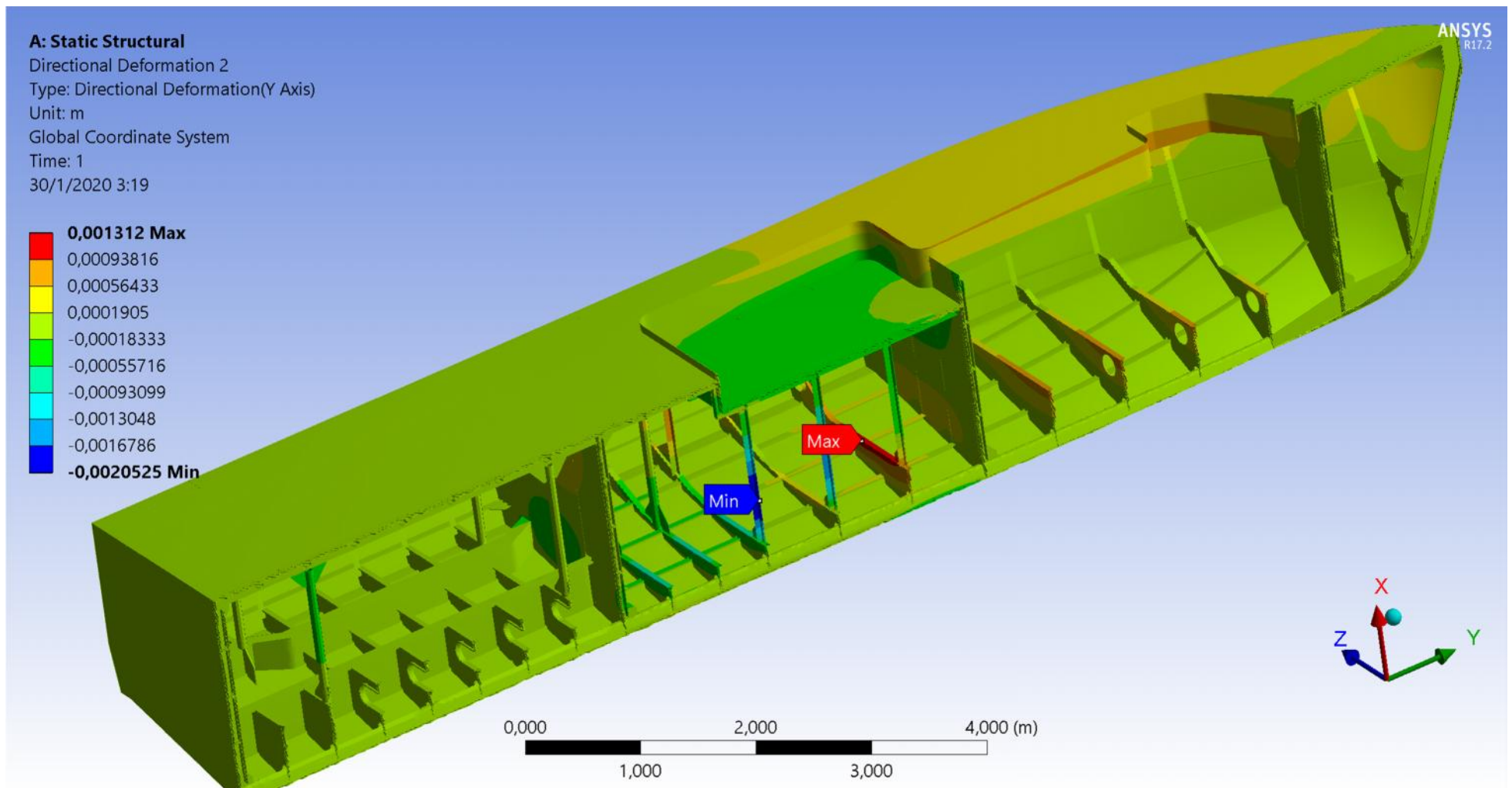


Figura 0.7 Deformación en sentido axial “Y” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

A: Static Structural

Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: m
Global Coordinate System
Time: 1
30/1/2020 3:21

