

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis Modular de la Estructura de Una Lancha Planeadora de PRFV
Para Transporte Interislas en el Archipiélago de Galápagos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Jean Carlos Alvarez Tapia

Milton Bryan Pita Vera

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres: Teresa Tapia y Bernardo Alvarez; y a mi abuela Graciela Valverde que han sido parte fundamental en mi vida logrando llegar a este punto gracias a su apoyo. Con una mención especial a mi mejor amiga, Leyleen Ávila, que ha estado conmigo en las buenas y en las malas brindándome siempre su apoyo incondicional.

Jean C. Alvarez T.

El presente proyecto lo dedico a mis padres: Milton Pita y Carmen Vera; a mis hermanos por su apoyo diario.

A la memoria de mi abuela Emma Perero, hoy en día se está cumpliendo uno de sus grandiosos deseos.

A Ing. L. Tenesaca, Ing. E. Adrián e Ing. D. Suastegui, compañeros que desde que los conocí no permitieron que deje caer esta lucha constante de superación.

Milton B. Pita V.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a los profesores de la Facultad de Marítima que nos acompañaron a lo largo de nuestra vida universitaria. Con una mención especial al Ph.D. José R. Marín L. que se convirtió en una guía para nuestro desarrollo profesional durante estos años, brindando siempre su ayuda como profesor y tutor.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jean C. Alvarez T.* y *Milton B. Pita V.*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Jean C. Alvarez T.



Milton B. Pita V.

EVALUADORES

.....
Nadia R. Muñoz A, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
José R. Marín L, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las lanchas planeadoras debido a sus grandes velocidades de operación requieren un análisis para asegurar su integridad estructural. Sin embargo, al ser estructuras complejas se emplea métodos de elementos finitos (MEF) aconsejándose analizar solo un segmento de la estructura para reducir el esfuerzo computacional. Tomando esto en consideración se propone en este proyecto llevar a cabo el análisis de dos módulos de una lancha planeadora de servicio interislas en Galápagos.

Para llegar a dicho objetivo se estableció el equilibrio dinámico asumiendo a la embarcación como una viga de sección variable, determinando de forma relativamente simple las condiciones de frontera a aplicar en los módulos de la estructura. Luego se identificó y discretizó los módulos de proa y popa de interés utilizando MEF para materiales compuestos. Después en cada uno de los módulos se aplicó las fuerzas distribuidas correspondientes junto con las condiciones de frontera que son de tipo geométrico en la cara izquierda y natural en la derecha. Para el análisis en el módulo de proa se empleó 80811 nodos y 407845 para el módulo de popa con un tamaño mínimo de elemento de 2,5 cm en proa y 2 cm en popa.

Resultados de la ejecución del programa ANSYS permiten determinar que la deflexión en la cara derecha de ambos módulos se encuentra en niveles aceptables para la velocidad de operación. Además, se analizaron los esfuerzos en zonas de interés en ambos módulos registrando valores por debajo del permisible indicado por la norma ISO 12215 teniendo presente un sobredimensionamiento.

Palabras Clave: Lancha Planeadora, Equilibrio Dinámico, Método de elementos finitos, Módulos

ABSTRACT

Gliding boats due to their high operating speeds require an analysis to ensure their structural integrity. However, those boats have complex structures so finite element methods (FEM) are used, advising to analyze only a segment of the structure to reduce computational effort. Taking this into consideration, it's proposed in this project to carry out the analysis of two modules of an inter-island service glider boat in Galapagos.

To achieve this objective, the dynamic equilibrium was established assuming the vessel as a beam of variable section, determining in a relatively simple way the boundary conditions to be applied in the modules of the structure. The bow and stern modules of interest were then identified and discretized using FEM for composite materials. Later in each of the modules, the corresponding distributed forces were applied together with the boundary conditions that are geometric on the left face and natural on the right. For the analysis in the bow module 80811 nodes were used and 407845 nodes on the aft module with a minimum element size of 2.5 cm in the bow and 2 cm in the stern.

Results of the execution of the ANSYS program allow to determine that the deflection on the right face of both modules is at acceptable levels for the operating speed. In addition, the stresses in areas of interest were analyzed in both modules registering values below the permissible indicated by the ISO 12215 standard, bearing in mind an oversizing.

Keywords: *Gliding boats, Dynamic Equilibrium, Finite Element Methods (FEM), Modules*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Descripción de la lancha planeadora.....	4
1.4.2 Balance dinámico.....	5
1.4.3 MEF Modular.....	12
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología	14
2.1 Cálculos de la viga buque.....	15
2.1.1 Distribución de la rigidez flexural	15
2.1.2 Distribución de la deflexión.....	19
2.2 Módulos estructurales.....	22
2.2.1 Módulo estructural de popa	23

2.2.2	Módulo estructural de proa.....	26
CAPÍTULO 3.....		30
3.	Resultados y Análisis	30
3.1	Módulo de proa.....	30
3.1.1	Respuesta estructural del módulo de proa	30
3.2	Módulo de popa.....	38
3.2.1	Repuesta estructural del módulo de popa	38
3.2.2	Rigidez estructural del módulo de popa.....	39
3.2.3	Esfuerzo desarrollado en los agujeros del soporte de los motores	42
CAPÍTULO 4.....		45
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	45
4.1	Conclusiones	45
4.2	Recomendaciones	46
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ABS	American Bureau of Shipping
CG	Centro de Gravedad
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ISO	International Organization of Standardization
MEF	Método de Elementos Finitos
PRFV	Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
ton	Toneladas
kg	Kilogramo
gr	Gramo
N	Newton
HP	Caballos de Fuerza
°	Grados
LOA	Eslora Total
LWL	Eslora en Línea de Agua
B	Manga
Bc	Manga de China
D	Puntal
T	Calado de Diseño
θ	Ángulo de Astilla Muerta
V	Velocidad
Cb	Coeficiente de Bloque
Cp	Coeficiente Prismático
Cm	Coeficiente de Sección Media
P _{BMP}	Presión de Diseño del Fondo
P _{BMP Base}	Presión Base del Fondo
m _{LDC}	Desplazamiento Masico de la Embarcación
k _{ar}	Factor de Reducción de Presión en Área
k _i	Factor de Distribución Longitudinal de Presión
k _{dc}	Factor de Categoría de Diseño
G	Distancia entre la quilla y la china
n _{CG}	Aceleración del Centro de Gravedad
g's	Unidades de gravedad
E	Módulo de elasticidad del material
I	Inercia
EI	Rigidez Flexural

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sección Transversal de la Lancha A	5
Figura 1.2 Arreglo general-Lancha A.....	5
Figura 1.3 Distribución Longitudinal de la Presión de Diseño	7
Figura 1.4 Distribución de Presión Transversal de Quilla a China	7
Figura 1.5 Distribución de presión a lo largo de la embarcación.....	8
Figura 1.6 Representación esquemática y fuerzas actuando en el casco	9
Figura 1.7 Distribución de peso de la lancha A.....	10
Figura 1.8 Equilibrio dinámico de la lancha A.....	10
Figura 1.9 Distribución de aceleración a lo largo de la lancha	12
Figura 2.1 Cuaderna 10 de la embarcación actual	17
Figura 2.2 Distribución de la rigidez estructural a lo largo de la embarcación.....	19
Figura 2.3 Distribución de carga en la lancha.....	20
Figura 2.4 Distribución de la fuerza cortante y momento flector a lo largo de la embarcación	21
Figura 2.5 Distribución de pendiente y deflexión a lo largo de la embarcación	22
Figura 2.6 Modelo 3D de la estructura de popa de la embarcación	24
Figura 2.7 Distribución de carga del módulo de popa.....	25
Figura 2.8 Modelo 3D módulo de proa optimizado	27
Figura 2.9 Modelo 3D del módulo de proa actual	27
Figura 2.10 Distribución de carga del módulo de proa.....	29
Figura 3.1 Deflexión del módulo de proa optimizado.....	31
Figura 3.2 Deflexión del módulo actual	32
Figura 3.3 Deflexión a lo largo de cortes longitudinales del modelo optimizado	33
Figura 3.4 Deflexión a lo largo de cortes transversales del modelo optimizado.....	34
Figura 3.5 Esfuerzo normal en la plancha del fondo del modelo optimizado	35
Figura 3.6 Esfuerzo en el laminado del fondo del modelo optimizado	35
Figura 3.7 Deflexión a lo largo de cortes longitudinales del modelo actual	36
Figura 3.8 Deflexión a lo largo de cortes transversales del modelo actual	36
Figura 3.9 Esfuerzo normal en la plancha del fondo del modelo actual	37
Figura 3.10 Esfuerzo en el laminado del fondo del modelo actual.....	38
Figura 3.11 Reacciones en el espejo	38

Figura 3.12 Desplazamiento vertical del módulo de popa	39
Figura 3.13 Deflexión de la quilla del módulo de popa	40
Figura 3.14 Deflexión de la china del módulo de popa	40
Figura 3.15 Desplazamiento vertical del módulo de popa aplicando empuje	41
Figura 3.16 Desplazamiento de elementos longitudinales del módulo de popa	41
Figura 3.17 Desplazamiento siguiendo posición transversal del casco del módulo de popa	42
Figura 3.18 Esfuerzo normal desarrollado en el agujero del núcleo de madera	43
Figura 3.19 Comparación de esfuerzos máximos desarrollados	43
Figura 3.20 Esfuerzo interlaminar desarrollado en la parte exterior del agujero	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características – Lancha A.....	4
Tabla 2.1 Módulo de Young promedio para diferentes elementos estructurales.....	16
Tabla 2.2 Rigidez Flexural en diferentes puntos de la embarcación	18
Tabla 2.3 Límites de cada módulo.....	22
Tabla 2.4 Tipo de núcleos de maderas en la lancha A	23
Tabla 2.5 Refuerzos del módulo estructural de popa del modelo actual	24
Tabla 2.6 Condiciones de frontea del módulo de popa.....	25
Tabla 2.7 Refuerzos del fondo y costado del modelo actual y optimizado	26
Tabla 2.8 Condiciones de Frontera Módulo de Proa	28
Tabla 3.1 V y Mz registrados en el extremo izquierdo de los módulos de proa	30
Tabla 3.2 Diferencias porcentuales de la deflexión registrada en el extremo derecho de cada módulo	33

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En el Archipiélago de Galápagos el principal medio de transporte interislas son las lanchas planeadoras. Esta afirmación se ve apoyada con las estadísticas presentadas por el (Observatorio de Turismo de Galápagos, 2019) correspondiente al año 2018, donde presenta la cantidad de pasajeros y viajes en las rutas más comunes. De acuerdo con dichas estadísticas en solo un año se llegó a realizar aproximadamente 15 mil viajes, significando un total 311 mil pasajeros, mostrando un incremento del 17% en comparación al año anterior. Entonces en promedio 46 lanchas de pasajeros con una capacidad promedio de 20 personas viajan diariamente entre islas del archipiélago.

Las lanchas planeadoras de transporte interislas en Galápagos por sus altas velocidades de operación están sometidas a elevadas cargas por lo que requieren un análisis que garantice su integridad estructural. Existen diferentes análisis estructurales siendo el de mayor dificultad el análisis tridimensional de la estructura completa, requiriéndose en este caso aplicar el método de elementos finitos (MEF). En este análisis discreto se pueden considerar dos etapas que son el global y el submodelo o modular (Yasuhisa, Yu, & Masaki, 2009). El modelo global se caracteriza por tener una malla gruesa, es decir elementos relativamente grandes, presentando errores significativos en los cálculos en áreas de concentración de esfuerzos. En cambio, aplicando el análisis tipo submodelo o modular se representa visualmente como un segmento que es extraído del global, pudiéndose aplicar un mallado más fino (Lamb, 2003).

La lancha planeadora que se usará para el desarrollo del presente proyecto se describe en el trabajo de investigación de (Mendoza & Vasquez, 2020) identificada con el nombre de lancha A. Tiene una eslora de 12,02 m y una velocidad máxima de 30 nudos y cuenta con 3 motores fueraborda con una potencia total de 850 HP. Esta misma lancha fue utilizada en el proyecto de (Onofre & Venegas, 2020) en el que se desarrolló la optimización de un módulo reforzado cumpliendo con los criterios de integridad estructural de la norma ISO 12215. Además, en dicho trabajo se muestra

un análisis con MEF del módulo optimizado empleando condiciones de fronteras simplificadas, secciones extremas empotradas, y se recomendó analizar la zona de popa considerando el peso elevado de los motores.

1.1 Descripción del problema

Las lanchas planeadoras que proveen servicio interislas en Galápagos son embarcaciones menores, construidas con plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) con el fin de reducir su peso (Villamarin, 2020). No obstante, al ser embarcaciones menores su diseño y construcción son artesanales, dando lugar a potenciales sobredimensionamientos o deficiencias estructurales. Este proceso de construcción podría mejorar al implementarse un análisis con el fin de calcular la respuesta estructural de la embarcación. De esta manera se podría comparar dichos resultados con criterios de integridad estructural como los estándares ISO 12215.

Además, es recomendable emplear un análisis estructural modular en vez de un análisis global (Hughes & Paik, 2010) para representar adecuadamente los detalles estructurales y poder aproximar sus distribuciones de esfuerzo de manera confiable. Debido que al emplear módulos la solución del sistema de ecuaciones toma menos tiempo de computación, focalizando el análisis en zonas de interés este tipo de análisis es ventajoso. En el caso de estas lanchas estas zonas a analizar son la proa por el impacto dinámico y la popa, ya que comúnmente tienen instalados 3 motores fueraborda con una potencia cada uno de 250-300 HP (Villamarin, 2020).

Por otra parte, en el caso de embarcaciones construidas con PRFV sus propiedades mecánicas deben especificarse en conjunto con la geometría de la estructura (Barbero, 2011). También, en el espejo de estas lanchas y sus refuerzos es común encontrar lo que se denomina estructura tipo sándwich laminado, que son núcleos de madera recubiertos de PRFV (Gürdal, Haftka, & Hajela, 1999). Por ende, resulta conveniente el análisis modular ya que al trabajar con un modelo global el tiempo de computación empleando MEF se incrementaría, considerando la complejidad que presenta el material.

1.2 Justificación del problema

Al emplearse un método de construcción artesanal para este tipo de embarcaciones resulta complicado validar el cumplimiento de criterios de integridad estructural. Por ende, al comprobarse que el análisis estructural modular con MEF da resultados precisos se puede implementar de forma directa complementando el proceso de construcción actual. Además, este tipo de análisis representa un ahorro de tiempo al poder analizar varios módulos en paralelo. Por otra parte, al validarse el proceso de optimización propuesto por (Onofre & Venegas, 2020) aplicando MEF con condiciones de frontera adecuadas se podría aplicar de forma directa en la embarcación. Esto representaría un gran beneficio a nivel práctico al agilizar el proceso de análisis implementando la optimización estructural y el análisis modular en las lanchas planeadoras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar dos módulos estructurales de una embarcación planeadora que brinda servicio interislas en Galápagos aplicando MEF de material laminado, para la comprobación de los criterios de integridad estructural de la ISO 12215.

1.3.2 Objetivos Específicos

Considerando las zonas de interés de las lanchas planeadoras este proyecto propone:

1. Calcular la deflexión de la embarcación planeadora modelada como una viga de sección variable, que se encuentra en balance dinámico bajo la influencia de cargas estáticas y dinámicas aproximadas mediante ecuaciones semiempíricas.
2. Calcular la respuesta estructural de los módulos bajo cargas estáticas y dinámicas empleando la herramienta ACP de ANSYS para laminados, tomando las condiciones de frontera de los resultados obtenidos del cálculo en la viga buque.

3. Analizar el módulo estructural de la zona de popa siguiendo los criterios de integridad estructural de la norma ISO 12215.
4. Analizar el módulo de proa optimizado con los criterios de integridad estructural requeridos por la ISO 12215 y comparándolo también con la estructura original.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Descripción de la lancha planeadora

La lancha de transporte interislas (lancha A en (Mendoza & Vasquez, 2020)) cuya estructura será analizada en este proyecto tiene las siguientes características principales:

**Tabla 1.1 Características – Lancha A
(Mendoza & Vasquez, 2020)**

Eslora Total (L_{OA}) [m]	12.02
Eslora en Línea de Agua (L_{WL}) [m]	10,74
Manga (B) [m]	3.45
Manga de China (B_c) [m]	2,93
Puntal (D) [m]	1.51
Calado de diseño (T) [m]	0.51
Ángulo de Astilla Muerta (θ) [°]	13
Velocidad (V) [nudos]	30
Desplazamiento (m_{LDC}) [kg]	8864
Cap. Max de pasajeros	29
Potencia de motores	
Suzuki, DF250AP – DF300AP	300 HP @ 5000 RPMs
	250 HP @ 4500 RPMs
	300 HP @ 5000 RPMs

Esta lancha se caracteriza por ser una embarcación monocasco con un fondo en V; la sección transversal de la embarcación tiene dos chinas que forman una faja como se muestra en la Figura 1.1.

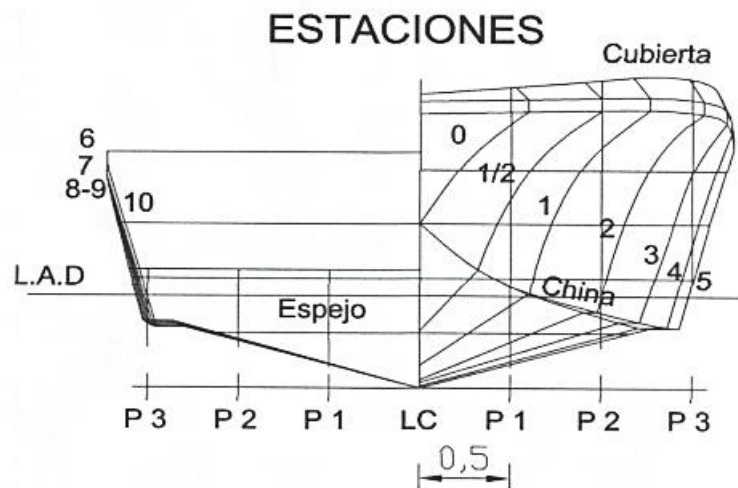


Figura 1.1 Sección Transversal de la Lancha A

Con respecto al sistema propulsivo esta embarcación cuenta con 3 motores fueraborda como se indica en la Tabla 1.1, alcanzando velocidades máximas de 30 nudos con una potencia instalada de 850 HP. En la Figura 1.2 se presenta el arreglo general de la lancha A, que servirá para determinar la distribución de pesos a lo largo de la eslora.

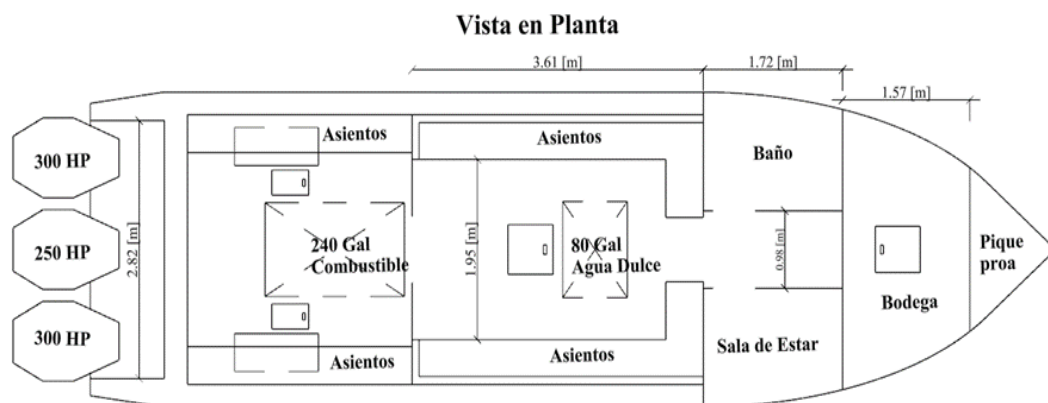


Figura 1.2 Arreglo general-Lancha A

(Villamarin, 2020)

1.4.2 Balance dinámico

1.4.2.1 Cálculo de la distribución de presión del fondo

Las embarcaciones de alta velocidad soportan elevadas presiones en el fondo debido a la acción dinámica relativa del agua sobre la superficie del casco

(Lewandowski, 2004) y (Heller & Jasper, 1960). Tomando en consideración las ecuaciones semiempíricas de Heller y Jasper como la base de los cálculos para la distribución de presión, estos son implementadas por distintas normas como la ISO 12215 (International Organization for Standardization, 2008).

1.4.2.1.1 Normas ISO 12215

Siguiendo los lineamientos presentados en (International Organization for Standardization, 2008), se estima la distribución longitudinal de presión de diseño mediante las ecuaciones (1.1) y (1.2).

$$P_{BMP} = P_{BMP\ BASE} * k_{AR} * k_L \quad \frac{kN}{m^2} \quad (1.1)$$

$$P_{BMP\ BASE} = \frac{0.1 * m_{LDC}}{L_{WL} * B_C} * (1 + k_{DC}^{0.5} * n_{CG}) \quad \frac{kN}{m^2} \quad (1.2)$$

donde P_{BMP} es la presión de diseño en el fondo de la embarcación en kN/m^2 , $P_{BMP\ BASE}$ es la presión base del fondo y n_{CG} es la aceleración del centro de gravedad en modo de planeo. El factor k_{dc} depende de las condiciones de mar y el tipo de embarcación usándose un valor de 0,8 para el desarrollo del proyecto. Mientras que el factor k_L depende de la posición longitudinal a lo largo de eslora, y, el factor k_{ar} depende del tipo y área de diseño del elemento estructural.

A continuación, se presenta la distribución longitudinal resultante de la presión en el fondo de la embarcación, con una aceleración vertical en el centro de gravedad (CG) de 3,20 g's según la formulación de ISO 12215:

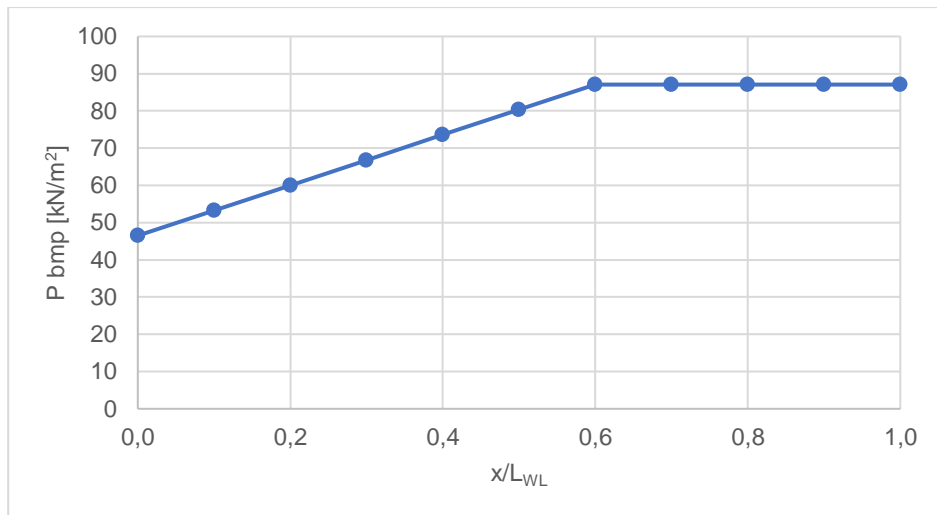


Figura 1.3 Distribución Longitudinal de la Presión de Diseño

1.4.2.1.2 Distribución de presión transversal

Aparte de la distribución longitudinal de presión es necesario la distribución de presión en dirección de la manga para establecer el equilibrio dinámico. Para obtener esta distribución se puede implementar el trabajo clásico en el área de ingeniería de botes planeadores (Heller & Jasper, 1960). En este trabajo se emplean las formulaciones semiempíricas para una presión equivalente a la dinámica distribuida a lo ancho de la manga, como se muestra en la Figura 1.4:

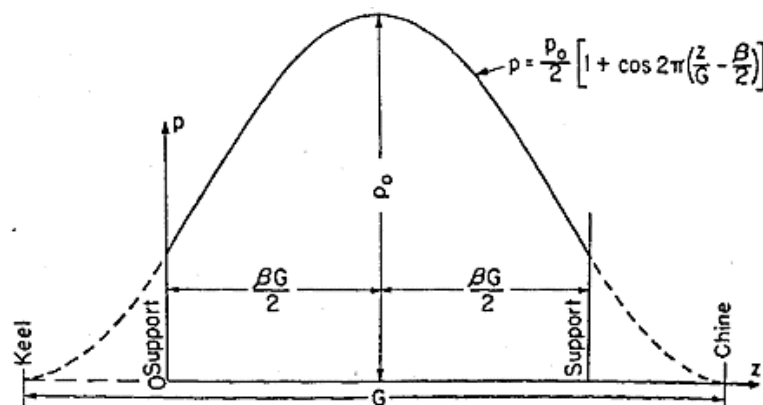


Figura 1.4 Distribución de Presión Transversal de Quilla a China

(Heller & Jasper, 1960, p. 53)

La curva sigue la siguiente función:

$$p(z) = \frac{p_0}{2} \left[1 + \cos 2\pi \left(\frac{z}{G} - \frac{\beta}{2} \right) \right] \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (1.3)$$

Donde G es la distancia total entre la quilla y la china en cada sección transversal, z es la distancia desde la quilla hasta un determinado punto de la plancha, p(z) es la presión en el eje z, p₀ es la presión pico en cada sección establecida por ISO y β es el porcentaje de separación entra soportes longitudinales. Sin embargo, al considerar un valor de β igual a 1 se obtiene la siguiente expresión:

$$p(z) = \frac{p_0}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi z}{G} \right] \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (1.4)$$

La variación de presión transversal a lo largo de la eslora se presenta en la Figura 1.5 tomando en consideración la semimanga de la embarcación. Además, se obtiene como resultado que la fuerza ejercida por la presión dinámica tiene una magnitud de 320,27 kN (32,68 ton), con centro de presión a 5,12 m desde popa.

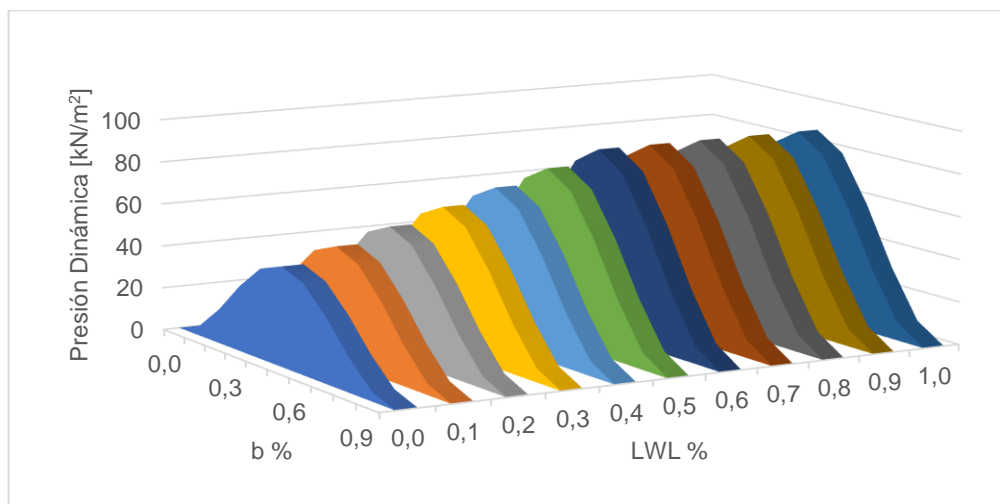


Figura 1.5 Distribución de presión a lo largo de la embarcación

1.4.2.2 Equilibrio dinámico

Para el análisis se asume a la embarcación como un cuerpo rígido donde solo actúan las componentes verticales de las fuerzas. Teniendo que satisfacer las dos ecuaciones de Newton para equilibrio dinámico, descritas por (Heller & Jasper, 1960):

$$\text{Fuerza: } \int_0^L P(x) dx = \int_0^L \left[1 + \frac{\ddot{y}(x)}{g} \right] w(x) dx \quad (1.5)$$

$$\text{Momento: } \int_{-\bar{x}}^{L-\bar{x}} P(x) x' dx' = I\ddot{\theta} \quad (1.6)$$

En estas ecuaciones, I es el momento de inercia de masa de la lancha con respecto al CG, L es la eslora en la línea de agua, $P(x)$ es la presión externa por unidad de longitud, $w(x)$ es la distribución de peso por unidad de longitud, x es la distancia desde popa, x' es la distancia desde el CG, $\ddot{y}(x)$ es la componente vertical de la aceleración lineal resultante y $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular del cuerpo rígido. Tal como se muestra en la Figura 1.6:

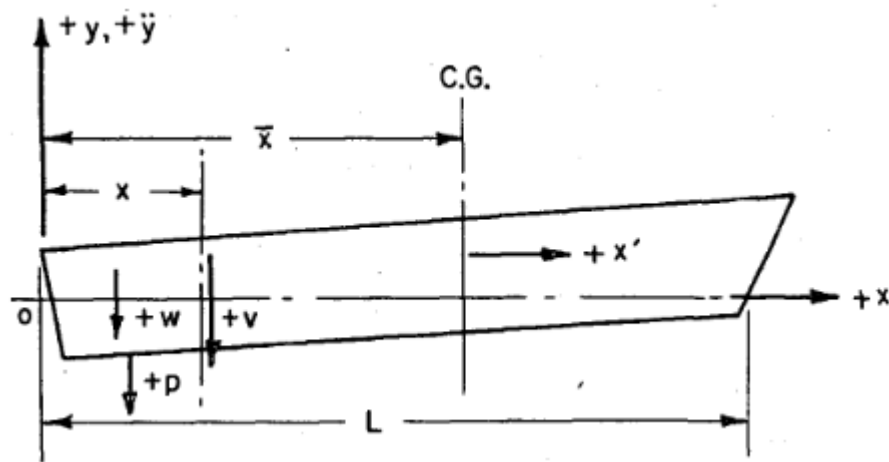


Figura 1.6 Representación esquemática y fuerzas actuando en el casco

(Heller & Jasper, 1960, p. 54)

La embarcación a plena carga tiene un desplazamiento total de 8,86 ton de acuerdo con los datos mostrados en (Mendoza & Vasquez, 2020), distribuyéndose el peso a lo largo de la eslora como se muestra en la Figura 1.7, obteniendo que el CG se encuentra a 4,14 m desde popa:

