

Diseño y validación del arreglo estructural de un Buque de Apoyo Logístico Liviano Fluvial mediante análisis directo

David Alvarado-Carvajal¹, Omar Vasquez-Berdugo²

¹División de Arquitectura Naval y Estructuras, Gerencia de Diseño e Ingeniería, COTECMAR, Colombia. Email: dalvarado@cotecmar.com

²División de Arquitectura Naval y Estructuras, Gerencia de Diseño e Ingeniería, COTECMAR, Colombia. Email: ovasquez@cotecmar.com

Resumen

El Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje Liviano es una embarcación diseñada, en el marco de un proyecto de I+D, para desarrollar misiones de apoyo logístico, atención de desastres y misiones de ayuda humanitaria a la población civil en zonas ribereñas en ríos de baja profundidad de la región Pacífica colombiana. La estructura del casco fue diseñada acorde a las recomendaciones de normativas de las sociedades de clasificación con el fin de obtener una navegación fluvial segura con una velocidad de 9 nudos y un calado máximo de 1,4 m.

A partir de la estructura obtenida, se realizó un análisis de elementos finitos global; desde las presiones y cargas calculadas en el escantillado como entradas, con la finalidad de validar el diseño y comparar los factores de seguridad de los componentes estructurales principales con los establecidos por las normativas. Acorde a la validación, se implementaron mejoras estructurales.

Palabras clave: análisis directo; escantillado; embarcaciones fluviales

Abstract

The Logistic and Support Light Ship, designed in the framework of a R&D project, is capable of providing logistic support, disaster relief, and humanitarian aid missions to reach isolated communities where the only way to arrive is by shallow rivers in the Colombian pacific basin. The scantling was designed according to classification societies rules in order to secure a safe and effective inland waters navigation at 9 knots with 1,4 m of draft.

From the structural arrangement obtained and according to the standards, a global finite element analysis was performed, using pressures and loads from scantling rules as inputs, to obtain and comparing safety factors of the primary structural components. Accordingly, structural improvements were implemented in the design.

Keywords: direct analysis; scantling; inland vessels

1. Introducción

El Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje Liviano es una embarcación diseñada para desarrollar misiones de apoyo logístico, atención de desastres y de ayuda humanitaria a la población civil residente en zonas ribereñas en la región Pacífica colombiana [1]. Mediante un proceso de diseño iterativo se han obtenido sus dimensiones principales, siendo estas una eslora de flotación de 40,1 m, una manga en línea de flotación de 8,0 m y un desplazamiento de 313 toneladas principalmente [2] [ver tabla 1]. La estructura del casco fue diseñado acorde a las

recomendaciones realizadas por las sociedades de clasificación esto con el fin de obtener una navegación fluvial segura con una velocidad de hasta 9 nudos, un calado de 1,4 m a máxima carga [ver figura 1 y 2].

Tabla 1. Dimensiones de escantillón de la embarcación

Dimensiones de escantillón		
Eslora total (Loa)	43,4	m
Eslora de escantillón (L)	38,4	m
Manga de flotación (BWL)	8,0	m
Puntal (D)	2,3	m
Calado de diseño (T)	1,4	m

Desplazamiento (Δ)	313,2	Tm
Velocidad de diseño (V)	9,0	m
Velocidad de operación en aguas someras (V_{01})	6,0	Nudos
Velocidad de operación en aguas profundas (V_{02})	8,0	Nudos
Coefficiente de bloque (C_b)	0,812	

Fuente: elaboración propia



Figura 1. Modelo funcional de la embarcación Fuente: elaboración propia

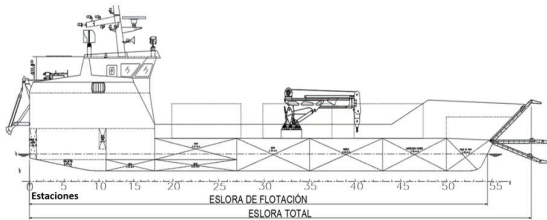


Figura 2. Dimensiones de la embarcación y distribución de mamparos. Fuente: elaboración propia