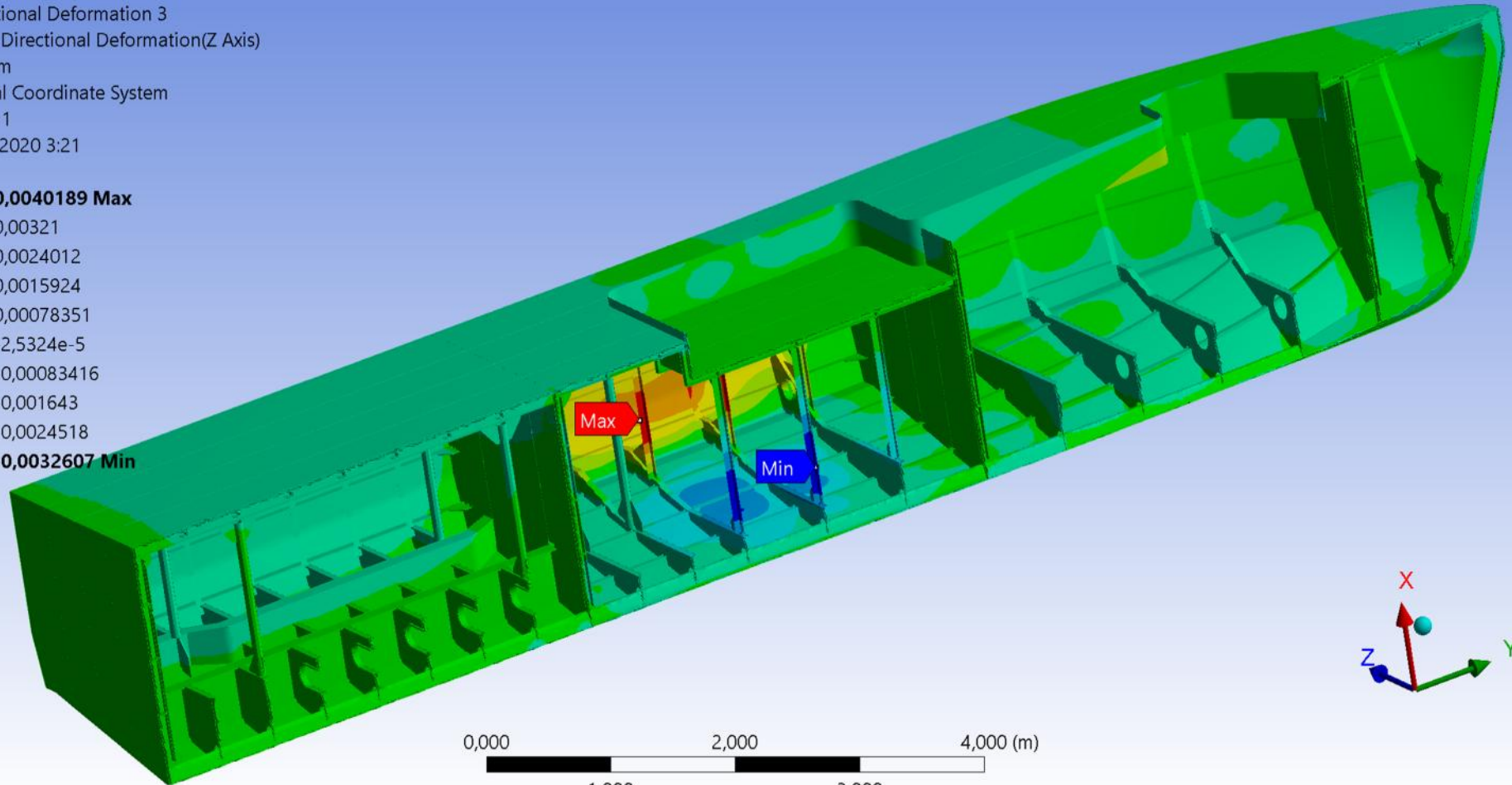
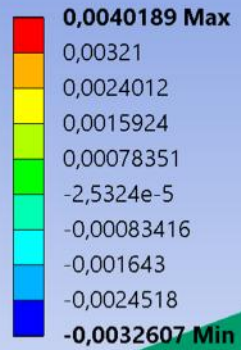