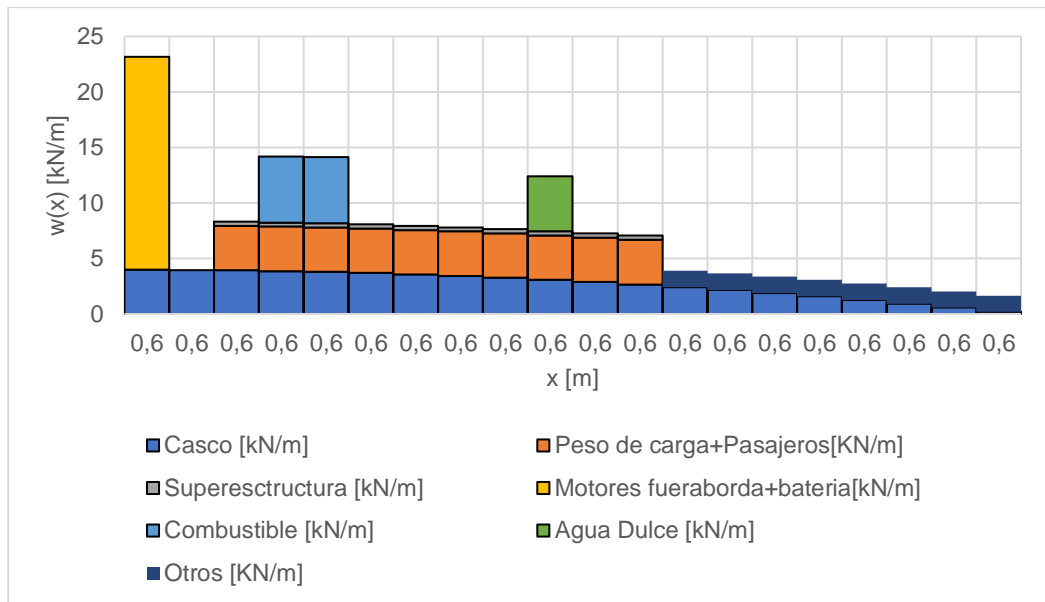


Figura 1.7 Distribución de peso de la lancha A

En la Figura 1.8 se presenta un resumen del equilibrio dinámico mostrando dos curvas que corresponden a la presión hidrodinámica (amarilla) y a la distribución de pesos a lo largo de la eslora (verde). Se presentan también los valores de las fuerzas resultantes y sus posiciones centroidales:

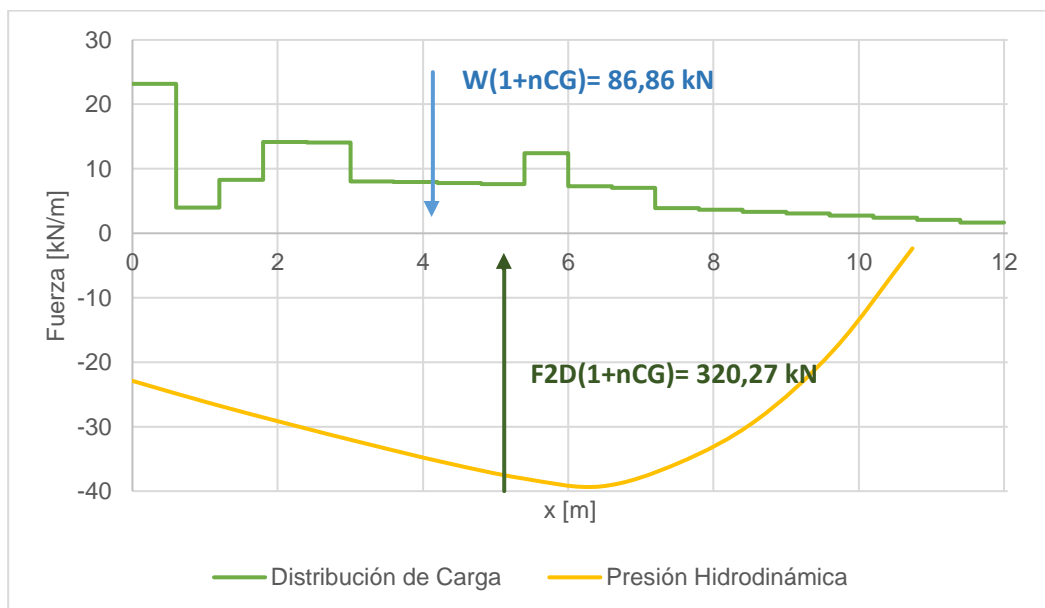


Figura 1.8 Equilibrio dinámico de la lancha A

Para satisfacer la ecuación (1.5) las resultantes de la presión dinámica y del peso deben igualarse a cero, obteniendo un n_{CG} de 2,68 g. Además, al aplicarse la ecuación (1.7) dada por ISO para el cálculo de la n_{CG} se obtiene una aceleración vertical de 3,20 g. Esto es, con la distribución actual de cargas el n_{CG} obtenido tiene una diferencia del 16% con respecto al n_{CG} dado por ISO 12215.

$$n_{CG} = \frac{0,5 * V}{m_{LDC}^{0,17}} \quad (1.7)$$

Por otra parte, las fuerzas resultantes actúan en diferentes puntos teniendo una separación de 1,00 m entre ellas. Esto induce un desbalance de momentos que provoca una aceleración rotacional en la embarcación. Para satisfacer la ecuación (1.6) el momento de inercia de la masa de la lancha es de 79368,31 kg-m² y el momento dinámico con respecto al CG es de 319,51 kN-m; resultando que la aceleración rotacional de la lancha es:

$$\int_{-\bar{x}}^{L-\bar{x}} P(x) x' dx' = I\ddot{\theta}$$

$$319508,61 \text{ [N - m]} = 79368,31 \text{ [kg - m}^2\text{]} * \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} = 4,03 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right]$$

Combinando esta aceleración rotacional y la del CG, se calcula la distribución de la aceleración vertical a lo largo de la eslora como se presenta en la Figura 1.9. La pendiente de la recta (azul) corresponde al valor de aceleración rotacional previamente calculado.

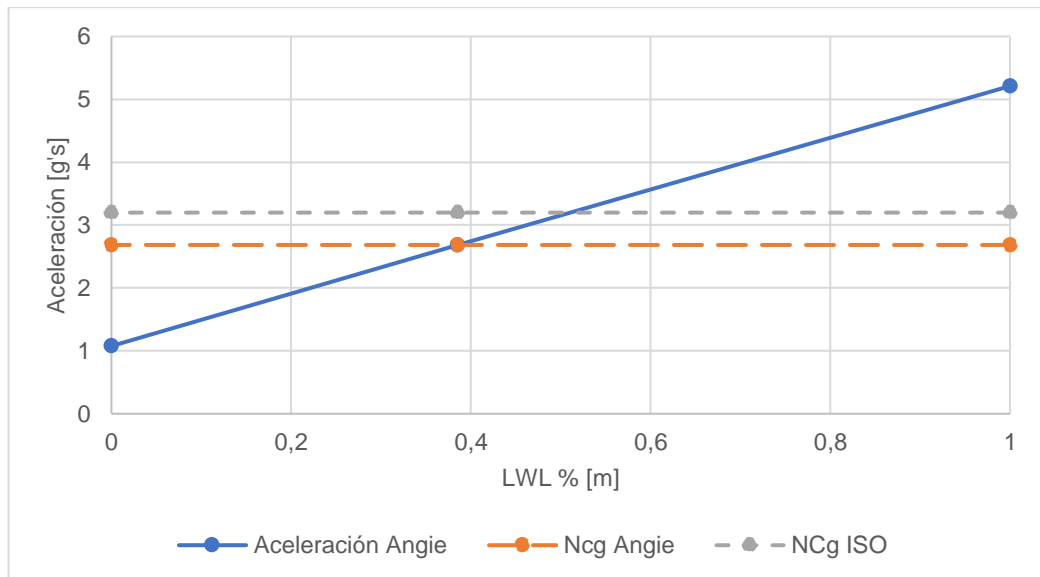


Figura 1.9 Distribución de aceleración a lo largo de la lancha

1.4.3 MEF Modular

Para llevar a cabo el análisis modular en este proyecto se van a tomar los resultados del comportamiento global usando el modelo del casco como viga de sección variable, como condiciones de frontera de la subestructura (Lamb, 2003). Esta recomendación la hace la sociedad clasificadora ABS (American Bureau of Shipping, 2018). Para ello se deben considerar los valores de deflexión y pendiente de la viga buque como condiciones de frontera en una sección extrema de la subestructura. En la otra sección del módulo se aplican el momento flector y la fuerza cortante del modelo global.

En este proyecto se propone analizar dos módulos de la embarcación que corresponden a la popa y proa debido a la influencia del gran peso de los motores en un caso y al elevado impacto hidrodinámico en el otro. Para ello se comienza con determinar el equilibrio dinámico de la lancha tomando en consideración la distribución de pesos y de presión dinámica. Considerando el efecto inercial por las aceleraciones resultantes, se puede determinar la distribución de cargas efectivas y por su integral, calcular las distribuciones de fuerza cortante, momento flector, pendiente y deflexión. De estos resultados se obtienen las condiciones de frontera a aplicar en los módulos a analizar. Para ello se procede con el análisis de MEF empleando la herramienta ACP de ANSYS para materiales compuestos. Una vez

obtenidos los resultados deberán ser evaluados respecto de los criterios de integridad estructural de la ISO 12215. Además, en el caso del módulo de proa el análisis del módulo optimizado presentado en (Onofre & Venegas, 2020) se podrá comparar con el módulo de la estructura original. Esta comparación tiene como fin verificar el proceso de optimización presentado en (Onofre & Venegas, 2020).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Debido a sus altas velocidades el fondo de las embarcaciones planeadoras se ven expuestas a elevadas presiones dinámicas cuya distribución puede calcularse mediante ecuaciones semiempíricas. En el caso de la lancha A, descrita en el capítulo anterior, la fuerza total producto de la presión dinámica es de 320,27 kN con su centroide a 0,98 m del CG. Al no encontrarse el centro de masa de la lancha en la línea de acción de la fuerza hidrodinámica se produce un momento que causa una aceleración angular de la embarcación. De tal forma que se estima que la lancha soporta una aceleración vertical y rotacional de 2,68 g y 4,03 rad/seg² respectivamente.

Para el desarrollo del análisis estructural de la embarcación se estableció el equilibrio dinámico entre la presión dinámica y el peso efectivo producto de la distribución lineal de la aceleración vertical. En el caso que no se cumpliera con el equilibrio dinámico no se satisfaría las condiciones de frontera de la viga buque donde la fuerza cortante y momento flector son nulos en los extremos. (Lamb, 2003) Satisfaciéndose dichas condiciones de frontera se pueden emplear las ecuaciones de flexión de la viga buque para el cálculo del desplazamiento a lo largo de la embarcación.

Ahora bien, para emplear las ecuaciones de viga se debe considerar que la viga buque tiene sección variable, teniendo que calcularse la distribución de rigidez flexural (EI). Para el cálculo de este parámetro se siguieron las recomendaciones dadas por (International Organization for Standardization, 2008) en el anexo H: Laminate Stack Analysis, para un material compuesto. Teniendo que adaptarse las tablas dadas por ISO para el cálculo del EI de las secciones transversales de la embarcación ya que ellas se aplican para laminados y refuerzos tipo sombrero.

Una vez terminado el análisis global simplificado se procedió con la identificación de los módulos de la estructura a ser analizados. Tomando como referencia el CG de la embarcación, el módulo de popa va desde -4,14 m (espejo) a -1,64 m. Mientras el módulo de proa, tanto el optimizado como el actual, va de -0,51 m a 3,49 m.

Conocidos los límites de los módulos se toman las condiciones de frontera (deflexión, pendiente, fuerza cortante y momento flector) de la solución de la flexión de la viga buque, de acuerdo con el módulo que se desee analizar.

En el caso del módulo de popa el momento flector y fuerza cortante en el límite izquierdo son nulos debido a que coincide con el espejo, esto es, un extremo libre. Para el límite derecho del módulo se tomó como condiciones de frontera el momento flector y fuerza cortante que se transfieren de los resultados obtenidos del modelo global. Además, para mantenerse el equilibrio dinámico, la fuerza y el momento internos provocados por la distribución de carga debe anular el momento aplicado en el extremo derecho.

Por otra parte, en el caso del módulo de proa se tiene dos estructuras que corresponden a la embarcación actual y la que resultó producto del proceso de optimización de (Onofre & Venegas, 2020). No obstante, para ambos casos se consideran las mismas distribuciones de cargas y condiciones de frontera. En forma similar al análisis del módulo de popa, se aplican como condiciones de frontera en el límite izquierdo la pendiente y deflexión, mientras que en el lado derecho se aplican el momento flector y la fuerza cortante. Teniendo en cuenta que se debe mantener la continuidad de la viga buque se espera que el momento flector y fuerza cortante registrados en el lado izquierdo coincida con los resultados del modelo global.

Una vez que se identificó los módulos con sus respectivas condiciones de frontera y distribución de cargas se procedió con el modelado geométrico 3D empleando el programa Rhinoceros. Luego se procede con el modelado según el MEF para el cual se empleó el módulo ACP de ANSYS para materiales compuestos. En este módulo ACP se definen los diferentes laminados con sus respectivas orientaciones.

2.1 Cálculos de la viga buque

2.1.1 Distribución de la rigidez flexural

En las ecuaciones de teoría de vigas aparecen las variables módulo de elasticidad (E) e inercia (I), cuyo producto es la rigidez flexural (EI). La inercia está en función

de la geometría de la sección transversal y el módulo de elasticidad depende del material de la estructura. En el caso específico de la lancha planeadora la sección transversal no es constante teniéndose que modelar la embarcación como una viga de sección variable. Otro factor por considerar es que la embarcación es de material compuesto por ende su E sería un promedio de los diferentes elementos estructurales que componen a la estructura.

En el anexo H “Laminate Stack Analysis” de la (International Organization for Standardization, 2008) se explica cómo realizar el cálculo de la rigidez flexural para laminados y refuerzos con forma de sombrero. Sin embargo, estos cálculos tuvieron que ser adaptados para poder aplicarlos en la sección transversal de la embarcación como se muestra en el APÉNDICE C. El primer paso del cálculo es determinar para los diferentes elementos estructurales el E, presentándose en la Tabla 2.1 los E promedio calculados en la sección de anexos:

Tabla 2.1 Módulo de Young promedio para diferentes elementos estructurales

Descripción	EI [kNm ²]
Laminado Fondo	8154,85
Laminado Costado	8154,85
Laminado Cubierta Principal	7373,26
Laminado Cubierta Estiba	7802,82
Refuerzo de fondo (Eslora)	8793,73
Refuerzo de fondo (Eslora)	8793,73
Refuerzo Costado (Palmejar)	8793,73

Usándose los datos presentados en la Tabla 2.1 se procedió con el cálculo de EI para diferentes cuadernas tomándose en consideración las siguientes ecuaciones:

$$\bar{y} = \frac{\sum E_i A_i d_i}{\sum E_i A_i} \quad (2.1)$$

$$EI_{BASE} = \sum E_i I_{COi} + \sum E_i A_i d_i^2 \quad (2.2)$$

$$EI_{na} = EI_{BASE} - \bar{y}^2 * \sum E_i A_i \quad (2.3)$$

Donde \bar{y} es la posición del eje neutro de la sección, A_i es el área transversal de los elementos estructurales, d_i es la posición vertical del elemento estructural desde la línea base, I_{coi} es la inercia seccional de los elementos, EI_{BASE} es la rigidez flexural con respecto a la línea base, y, EI_{na} es la rigidez flexural con respecto al eje neutro. Aparte se tuvo que considerar que en las secciones es común encontrar elementos rectangulares inclinados utilizándose la siguiente ecuación para el cálculo de I_{coi} :

$$I_{coi} = \frac{bh(h^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha)}{12} \quad (2.4)$$

Donde b es la base del elemento estructural, h es la altura del elemento y α es el ángulo de inclinación.

Para ejemplificar el proceso de cálculo se tomó como ejemplo la sección a la altura de la cuaderna 10 que se presenta en la Figura 2.1, considerándose solo los elementos longitudinales de la estructura.

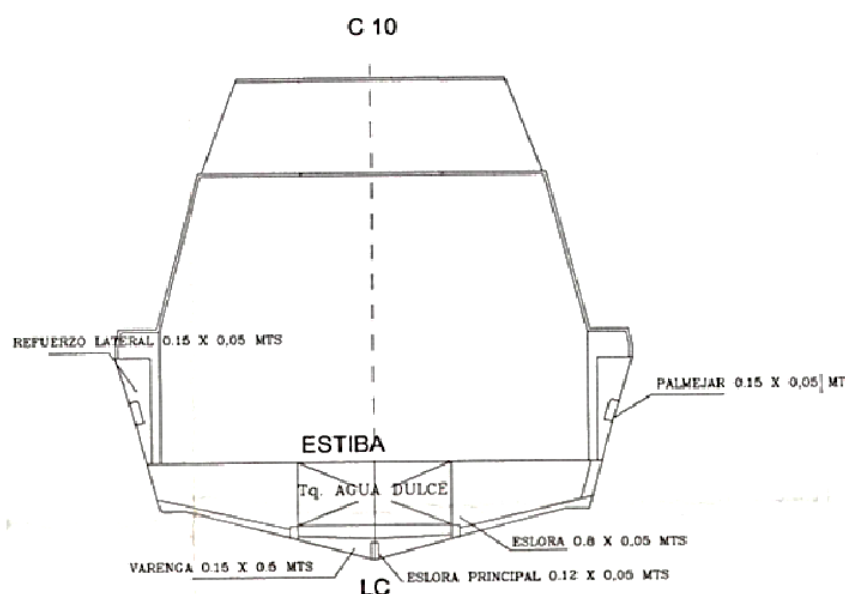


Figura 2.1 Cuaderna 10 de la embarcación actual

En el caso de la cuaderna 10 se registró que $\sum E_i A_i$ y $\sum E_i A_i d_i$ tienen un valor de $5,60E+08$ N y $3,03E+11$ Nmm respectivamente, obteniendo como resultado que el eje de la cuaderna está 541,21 mm de la línea base usando la ecuación (2.1).

Luego, se calculó la rigidez flexural con respecto al eje neutro tomando en consideración las ecuaciones (2.2) y (2.4) siendo de $4,66E+14$ Nmm². Por último, al conocerse el \bar{y} y el EI_{BASE} se utilizó la ecuación (2.3) para el cálculo de la rigidez flexural desde el eje neutro siendo de $1,38E+05$ kNm². En el APÉNDICE C se presenta una tabla que resume los cálculos correspondientes a la cuaderna 10 junto con las secuencias de laminado consideradas en la estructura. Además, el mismo proceso que se utilizó para el cálculo de la EI_{na} de la cuaderna 10 se empleó en otras cuadernas a lo largo de la eslora, presentándose en la Tabla 2.2 los resultados de dichos cálculos:

Tabla 2.2 Rigidez Flexural en diferentes puntos de la embarcación

X [m]	EI [kNm ²]
1,38	8,24E+04
2,52	1,05E+05
4,23	1,06E+05
5,95	1,38E+05
7,75	1,42E+05
8,81	1,50E+05
9,94	1,37E+05

Las posiciones de las secciones que se presentan en la Tabla 2.2 son tomadas desde el espejo y se presentan en forma gráfica en la Figura 2.1. Además, la ecuación de la curva de ajuste que se presenta en la Figura 2.2 corresponde a la ecuación (2.5) que será empleada en el cálculo de la deflexión de la viga buque:

$$EI \text{ [kN m}^2\text{]} = -1,003.22 x^2 + 18,406.89 x + 59,064.77 \quad (2.5)$$

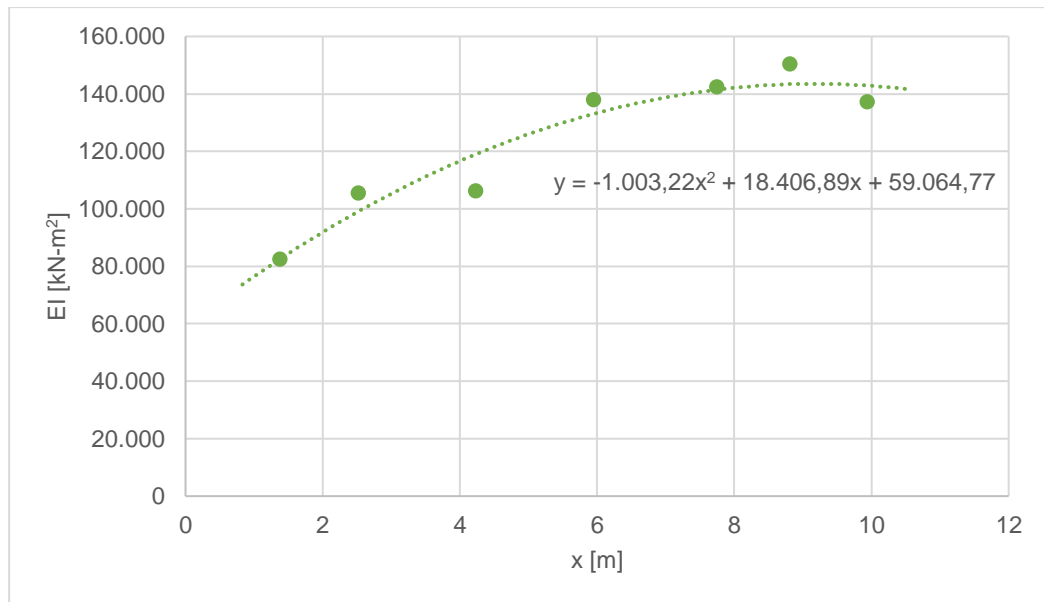


Figura 2.2 Distribución de la rigidez estructural a lo largo de la embarcación

2.1.2 Distribución de la deflexión

La distribución de fuerza externa por unidad de longitud $p(x)$, se obtuvo mediante la combinación de la fuerza dinámica debido a la presión de impacto y a la variación de peso, e , incluyendo la acción inercial debido a la variación de la aceleración a lo largo de la embarcación, ecuación (2.6).

$$p\left(x_i + \frac{1}{2}\right) = F_{2d}(x) - m(x) * (g + a_{CG} - x\ddot{\theta}) \quad (2.6)$$

donde F_{2D} es la presión dinámica que actúa en el fondo, $m(x)$ es la distribución de masa a lo largo de la embarcación, g es la gravedad, a_{CG} es la aceleración del centro de gravedad y $\ddot{\theta}$ es la aceleración rotacional de la lancha siendo positiva en dirección a las manecillas del reloj.

A continuación, en la Figura 2.3 se presenta la distribución de carga por unidad de longitud, con la embarcación en balance dinámico.

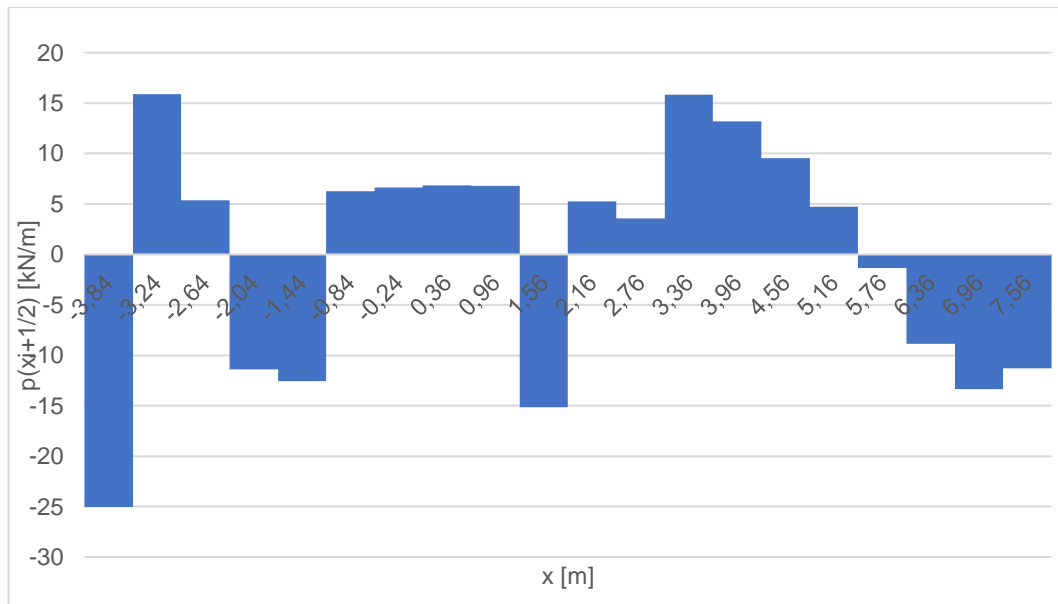


Figura 2.3 Distribución de carga en la lancha

La variación de fuerza cortante (V) y momento flector (Mz) a lo largo de la embarcación se obtuvo integrando numéricamente la distribución de carga una y dos veces, aplicando las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$V(x_i + 1) = V(x_i) - p_{i+\frac{1}{2}} * \Delta x \quad (2.7)$$

$$Mz(x_i + 1) = Mz(x_i) - [V(x_i + 1) + V(x_i)] * \frac{\Delta x}{2} \quad (2.8)$$

En la Figura 2.4 se muestran las distribuciones de la fuerza cortante y momento flector a lo largo de la lancha. Se puede distinguir que en los extremos cumple con las condiciones de frontera para una viga con soportes libres (Popov, 1982).

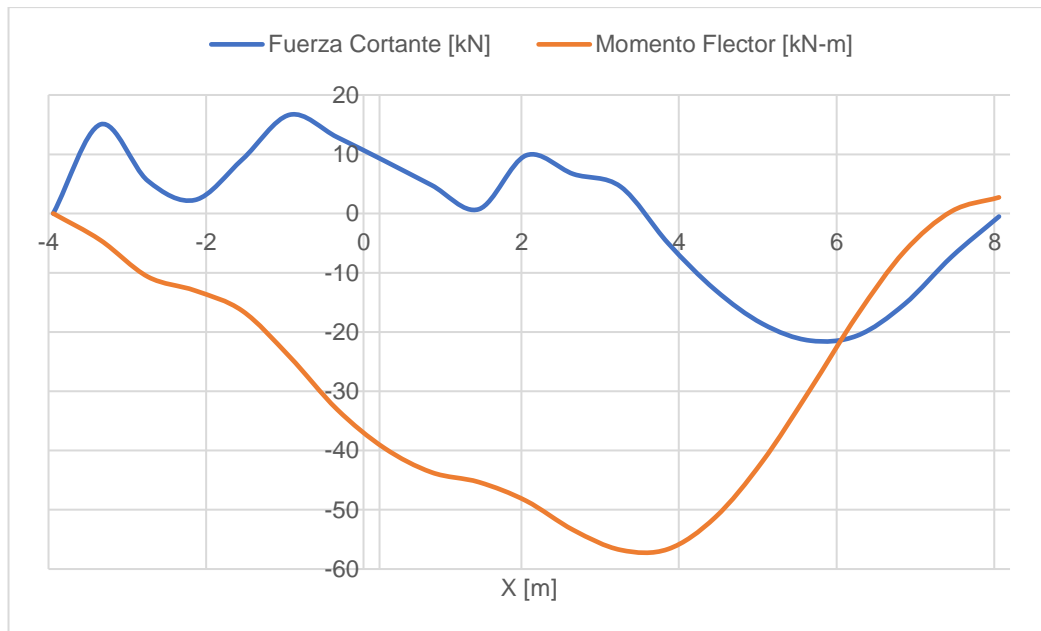


Figura 2.4 Distribución de la fuerza cortante y momento flector a lo largo de la embarcación

Siguiendo la hipótesis cinemática y asumiendo que la curvatura se aproxima con la segunda derivada de la deflexión, el momento flector corresponde a:

$$EI(x) v_{,xx}(x) = Mz(x) \quad (2.9)$$

La pendiente y deflexión se las obtuvo integrando numéricamente dos veces $v_{,xx}(x)$ aplicando las ecuaciones (2.10) y (2.11). En la Figura 2.5 se muestran sus distribuciones a lo largo de la embarcación.

$$v_{,x}(x_i + 1) = v_{,x}(x_i) + \frac{[Mz(x_i + 1) + Mz(x_i)]}{EI(x_i)} * \frac{\Delta x}{2} \quad (2.10)$$

$$v(x_i + 1) = v(x_i) + [v_{,x}(x_i + 1) + v_{,x}(x_i)] * \frac{\Delta x}{2} \quad (2.11)$$

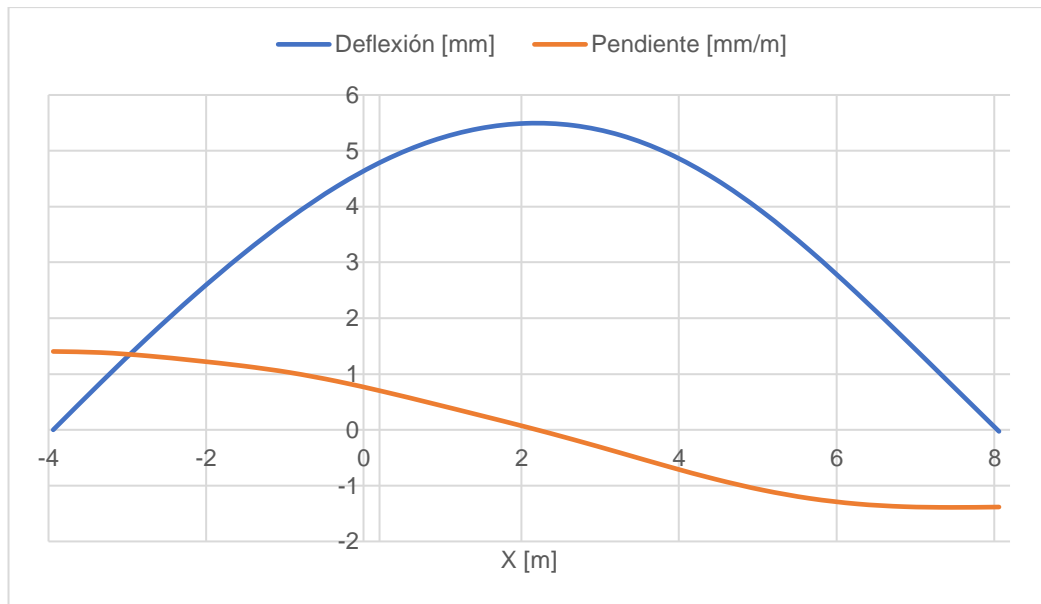


Figura 2.5 Distribución de pendiente y deflexión a lo largo de la embarcación

2.2 Módulos estructurales

Se desarrolló el módulo de proa y popa de la actual embarcación y el módulo de proa optimizado corresponde al modelo presentado en (Onofre & Venegas, 2020), empleando el software Rhinoceros. Los límites de los módulos se presentan en la Tabla 2.3, y reconociendo que el CG de la embarcación se encuentra a 4,14 m del espejo.

Tabla 2.3 Límites de cada módulo

	MODULO DE POPA		MODULO DE PROA	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Desde el espejo [m]	0	2,50	3,63	7,63
Desde el CG [m]	-4,14	-1,64	-0,51	3,49

Para el desarrollo del modelo actual se acordó una visita al Taller Ocean Fibra en Anconcito, Prov. De Santa Elena, quien construyó la lancha A. Se pretendía observar detalles como el tipo de madera para cada núcleo y la distribución de refuerzos en la embarcación actual. Estos aspectos se explican con mayor detalle en el APÉNDICE D presentando evidencia de la visita técnica realizada.

Tabla 2.4 Tipo de núcleos de maderas en la lancha A

TIPO DE MADERA	UBICACIÓN
Chanul	Rodón
	Quilla
Figueroa	Refuerzos transversales
	Refuerzos longitudinales
	Varenga
	Espejo
	Palmejar
Plywood Marino	Cubierta de estiba

Uno de los requisitos al construir este tipo de embarcación es que debe ser lo más ligera posible, de manera que los núcleos de madera deben ser ligeros. En la Tabla 2.4 se observa la aplicación de diferentes tipos de maderas debido a su rigidez y peso. Chanul es la madera más rígida y pesada empleándose en zonas de mayor impacto y de poca sección, aplicada en la actual embarcación en el rodón y la quilla. En cambio, Figueroa es la madera más usada como núcleo debido a que es ligera siendo aplicada en toda la zona del espejo, en los refuerzos y palmejar.