Los elementos estructurales fueron calculados de forma que sus áreas transversales, inercias y módulos de sección son superiores a las descritas en la norma “LR Rules and regulations for the classification of special service craft” en su parte 5: ‘design and load criteria’, su parte 6: ‘Hull construction in steel’ y la parte 7: ‘hull construction in aluminium’ [3] para la construcción del puente de mando y mástil. Para esloras menores a 50 metros [3] indica que el cálculo del módulo de sección de la embarcación se determina localmente por las propiedades de sus refuerzos. No obstante, el módulo de sección en la cuaderna maestra fue calculado acorde a la normativa de ABS “Rules for Building and Classing: Steel Vessels under 90 meters” [4] a forma de verificar el factor de seguridad de la viga-buque en su sección media. De esta, se obtuvo que la embarcación presentaba un módulo de sección (SM) 1,21 veces superior al requerido [ver tabla 2].

Tabla 2. Módulo de sección en la cuaderna maestra

Módulos de sección viga-buque		
SM mínimo requerido	1286,45	cm ² -m
SM resultante del arreglo	1558,35	cm ² -m
Factor de seguridad	1,21	

Fuente: elaboración propia

1.1. Arreglo estructural

La estructura del fondo consiste en una quilla en acero A131 GR. A de 28 mm de espesor, un forro de fondo de 7 mm, 6 refuerzos longitudinales de bulbo en acero A36 y 6 vagras de 7 mm de espesor en acero A131 ubicadas simétricamente a 650 mm, 1750 mm y 2850 mm de la línea de crujía. Cuando estas vagras no cumplen función de pared de tanques, cuentan con aligeramientos. Se incluye un forro de espesor de 9 mm en la proa hasta el mamparo de colisión para protección del casco en operaciones de empuje. En sentido vertical, el espesor de fondo se mantiene hasta el pantoque de la embarcación a 150 mm sobre la línea de flotación; a partir de ese punto, los costados de la embarcación disminuyen a 6 mm de espesor [ver figura 3]. La cubierta principal, en la zona de carga, cuenta con un espesor de 7 mm y refuerzos longitudinales equitativamente espaciados a 550 mm entre sí [5].

El casco cuenta con un doblefondo, reforzado longitudinalmente por vagras y refuerzos de bulbo y transversalmente por las varengas del fondo, que se extiende desde la estación 11 hasta el mamparo de la estación 18, para ser continuado entre la estación 35 y la 43 y luego en la estación 45 y 52. Esta cubierta cumple con la función de dividir tanques superiores, para transporte de combustible, de los tanques de lastre y tanques vacíos que se encuentran en el fondo [ver figura 4]. El dimensionamiento estructural de la embarcación, detallado en el cuadernillo de escantillonado [5].

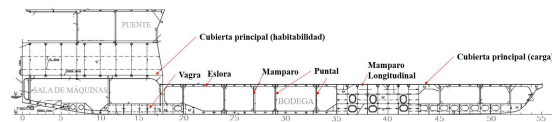


Figura 3. Corte longitudinal de la embarcación CL+650mm. Fuente: elaboración propia

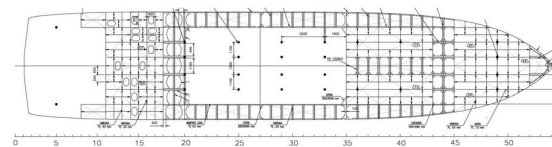


Figura 4. Cubierta de doblefondo. Fuente: elaboración propia

El buque cuenta con particularidades dadas las restricciones para el diseño. Entre estas se cuentan la diferencia de alturas de la cubierta principal en la región de carga y habitabilidad, la disminución de las dimensiones de los refuerzos de cubierta por el uso de puntales y la reducción en el módulo de sección de los refuerzos de fondo en la sección media del casco para obtener altura en la bodega - entre las estaciones 27 y 35-. En algunos casos no se tienen consideraciones específicas para aplicación de la normativa. Por lo tanto, es necesario validar el escantillonado obtenido mediante análisis directo.

El objetivo del presente trabajo es validar mediante análisis estructural estático, modal y de pandeo, el arreglo estructural del Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje Liviano obtenido mediante normativas de las sociedades de clasificación.