Figura 0.8 Deformación en sentido transversal “Z” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

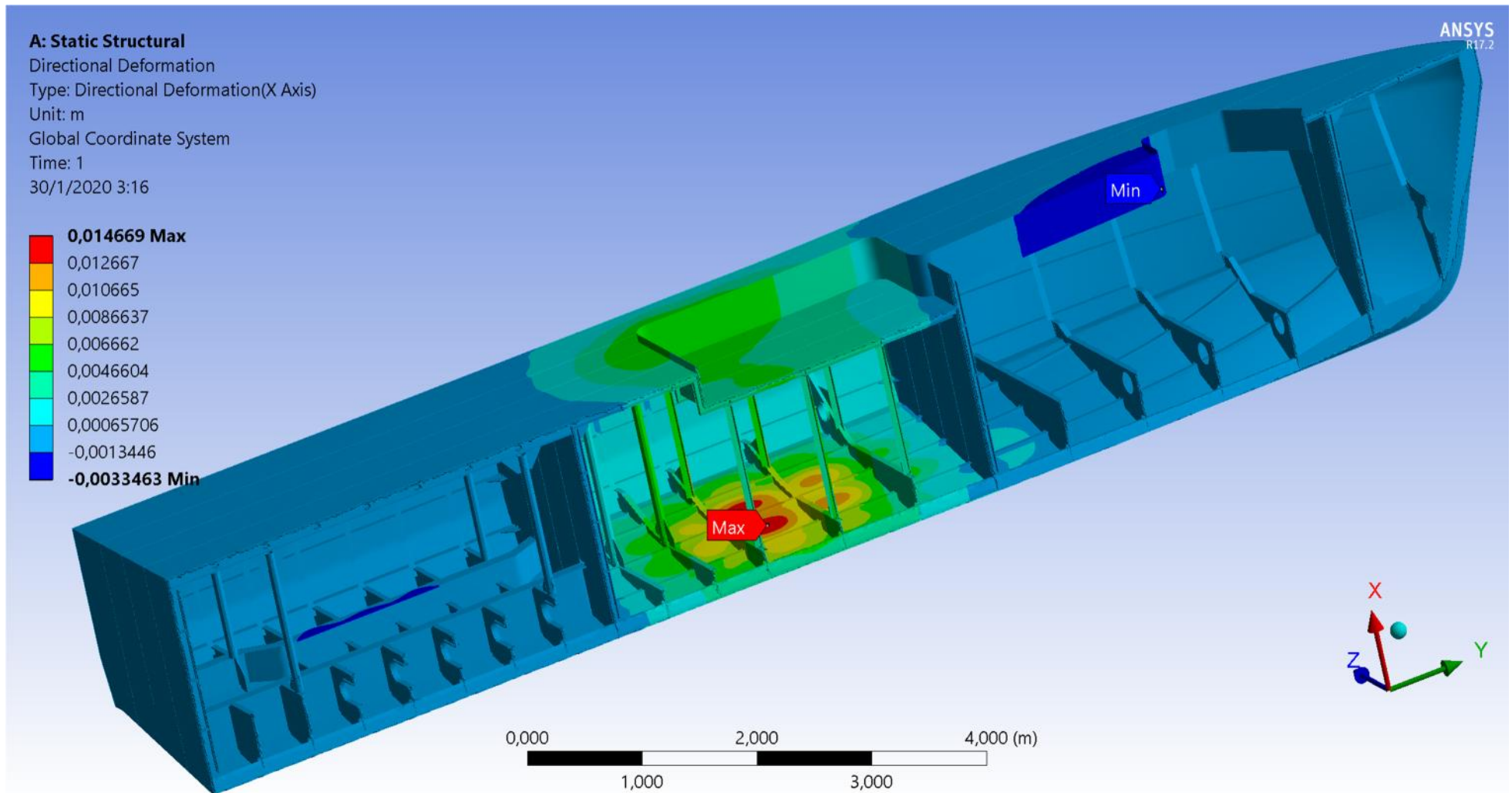


Figura 0.9 Deformaciones en sentido vertical “X” en estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media