2.2.1 Módulo estructural de popa

El espesor del núcleo de madera del espejo es de 5,8 cm, dato medido en el taller Ocean Fibra a una embarcación similar a la lancha A. Cada motor fueraborda es ajustado al espejo con cuatro pernos de acero de media pulgada de diámetro.

Los límites del módulo se presentaron en la Tabla 2.3, teniendo una longitud de 2,5 m. Los refuerzos presentes en el módulo se muestran en la Tabla 2.5, donde los longitudinales del fondo están separados 0,51 m desde la quilla y los transversales separados 0,51 m.

Tabla 2.5 Refuerzos del módulo estructural de popa del modelo actual

(Onofre & Venegas, 2020)

Refuerzos del fondo	Cantidad	Dimensiones
Refuerzos Longitudinales	2	0,08 x 0,05
Refuerzos Transversales	4	0,05 x 0,05
Quilla	1	0,12 x 0,05
Refuerzos del costado		
Palmejar	2	0,15 x 0,05
Rodón	2	0,06 x 0,02
Refuerzo de costado interior		
Refuerzos Transversales	2	0,05 x 0,05

El módulo estructural fue desarrollado hasta la mitad de la cuaderna 4, como se puede observar en la Figura 2.6, con el fin de aplicar las condiciones de frontera en puntos relativamente rígidos. Este límite derecho del módulo coincide con la cuaderna 4 de la embarcación actual.

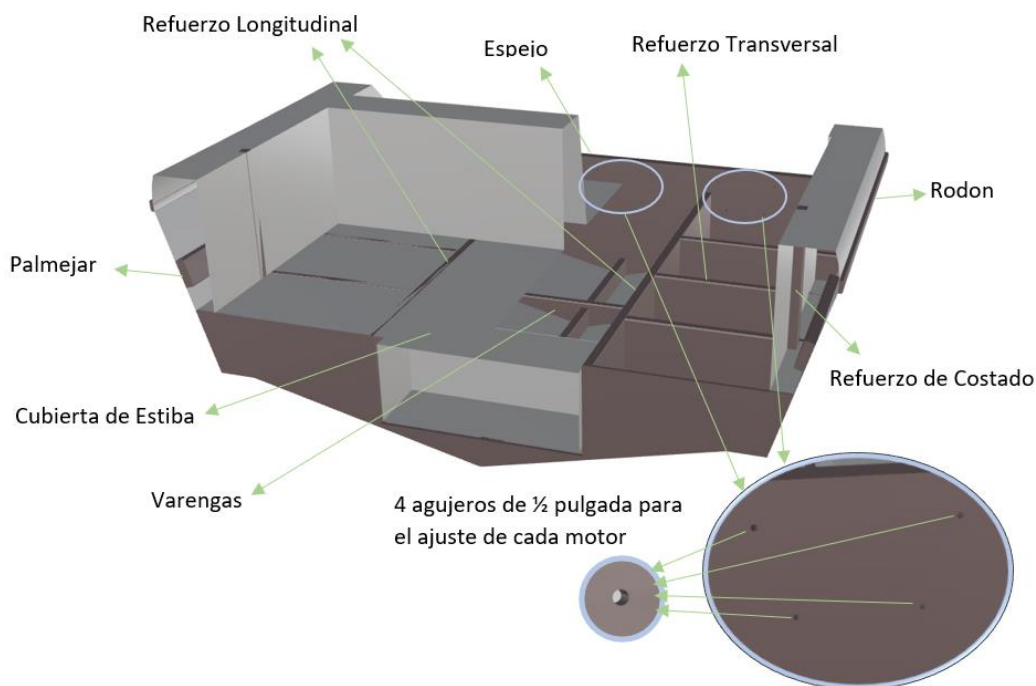


Figura 2.6 Modelo 3D de la estructura de popa de la embarcación

2.2.1.1 Distribución de cargas y Condiciones de Frontera

Como se explicó previamente las cargas de diseño sobre la estructura toman en consideración la acción inercial debido a la variación lineal de la aceleración y la fuerza provocada por la presión dinámica. La distribución de cargas de los módulos de popa se muestra en la Figura 2.7.

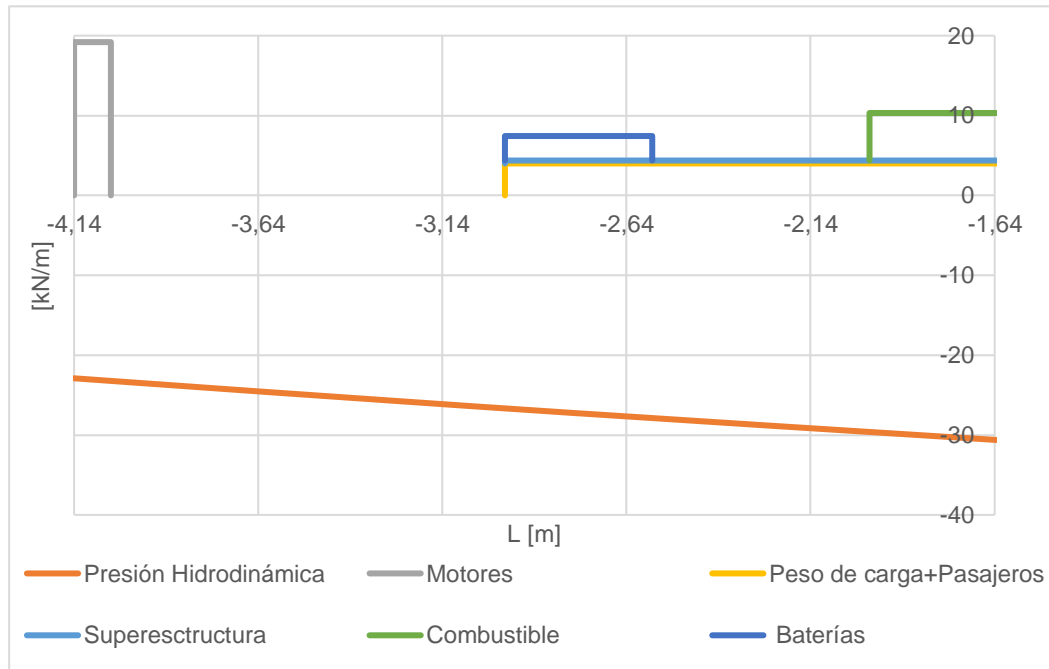


Figura 2.7 Distribución de carga del módulo de popa

De las Figura 2.4 y Figura 2.5 se obtienen los valores para las condiciones de frontera para los extremos del módulo de popa, tal como se muestra en la Tabla 2.6. Para el espejo de la embarcación se tomaron condiciones de frontera geométricas (pendiente y deflexión), mientras que, para el otro extremo a la mitad de la cuaderna 4, se aplicaron condiciones de frontera naturales (Fuerza Cortante y Momento Flector).

Tabla 2.6 Condiciones de frondea del módulo de popa

x [m]	V(x) [kN]	Mz(x) [kN-m]	v,x (x) [mm/m]	v(x) [mm]
-4,14	0,00	0,00	1,40	0,00
-1,64	10,386	-17,728	1,13	3,25

2.2.2 Módulo estructural de proa

Para el desarrollo de los módulos estructurales de proa se emplearon los límites presentados en la Tabla 2.3, teniendo cada uno, una longitud de 4 m. Dichos módulos se diferencian por los refuerzos presentes en cada caso como se observa en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7 Refuerzos del fondo y costado del modelo actual y optimizado

(Onofre & Venegas, 2020)

Refuerzos del fondo	Actual	Óptimo
Numero de Refuerzos Longitudinales	2	-
Numero de Refuerzos Transversales	6	9
Espaciamiento entre refuerzos longitudinales [m]	0,51	-
Espaciamiento entre refuerzos trasversales [m]	0,51	0,4
Dimensiones de refuerzos longitudinales [m]	0,08 x 0,05	-
Dimensiones de refuerzos trasversales [m]	0,05 x 0,05	0,057 x 0,04
Refuerzos del costado	Actual	Óptimo
Numero de Refuerzos Longitudinales	1	-
Numero de Refuerzos Transversales	-	9
Espaciamiento entre refuerzos longitudinales [m]	0,75	-
Espaciamiento entre refuerzos trasversales [m]	-	0,40
Dimensiones de refuerzos longitudinales [m]	0,15 x 0,05	-
Dimensiones de refuerzos trasversales [m]	-	0,057 x 0,04

En las Figura 2.8 y Figura 2.9 se presentan los modelos 3D del módulo optimizado y el actual respectivamente:

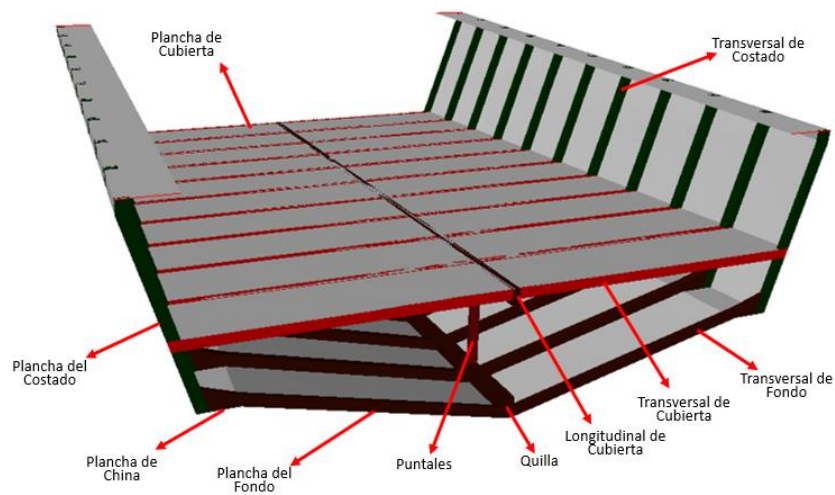


Figura 2.8 Modelo 3D módulo de proa optimizado

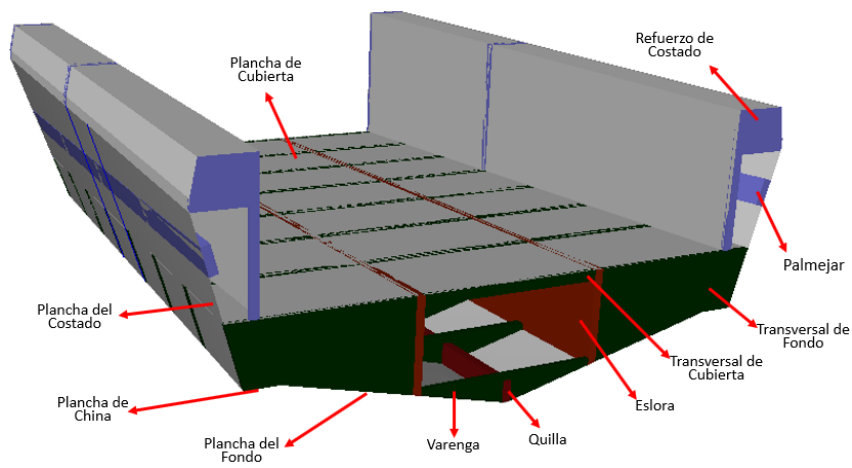


Figura 2.9 Modelo 3D del módulo de proa actual

En el modelo optimizado no se tiene refuerzos longitudinales en el fondo ni en el costado de la embarcación, y los refuerzos transversales del fondo no conectan con la cubierta de estiba. Por esta razón a la cubierta de estiba se le agrega unos refuerzos transversales (color rojo) que conectan con los refuerzos trasversales de costado (color verde). Además, al refuerzo longitudinal de cubierta se le agrega puntales (color café) que conectan a la quilla como se observa en la Figura 2.8. Estos puntales se ubicaron con una separación de 0,8 m entre ellos, es decir, saltando un refuerzo transversal de la embarcación ya que los refuerzos transversales tienen un espaciamiento de 0,4 m.

En cambio, en el módulo estructural actual se puede observar que el fondo cuenta con refuerzos transversales (color verde oscuro) que conectan: fondo, china, costado y cubierta de estiba; debe considerarse una separación de 0,51 m entre los refuerzos. Además, el costado se encuentra conectado a la cubierta de estiba por medio de refuerzos transversales (color celeste) ubicados en los límites y en la mitad del módulo. Aparte en el modelo actual los refuerzos longitudinales y transversales del fondo sirven de soporte a la cubierta de estiba conectando toda la estructura, siendo este el método de construcción empleado actualmente en estas embarcaciones.

2.2.2.1 Distribución de cargas y Condiciones de Frontera

Para determinar las condiciones de frontera que se aplicarán en los módulos de proa se utilizaron las Figura 2.4 y Figura 2.5 tomando en consideración los límites indicados en la Tabla 2.3. En la Tabla 2.8 se presenta las condiciones de frontera obtenidos en los límites del modelo, siendo las mismas para el modelo actual y optimizado:

Tabla 2.8 Condiciones de Frontera Módulo de Proa

x [m]	V(x) [kN]	Mz(x) [kN-m]	v,x (x) [mm/m]	v(x) [mm]
-0,51	12,69	-33,36	0,86	4,39
3,49	-2,30	-56,68	-0,59	5,05

En forma similar al análisis del módulo de Popa, se aplican en el límite izquierdo, condiciones de fronteras geométricas (pendiente y desplazamiento) mientras que en el límite derecho se aplican en forma distribuida en elementos longitudinales, condiciones de fronteras naturales (momento flector y fuerza cortante). En el APÉNDICE E se explica de forma detallada como se aplicaron cada una de las condiciones de frontera en los límites del módulo de proa para el análisis MEF.

Con respecto a las condiciones de carga se toma en consideración el peso efectivo, producto de la variación lineal de aceleración, y la fuerza provocada por la presión dinámica como se muestra en la Figura 2.10. Estas fuerzas se aplican sobre el

modelo de forma distribuida variando longitudinalmente explicándose en el APÉNDICE E con mayor detalle la aplicación de estas cargas.

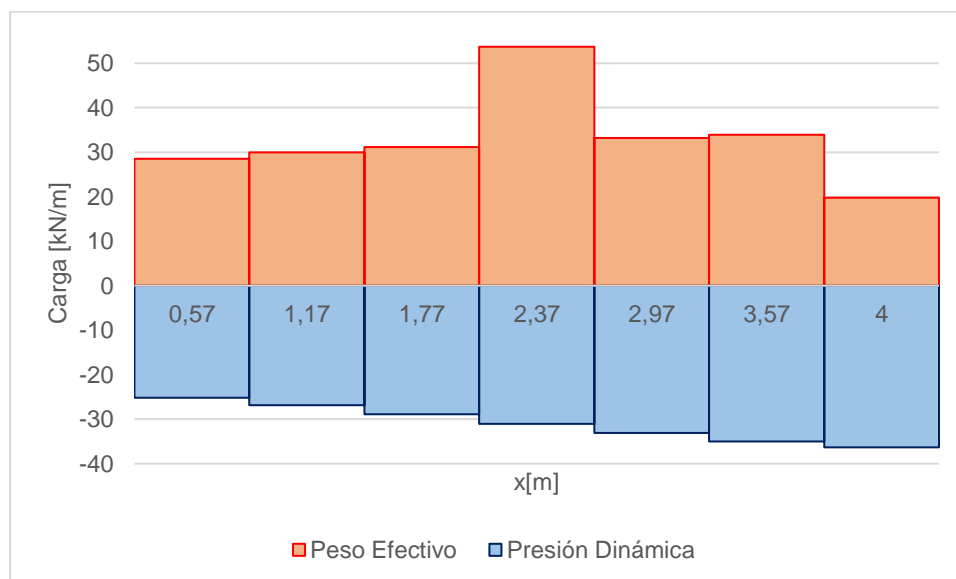


Figura 2.10 Distribución de carga del módulo de proa

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Módulo de proa

3.1.1 Respuesta estructural del módulo de proa

Tomando en consideración el segundo y cuarto objetivos específicos del proyecto, se analizan los módulos estructurales actual y optimizado de proa empleando el módulo ACP de ANSYS. En ambos casos se aplicaron condiciones de carga y de frontera que fueron definidas en el capítulo 2, y cuya aplicación en el modelo es explicado a detalle en el APÉNDICE E. Como resultado del análisis MEF de ambos módulos se integran en la frontera izquierda los valores de fuerza cortante y momento flector presentados en la Tabla 3.1. Se incluyen los valores obtenidos empleando el modelo viga-buque.

Tabla 3.1 V y Mz registrados en el extremo izquierdo de los módulos de proa

Módulo	Descripción	Viga Buque	Ansys	Error %
Actual	Fuerza Cortante [KN]	12,69	12,59	0,82
	Momento Flector [KN m]	-33,37	-36,50	9,39
Optimizado	Fuerza Cortante [KN]	12,69	12,59	0,82
	Momento Flector [KN m]	-33,37	-36,50	9,39

En la Tabla 3.1 se observa que los valores calculados de las fuerzas internas son iguales para ambos módulos, aunque los elementos estructurales considerados en cada uno son diferentes. Esto se debe al hecho que la distribución de fuerza cortante y de momento son independientes de la distribución de rigidez flexural, dependiendo estas dos variables de la distribución de carga presente a lo largo del modelo y a las fuerzas aplicadas en la frontera derecha. En el presente cálculo ambos módulos tienen la misma distribución de carga al compartir sus límites.

Por otra parte, en el extremo derecho se registraron los valores de deflexión en diferentes puntos de la sección transversal: quilla, mitad de la plancha de fondo (eslora), china, mitad de la plancha de costado y al final de la plancha de costado. Los resultados se muestran en las Figura 3.1 y Figura 3.2 para el modelo optimizado

y actual, respectivamente, junto con la deflexión en dicha sección, tomada del cálculo de la viga-buque.

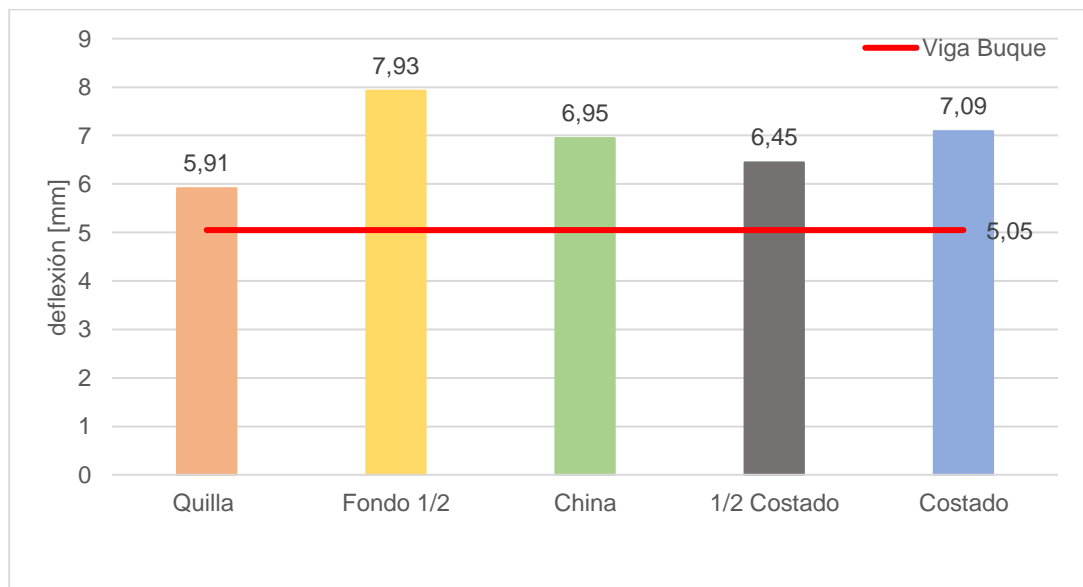
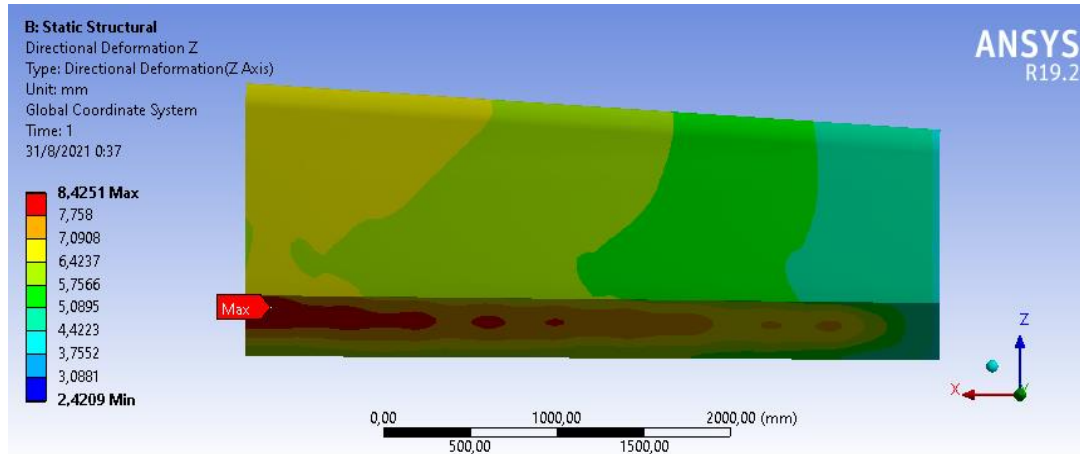


Figura 3.1 Deflexión del módulo de proa optimizado

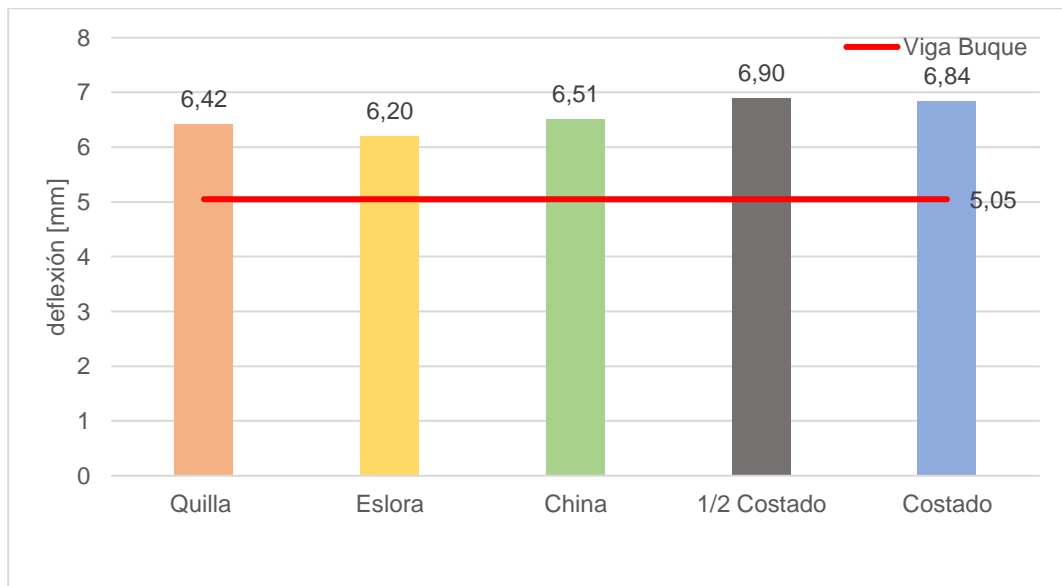
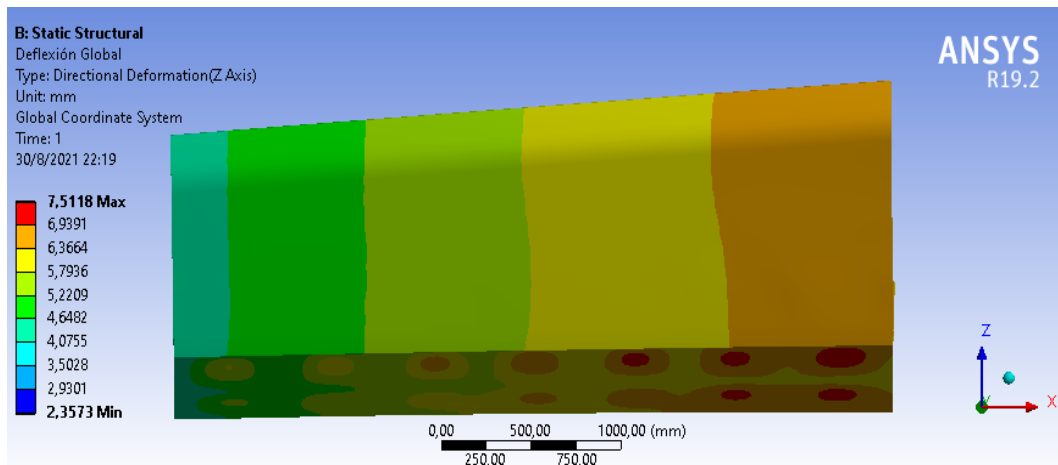


Figura 3.2 Deflexión del módulo actual

En el caso del módulo optimizado la máxima deflexión se registra en la mitad de la plancha del fondo debido a la falta de resistencia transversal del modelo. En cambio, en el módulo actual la máxima deflexión se registra en la mitad de la plancha del costado ya que en esta zona la resistencia transversal se ve reducida. En la Tabla 3.2 se presenta la diferencia porcentual de los valores registrados con respecto al valor calculado con el modelo de viga buque. En el modelo actual se obtiene una diferencia promedio de 30% y en el optimizado de 36%.

Tabla 3.2 Diferencias porcentuales de la deflexión registrada en el extremo derecho de cada módulo

Descripción	v_optimo [mm]	Difer % Opt	V_actual [mm]	Difer. % Act
Quilla	5,91	17,16	6,42	27,21
Eslora	7,93	57,06	6,20	22,90
China	6,95	37,68	6,51	28,93
Costado 1/2	6,45	27,72	6,90	36,75
Costado	7,09	40,51	6,84	35,43

3.1.1.1 Análisis del módulo de proa optimizado

Para evaluar la integridad estructural de los módulos se tomaron en consideración dos aspectos: la rigidez y la resistencia de la estructura. En el caso de la rigidez se registró la deflexión en cortes longitudinales y transversales (desde quilla) a lo largo del modelo, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.3 y Figura 3.4.

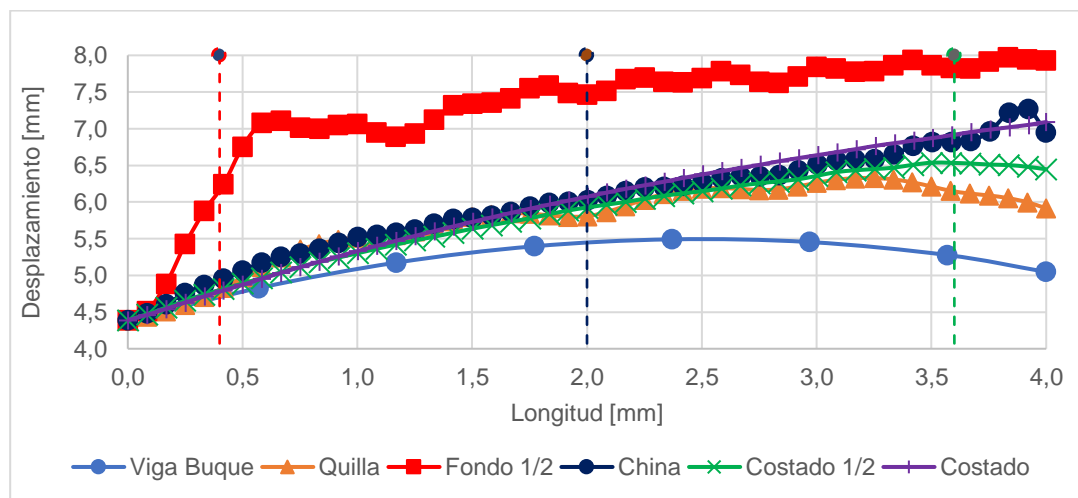


Figura 3.3 Deflexión a lo largo de cortes longitudinales del modelo optimizado

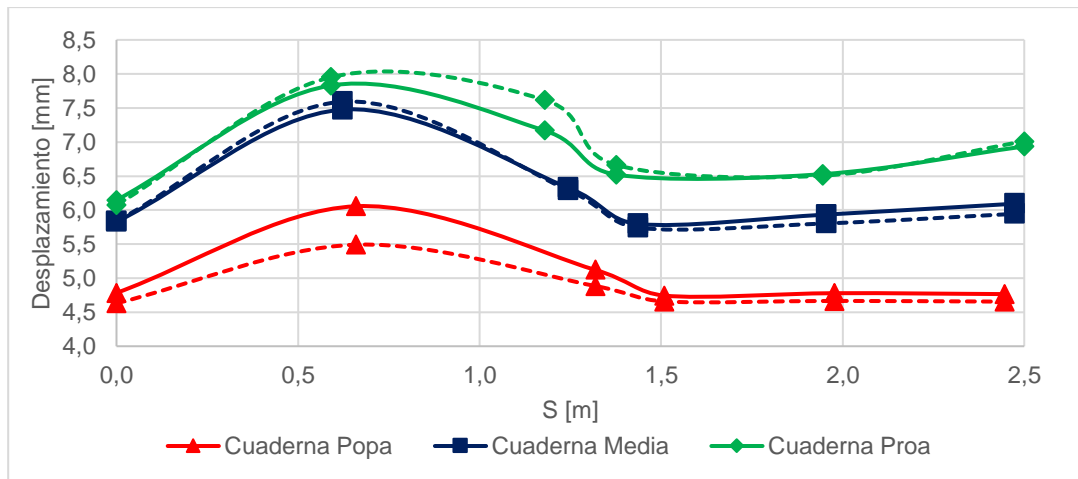


Figura 3.4 Deflexión a lo largo de cortes transversales del modelo optimizado

En base a los resultados presentados en las Figura 3.3 y Figura 3.4 se observa que hay una deficiencia en la rigidez transversal en el centro de la plancha del fondo, ya que en este punto se producen los mayores desplazamientos en el modelo. Este comportamiento del fondo también llega a afectar al comportamiento de la china en las cuadernas (líneas continuas) y en las planchas (línea entrecortada) como se observa en la Figura 3.4. En cambio, el punto inicial (quilla) y final (costado) de los cortes trasversales tienen un desplazamiento similar dejando la responsabilidad de la deficiencia de rigidez trasversal a la plancha del fondo. Esto es apoyado por los resultados obtenidos en la Figura 3.3 puesto que a excepción de la curva en la mitad de la plancha del fondo (roja) todas las demás están muy cerca una a la otra, indicando una continuidad entre los desplazamientos.