A partir de los resultados obtenidos, se evalúa su factor de seguridad en función de las recomendaciones de las sociedades de clasificación para análisis directos [6], [7] y su comparación con el factor de seguridad obtenido por los cálculos de escantillonado [5]. Adicional a esto, se realizaron análisis de pandeo; cuya finalidad consiste en confirmar que los elementos sujetos a cargas compresivas, como puntales y mamparos no presenten fallas por pandeo y análisis de vibración libre; para determinar las frecuencias de resonancia de los elementos estructurales principales de la embarcación.

2. Método

En la presente metodología, se detalla el desarrollo del modelo computacional para verificar el cumplimiento de las normas de la Sociedad de Clasificación [6] y el alcance de dichas normas. Se describirá el modelamiento de la estructura, el enmallado realizado, condiciones de frontera y condiciones de carga. Para el desarrollo del presente estudio, fue necesario realizar ciertas suposiciones que serán explicadas a continuación.

- a. **Estado plano de esfuerzos:** Las secciones del ensamble cuyo espesor es considerablemente menor en relación con sus demás dimensiones y que además no presentan cargas perpendiculares, pueden simplificarse como elementos bidimensionales o tipo “Shell”.
- b. **Supresión de elementos de soporte terciarios:** los rigidizadores menores y cartabones tienen un efecto limitado en el perfil de esfuerzos. De esta forma, solo serán añadidos en regiones críticas del modelo.
- c. **Análisis lineal-elástico:** El presente análisis es desarrollado bajo un modelo lineal- elástico del material y deflexiones bajas. Con este modelo, el esfuerzo varía lineal y proporcionalmente respecto a la carga aplicada.
- d. **Simplificación de las uniones soldadas:** El estudio del comportamiento de las uniones soldadas bajo las cargas aplicadas se encuentra fuera del alcance de este análisis. Por ende, el ensamble de las piezas se representa como contactos tipo “bonded” con el fin de evitar movimientos relativos entre las mismas. De igual forma, las uniones de paneles que se encuentren en

el mismo plano son simplificados al asumir la continuidad del material. Es menester anotar que la aplicación de contactos en la superficie podría generar puntos de esfuerzos altos o “hot spots” los cuales no representan adecuadamente el estado real de los esfuerzos [7] [8].

2.1. Geometría

Se realizó un modelo global de la embarcación de superficies sin espesor. Posteriormente, se le asigna a cada uno de estos elementos su espesor real a modo de constante para la solución del análisis. Elementos como bulbos y perfiles en T lejanos a las regiones de interés fueron modelados como laminas cuyos espesores son ajustados para proveer de la inercia equivalente de los refuerzos seleccionados. Los puntales fueron modelados como elementos bidimensionales tipo viga a los cuales son asignados las inercias y áreas transversales correspondientes [ver figura 4].

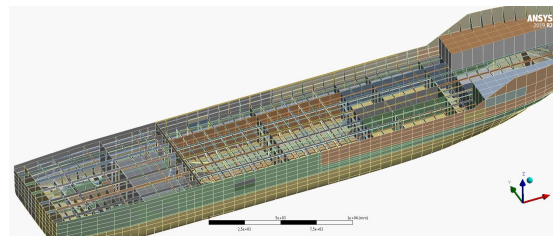


Figura 4. Cubierta de doble fondo. Fuente: elaboración propia

2.2. Mallado

El modelo estructural consta de elementos del tipo SHELL181 que representan las superficies de la geometría [ver figura 5]. Este tipo de elemento permite analizar estructuras de espesores delgados [9]. Las superficies tipo bulbo son modeladas como secciones rectangulares que conservan la longitud y su inercia, asemejándose a su sección real.

El mallado tiene un tamaño general de elemento de 60 mm. En las zonas de mayor interés se aplican refinamientos locales con un tamaño de elemento de hasta 40 mm de forma que entre refuerzos longitudinales se tienen al menos 10 elementos. El modelo hace uso de elementos hexagonales “4 Node Linear Quadrilateral” y en menor medida de elementos tetragonales “4 Node Linear Triangular”.