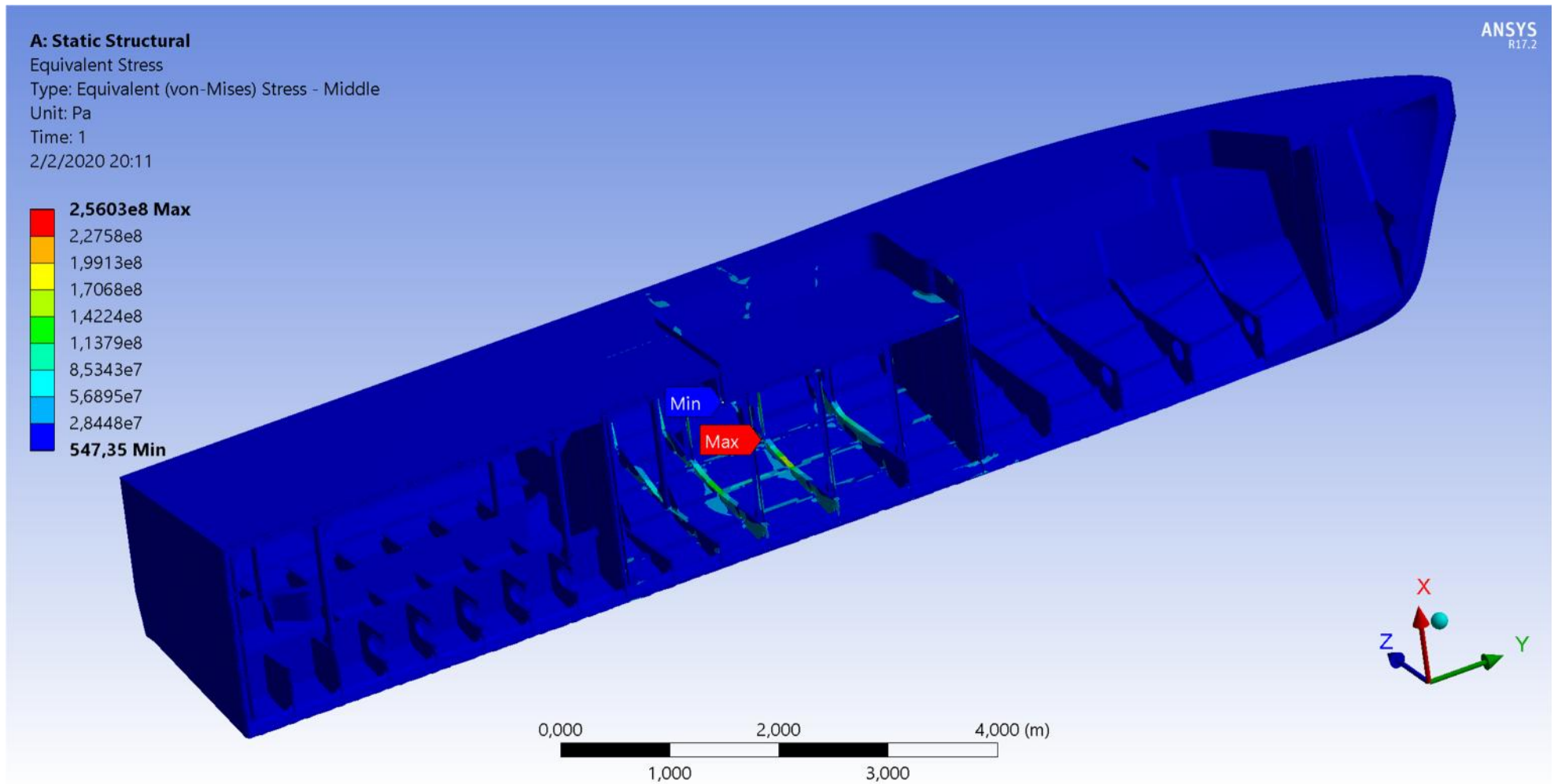


Figura 0.10 Esfuerzo equivalente de von Mises en la estructura primaria de la Lancha tras Golpe Hidrodinámico de Sección Media