Con respecto a la resistencia de la estructura se registraron los valores de esfuerzos en el centro de la plancha de fondo en sección media, comparando los valores registrados con el esfuerzo de diseño permisible dado por ISO 12215 que se muestra en la Figura 3.5:

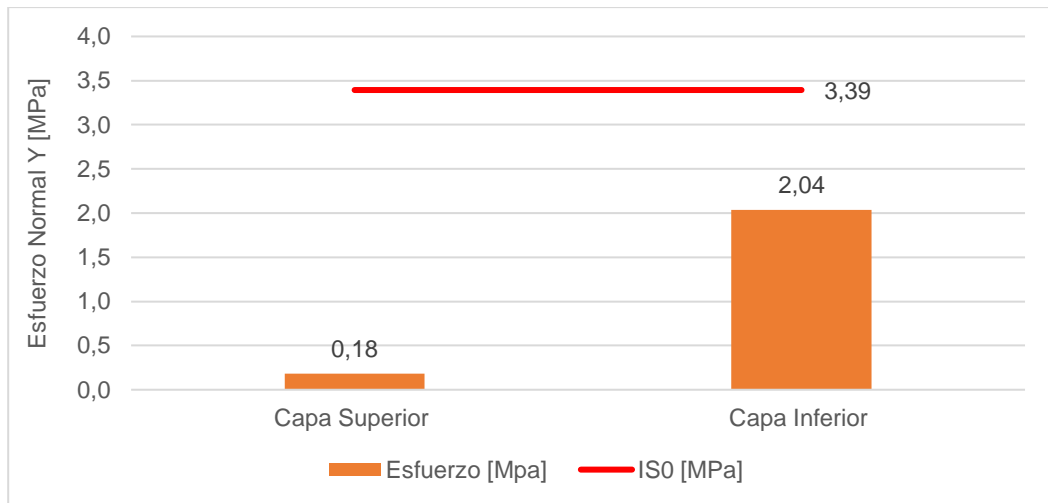


Figura 3.5 Esfuerzo normal en la plancha del fondo del modelo optimizado

Obteniendo como resultado en el caso optimizado un factor de seguridad 1,32 en la capa inferior con respecto al esfuerzo permisible por ISO de 3,39 MPa; en la capa superior el factor de seguridad llega a 8,9 al tener un esfuerzo muy bajo. Esto se explica por lo que se observa en la Figura 3.6 ya que ambas capas se encuentran en compresión debido a los elevados desplazamientos registrados en esta zona. Debido a esto no sigue el comportamiento esperado mostrado en el APÉNDICE Adonde el esfuerzo es nulo en el eje neutro del laminado, en cambio en este caso solo nos acercamos a cero en la capa superior.

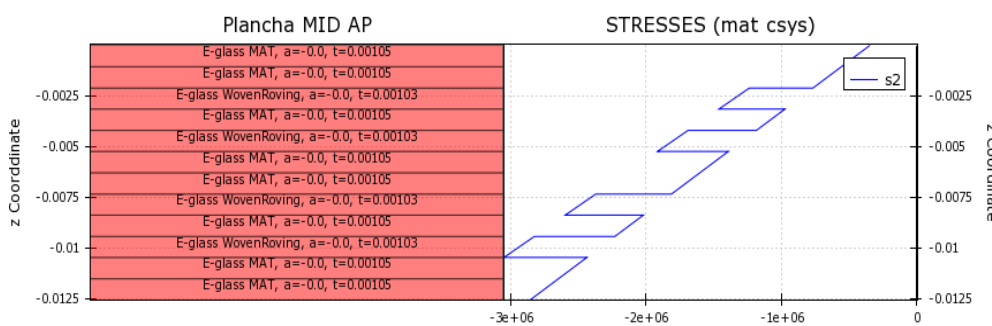


Figura 3.6 Esfuerzo en el laminado del fondo del modelo optimizado

Además, se registró en la mitad de la plancha un momento flector de $2,10E4$ N mm y una deflexión de 1,78 mm con respecto a la quilla que tenía un desplazamiento 5,83 mm. Usando las ecuaciones dadas por ISO 12215 se obtiene que el momento debería ser $3,56E4$ N mm registrándose un valor menor; pero se encuentran en el

mismo orden de magnitud teniendo esta diferencia ya que la plancha en el modelo no está exactamente empotrada.

3.1.1.2 Análisis del módulo de proa actual

De igual forma que en el módulo optimizado se analiza la rigidez y la resistencia en el módulo estructural actual. En el caso de la rigidez se realizaron cortes transversales y longitudinales en el modelo mostrando los resultados obtenidos en las Figura 3.7 y Figura 3.8.

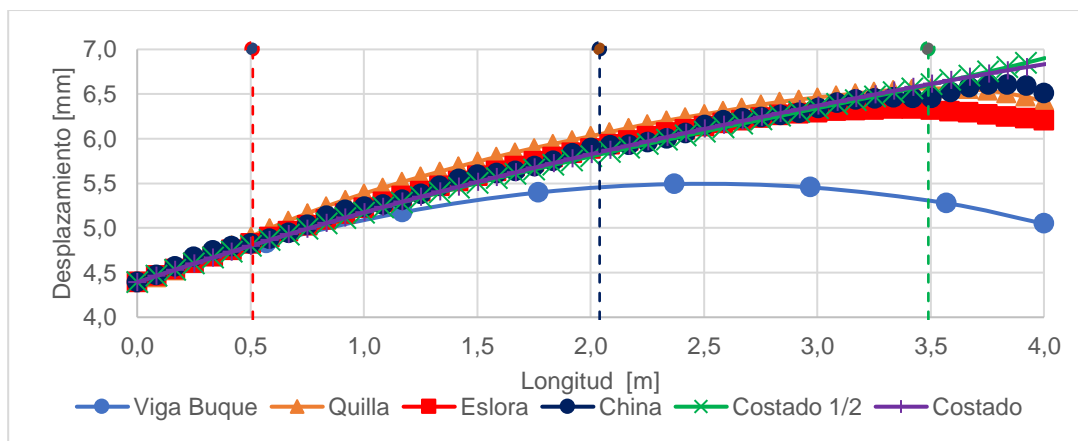


Figura 3.7 Deflexión a lo largo de cortes longitudinales del modelo actual

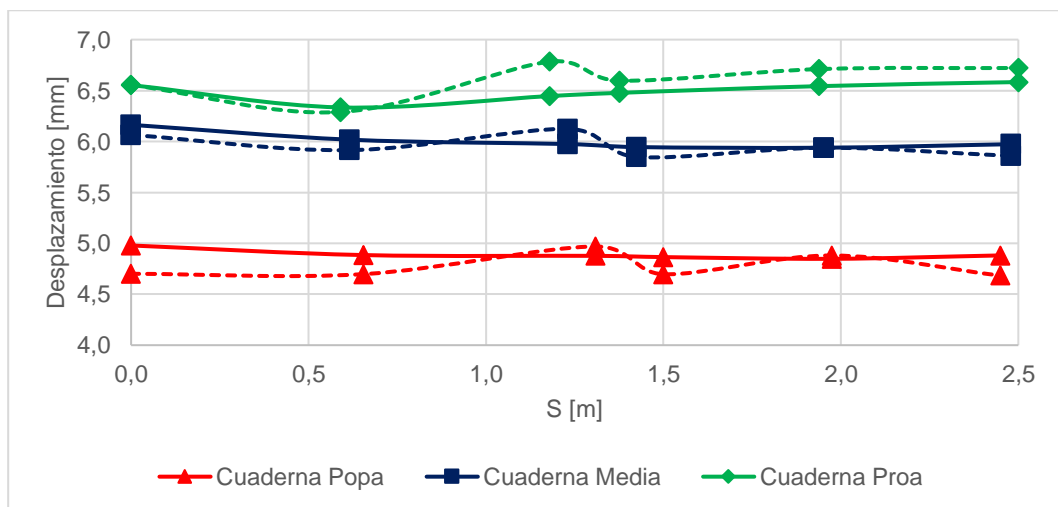


Figura 3.8 Deflexión a lo largo de cortes transversales del modelo actual

En el módulo actual se obtienen desplazamientos menores a los registrados en el módulo optimizado y eso se debe a la rigidez flexural (EI) de ambos modelos. En el

caso del optimizado su modelo no cuenta con elementos longitudinales a diferencia del caso actual, y debido a esto el valor del parámetro EI se ve reducido dando lugar a un aumento de la deflexión en la estructura. Además, el caso actual presenta una mejor rigidez transversal como se muestra en la Figura 3.8 donde el desplazamiento a lo largo de la distancia transversal es muy uniforme, presentando solo variaciones en las planchas. Esto se ve reforzado por la Figura 3.7 ya que las curvas están muy cerca una de la otra indicando desplazamientos similares, pero estas se separan en el extremo derecho debido al momento aplicado.

Con respecto a la resistencia se registraron los valores de esfuerzo normal en la mitad de la plancha de sección media que va desde la eslora hasta la china. En la Figura 3.9 se comparan estos valores con el esfuerzo permisible dado por la norma ISO.

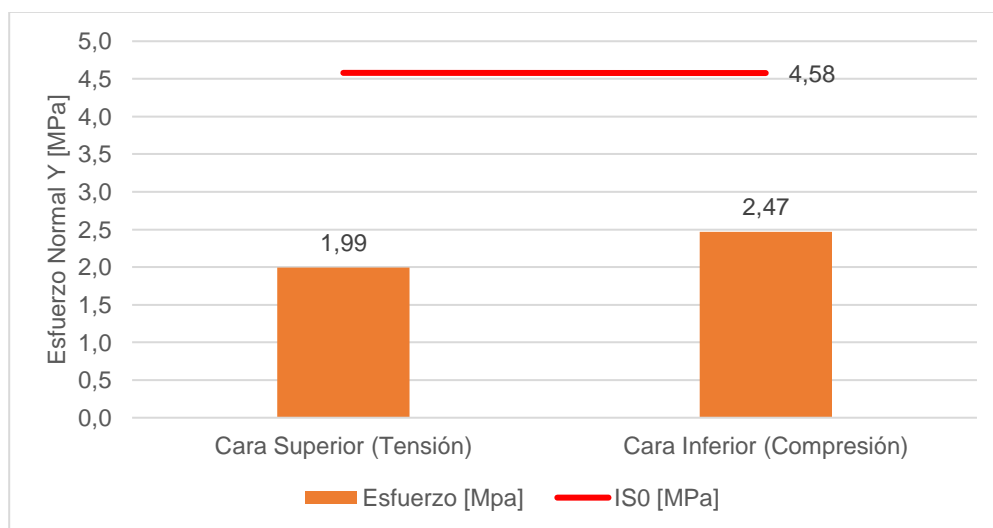


Figura 3.9 Esfuerzo normal en la plancha del fondo del modelo actual

En este caso los esfuerzos registrados también se encuentran por debajo del permisible, llegando a tener un factor de seguridad de 2,30 en la capa superior, valor superior al factor de seguridad en la capa inferior del modelo optimizado. Sin embargo, en ese caso si se presenta el comportamiento flexural mostrado en el APÉNDICE A, teniendo un esfuerzo nulo por el plano medio del laminado. Debido a esto en el laminado se presentan capas en tensión y compresión como se muestra en la Figura 3.10.

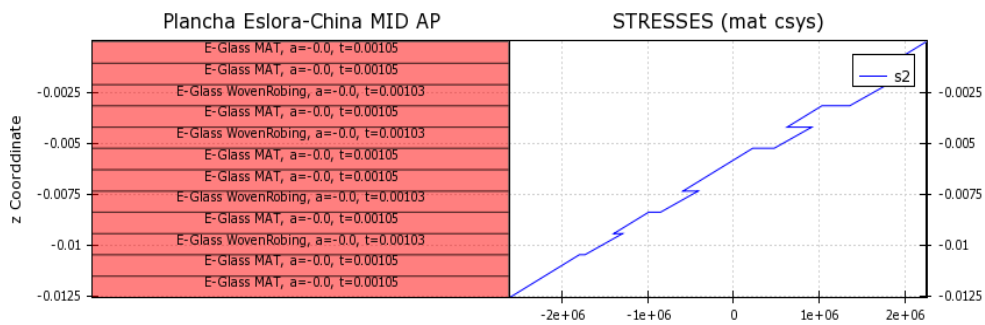


Figura 3.10 Esfuerzo en el laminado del fondo del modelo actual

Aparte se registró un momento de $3,77E4$ Nmm en la mitad de la plancha estando en el mismo orden que el momento dado por ISO de $6,12E4$ Nmm. Además, se registró una deflexión de $1,01$ mm con respecto a la quilla estando en el mismo orden de magnitud que la deflexión obtenida por formulaciones de viga que fue de $1,86$ mm.

3.2 Módulo de popa

3.2.1 Repuesta estructural del módulo de popa

Aplicando las cargas y condiciones de fronteras definidas en el capítulo 2, en el módulo estructural de popa se procedió a realizar el análisis con el MEF empleando el módulo de ACP de ANSYS.

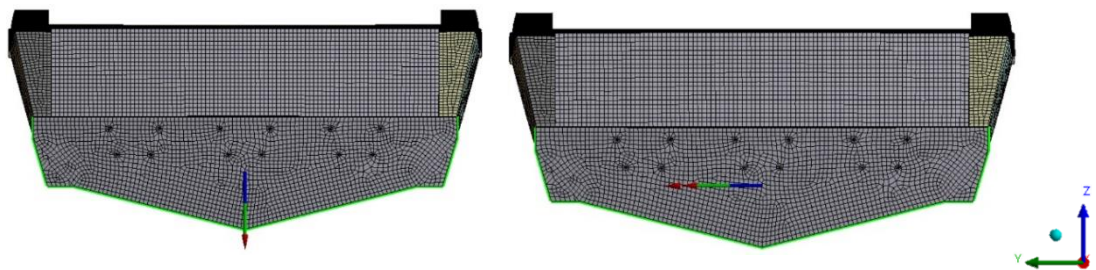


Figura 3.11 Reacciones en el espejo

En el espejo, donde se aplicó condiciones de frontera geométricas (pendiente y deflexión), se obtuvo una fuerza de reacción vertical de $-5,32$ kN y un momento de reacción en dirección y de $5,75$ kN-m. Estos valores deberían ser nulos, de acuerdo al tipo de extremo del casco considerado como una viga. La fuerza vertical

corresponde al 25% del valor máximo desarrollado a lo largo de la embarcación mientras que el momento flector está a 10% del valor máximo desarrollado.

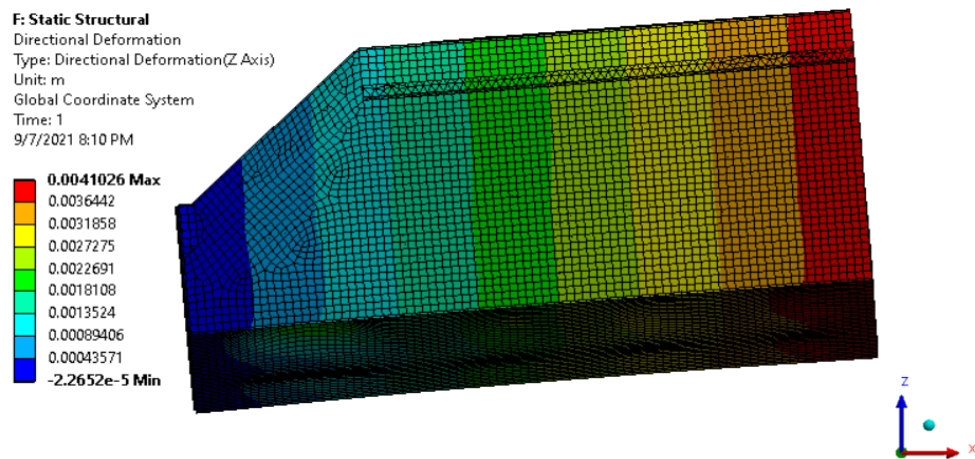


Figura 3.12 Desplazamiento vertical del módulo de popa

En cambio, en el corte de la cuaderna cuatro, donde se aplicaron condiciones de frontera naturales (fuerza cortante y momento flector), se obtuvo una deflexión hacia arriba de 4,10 mm. De acuerdo con la Tabla 2.6, dicho valor debía ser 3,25 mm siguiendo el modelo de viga buque. Con estos valores se comprobó el equilibrio dinámico en el módulo de popa analizado.

3.2.2 Rigidez estructural del módulo de popa

Para el análisis del módulo de popa fue interesante observar la reacción al aplicar el empuje generado por los propulsores durante la navegación. Entonces primero se procedió a comprobar el valor de la deformación vertical de dos zonas longitudinales como se muestra a continuación, considerando la influencia de la fuerza axial, el empuje:

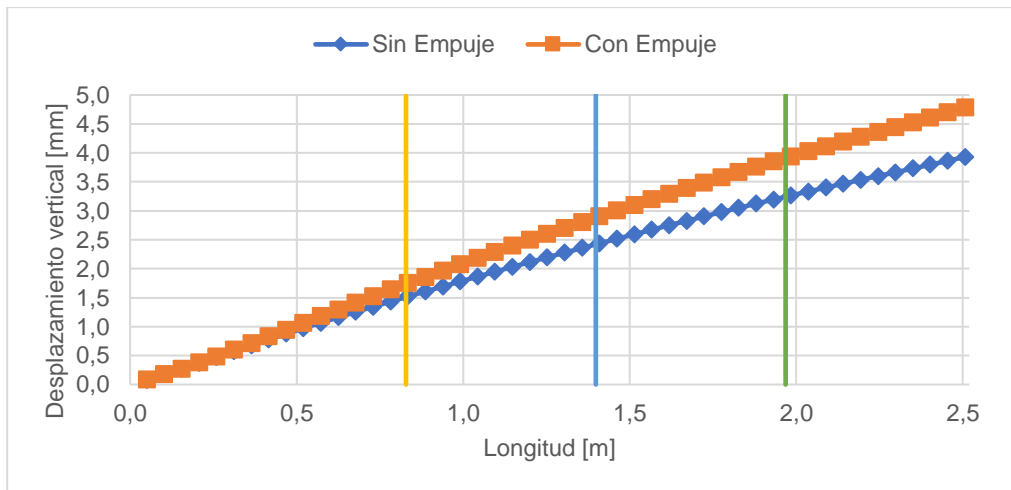


Figura 3.13 Deflexión de la quilla del módulo de popa

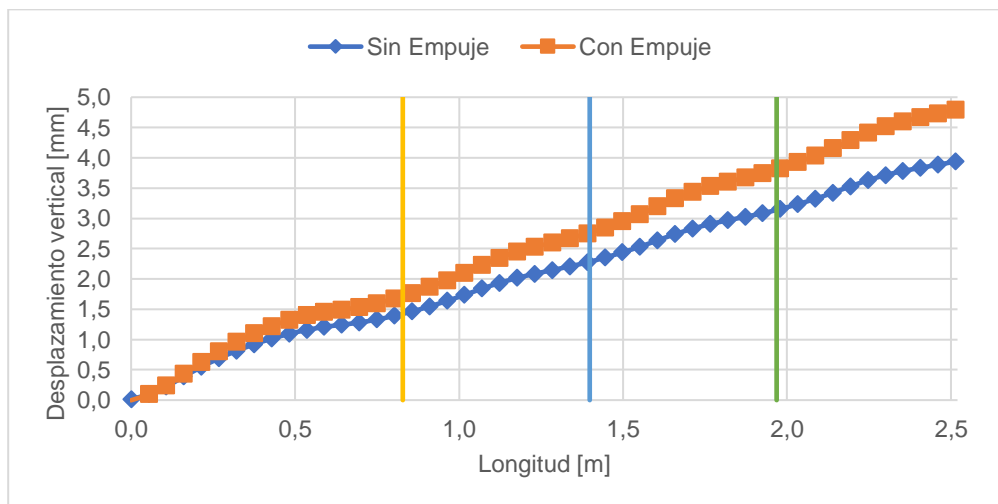


Figura 3.14 Deflexión de la china del módulo de popa

El comportamiento de la deformación longitudinal al aplicar empuje se mantuvo, según las Figura 3.13 y Figura 3.14. La mayor diferencia se presentó en la cuaderna 4 teniendo como diferencia de 0,78 mm, entre el desplazamiento con la aplicación del empuje y sin la aplicación de esta fuerza. Como se puede observar el nuevo desplazamiento del módulo con la aplicación del empuje en la siguiente figura:

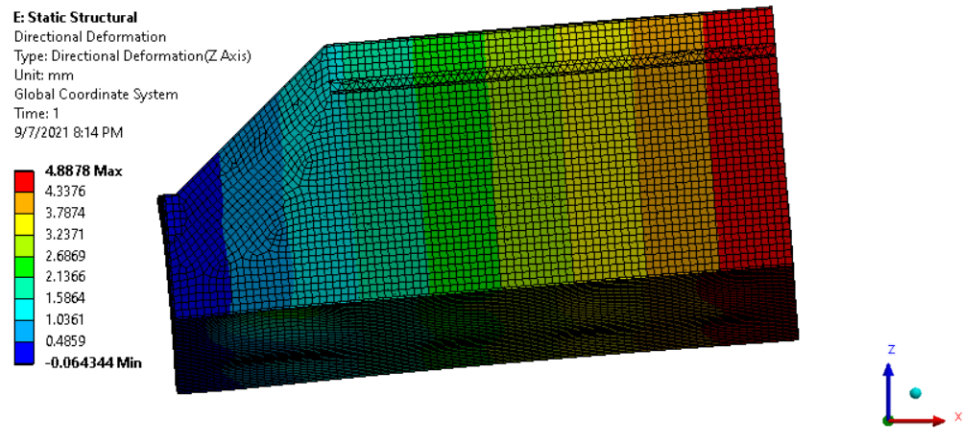


Figura 3.15 Desplazamiento vertical del módulo de popa aplicando empuje

Con esa pequeña diferencia de desplazamiento vertical, se procedió el análisis incluyendo la aplicación del empuje y momento-y equivalente, en el espejo de la embarcación. Se analizó la rigidez estructural de forma longitudinal y transversal, como se muestra a continuación:

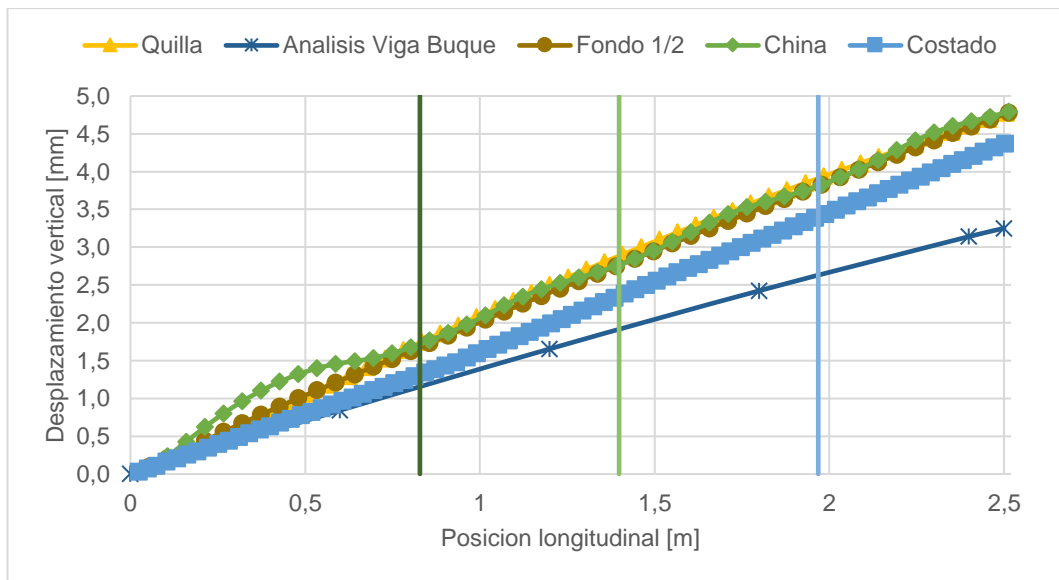


Figura 3.16 Desplazamiento de elementos longitudinales del módulo de popa

En la Figura 3.16 se observa que la rigidez longitudinal del módulo se mantuvo, ya que en las secciones analizadas tienen un comportamiento similar al desplazamiento vertical del modelo viga buque.

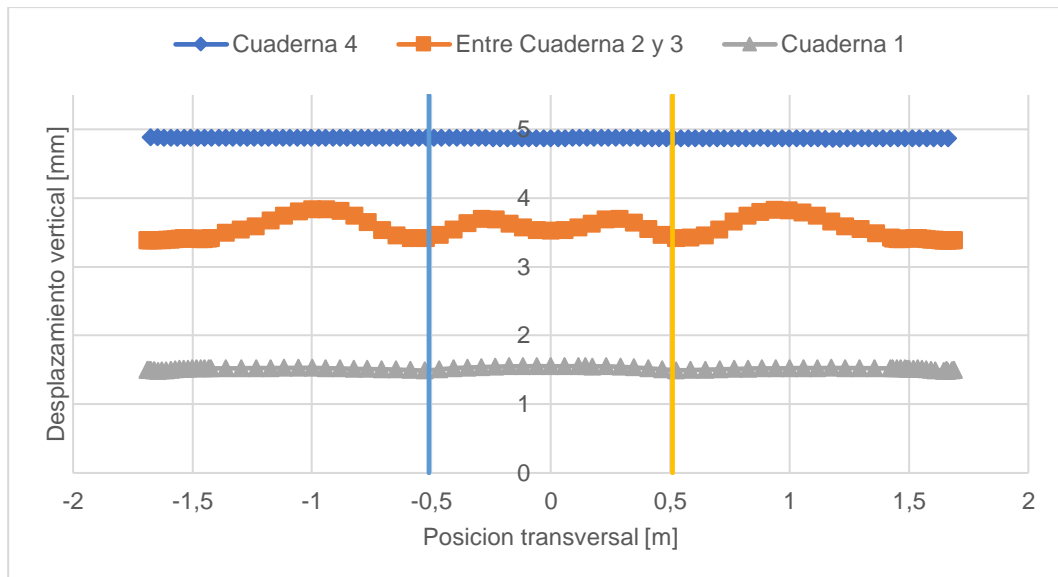


Figura 3.17 Desplazamiento siguiendo posición transversal del casco del módulo de popa

En la Figura 3.17, se presenta la deflexión del casco de la embarcación (fondo y costado) en dirección transversal. Se analizaron dos cuadernas y una zona de plancha entre cuadernas, observándose que la rigidez transversal se mantiene constante en la zona de refuerzos y en la plancha tiene una deformación mayor entre la china y el refuerzo longitudinal.

3.2.3 Esfuerzo desarrollado en los agujeros del soporte de los motores

Se obtuvo la variación de esfuerzos en los agujeros de los soportes de los motores, observándose que el valor máximo se generó en los agujeros del motor central, en la parte inferior. También se obtuvo la variación de esfuerzos en el núcleo de madera y en las capas del laminado exterior, zona donde se presentó mayor esfuerzo.

El esfuerzo obtenido en el núcleo de madera tuvo una variación lineal, Figura 3.18, con la parte interior sometida a esfuerzos de tensión y la parte exterior a esfuerzos de compresión:

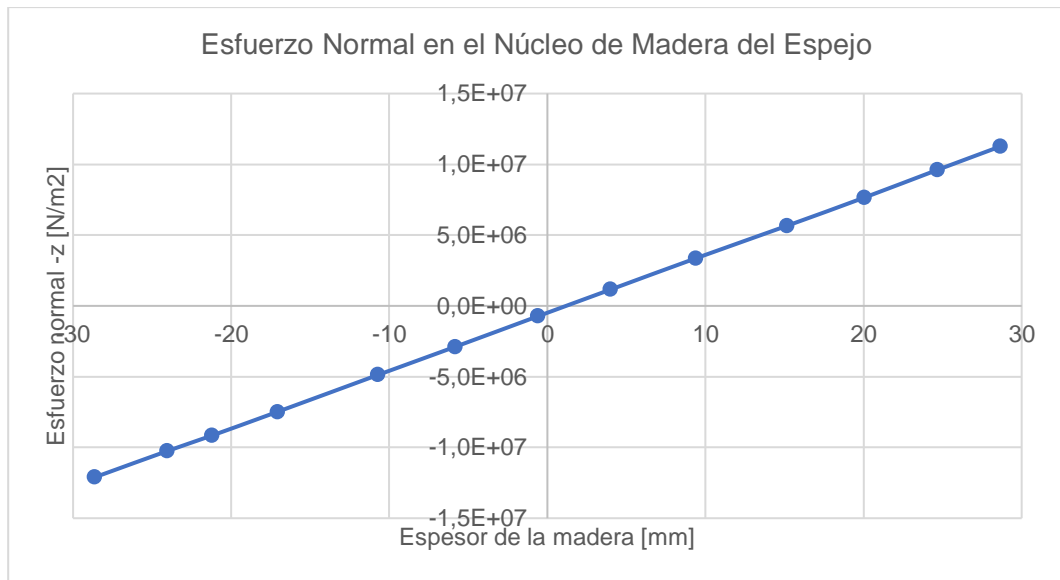


Figura 3.18 Esfuerzo normal desarrollado en el agujero del núcleo de madera

El esfuerzo permisible obtenido mediante formulaciones de la regla ISO 12215-5 es de 48 MPa, comparado con el máximo desarrollado en los análisis mediante elementos finitos cuyo valor es de 11,26 MPa esfuerzo desarrollado en tensión y 12,11 MPa esfuerzo desarrollado en compresión, se obtiene que la embarcación actual tiene un factor de seguridad máximo de 3,94. Tal como se observa en la siguiente figura:

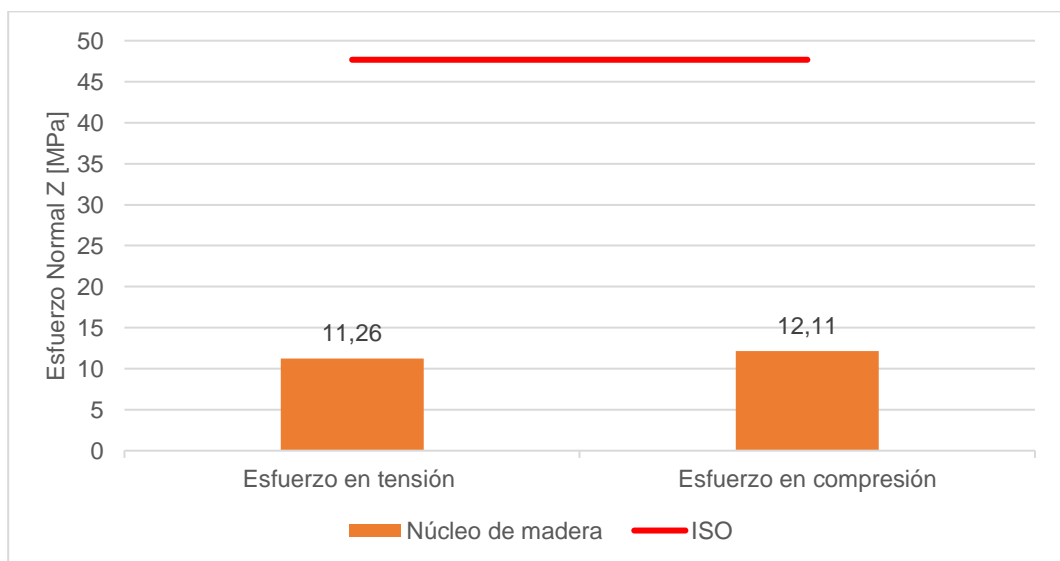


Figura 3.19 Comparación de esfuerzos máximos desarrollados en el agujero del espejo

Con respecto al análisis de las capas de laminado alrededor de los agujeros, el esfuerzo máximo se desarrolló en la parte exterior del agujero inferior de 5 MPa esfuerzo desarrollado en compresión. Obteniendo la variación del esfuerzo entre capas de laminado, observando un comportamiento similar al análisis realizado en el APÉNDICE B, tal como se observa en la siguiente figura:

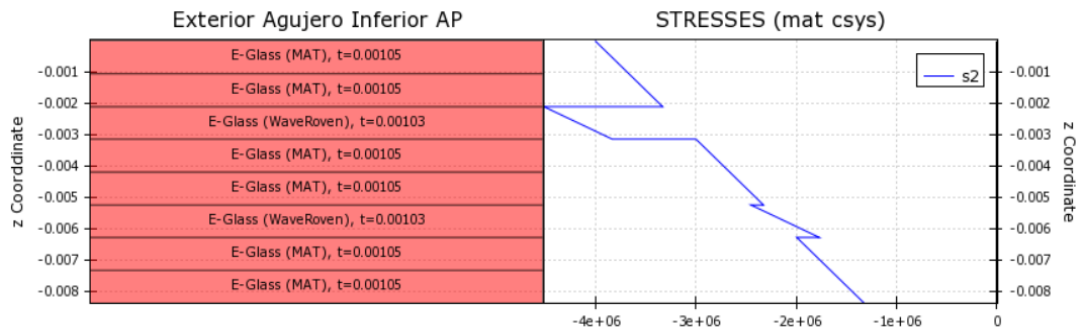


Figura 3.20 Esfuerzo interlaminar desarrollado en la parte exterior del agujero

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto se aplicó un análisis estructural modular usando el MEF para calcular la respuesta estructural en zonas de interés de una lancha planeadora. Al validarse este análisis representaría un gran beneficio a nivel práctico ya que requeriría menor tiempo de cómputo al modelar un segmento de la estructura con condiciones de frontera adecuadas. Además, con los resultados del análisis estructural podría comprobarse el sobredimensionamiento de la estructura y se podría reducir los costos de fabricación de la lancha, junto disminución del consumo de combustible. En este proyecto se llegan a las siguientes conclusiones:

4.1 Conclusiones

Es factible aplicar el análisis estructural modular para calcular la respuesta estructural de la embarcación, combinado con un análisis primario del casco como viga de sección variable. Esta afirmación se sustenta en el hecho que se registraron valores de deflexión en el límite derecho de ambos módulos con un orden de magnitud igual al del valor esperado. Además, los valores de fuerza cortante y momento flector registrados en el extremo izquierdo en el caso del módulo de proa tienen diferencias aceptables respecto del modelo viga-buque. No obstante, hay que considerar que se está pasando de un problema unidimensional a uno tridimensional, por lo que puede esperarse que los resultados registrados no se puedan comparar directamente.