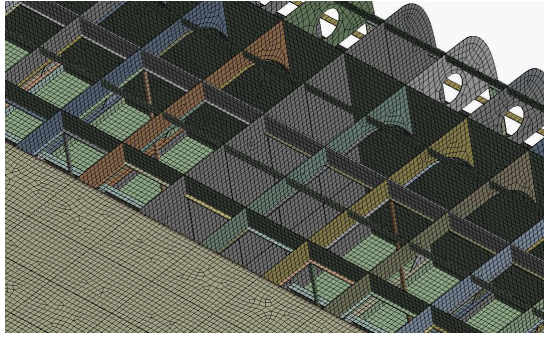


Figura 5. Mallado del fondo. Fuente: elaboración propia

2.3. Restricciones

Las restricciones de movimiento del modelo consisten en soportes simples que evitan el movimiento de cuerpo rígido de la embarcación [6]. Las reacciones en los soportes del modelo son compensadas con la opción de ANSYS, ‘Inertial relief’ [7]. Esta opción funciona equilibrando la carga externa con cargas de inercia y aceleraciones dentro de la estructura misma, de esta manera, las reacciones en los soportes son minimizadas.

Estos puntos de fijación deben estar lejos de zonas de interés. En el presente caso, los soportes simples son ubicados en el mamparo frontal de la sala de máquinas y en el mamparo de sujeción [ver figura 6] [6].

	Location	Direction of support
Engine room Front Bulkhead	SB	Z
	CL	Y
	PS	Z
Collision Bulkhead	CL	X
	CL	Y
	CL	Z

Figura 6. Cubierta de doblefondo. Fuente: DNV [5].

2.4. Esfuerzos Admisibles

Se considera la teoría de Energía de Distorsión máxima o esfuerzo equivalente de Von Mises como criterio de falla. Este criterio toma en cuenta tanto los esfuerzos normales como cortantes para desarrollar un estado combinado equivalente de esfuerzos [10]. Por esta razón, no se hacen necesarios estudios separados de esfuerzos flectores y de cortantes.

Según el criterio de falla de Von Mises, la estructura no fallará en tanto el esfuerzo equivalente no supere el esfuerzo de fluencia del material ($\sigma_e < S_y$). Adicionalmente, el esfuerzo equivalente admisible es reducido mediante el uso de un factor adicional (FP) establecido por la sociedad de clasificación *Lloyd's Register* [7].

Para los esfuerzos permisibles en puntales, el esfuerzo crítico descrito se calcula con la siguiente relación:

$$\sigma_{crit} = \frac{\sigma_0}{\left(1 + \frac{\sigma_0}{E} * \left(\frac{L_e}{\pi * r}\right)^2\right)}$$

En donde:

σ_0 =Esfuerzo de fluencia
 E = Módulo de elasticidad
 L_e = Longitud efectiva
 r = radio de giro

A continuación, se resumen los valores de esfuerzos equivalentes admisibles [ver tabla 3].

Tabla 3. Módulo de sección en la cuaderna maestra

Esfuerzos admisibles	
Elemento estructural	Esfuerzo admisible
Elementos longitudinales	220 MPa
Elementos transversales	165 MPa
Puntales	157 MPa

Fuente: elaboración propia.

2.5. Condiciones de carga

Para el análisis estructural, fueron aplicadas las presiones de diseño calculadas para las condiciones de operación de la embarcación en ambientes fluviales. Estas presiones son resumidas a continuación [ver tabla 4] [5].

Tabla 4. Presiones de diseño en superficies del casco

Elemento	Valor	Unidad
Fondo en sección media	46,7	kN/m ²
Costado en la Línea de Flotación LF	41,5	kN/m ²
Cubierta 1 carga	16,2	kN/m ²
Cubierta 1 habitabilidad	12,4	kN/m ²
Cubierta 01	12,4	kN/m ²
Cubierta 01 en proa	14,0	kN/m ²
Cubierta 02	12,5	kN/m ²
Mamparos estancos	14,4	kN/m ²
Mamparos tanques profundos	22,4	kN/m ²
Forros superestructura	12,5	kN/m ²

Fuente: elaboración propia.

2.6. Materiales

Para el análisis por elementos finitos, fueron asignadas a la estructura las propiedades mecánicas del acero de uso naval A131 grado A. Dichas propiedades se presentan a continuación [ver tabla 5].

Tabla 5. Propiedades de materiales [11].

Propiedad	Valor	Unidad
Esfuerzo de fluencia	235	MPa
Densidad	7850	Kg/m ³
Módulo de rigidez	200	GPa
Esfuerzo a la ruptura	460	MPa
Coefficiente de Poisson	0,3	-----

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis Estructural

En la presente sección se discutirán los resultados obtenidos para las presiones previamente descritas. En primer lugar, se analizan los niveles de esfuerzos encontrados en el fondo de la embarcación.