Los niveles de esfuerzo resultantes muestran que los módulos de popa y de proa de la lancha analizada se encuentran sobredimensionados, comparados con los niveles permisibles especificados por la norma ISO. En ambos módulos estructurales se obtuvieron factores de seguridad de 2,30 en el módulo de proa actual y de 3,94 en el módulo de popa. Considerando que las normas de diseño incluyen un factor de seguridad se considera que se podría reducir el laminado del casco, con la consiguiente reducción del costo de construcción.

El módulo estructural de proa optimizado presenta una deficiencia en rigidez transversal, ya que se registran valores elevados de deflexión en el centro de la plancha del fondo. Debido a esto es necesario incorporar un refuerzo longitudinal que conecte la cubierta con el fondo de la embarcación, ya que esto reduciría el desplazamiento registrado mejorando su rigidez.

4.2 Recomendaciones

Aunque el análisis estructural permite identificar sobredimensionamiento en la estructura, es necesario brindar una solución a dicho problema dando información con respecto a las dimensiones estructurales adecuadas. Tomando lo antes expuesto como un punto de partida se recomienda unificar el proceso de optimización que fue analizado junto con el análisis global simplificado. De esta forma se podrá determinar el balance dinámico de la embarcación junto con las condiciones de frontera que deberán ser transferidas al proceso de optimización pudiéndose brindar una solución al problema en cuestión.

Partiendo de los resultados obtenido en el análisis estructural del soporte de los motores fueraborda, se recomienda aplicar un análisis de vibraciones generado por lo motores en operación. Mediante estos dos procesos de análisis, se puede complementar si es posible reducir las dimensiones de los elementos de la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- American Bureau of Shipping. (2018). *Structural Direct Analysis for High-Speed Craft*. Houston.
- Barbero, E. J. (2011). *Introduction to composite material design*. CRC Press.
- Gürdal, Z., Haftka, R. T., & Hajela, P. (1999). *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*. Wiley-Interscience.
- Heller, S. R., & Jasper, N. H. (1960). On the Structural Design of Planing Craft. *Transactions of the Royal Institution of naval Architect*.
- Hughes, O., & Paik, J. (2010). *Ship Structural Analysis and Design*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- International Organization for Standardization. (2008). Small Craft Hull Construction and Scantlings 12215-5. *Part 5: Design pressures for monohulls design stresses, scantlings determination*.
- Lamb, T. (2003). *Ship Design and Construction Volume 1*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Lewandowski, E. (2004). *The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping*. Washington DC: World Scientific .
- Mendoza, J. I., & Vasquez, E. K. (2020). *Pruebas de Mar de Lanchas Interislas de Galápagos*. Guayaquil: SiMar Lab.
- Observatorio de Turismo de Galápagos. (2019). *Estadísticas del turismo en Galápagos 2018*. Galápagos-Ecuador: Ministerio de Turismo del Ecuador. Obtenido de Observatorio de Turismo de Galápagos.
- Onofre, M., & Venegas, C. (2020). *Optimización Estructural Basada En Las Normas ISO 12215 De Una Embarcacion Menor De Alta Velocidad Construida con PRFV*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Popov, E. (1982). *Introducción a la mecánica de sólidos*. México: Editorial Limusa S.A.
- Villamarin, E. (2020). *Propuesta de mejora de comportamiento dinámico de lanchas interislas de Galápagos orientado al confort de pasajeros*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Yasuhisa, O., Yu, T., & Masaki, M. (2009). *Design of Ship Hull Structure: A Practical Guide for Engineers*. Berlin: Springer.

APÉNDICES

APÉNDICE A

ANÁLISIS DE PLANCHAS COMPUESTAS

Las planchas de materiales compuestos solo pueden soportar dos tipos de carga que son: el esfuerzo plano y la flexión; pero se deben considerar ambas cargas al analizar la plancha ya que se encuentran relacionadas por la matriz de acoplamiento [B].

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. A.1}$$

Sin embargo, en el caso que se trabaje con un laminado simétrico la matriz [B] es nula permitiendo analizar la flexión de la plancha por separado.

El laminado presente en el fondo de la lancha A tiene una secuencia de $\left[\frac{CSM_2}{(WR/CSM)_2} \right]_S$ siendo un laminado simétrico como se presenta en la Tabla A.1. Además, el laminado cuenta con un total de 12 capas con un espesor total de 12,53 mm al ser una combinación de telas MAT y Woven Roving cuyas propiedades mecánicas se presentan en la Tabla A.2.

Tabla A.1 Secuencia de Laminado

Número de Capa	Material	Espesor [mm]
1	MAT	1,05
2	MAT	1,05
3	Woven Roving	1,03
4	MAT	1,05
5	Woven Roving	1,03
6	MAT	1,05
7	MAT	1,05
8	Woven Roving	1,03
9	MAT	1,05
10	Woven Roving	1,03
11	MAT	1,05
12	MAT	1,05

Tabla A.2 Propiedades Mecánicas de la fibra de vidrio

Material	MAT	Woven Roving
E11 [Pa]	6,4E+9	1,32E+10
E22 [Pa]	6,4E+9	1,32E+10
V12	0,40	0,12
G12	2,75E+9	3,06E+9
V21	0,40	0,12

Flexión de plancha:

Para el análisis de flexión de plancha se asumió un momento flector x de $9,89E+2$ N mm/mm aplicado en el fondo de la embarcación, obteniendo resultados de la deformación y curvatura en el plano medio del laminado para diferentes ángulos de orientación:

Tabla A.3 Matriz ABD para ángulo de orientación de 0 y 90 grados

1,19E8	3,22E7	0,00	0,00	0,00	0,00
3,22E7	1,19E8	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	3,57E7	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	1,44E3	4,51E2	0,00
0,00	0,00	0,00	4,51E2	1,44E3	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,50E2

Tabla A.4 Deformación y curvatura en el eje neutro

	0 y 90 grados	45 grados
ϵ_{m_x}	0,00	0,00
ϵ_{m_y}	0,00	0,00
$\gamma_{m_{xy}}$	0,00	0,00
k_x	0,76	0,80
k_y	-0,24	-0,28
k_{xy}	0,00	0,00

Dando como resultado una [B] nula demostrando que en el caso de laminado simétricos el esfuerzo plano y la flexión se encuentran desacopladas. Además, al considerar solo flexión de planchas la deformación registrada en el plano medio del laminado es nulo sin

importar el ángulo de orientación. Con respecto a la curvatura esta varía de cero y va aumentando conforme nos vamos acercando a los 45 grados.

Por otra parte, la deformación normal x tiene una distribución lineal a lo largo del espesor de la plancha sin importar la orientación de las fibras teniendo a 45 grados la pendiente máxima en comparación a la pendiente registrada para 0 y 90 grados. Además, al no presentarse saltos en la distribución de deformación entre una capa y otra se tiene continuidad. Por ende, se está respetando la asunción de que todas las capas se encuentran perfectamente unidas.

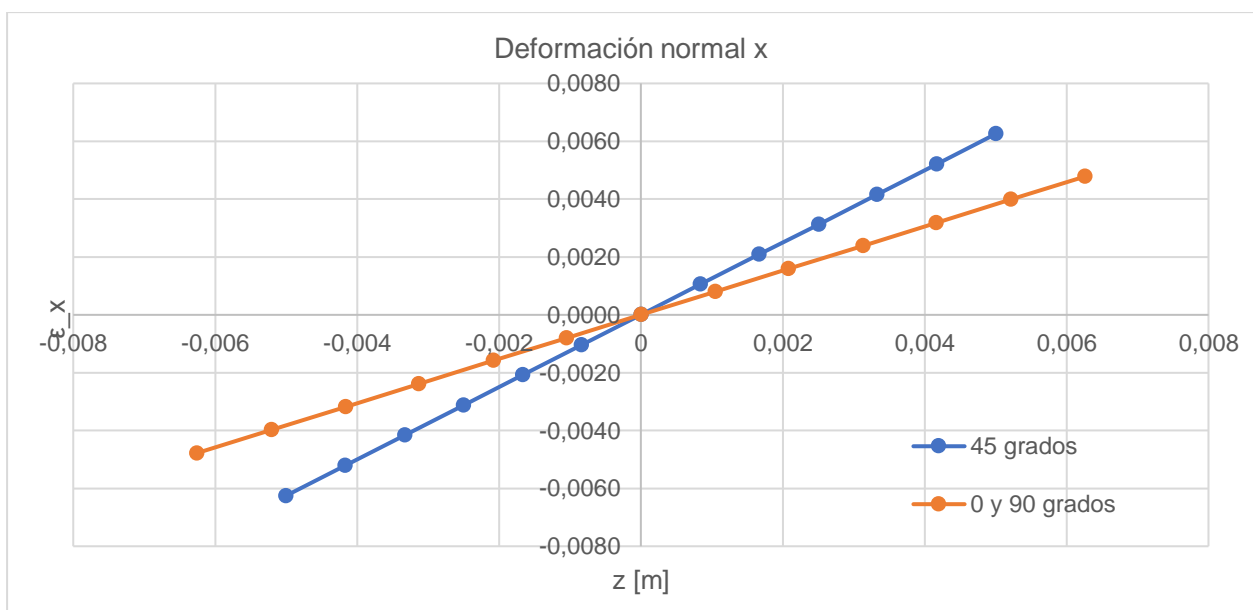


Figura A.1 Deformación normal x para diferentes ángulos de orientación

En la Figura A.2 se presentan los resultados del esfuerzo interlaminar a lo largo del espesor observándose que el esfuerzo varía entre la cara superior e inferior de una misma capa siguiendo un comportamiento lineal. Este comportamiento lineal se mantiene constante entre una capa y otra cuando son del mismo material, pero en caso de que sean diferentes se presentan saltos. Además, el esfuerzo presente en el plano medio es nulo siendo el punto de referencia entre los esfuerzos de compresión (abajo del plano medio) y tensión (arriba del plano medio) dentro del laminado. Con respecto a la influencia de la orientación del laminado al aumentar el ángulo se obtiene que en el caso de las telas Mat aumenta el esfuerzo y en las telas Woven Roving disminuye.

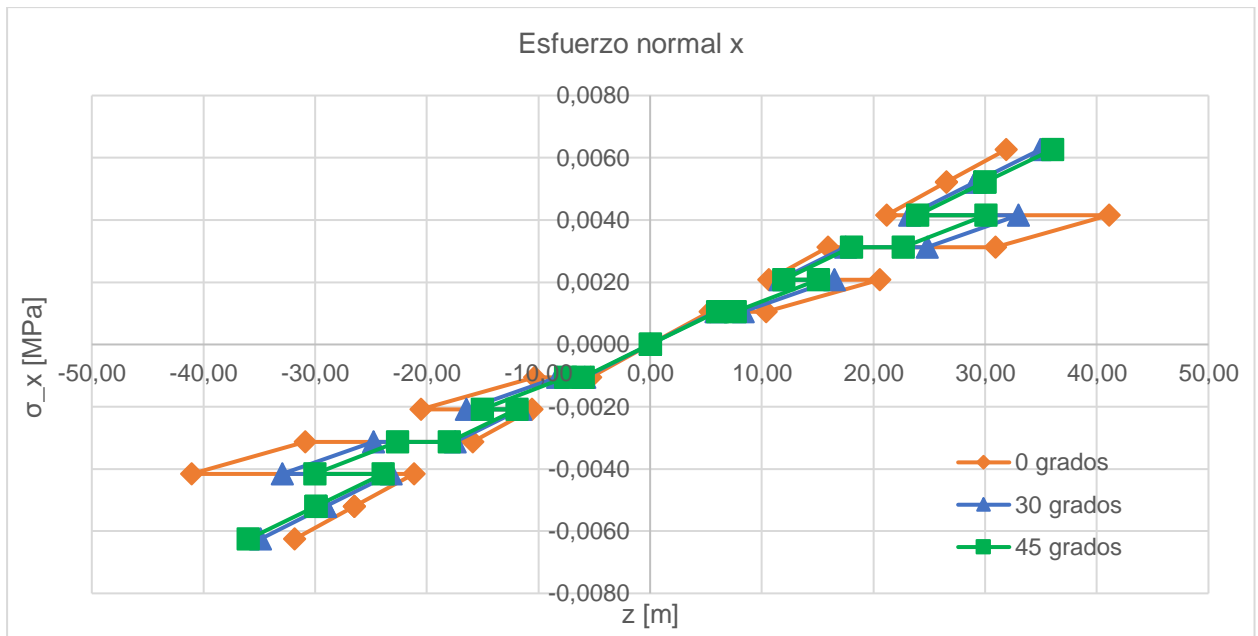


Figura A.2 Esfuerzo Normal x para diferentes ángulos de orientación

APÉNDICE B

ANÁLISIS DEL ESPEJO DE LA EMBARCACION

El espejo de una embarcación rápida debe estar diseñada para soportar el peso de dos o más motores fueraborda, por lo que toda la sección del espejo tiende a aplicar lo que se denomina Sándwich Laminado, compuesto por un núcleo de madera forrado con láminas de fibra de vidrio, como se observa en la siguiente figura.

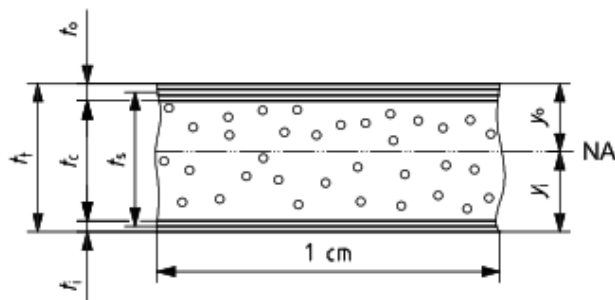


Figura B.1 Esquema del Sándwich Laminado.

Fuente: ISO 12215-5 ANEXO A.

Para este ejemplo se escogió un laminado complejo en exterior combinación de 8 telas MAT y 4 telas de Woven Roving, en interior se escogió una secuencia de tela MAT y el núcleo de madera es de Chanul, con las características, propiedades y ubicación como lo indica la Tabla B.1

Tabla B.1 Secuencia de Laminado

Ubicación	Elemento	Espesor h [mm]	Ancho b [mm]	Modulo E [N/mm ²]
Exterior	MAT	0.70	245.47	6400
2	MAT	0.70	245.47	6400
3	WR	0.78	245.47	13240
4	MAT	0.70	245.47	6400
5	WR	0.78	245.47	13240
6	MAT	0.70	245.47	6400
7	MAT	0.70	245.47	6400
8	WR	0.78	245.47	13240
9	MAT	0.70	245.47	6400
10	WR	0.78	245.47	13240
11	MAT	0.70	245.47	6400
12	MAT	0.70	245.47	6400

Ubicación	Elemento	Espesor h [mm]	Ancho b [mm]	Modulo E [N/mm2]
Madera	Chanul	210.29	71.30	17240
5	MAT	0.70	71.30	6400
4	MAT	0.70	71.30	6400
3	MAT	0.70	71.30	6400
2	MAT	0.70	71.30	6400
Interior	MAT	0.70	71.30	6400

Siguiendo el ejemplo presentado en el Anexo H de ISO 12215-5, acerca de un análisis de esfuerzos de cada lamina de un refuerzo tipo sombrero como un sándwich laminado, realizamos el análisis del espejo de la embarcación, sometido a la presión del fondo de la embarcación en modo de planeo presentada por ISO, mediante las siguiente formula:

$$P_{BMP} = P_{BMP\ BASE} * k_{AR} * k_L \left[\frac{kN}{m^2} \right]$$

Donde $P_{BMP\ BASE} = \frac{0.1 * m_{LDC}}{L_{WL} * B_C} * (1 + k_{DC}^{0.5} * n_{CG}) \left[\frac{kN}{m^2} \right]$, donde m_{LDC} es la masa de la embarcaion, L_{WL} es la eslora de línea de agua, B_C es manga de la china, $P_{BMP\ BASE}$ es la presión base de fondo para lanchas a motor fueraborda en modo de planeo en kN/m^2 y los factores k's son adimensionales.

De donde P_{BMP} tiene un valor de $23.83 \left[\frac{kN}{m^2} \right]$, se la ditribuye a una distancia de 1,5 m, obtenido la presion de diseno de una viga, y procedemos con el calculo del esfuerzo en cada capa de la seccion a analizar.

Tabla B.2 Desarrollo para el cálculo de esfuerzo y deformación en capas de una sección de Sándwich laminado

0	1	2	3	4	5 = 2*3	6 = 4*5	7
Ubicación	Elemento	Espesor h [mm]	Ancho b [mm]	Modulo E [N/mm2]	Área A=b*h [mm2]	E*A [N]	Distancia Centro zgi [mm]
Exterior	MAT	0.700	245.70	6400	171.99	1.10E+06	0.35
2	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	1.05
3	WR	0.776	245.70	13240	190.67	2.52E+06	1.79
4	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	2.53
5	WR	0.776	245.70	13240	190.67	2.52E+06	3.27

0	1	2	3	4	5 = 2*3	6 = 4*5	7
Ubicación	Elemento	Espesor h [mm]	Ancho b [mm]	Modulo E [N/mm2]	Área A=b*h [mm2]	E*A [N]	Distancia Centro zgi [mm]
6	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	4.01
7	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	4.71
8	WR	0.776	245.70	13240	190.67	2.52E+06	5.45
9	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	6.19
10	WR	0.776	245.70	13240	190.67	2.52E+06	6.93
11	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	7.67
Interior	MAT	0.701	245.70	6400	172.12	1.10E+06	8.37
Madera	Chanul	210.290	71.30	17240	14993.68	2.58E+08	113.87
5	MAT	1.401	71.30	6400	99.89	6.39E+05	219.71
4	MAT	1.401	71.30	6400	99.89	6.39E+05	221.11
3	MAT	1.401	71.30	6400	99.89	6.39E+05	222.52
2	MAT	1.401	71.30	6400	99.89	6.39E+05	223.92
Exterior	MAT	1.401	71.30	6400	99.89	6.39E+05	225.32
8 = 6*7	9 = 7*8	10 = 3*4*(2^3)/12	11 = 9+10	12	13	14	15
E*A*zgi [N-mm]	E*A*zgi2 [Nmm2]	E*b*h3/12 [Nmm2]	Alrededor de la base (EI)i [Nmm2]	Z crit desde NA [mm]	Modulo Seccional Smi [cm3]	Esfuerzo directo σi [N/mm2]	μE
3.86E+05	1.36E+05	4.49E+04	1.81E+05	-1.07E+02	-1756.46	-27.14	2.768E-14
1.16E+06	1.22E+06	4.50E+04	1.26E+06	-1.07E+02	-1768.01	-26.96	5.539E-14
4.52E+06	8.10E+06	1.27E+05	8.23E+06	-1.06E+02	-860.59	-55.39	8.608E-14
2.79E+06	7.06E+06	4.50E+04	7.10E+06	-1.05E+02	-1792.86	-26.59	1.138E-13
8.26E+06	2.70E+07	1.27E+05	2.71E+07	-1.04E+02	-872.78	-54.61	1.445E-13
4.42E+06	1.77E+07	4.50E+04	1.78E+07	-1.04E+02	-1818.43	-26.21	1.722E-13
5.19E+06	2.44E+07	4.50E+04	2.45E+07	-1.03E+02	-1830.81	-26.03	1.999E-13
1.38E+07	7.50E+07	1.27E+05	7.51E+07	-1.02E+02	-891.38	-53.47	2.306E-13
6.82E+06	4.22E+07	4.50E+04	4.22E+07	-1.02E+02	-1857.47	-25.66	2.583E-13
1.75E+07	1.21E+08	1.27E+05	1.21E+08	-1.01E+02	-904.46	-52.70	2.89E-13
8.45E+06	6.48E+07	4.50E+04	6.48E+07	-1.00E+02	-1884.92	-25.29	3.167E-13
9.22E+06	7.72E+07	4.50E+04	7.72E+07	-9.93E+01	-1898.24	-25.11	3.444E-13
2.94E+10	3.35E+12	9.53E+11	4.30E+12	6.15E+00	11381.76	4.19	8.649E-12
1.40E+08	3.09E+10	1.05E+05	3.09E+10	1.12E+02	1683.80	28.31	8.705E-12
1.41E+08	3.13E+10	1.05E+05	3.13E+10	1.13E+02	1662.98	28.66	8.76E-12
1.42E+08	3.17E+10	1.05E+05	3.17E+10	1.15E+02	1642.67	29.02	8.815E-12
1.43E+08	3.21E+10	1.05E+05	3.21E+10	1.16E+02	1622.85	29.37	8.871E-12
1.44E+08	3.25E+10	1.05E+05	3.25E+10	1.18E+02	1603.51	29.73	8.926E-12

Se obtuvo también el eje neutro y la rigidez flexural (EI) de la sección alrededor del eje neutro obteniendo los siguientes resultados:

$$\text{Eje neutro} = 107.72 \text{ mm}$$

$$EI_{\text{eje neutro}} = 1.21E12 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$$

En la siguiente figura se puede observar que las capas hasta una parte del núcleo de madera de la parte exterior (parte inferior de la gráfica) están sometidas a esfuerzos negativos, en compresión. Mientras que las capas del borde interior (parte superior de la gráfica) y una zona corta del núcleo están sometidas a esfuerzo positivos, de tensión, como se observa a continuación:

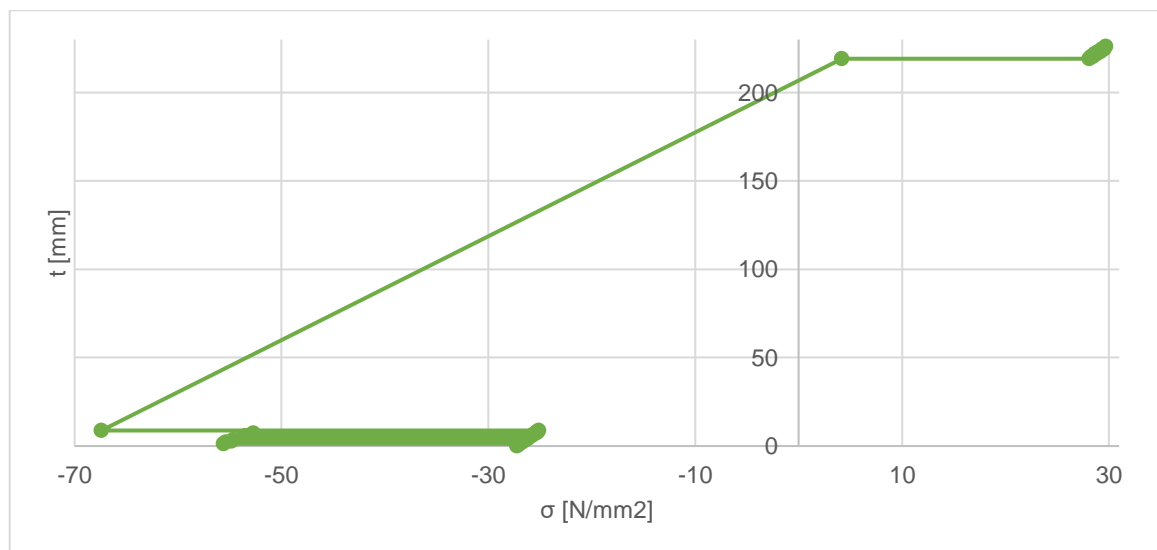


Figura B.2 Variación de esfuerzos normal en x del Sándwich Laminado

Se tomo también dos diferentes tipos de laminados, en la parte exterior se aplicó una combinación de tela MAT y WB, mientras que en la parte interior solo se aplicó tela MAT. Se puede notar un comportamiento aproximadamente lineal cuando el laminado es de un mismo material, mientras que, debido a sus cambios de propiedades, la combinación de tela MAT y WB, el esfuerzo tiende a elevarse en las telas WB. Los resultados de los esfuerzos desarrollados en las capas del laminado de PRFV con más precisión se muestran a continuación.

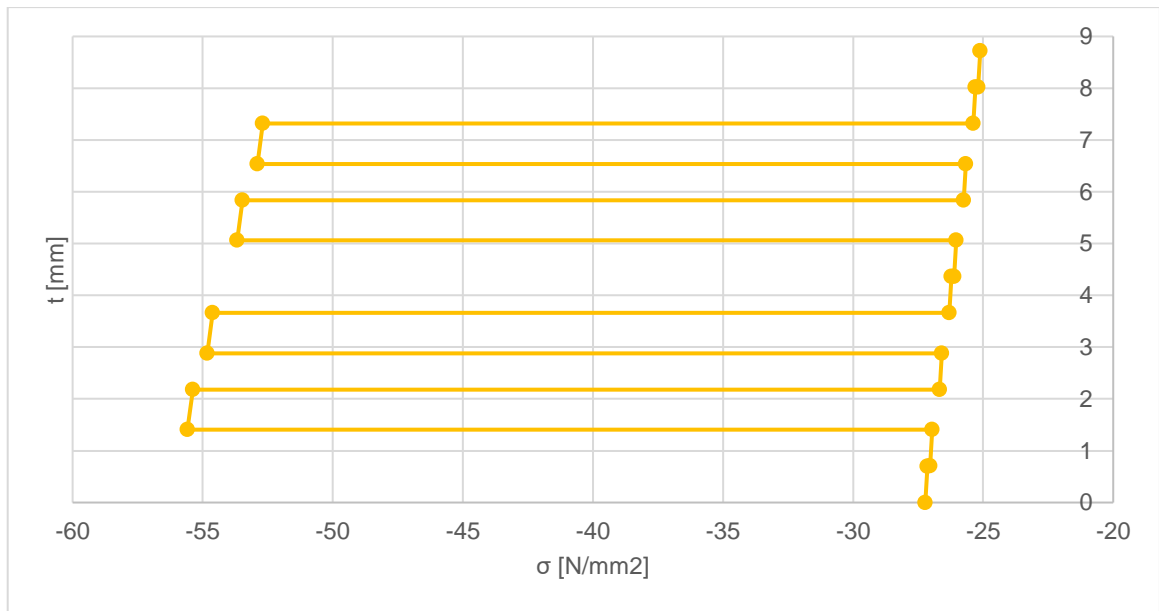


Figura B.3 Esfuerzo desarrollado en un laminado por a una combinación de tela MAT y WB

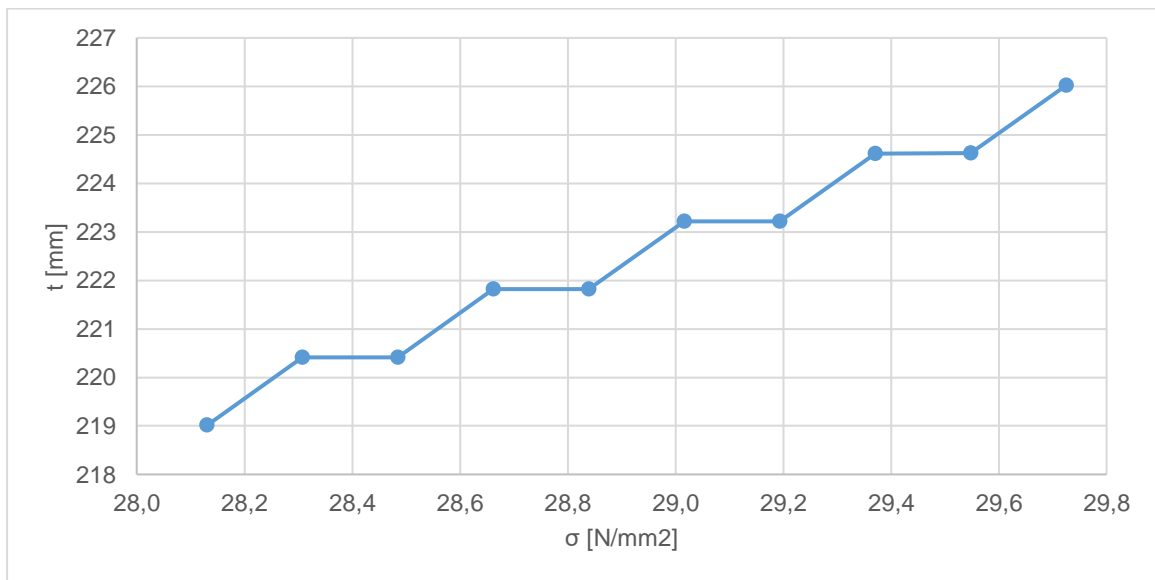


Figura B.4 Esfuerzo desarrollado en un laminado compuesto solo por tela MAT

APÉNDICE C

RIGIDEZ FLEXURAL DE LA EMBARCACIÓN PLANEADORA

En el anexo H “Laminate Stack Analysis” de la (International Organization for Standardization, 2008) se indica como realizar el cálculo de la rigidez flexural de planchas y de vigas de materiales compuestos. En el caso específico de la lancha planeadora se puede modelar la sección transversal como una combinación de planchas y de vigas, teniendo como primer paso calcular el Módulo de Young promedio (E) de cada uno de estos elementos. Con respecto a las planchas se cuenta con un laminado simétrico en toda la estructura, pero su secuencia de laminado varía de acuerdo con la zona de la embarcación. Desde la Tabla C.1 hasta la Tabla C.4 se presenta el laminado considerado en cada uno de los elementos junto con el cálculo de E por media geométrica.

Tabla C.1 Laminado de las planchas de fondo y costado

Número de Capa	Material	Módulo de Young E [N/mm ²]	Espesor [mm]
1	MAT 450	6400,00	1,05
2	MAT 450	6400,00	1,05
3	WR 800	13240,00	1,03
4	MAT 450	6400,00	1,05
5	WR 800	13240,00	1,03
6	MAT 450	6400,00	1,05
7	MAT 450	6400,00	1,05
8	WR 800	13240,00	1,03
9	MAT 450	6400,00	1,05
10	WR 800	13240,00	1,03
11	MAT 450	6400,00	1,05
12	MAT 450	6400,00	1,05
Total		8154,85	12,55

Tabla C.2 Laminado de la plancha de cubierta

Número de Capa	Material	Módulo de Young E [N/mm ²]	Espesor [mm]
1	MAT 450	6400,00	1,05
2	MAT 450	6400,00	1,05
3	Madera Laurel	17240,00	10,00
4	MAT 450	6400,00	1,05
5	MAT 450	6400,00	1,05
Total		7802,82	14,21

Tabla C.3 Laminado de los refuerzos

Número de Capa	Material	Módulo de Young E [N/mm ²]	Espesor [mm]
1	MAT 450	6400,00	1,05
2	MAT 450	6400,00	1,05
3	MAT 450	6400,00	1,05
4	MAT 450	6400,00	1,05
5	MAT 450	6400,00	1,05
6	MAT 450	6400,00	1,05
Total		6400,00	6,31

Tabla C.4 Refuerzos Longitudinales tipo sombrero (Viga)

Descripción	Módulo de Young E [N/mm ²]
Plancha de unión	8154,85
Alas de unión	6400,00
Alma bajo el eje neutro	6400,00
Núcleo bajo el eje neutro	17240,00
Núcleo sobre el eje neutro	17240,00
Alma sobre el eje neutro	6400,00
Ala superior	6400,00
Total	8793,73

Luego de calcular el E promedio para cada uno de los elementos estructurales, ISO da unos formatos de tabla para el cálculo de la rigidez flexural de dichos elementos en función de su longitud. No obstante, el cálculo presentado en dichas tablas es con respecto a únicamente a un elemento teniendo que ser adaptas para aplicarse en la sección transversal de la embarcación. En la Tabla C.5 se presenta la adaptación

previamente mencionada donde se muestra el cálculo de la rigidez flexural (EI) de la cuaderna de sección media de la lancha.

Tabla C.5 Cálculo de la Rigidez Flexural (EI) de la cuaderna de sección media

Detalle	Elemento	Ancho b [mm]	Espesor h [mm]	E [N/mm ²]	Θ [grados]	A [mm ²]
Planchaje	Fondo	1303,10	12,55	8154,85	14	16354,76
	China	165,50	12,55	8154,85	0	2077,13
	Costado 1	1103,60	12,55	8154,85	73	13850,90
	Costado 2	0,00	0,00	8154,85	0	0,00
	Cubierta	1527,10	14,21	7802,82	0	21693,80
Refuerzo	Quilla	25,00	120,00	8793,73	0	3000,00
	Eslora	50,00	80,00	8793,73	14	4000,00
	Palmejar	150,00	50,00	8793,73	73	7500,00
				3658,20		68476,59

Elemento	Ei * A [N]	di [mm]	Ei * A * di [Nmm]	Ei * A * di ² [Nmm]
Fondo	1,33E+08	157,5	2,10E+10	3,31E+12
China	1,69E+07	315,1	5,34E+09	1,68E+12
Costado 1	1,13E+08	843,1	9,52E+10	8,03E+13
Costado 2	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00
Cubierta	1,69E+08	657	1,11E+11	7,31E+13
Quilla	2,64E+07	60	1,58E+09	9,50E+10
Eslora	3,52E+07	134,7	4,74E+09	6,38E+11
Palmejar	6,60E+07	970,3	6,40E+10	6,21E+13
	5,60E+08	541,21	3,03E+11	2,21E+14

Elemento	Icoi [mm ⁴]	Ei * Icoi [Nmm ²]	(EI)i base [Nmm ²]	EI_na [Nmm ²]
Fondo	1,36E+08	1,11E+12	4,41E+12	1,38E+14
China	2,73E+04	2,22E+08	1,68E+12	
Costado 1	1,29E+09	1,05E+13	9,08E+13	
Costado 2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
Cubierta	3,65E+05	2,85E+09	7,31E+13	
Quilla	3,60E+06	3,17E+10	1,27E+11	
Eslora	2,06E+06	1,81E+10	6,56E+11	
Palmejar	1,30E+07	1,14E+11	6,22E+13	
		1,18E+13	2,33E+14	

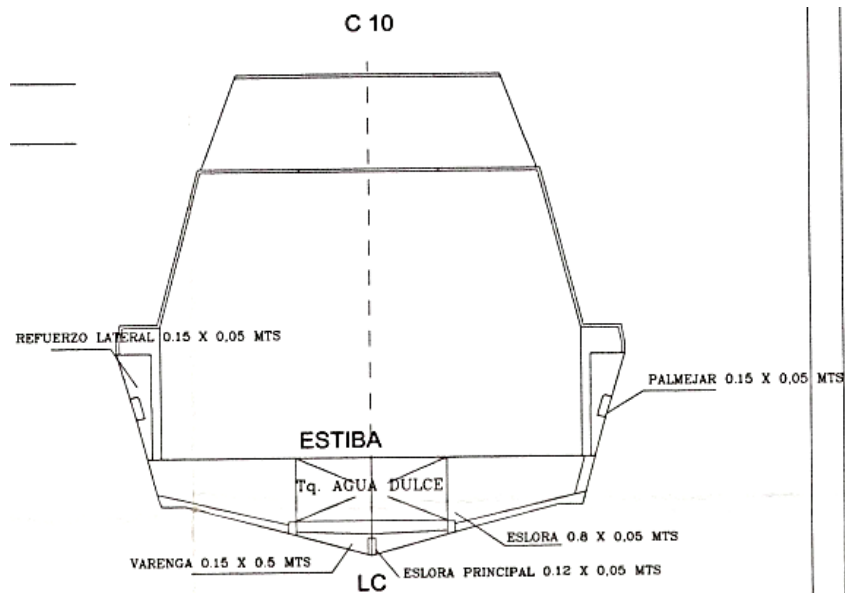


Figura C.1 Cuaderna de sección media de la lancha planeadora

Obteniéndose como resultado que el eje neutro (n_a) de la cuaderna de sección media se encuentra ubicada a 0,54 m tomada desde la línea base, dando una rigidez flexural (EI) de $1,38E+14$ N mm². Los cálculos presentes en la Tabla C.5 se aplican para el resto de las cuadernas a lo largo de la embarcación resumiendo los resultados obtenidos en la Tabla C.6.

Tabla C.6 Resumen de resultados del Cálculo de EI a lo largo de la embarcación

Cuaderna	X desde el espejo [m]	$A_i/2$ [mm ²]	n_a [mm]	EI [kNm ²]	K_{yy}/D
1	1,38	59614,20	446,78	8,24E+04	0,30
2	2,52	68217,40	497,61	1,05E+05	0,32
3	4,23	66189,87	502,08	1,06E+05	0,31
4	5,95	68476,59	541,21	1,38E+05	0,48
5	7,75	67695,94	568,89	1,42E+05	0,30
6	8,81	42474,15	626,72	1,50E+05	0,38
7	9,94	40228,84	636,06	1,37E+05	0,37

APÉNDICE D

ACTA DE REUNION: CONSTRUCCION DE EMBARCACIONES CON PRFV PARA SERVICIO INTERISLAS EN GALAPAGOS

Fecha: 07/13/2021

Hora: 10h00 a 10h45

Duración: 45 minutos

Participantes: Sr. Wilson Figueroa; Bryan Pita Vera.

Medio: Visita al taller "OCEAN FIBRA".

Puntos Tratados: Dimensiones y tipos de materiales en casco, cubiertas y elementos estructurales implementados en la construcción de la lancha actual "ANGY".

DESARROLLO:

1. Soporte de motores y espejo de la embarcación.



Madera Figueroa cubre
todo el espejo de la

Laminado exterior de PRFV
combinación de tela MAT con

Conexión entre el núcleo del
refuerzo longitudinal y el

Espacio de llenado con
Resina para dar más

Figura D.1 Composición del espejo de la embarcación

La madera del espejo es Figueroa, cubre toda la sección del espejo y es forrado con láminas de fibra de vidrio. En la parte exterior, entre la fibra y la madera se rellena con resina con la finalidad de brindar más de rigidez a esa zona debido a que tiene que soportar los motores fueraborda.

Lo motores fueraborda son ajustados a las embarcaciones con 4 pernos de media pulgada como se puede observar en la figura siguiente, distribuidos desde la línea de crujía hacia los costados.



Figura D.2 Espejo de la lancha ANGY.

2. Arreglo estructural de una embarcación similar a la lancha ANGY

Los refuerzos señalados en la Figura D.3 son de madera Figueroa igual que en la quilla. En el costado de la embarcación solo se tiene un refuerzo longitudinal (Palmejar). En el fondo se tienen la misma cantidad de refuerzos como lo indica en el plano, con la única variación que los refuerzos longitudinales y transversales tienen la altura hasta la cubierta de estiba, siendo base para dicha cubierta. Las varengas siguen las mismas condiciones del plano y entre estas y los refuerzos longitudinales van los tanques de combustible y agua dulce.

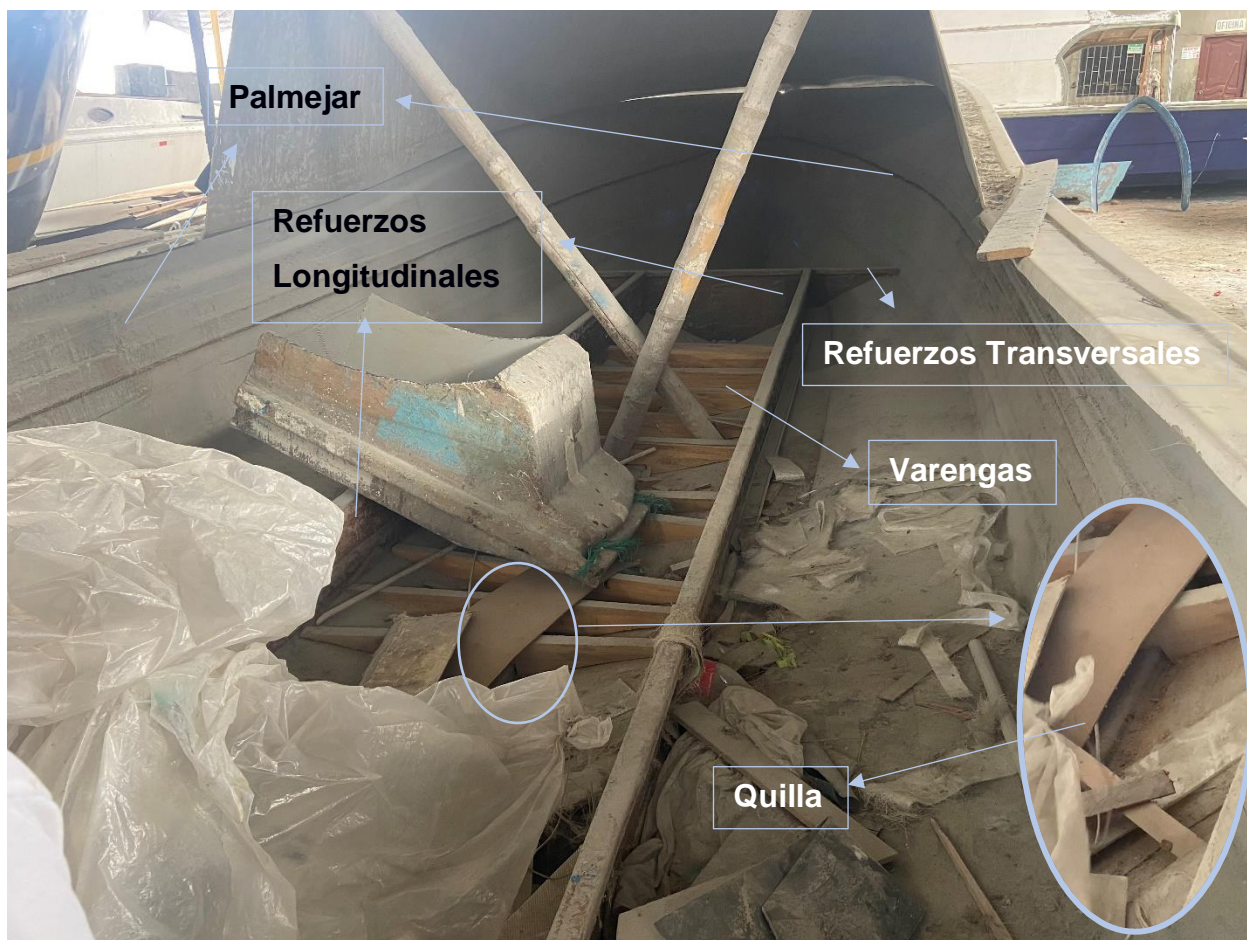


Figura D.3 Refuerzos estructurales dentro de una embarcación para servicio similar a la lancha ANGY

3. Anexo Fotográfico:

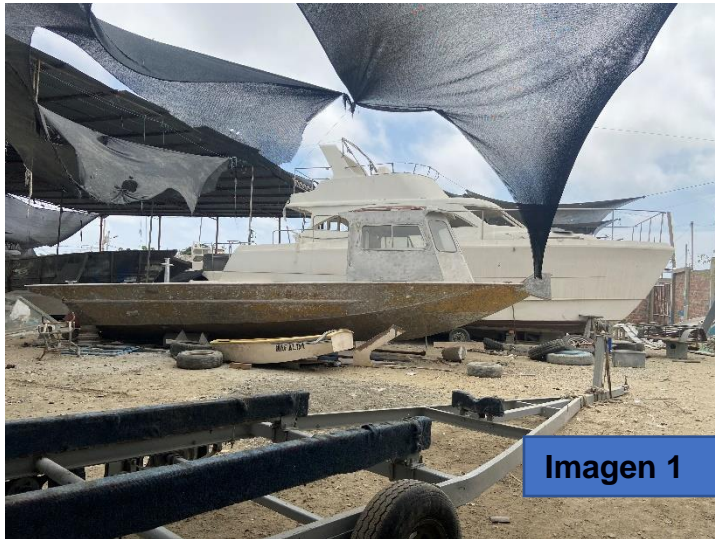
- Imagen 1. Fotografía del taller "OCEAN FIBRA" donde fue construida la lancha "ANGY"
- Imagen 2. Evidencia probatoria de reunión mediante visita al taller con el Sr. Wilson Figueroa.

Sr. Wilson Figueroa.
OCEAN FIBRA
Ayudante de taller


Bryan Pita Vera.
ESPOL - FIMCM
Estudiante

ANEXO FOTOGRÁFICO:

- Imagen 1. Fotografía del taller “OCEAN FIBRA” donde fue construida la lancha “ANGY”
- Imagen 2. Evidencia probatoria de reunión mediante visita al taller con el Sr. Wilson Figueroa.



APÉNDICE E

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL MÓDULO DE PROA

Para llevar a cabo el análisis de materiales compuestos por medio de elementos finitos uno de los programas que se pueden utilizar es ANSYS con sus módulos de ACP (Pre) y ACP (Post):

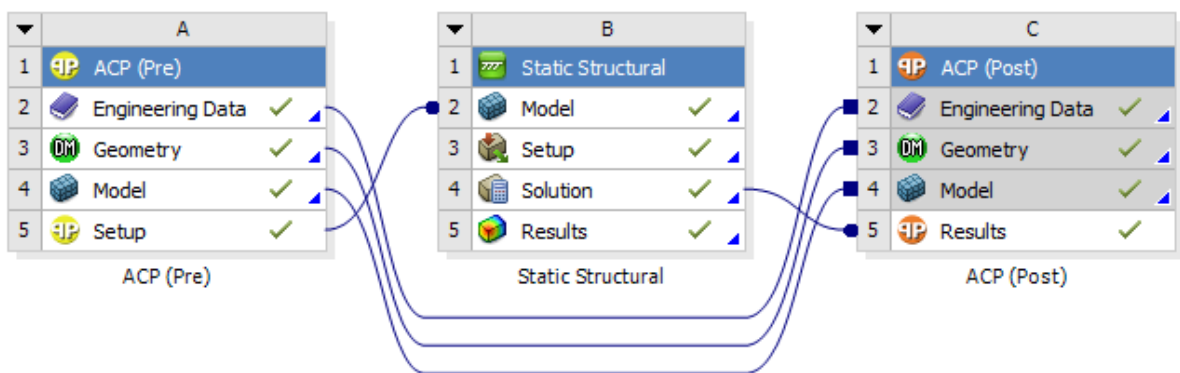


Figura E.1 MEF del módulo de proa

El módulo ACP (Pre) tiene como objetivo definir las características presentes en el laminado utilizando para ello diferentes campos que se encuentran en el componente “Setup”. Entre estos campos tenemos:

- **Material Data:** En este campo se procede a definir las diferentes capas que se pueden presentar en el laminado especificando el material y el espesor. Además, se define las diferentes secuencias de laminado utilizadas en la estructura.
- **Element Sets:** Muestra los elementos a los cuales se aplica las diferentes secuencias de laminado teniendo que nombrarse dichos elementos con anterioridad en el componente Model.
- **Rosettes:** Se define el sistema de referencia que sigue el laminado para los diferentes elementos estructurales a considerar.
- **Oriented Selection Sets:** Este campo tiene como objetivo relacionar los diferentes elementos presentes en “Element Sets” con su respectiva roseta con el fin de especificar la dirección del laminado.

- **Modeling Group:** En este campo se relaciona las diferentes secuencias de laminado definidas en “Material Data” con cada uno de los laminados definidos en “Oriented Selection Sets”.

Por otra parte, el componente ACP (Post) presenta los mismos campos que el módulo ACP (Pre) junto con un nuevo campo “Solutions” donde se presentan los resultados obtenidos.

Modelo Geométrico:

Uno de los primeros componentes presentes en el ACP (Pre) es “Geometry” que tiene como fin definir el modelo geométrico de la estructura a analizar. En el caso específico de este proyecto dichos modelos son realizados con anterioridad en Rhynoceros y se importan a ANSYS. Teniendo en total dos módulos que corresponden: a la estructura actual de la embarcación y a la estructura optimizada; recibiendo dichas estructuras el nombre de módulo actual y módulo optimizado respectivamente.

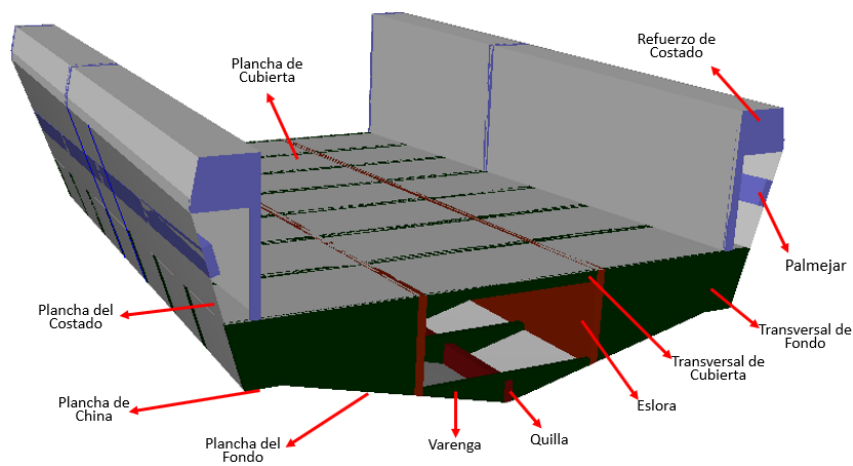


Figura E.2 Módulo Actual

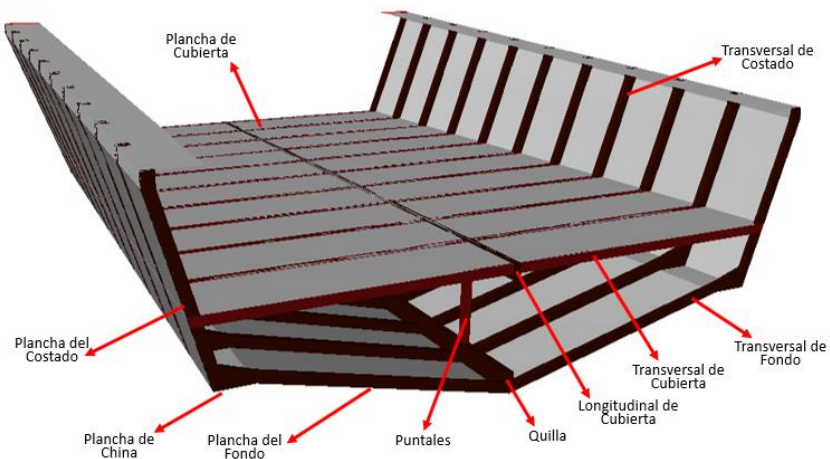


Figura E.3 Modelo Optimizado

Mallado:

Una vez importado los módulos a analizar se procede a definir el mallado y las conexiones presentes en la estructura en el componente Model. El mallado utilizado en ambos modelos fue lineal con las dimensiones que se presentan en la Tabla E.1 y Tabla E.2:

Tabla E.1 Dimensiones de los elementos del módulo actual

Modulo	Dimensiones [mm]	Elementos	
Actual	100	Plancha de Cubierta	
		50	Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de fondo
			Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de cubierta
	Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de costado		
	Plancha de Fondo		
	Plancha de Costado		
	Plancha de China		
	25	Núcleo y Laminado de Quilla	
		Núcleo y Laminado de Varenga	
		Núcleo y Laminado de Eslora	
		Núcleo y Laminado de Palmejar	

Tabla E.2 Dimensiones de los elementos del módulo Optimizado

Modulo	Dimensiones [mm]	Elementos
Optimizado	100	Plancha de Cubierta
		Núcleo de Refuerzos Transversales de fondo
	50	Núcleo de Refuerzos Transversales de cubierta
		Núcleo de Refuerzos Transversales de costado
		Núcleo de Puntales
		Plancha de Fondo
		Plancha de Costado
		Plancha de China
		25
	Laminado de Refuerzos Transversales de fondo	
	Laminado de Refuerzos Transversales de Cubierta	
	Laminado de Refuerzos Transversales de Costado	
	Laminado de Puntales	

Teniendo como resultado en el caso del modelo actual un total de 80811 nodos y 59371 elementos; mientras que en el modelo optimizado se tiene 57308 nodos y 45691 elementos. No obstante, cabe recalcar que las dimensiones presentadas en la Tabla E.1 y Tabla E.2 corresponden al caso donde se tiene el tamaño de elemento mayor de 50 mm omitiendo la plancha de cubierta.

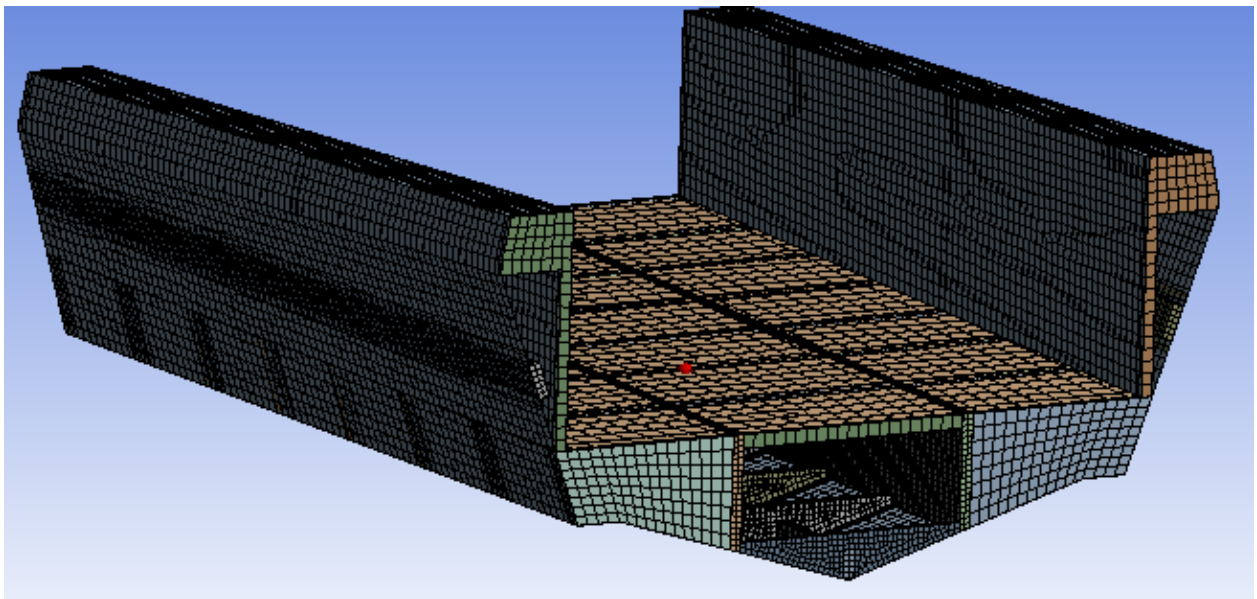


Figura E.4 Mallado del Modelo Actual

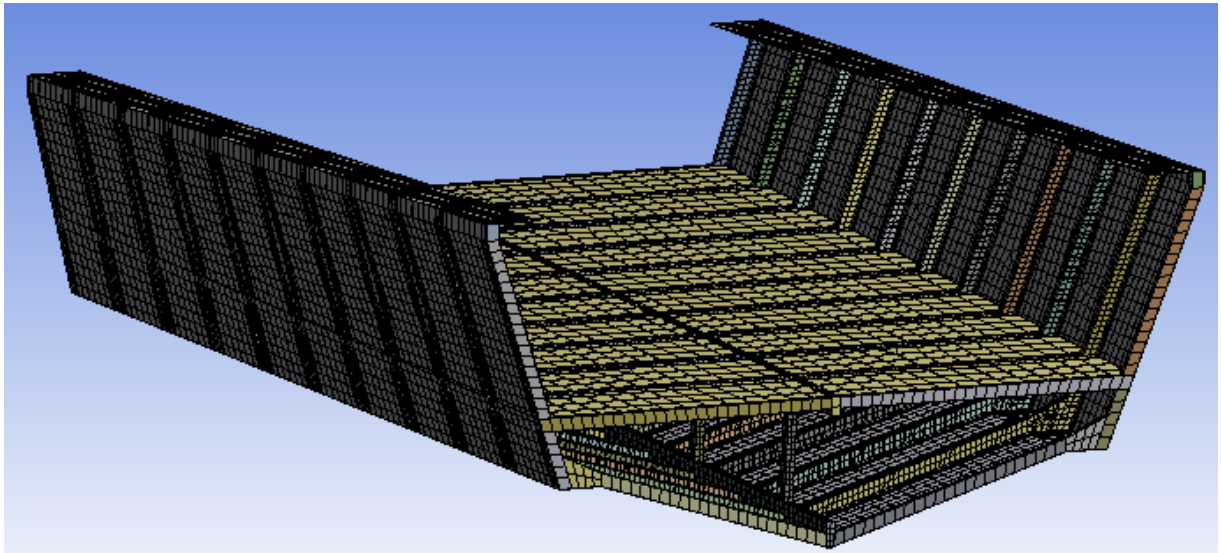


Figura E.5 Mallado del Modelo Optimizado

Módulo “Static Structural”:

Una vez terminado el módulo ACP (Pre) se procede con el módulo de “Static Structural” que tiene como fin implementar en el modelo las condiciones de frontera a considerar para el análisis. Además, se incorpora dentro del modelo las diferentes cargas que actúan sobre la estructura tomándose en consideración la distribución de fuerzas. Aparte en este módulo se especifica los parámetros a presentarse como resultados de la simulación considerando en ambos modelos la deformación en dirección vertical z y los esfuerzos normales en la capa superior e inferior de la plancha del fondo.

Distribución de Carga:

Para la distribución de carga de ambos modelos se tomó en consideración la presión dinámica en el fondo de la embarcación y la distribución de pesos considerando el efecto de la variación lineal de la aceleración vertical. Sin embargo, debido al comportamiento de ambas cargas su forma de implementarlo dentro del modelo varía. En el caso de la presión dinámica se implementa de forma tabular dentro del programa variando a lo largo de la eslora de embarcación; pero el valor de presión es constante a lo largo de la manga mostrándose los valores de presión en la Tabla E.3.

Tabla E.3 Distribución de Presión Dinámica

x [mm]	Presión [MPa]
0	0,0136
250	0,0140
500	0,0144
750	0,0148
1000	0,0151
1250	0,0154
1500	0,0157
1750	0,0159
2000	0,0161
2250	0,0163
2500	0,0163
2750	0,0164
3000	0,0163
3250	0,0162
3500	0,0160
3750	0,0157
4000	0,0153

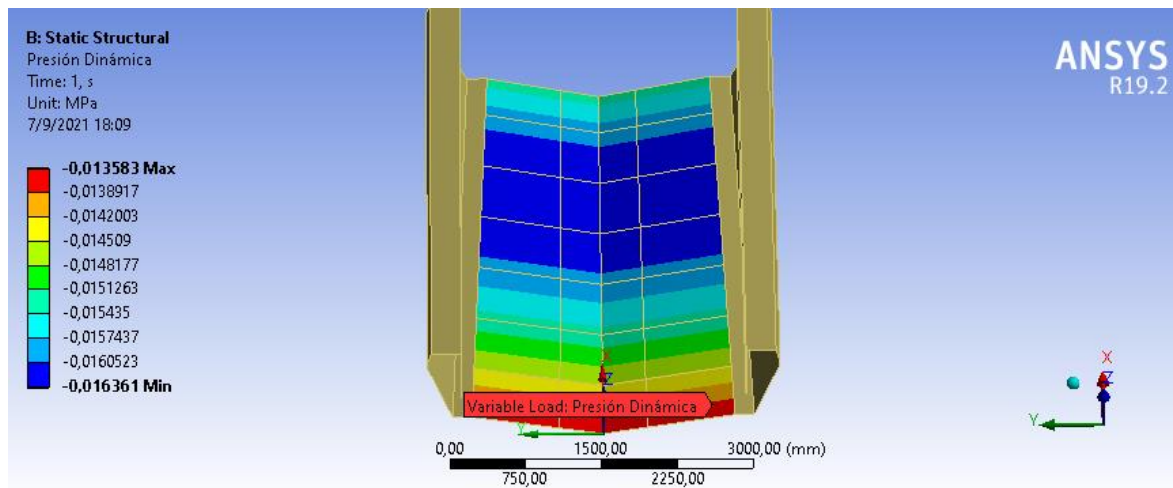


Figura E.6 Distribución de Presión Dinámica en el Fondo de la embarcación

En el caso de la distribución de pesos este se implementó en la cubierta como una fuerza uniforme que varía al pasar de una región a otra, ya que la cubierta está dividida en 7 particiones. De esta forma se obtiene una distribución de pesos lo más cercano a la realidad tomándose en consideración la variación de la aceleración vertical. En la Tabla

E.4 se presenta los rangos de cada una de las particiones junto con el total de la fuerza aplicada:

Tabla E.4 Distribución de Pesos

Xi [mm]	Xf [mm]	W(x) Total [N]
0,00	570	16253,60
570	1170	17962,56
1170	1770	18725,80
1770	2370	32240,14
2370	2970	19946,04
2970	3570	20385,31
3570	4000	8497,51

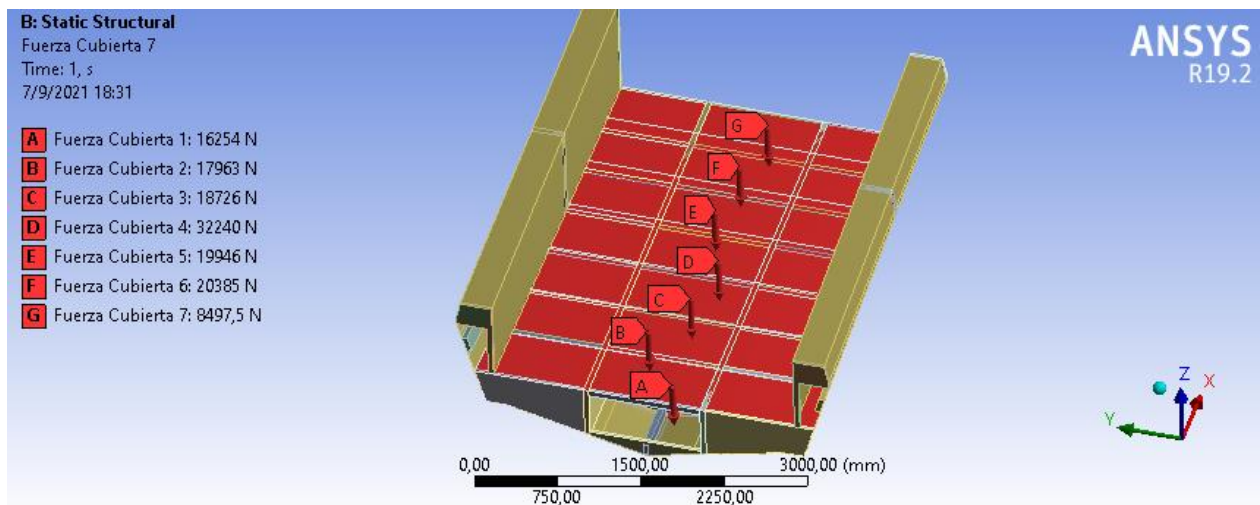


Figura E.7 Distribución de Pesos en la plancha de cubierta

La distribución de presión y pesos presentados en la Figura E.6 y Figura E.7 respectivamente corresponden al modelo actual de la embarcación, pero también aplica para el modelo optimizado. Esto se debe a que ambos modelos comparten sus límites por lo que se ven influenciados por la misma distribución de presión y pesos siendo independiente de las diferencias estructurales que ambos modelos poseen.