El fondo de la embarcación presenta esfuerzos superiores a 50 MPa en la mayor parte del fondo, siendo estos más altos en regiones cercanas a la quilla donde la separación entre la quilla y las vagras son de 650 mm y en regiones en que la separación transversal de refuerzos es de 1600 mm; tal es el caso de las regiones de tanques anteriores al mamparo 18 y posteriores al mamparo 35 [ver figura 7]. Las zonas con doblefondo presentan esfuerzos cercanos a la quilla entre 60 y 70 MPa mientras que los compartimientos entre el mamparo 18 y 35, que no cuentan con doblefondo y sus refuerzos de fondo tienen menor área transversal y módulo de sección, presentan valores cercanos a 100 MPa [ver figura 8 y 9].

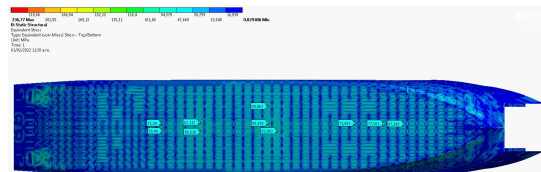


Figura 7. Esfuerzos del fondo ($\sigma_{e_max}=95,4$ MPa). Fuente: elaboración propia

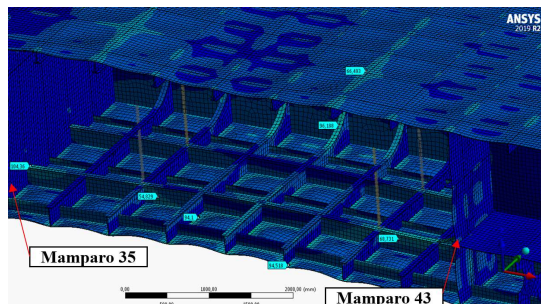


Figura 8. Esfuerzos en bodega ($\sigma_{e_max}=104,3$ MPa). Fuente: elaboración propia

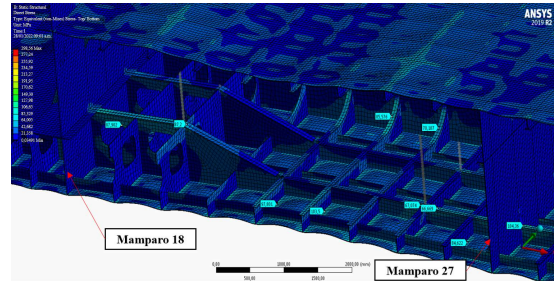


Figura 9. Esfuerzos en cercanías de la discontinuidad de cubierta ($\sigma_{e_max}=103,5$ MPa). Fuente: elaboración propia

La cubierta de la embarcación es soportada por dos mamparos longitudinales a 2850 mm de la línea de crujía, mamparos transversales en las estaciones 18, 27, 35, 38, 43 y 45 y mamparos de forma que las esloras no tengan longitudes sin soporte mayores a 4 metros. Con este arreglo estructural, se tiene que la cubierta a proa del mamparo 35 tiene esfuerzos cercanos a 40 MPa en las láminas de cubierta mientras que en las zonas sin doblefondo, entre el mamparo 18 y 35, el nivel de esfuerzos en las láminas es cercanos a 70 MPa en cercanías a la ubicación de los puntales e inferiores a 50 MPa en regiones lejanas a estos [ver figura 10]. En todos los casos previos, los esfuerzos están por debajo del límite admisible.

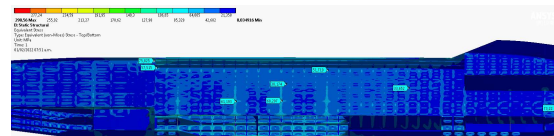


Figura 10. Esfuerzos en bodega ($\sigma_{e_max}=68,2$ MPa). Fuente: elaboración propia

Los refuerzos longitudinales bajo cubierta, en la región de mayor separación entre soportes, presentan valores inferiores a 130 MPa. En cercanías a los puntales, el nivel de esfuerzos alcanza 110 MPa, en otros segmentos de las esloras, sus esfuerzos no superan los 90 MPa [ver figura 10 y 11]. Los baos presentan esfuerzos inferiores a 30 MPa, la unión de los baos con las cuadernas muestra esfuerzos cercanos a 52 MPa sin la inclusión de los cartabones que harían de esta magnitud considerablemente menor.