Condiciones de Frontera:

Al compartir los límites el modelo actual y optimizado, las condiciones de frontera a considerar para el análisis llegan a ser las mismas para ambos modelos. Además, las condiciones de fronteras consideradas en cada uno de los extremos varían; ya que en el extremo izquierdo (dirección a popa) se toman condiciones de frontera geométricas mientras que en el extremo derecho (dirección a proa) se toman condiciones de frontera naturales.

Las condiciones de frontera geométricas hacen referencia a la deflexión y pendiente que de acuerdo con los datos registrados de la viga buque son de 4,39 mm y 0,86 mm/mm respectivamente. Esta condición de frontera se implementa dentro de ANSYS de forma tabular donde se pone como constante el desplazamiento en z de 4,39 mm y el desplazamiento en y de 0 mm. No obstante, debido a la pendiente el desplazamiento en x tiene un comportamiento lineal que se presenta en la Tabla E.5:

Tabla E.5 Desplazamiento X en el extremo izquierdo del módulo de proa

z [m]	x [mm]	z [m]	x [mm]
0,06	0,41	0,78	-0,21
0,12	0,36	0,84	-0,26
0,18	0,31	0,90	-0,31
0,24	0,26	0,96	-0,36
0,30	0,21	1,02	-0,41
0,36	0,16	1,08	-0,46
0,42	0,10	1,14	-0,52
0,48	0,05	1,20	-0,57
0,54	0,00	1,26	-0,62
0,60	-0,05	1,32	-0,67
0,66	-0,10	1,38	-0,72
0,72	-0,15	1,44	-0,77

Los valores presentados en la Tabla E.5 se aplica en los bordes de las planchas que coinciden con el extremo izquierdo del módulo como se muestra en la Figura E.8:

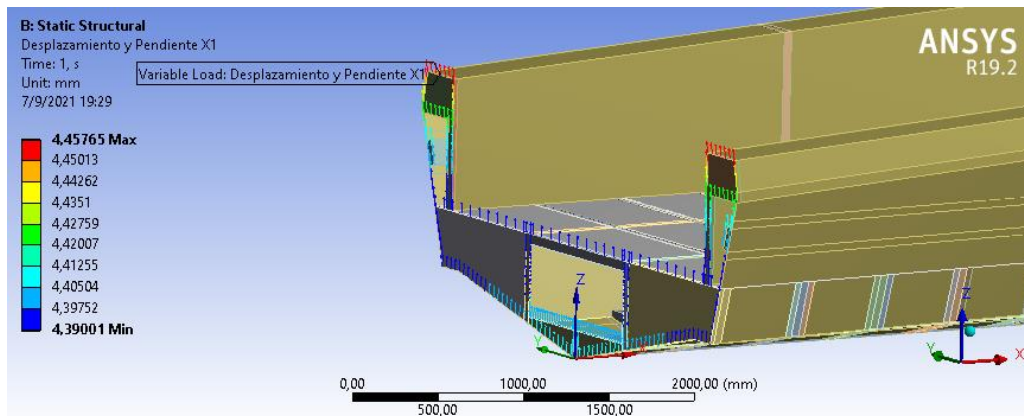


Figura E.8 Pendiente y Deflexión en el extremo izquierdo del módulo

Las condiciones de fronteras naturales hacen referencia al momento flector y a la fuerza cortante que de acuerdo con los datos registrados de la viga buque son de $-56,68 \text{ kN m}$ y $-2,30 \text{ kN}$ en el extremo derecho respectivamente. En el caso de la fuerza cortante esta se aplica como una fuerza remota hacia abajo en la cara de los núcleos que dan con el corte en el extremo derecho del modelo. Sin embargo, el modelo optimizado no cuenta con elementos longitudinales donde aplicar dicha fuerza a diferencia del actual que tiene la eslora y la quilla. Por dicha razón en el caso del modelo optimizado la fuerza cortante es aplicada en los núcleos de los refuerzos del costado al ser lo más cercano a elementos verticales.

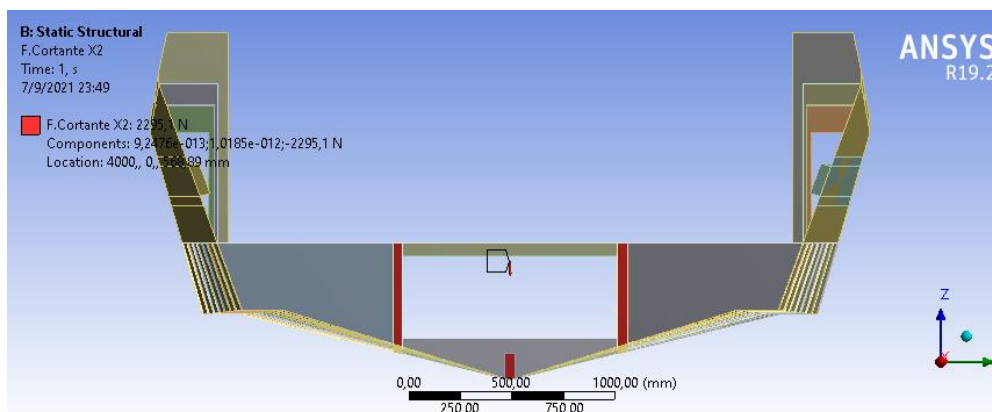


Figura E.9 Fuerza Cortante en el extremo derecho del modelo actual

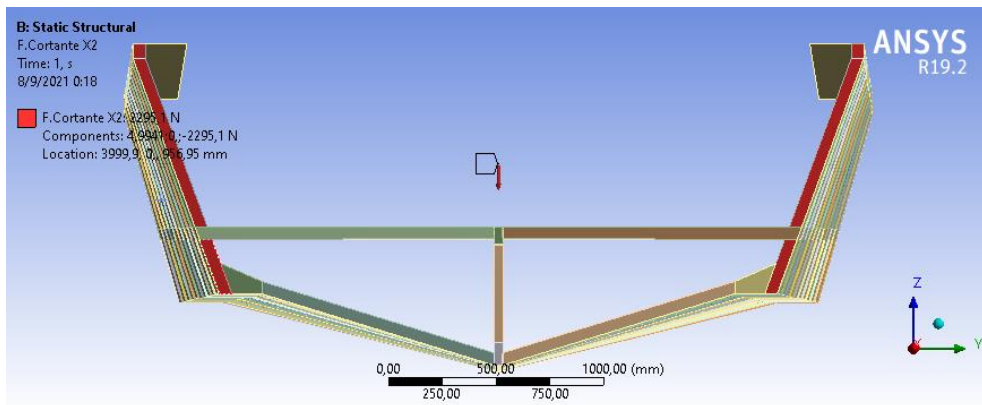


Figura E.10 Fuerza Cortante en el extremo derecho del modelo optimizado

Por otra parte, en el caso del momento flector para simularlo se emplearon cargas concentradas en diferentes zonas de la embarcación empleando fuerzas remotas como se observa en la Figura E.11 y Figura E.12. Una de las ventajas de emplear fuerza remota es que permite indicar la posición del centroide donde se aplica la fuerza facilitando el cálculo de momento al ubicar todas las cargas en la línea de crujía.

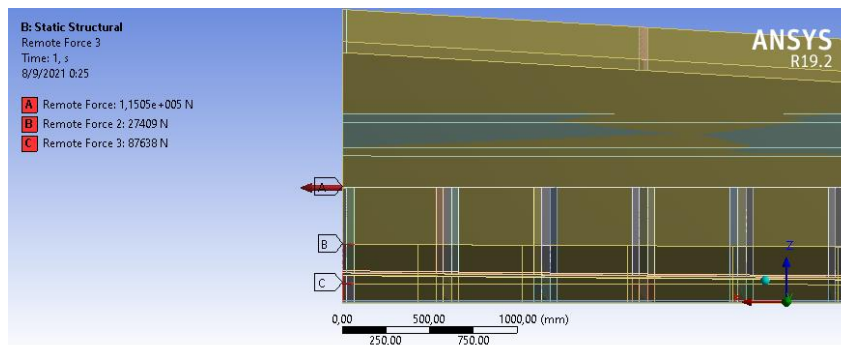


Figura E.11 Momento Flector en el extremo derecho del modelo actual

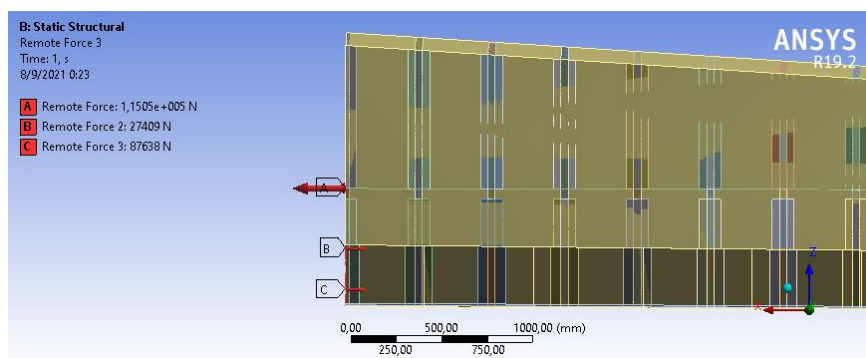


Figura E.12 Momento flector en el extremo derecho del modelo optimizado

Además, al repartir las cargas en diferentes zonas del módulo evitamos concentraciones de esfuerzos que puedan afectar de forma considerable a los resultados obtenidos. Las

zonas donde se aplicó dichas cargas fueron en: la cubierta, la china y las planchas del fondo; cuyas magnitudes se presentan en la Tabla E.6 que aplica para el modelo actual y optimizado. Dando como resultado de la distribución de cargas aplicadas una fuerza neta de 0 kN, indicando que las fuerzas están equilibradas y no afectaran a la fuerza cortante registrada en el extremo izquierdo del módulo.

Tabla E.6 Distribución de carga para el momento flector en el extremo derecho del módulo

Descripción	Z desde el CG [m]	Fuerza [kN]	Momento [kN m]
Cubierta	0,09	-115,05	-10,48
China	-0,23	27,41	-6,33
Plancha del Fondo	-0,45	87,64	-39,87
		Fuerza Neta [kN]	Momento Total [kN m]
		0,00	-56,68

Convergencia de malla:

Para llevar a cabo la convergencia de malla se tomó en consideración un segundo mallado para ambos módulos, presentándose en la Tabla E.7 y

Tabla E.8 las dimensiones del nuevo mallado empleado:

Tabla E.7 Dimensiones de los elementos del segundo mallado para el módulo actual

Modulo	Dimensiones [mm]	Elementos
Actual	100	Plancha de Cubierta
	30	Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de fondo
		Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de cubierta
		Núcleo y Laminado de Refuerzos Transversales de costado
		Plancha de Fondo
		Plancha de Costado
		Plancha de China
	25	Núcleo y Laminado de Quilla
		Núcleo y Laminado de Varenga
		Núcleo y Laminado de Eslora
		Núcleo y Laminado de Palmejar

Tabla E.8 Dimensiones de los elementos del segundo mallado para el módulo optimizado

Modulo	Dimensiones [mm]	Elementos
Optimizado	100	Plancha de Cubierta
		Núcleo de Refuerzos Transversales de fondo
	30	Núcleo de Refuerzos Transversales de cubierta
		Núcleo de Refuerzos Transversales de costado
		Núcleo de Puntales
		Plancha de Fondo
		Plancha de Costado
		Plancha de China
		25
	Laminado de Refuerzos Transversales de fondo	
	Laminado de Refuerzos Transversales de Cubierta	
	Laminado de Refuerzos Transversales de Costado	
	Laminado de Puntales	

Al comparar los valores de deflexión registrados en el extremo derecho del módulo en ambos mallados obtenemos los siguientes resultados:

Tabla E.9 Error porcentual entre los valores registrados en el mallado 1 y 2

Descripción	Mallado 1 (50-25)		Mallado 2 (50-25)		Error %	
	Actual	Optimizado	Actual	Optimizado	Actual	Optimizado
Quilla	6,42	5,91	6,50	5,93	1,20	0,37
Fondo ½	6,20	7,93	6,25	8,15	0,74	2,84
China	6,51	6,95	6,56	7,03	0,76	1,13
Costado ½	6,90	6,45	6,93	6,49	0,34	0,68
Costado	6,84	7,09	6,83	7,18	0,07	1,26
				MAX	1,20	2,84

Como se puede observar en la Tabla E.9 los errores obtenidos son muy bajos al comparar los valores de deflexión registrados en ambos mallados llegando a tener un error máximo de 1,20% en el modelo actual y de 2,84% en el modelo optimizado. El resto de los errores presentados en su mayoría son menores al 1% lo que indica que se puede trabajar con el primer mallado sin ningún inconveniente para el módulo de proa.

Tabla E.10 Número de elementos en el mallado de los módulos de proa

	Mallado 1		Mallado 2	
	Nodos	Elementos	Nodos	Elementos
Actual	57308	45691	137186	107534
Optimizado	80811	59371	85355	70070

Peso de la estructura:

Tomando en consideración que los modelos presentados varían con respecto a (Onofre & Venegas, 2020) al haberse incorporado la cubierta de estiba se calculó el peso de cada uno de los módulos. Para dicho calculo se empleó el peso específico de la madera que es de 870 kg/m³ y el peso por unidad de área de los diferentes laminados. En la Figura E.13 se presenta de forma resumida el peso de cada uno de los módulos llegando a tener el módulo optimizado una reducción del 39,18% con respecto al modelo actual.

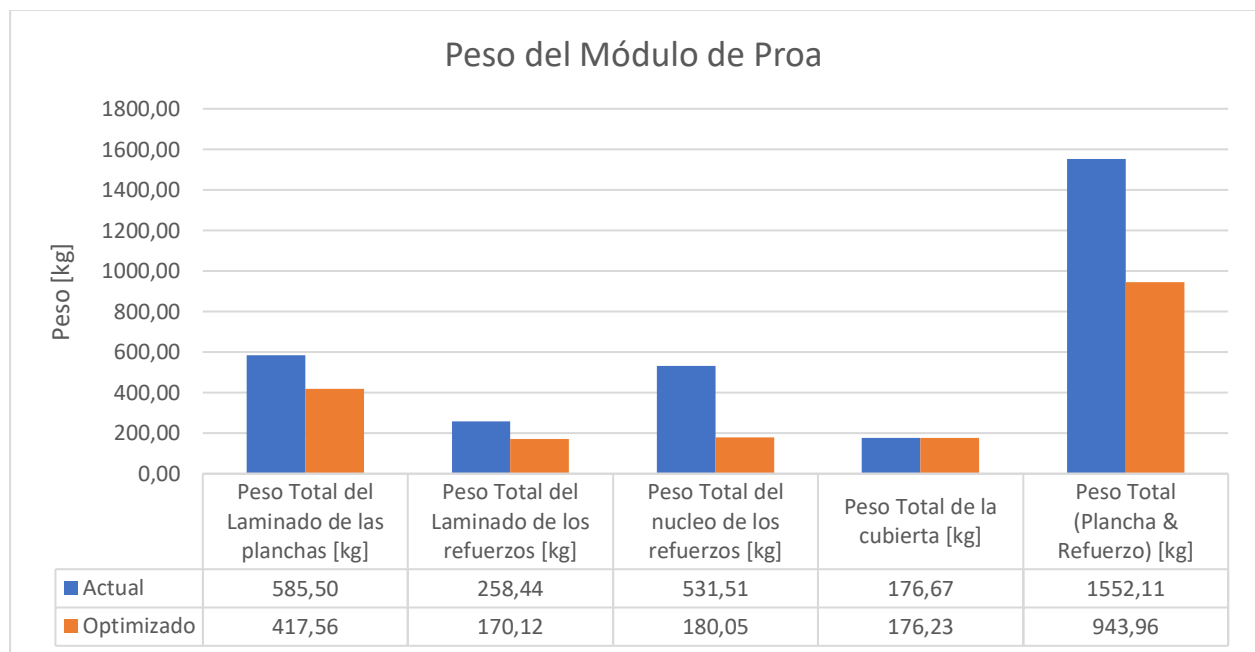


Figura E.13 Peso de los módulos de proa

APÉNDICE F

MODELO DE POPA

El módulo de popa fue desarrollado con la ayuda del software Rhinoceros, tiene una longitud de 2,5 metros, desde el espejo de la embarcación hasta la mitad de la cuaderna 4. Está conformada por 4 refuerzos transversales, 2 refuerzos longitudinales, palmejar, rodón, quilla, cubierta de estiba y tanque de combustible hasta la mitad de la cuaderna 4. tal como se muestra a continuación:

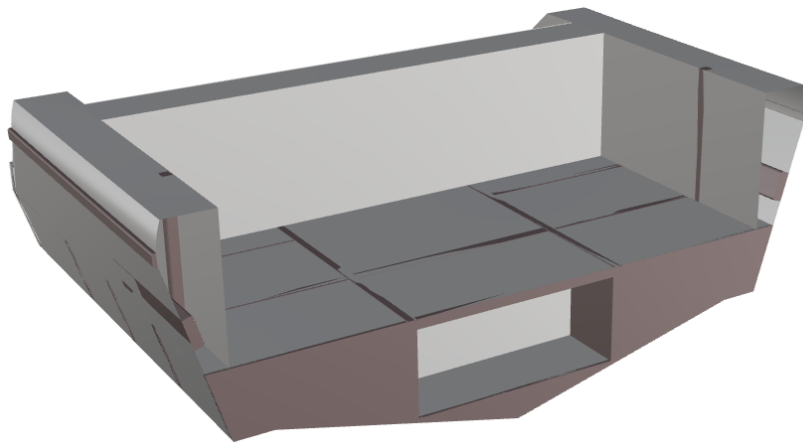


Figura F.1 Vista frontal del módulo de popa.

Fuente: Rhinoceros.

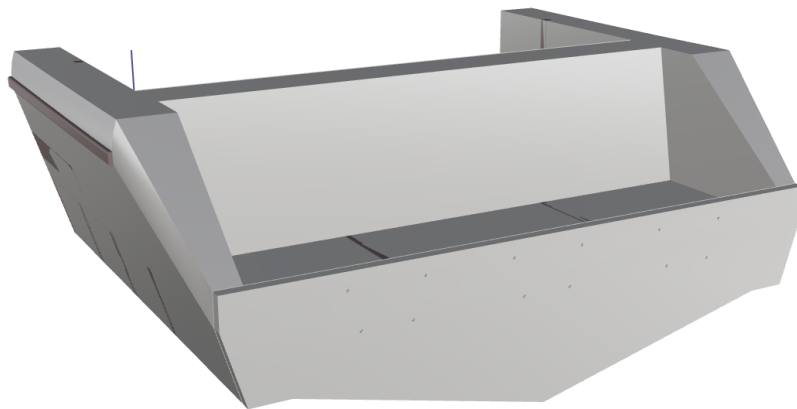


Figura F.2 Vista trasera del módulo de popa.

Fuente: Rhinoceros.

El espejo de la embarcación donde soporta tres motores fueraborda de 350 kilogramos cada uno, se aplicó 4 agujeros de ½ pulgada de diámetro de ajuste para cada motor, donde se aplicaría la carga de este.

1.1 Mallado del módulo

Para el análisis de este módulo se aplicó dos tipos de mallado para observar la convergencia de los resultados, de donde la diferencia de la deformación máxima es de 0.01 mm, podríamos continuar el proceso con el segundo mallado

Tabla F.1 Primer tipo de mallado aplicado al módulo.

Tamaño del elemento	Ubicación
20 mm	Núcleo de madera del espejo
	Laminado Quilla
	Laminado Longitudinales
	Laminado exterior e interior del espejo
50 mm	Laminados transversales
	Núcleos de madera de refuerzos transversales
	Fondo
	Costado
	Cubierta de Estiba

Tabla F.2 Segundo tipo de mallado aplicado al módulo.

Tamaño del elemento	Ubicación
20 mm	Núcleo de madera del espejo
	Laminado Quilla
	Laminado Longitudinales
	Laminado exterior e interior del espejo
30 mm	Laminados transversales
	Núcleos de madera de refuerzos transversales
	Fondo
	Costado
	Cubierta de Estiba

Tabla F.3 Convergencia del mallado.

	MALLADO		Diferencia
	50-20	30-20	
	<i>Desp. Vert [mm]</i>	<i>Desp. Vert [mm]</i>	
Quilla	4.67	4.78	0.11
Eslora	4.67	4.78	0.11
China	4.69	4.79	0.1
Costado	4.5	4.37	0.13

Con respecto a los dos tipos de mallado aplicado, se obtuvo una diferencia aproximada de 0,1 mm, pudiendo continuar con el segundo mallado el análisis. Tal como se muestran en las siguientes figuras:

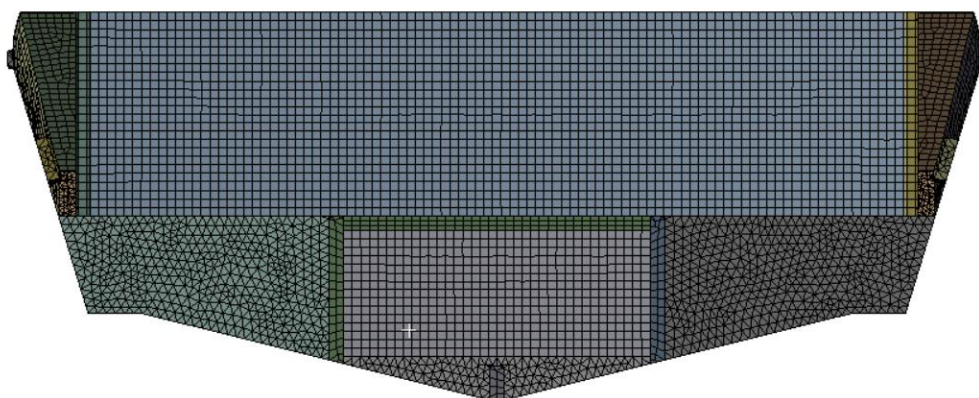


Figura F.3 Vista frontal del mallado del módulo de popa.

Fuente: ANSYS

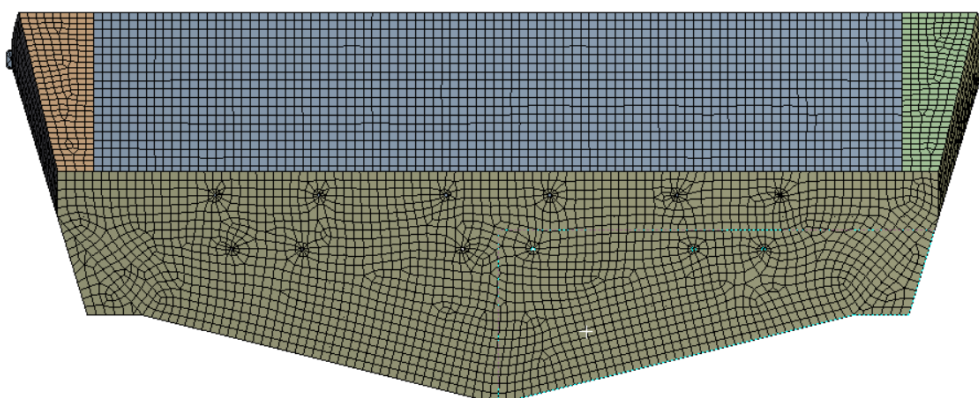


Figura F.4 Vista trasera del mallado del módulo de popa.

Fuente: ANSYS

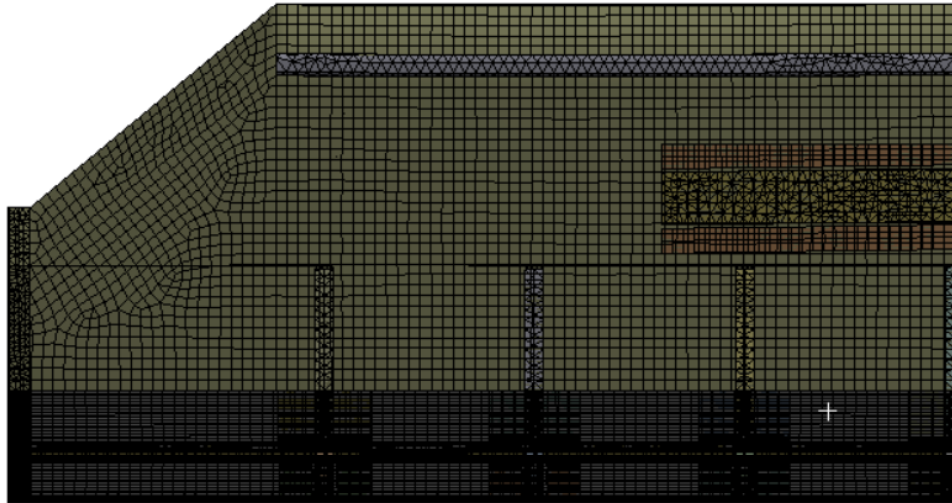


Figura F.5 Vista lateral del mallado del módulo de popa.

Fuente: ANSYS

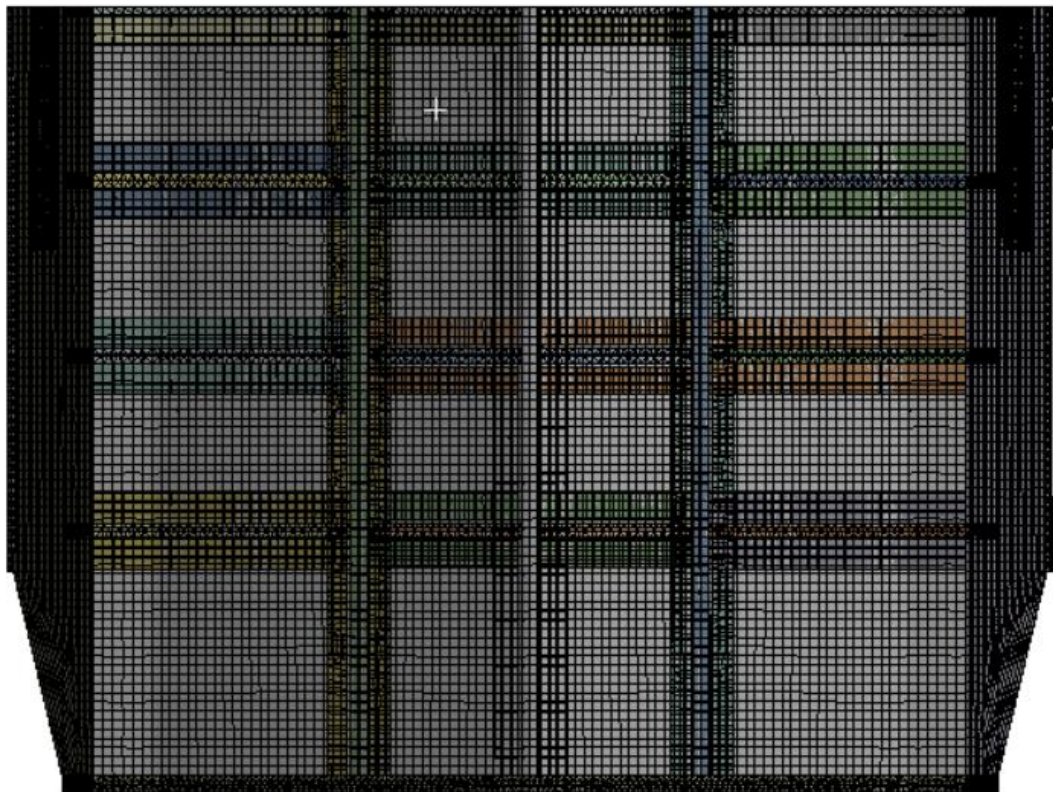


Figura F.6 Vista del fondo del mallado del módulo de popa.

Fuente: ANSYS

Teniendo un total de:

- Número de nodos: 407845
- Número de elementos: 259477

1.2 Aplicación de cargas.

El módulo de popa presenta las siguientes cargas:

- Presión hidrodinámica
- Carga de pasajeros y superestructura
- Combustible
- baterías
- 3 motores fuera borda

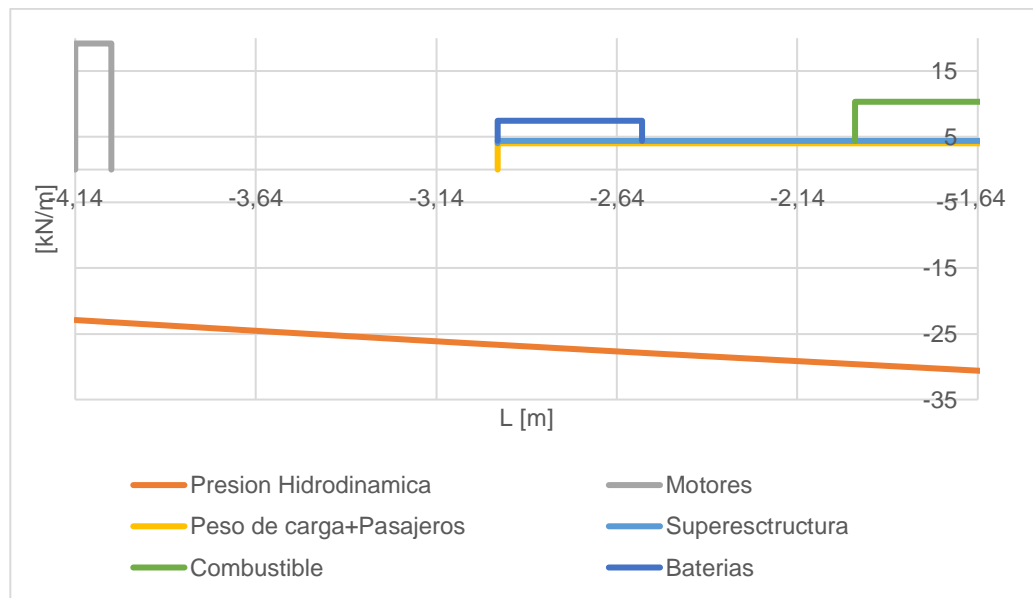


Figura F.7 Distribución longitudinal de carga del módulo de popa.

1.2.1 Presión hidrodinámica

Presión en el fondo de la embarcación en modo de planeo calculada en el Capítulo 1, aplicando las normas ISO. Es aplicada en el fondo de la embarcación, distribuida uniformemente a lo ancho de la china (2,85 m) como se muestra en la siguiente figura:

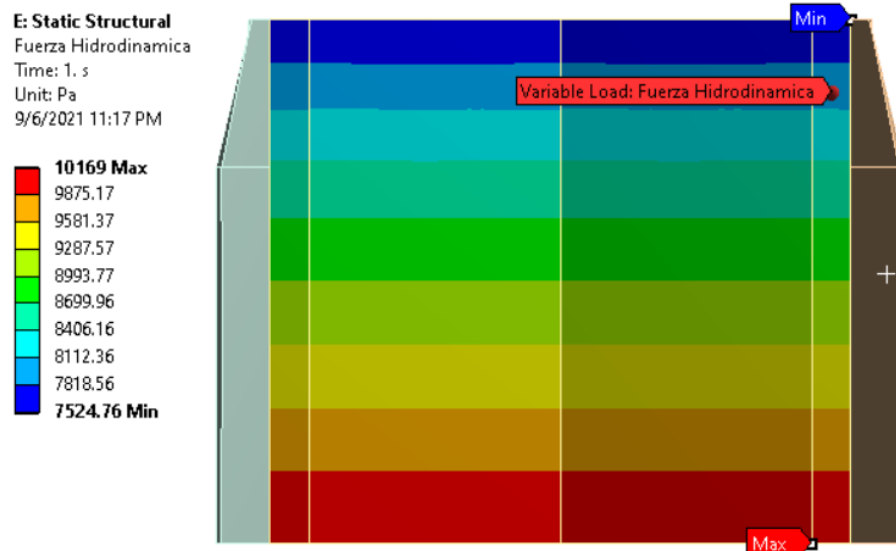


Figura F.8 Vista superior del fondo de la embarcación.

Fuente: ANSYS

1.2.2 Zona de pasajeros y superestructura

La zona de pasajeros y superestructura es hasta el corte en la mitad de la cuaderna 4 tiene una longitud de 1,32 metros y ancho de 2,84 m. Para el desarrollo de la presión de esta zona se divide la distribución longitudinal de la carga de pasajero y superestructura por el ancho de la sección, obteniendo la distribución como se muestra en la siguiente imagen:

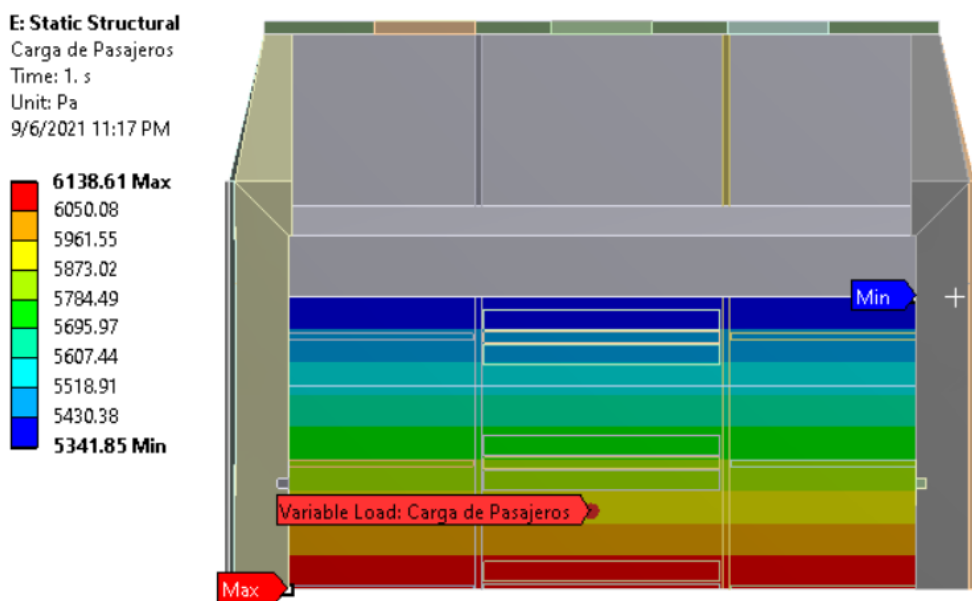


Figura F.9 Vista superior de la zona de pasajeros.

Fuente: ANSYS

1.2.3 Combustible

El tanque de combustible hasta la mitad de la cuaderna 4 tiene una longitud de 34 m, un ancho de 1,07 metros. Para el desarrollo de la presión del fondo del tanque se dividió la distribución longitudinal de la carga de combustible para el ancho de la sección, obteniendo la siguiente distribución:

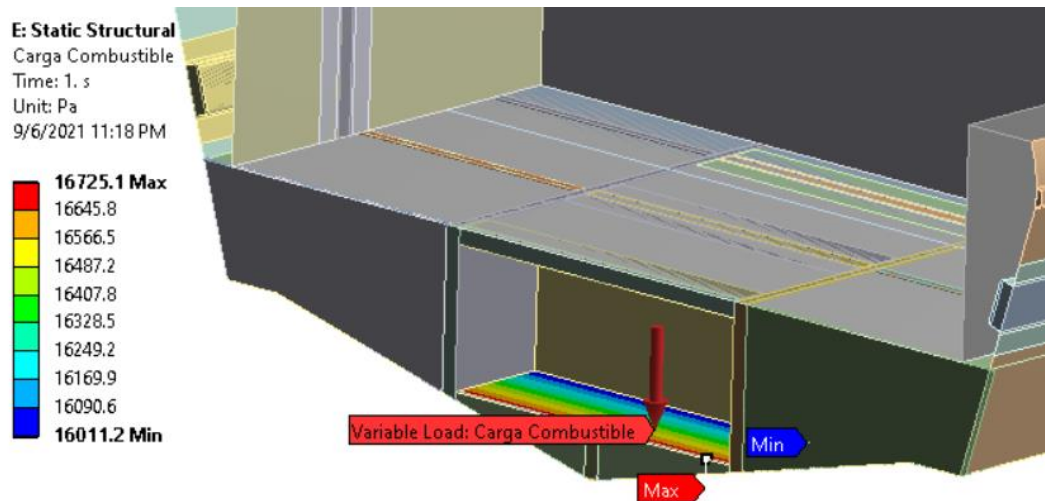


Figura F.10 Vista de perspectiva frontal del tanque de combustible de la embarcación.

Fuente: ANSYS

1.2.4 Baterías

La zona de baterías es aplicada a 40 cm desde el inicio de la zona de pasajeros hacia proa, a un ancho de 2,84 m. distribuidas uniforme a lo ancho de la sección, como se muestra a continuación:

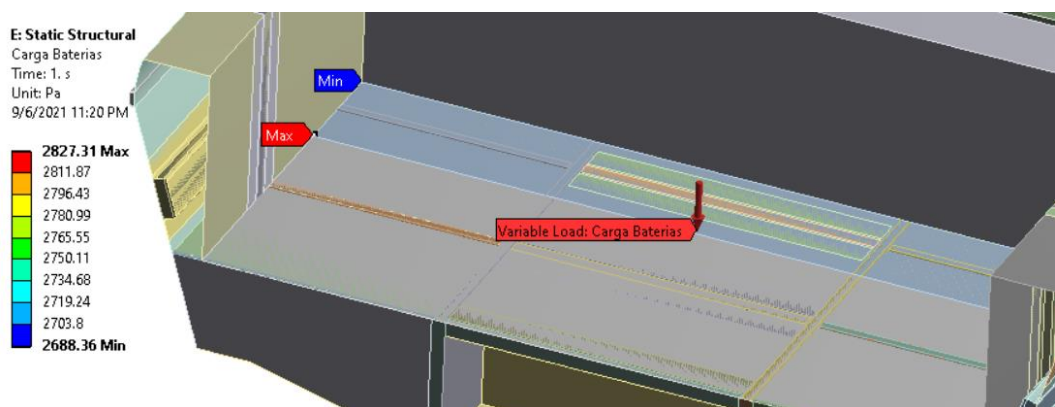


Figura F.11 Vista superior de la zona de baterías de la embarcación.

Fuente: ANSYS

1.2.5 Motores fueraborda

Esta embarcación cuenta con 2 motores de 300 HP (Suzuki DF300AP) y un motor de 250 HP (Suzuki DF250AP), cada uno con un peso de 350 kg y un empuje generado en la hélice de cada motor de 6265,6 N.



Figura F.12 Motores Suzuki DF250AP y DF300AP

Para la aplicación de las fuerzas generada por cada motor se descompone la misma de la siguiente forma: fuerza vertical, fuerza horizontal y momento, tal como se muestra en la Figura F.13. Donde: F_z es el peso de los motores, F_x es el empuje generado por las hélices y M_y es el momento generado por el empuje de cada motor.

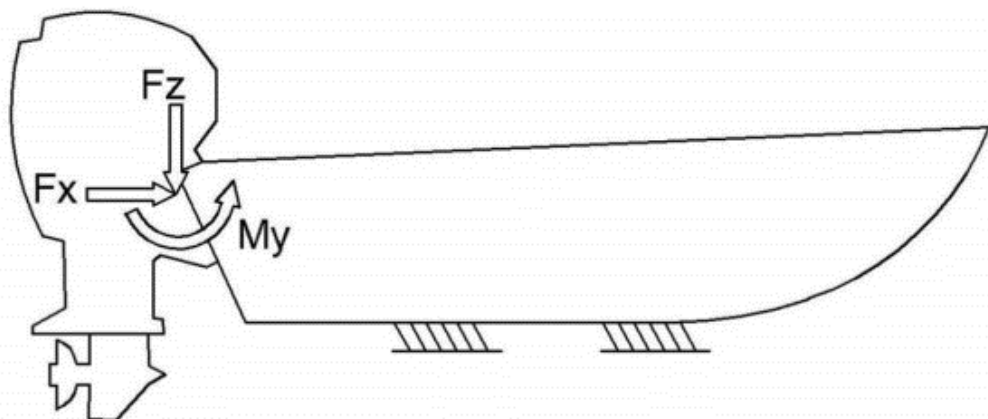


Figura F.13 Fuerzas y momento generado por los motores

El peso de cada motor es aplicado en los agujeros del soporte, para la aplicación de la carga se debe considerar la acción inercial debido a la presencia de la aceleración vertical desarrollada en esta sección de la embarcación. En el espejo tenemos una aceleración vertical de 9.66 m/s^2 y

sumando la aceleración vertical con la gravedad, la fuerza actuante en todos los agujeros del soporte de cada motor es -6815.9 N.

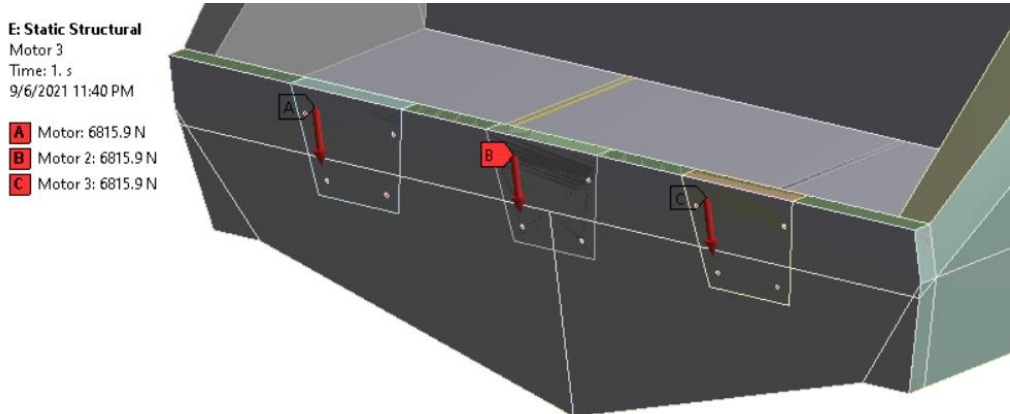


Figura F.14 Zona y aplicación de carga de motores en el espejo de la embarcación.

Fuente: ANSYS

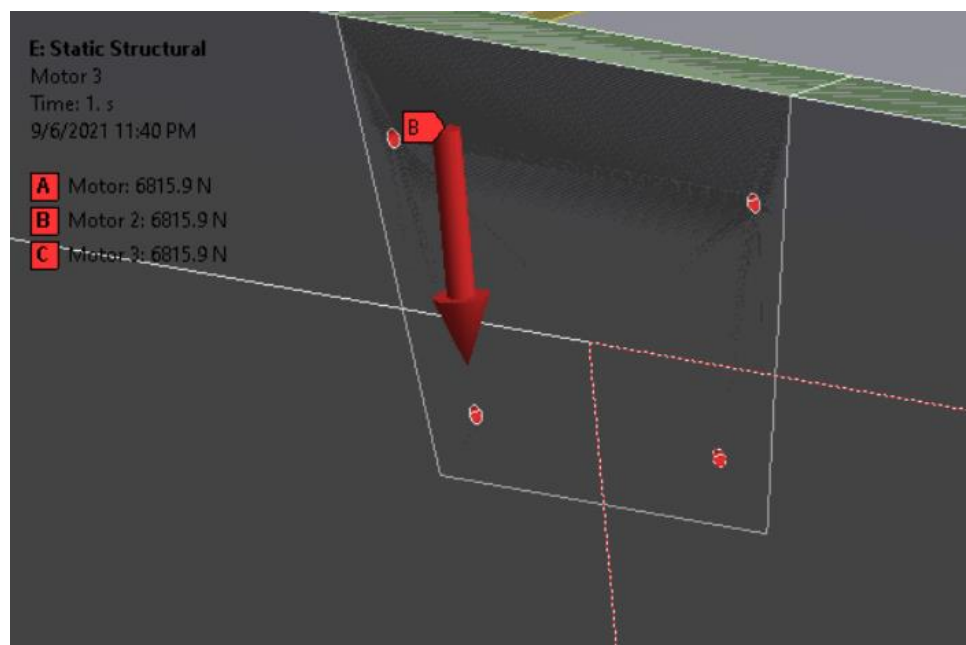


Figura F.15 Zona de agujeros seleccionada para la aplicación de carga de los motores.

Fuente: ANSYS

El empuje es generado en la hélice del motor fueraborda, el mismo que fue dividido en una fuerza de 6265.6 N en la dirección del empuje y un momento de -5212.8 M-m generado en los agujeros del soporte de cada motor, tal como se muestran en las siguientes figuras.

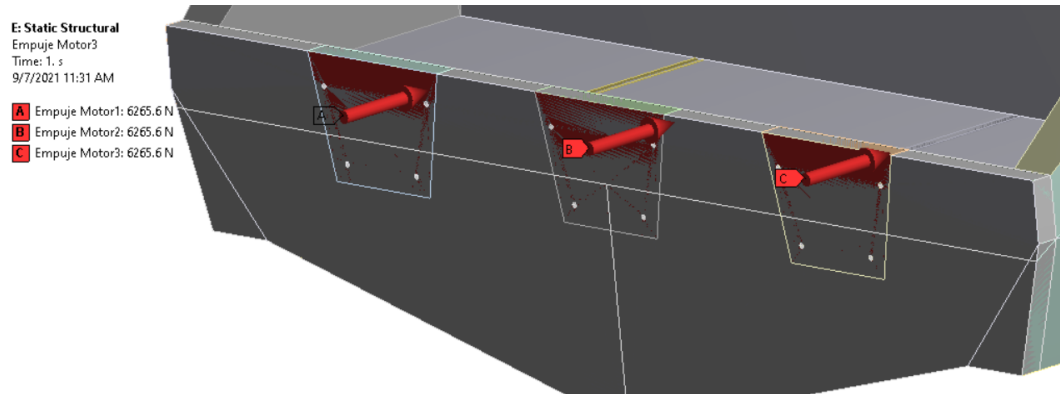


Figura F.16 Empuje generado por la hélice en el soporte de los motores.

Fuente: ANSYS

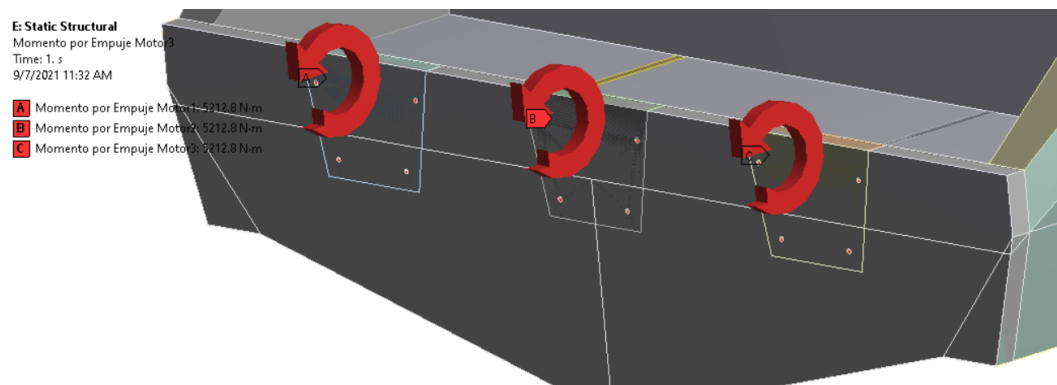


Figura F.17 Momento generado por el empuje en los agujeros del soporte de los motores.

Fuente: ANSYS

1.3 Condiciones de frontera

De acuerdo con lo establecido en la Tabla 2.6 del capítulo 2. Donde se determinó los valores de las condiciones de frontera a aplicar. En el espejo se aplica condiciones de frontera geométricas y en el corte condiciones de frontera naturales.

1.3.1 Condiciones de frontera en el espejo

Tenemos los valores de pendiente y deflexión en esta sección del módulo, se aplica la opción de desplazamiento remoto que nos permite darle valor de desplazamiento y rotación hacia cada dirección. En esta sección el valor de la pendiente es cero, solo tiene una rotación en el eje y de $1.40E-03$ radianes (0.0804°). Dichas condiciones son aplicadas en el centro de gravedad del

contorno del espejo a una altura de 41.35 cm, desde el fondo. Como se puede observar en la siguiente figura:

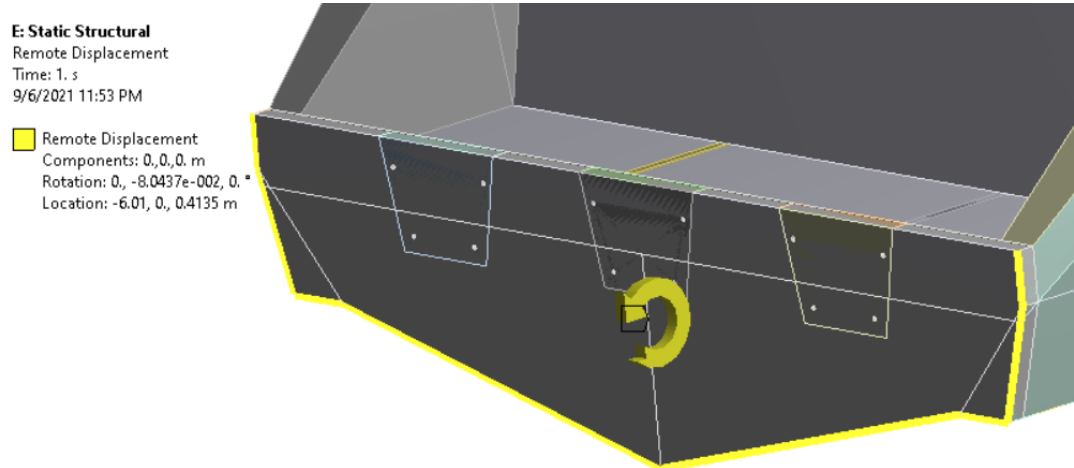


Figura F.18 Distribución de desplazamiento en el espejo.

Fuente: ANSYS

1.3.2 Condiciones de frontera en el corte

El corte fue realizado a 2,5 m desde el espejo, coincidiendo con la mitad de la cuaderna 4. En este punto se aplicó condiciones de frontera naturales, como lo indica la Tabla 2.6. Los valores de fuerza cortante y momento flector deben ser aplicados en el centro de gravedad de la sección a 41,35 cm desde el fondo.

La fuerza cortante es aplicada en los refuerzos longitudinales de la sección (longitudinales, quilla, palmejar y rodón) en dirección positiva un valor de 10386 N, como se muestra en la siguiente figura:

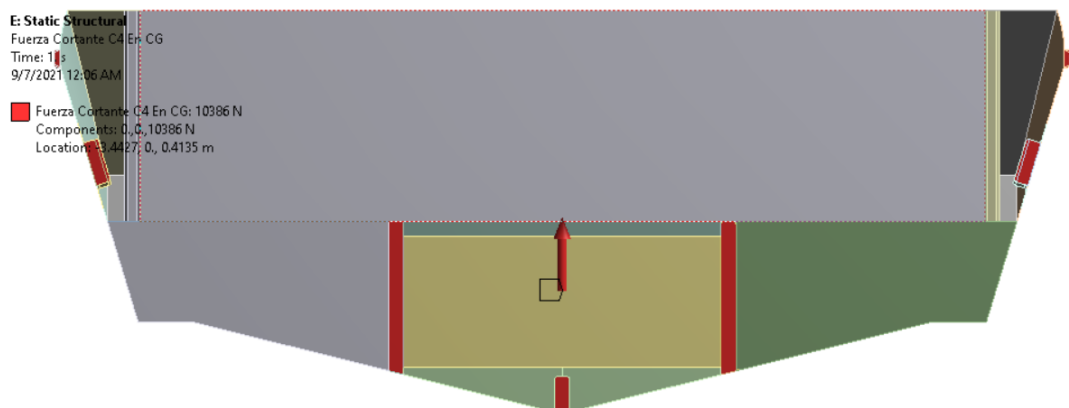


Figura F.19 Aplicación de la fuerza cortante en el corte del módulo.

Fuente: ANSYS

Para aplicar el momento flector se tomó la distancia entre el palmejar y la quilla, hacia el centro de gravedad de la sección. Y se procedió a calcular una fuerza igual en dirección x que su fuerza neta sea igual a cero, pero me brinde un momento igual al momento flector, obtenido como condición de frontera en el capítulo 2, con un valor de -17.728 kN-m.

Tabla F.4 Calculo de fuerza en dirección x para el momento flector.

	Y desde el fondo	Y desde CG	Fuerza en x [kN]	Momento en CG [kN-m]
Quilla y China	0.006 m	-0.41 m	21.08	-8.59
Palmejar y Rodón	0.8468 m	0.43 m	-21.08	-9.14
			FUERZA NETA	MOMENTO NETO EN CG [kN-m]
			0.00	-17.728

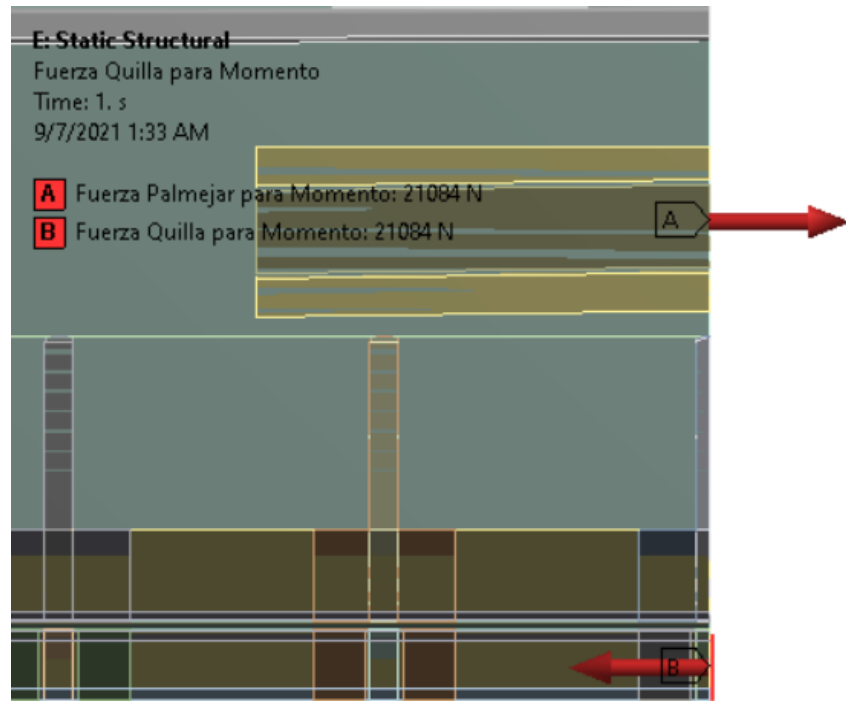


Figura F.20 Fuerza aplicada para generación de momento.

Fuente: ANSYS

1.4 Peso de la estructura

El peso de la estructura se aplica al obtener la acción de la gravedad -9.81 m/s^2 en el centro de gravedad de la estructura como se observa en la siguiente imagen:

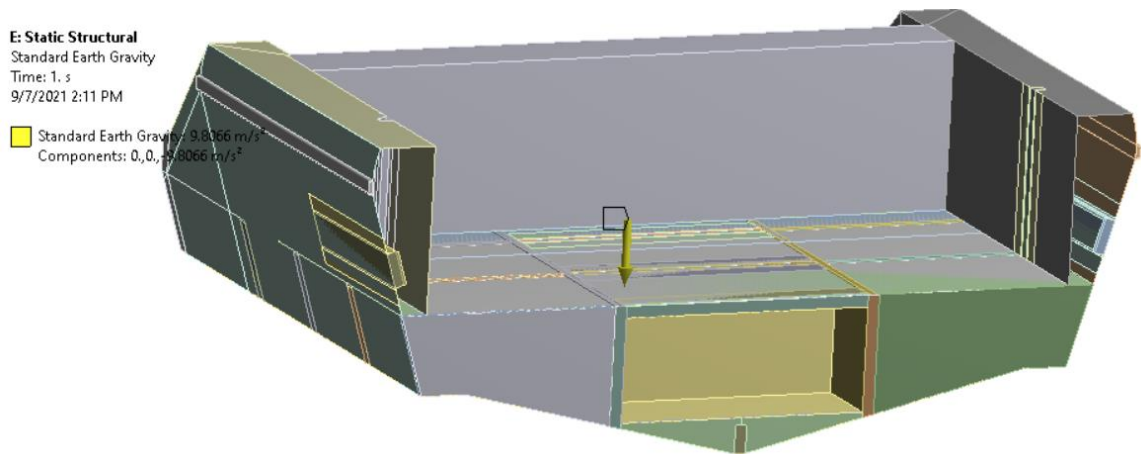


Figura F.21 Gravedad actuado en el centroide del módulo.

Fuente: ANSYS

1.5 Aceleración vertical

El valor de la aceleración varía lineal a lo largo de la embarcación como se observa en la Figura 1.9 del capítulo 1, para aplicarla en el modelo de popa, se obtiene el valor del centro de gravedad en el centroide de la estructura, ubicado a ,86 m hacia popa desde el centro de gravedad de la embarcación, con un valor de 14.87 m/s^2 , como se observa en la siguiente imagen.

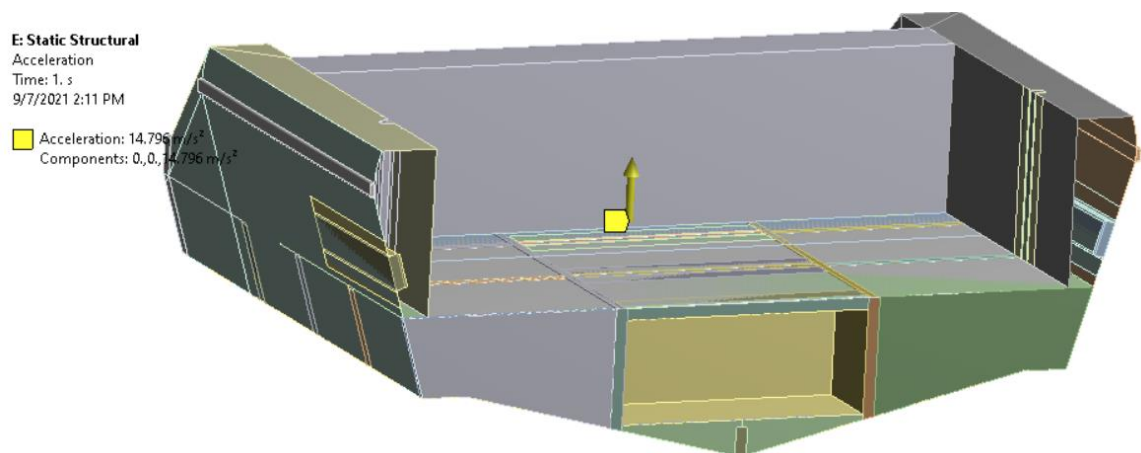


Figura F.22 Aceleración vertical actuado en el centroide del módulo.

Fuente: ANSYS

1.6 Aceleración rotacional

La aceleración rotacional calculada en el capítulo 1, es aplicada en el modulo con una acción en el centroide de la embarcación completa, ubicada a 4,14 m desde popa una altura de 41,35 cm desde el fondo y un valor de -4.03 rad/seg^2 , como se muestra en la siguiente figura

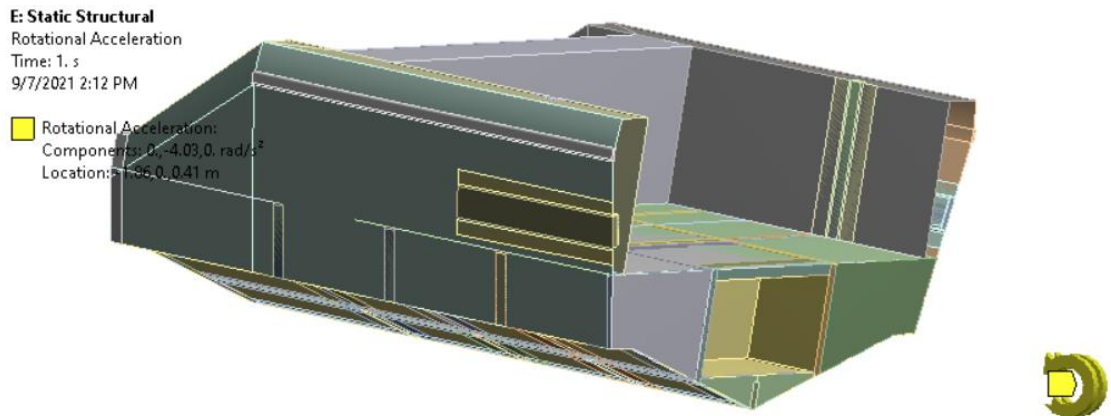


Figura F.23 Fuerza aplicada para generación de momento.

Fuente: ANSYS