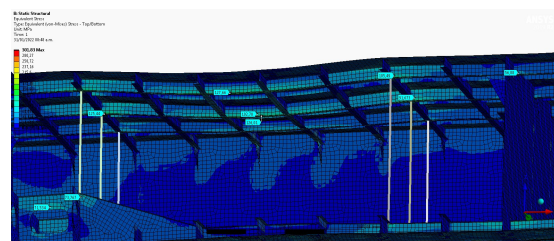


Figura 11. Esfuerzos en cubierta ($\sigma_{e_max}=127,6$ MPa). Fuente: elaboración propia

En la región media de la embarcación, las vagras presentan esfuerzos de hasta 75 MPa en cercanías del

mamparo 17 y en la transición que se da para tener la altura del doblefondo en el mamparo 35. Las esloras reportan valores entre 50 y 95 MPa [ver figura 12].

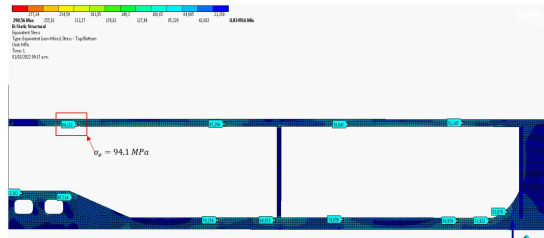


Figura 12. Anillo estructural CL+650mm sección media ($\sigma_{e_max}=94,1$ MPa). Fuente: elaboración propia

En la sección de popa de la embarcación existe una concentración de esfuerzos en la zona en que tiene lugar la discontinuidad de la cubierta. En esta discontinuidad, los esfuerzos son cercanos a 100 MPa. En cercanías del mamparo 11 se da un incremento de esfuerzos a 110 MPa en las esloras [ver figura 13].

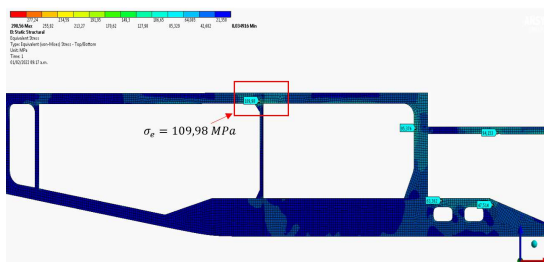


Figura 13. Anillo estructural CL+650mm sección popa ($\sigma_{e_max}=109,9$ MPa). Fuente: elaboración propia

En la sección de proa se reporta un incremento de los esfuerzos en la ubicación del puntal en la estación 49 y en el mamparo 52. En el primero el nivel de esfuerzos tiene un valor de 70 MPa mientras que en la intersección del mamparo 52 y el mamparo longitudinal del castillo de proa los esfuerzos incrementan hasta 73 MPa [ver figura 14]. En todos los casos previos, los esfuerzos están por debajo del límite admisible.

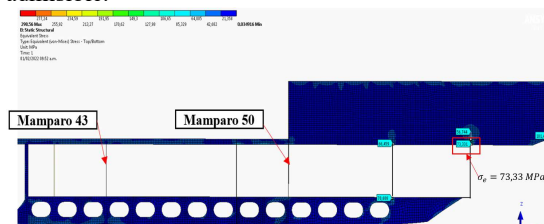


Figura 14. Anillo estructural CL+650mm sección proa ($\sigma_{e_max}=73,3$ MPa). Fuente: elaboración propia.

En la transición de la cubierta principal entre la región de carga y habitabilidad, se modelaron refuerzos verticales T 250X6 + 100X8. No obstante, debido a la necesidad de espacio en el cuarto auxiliar de máquinas,

se evaluó la reducción de este refuerzo a uno T 200X6 + 100X8, sin embargo, los esfuerzos en la curvatura del refuerzo aumentarían 1,5 veces y en la conexión con el doblefondo sería de 1,6 [ver figura 15]. De esta manera, se analizó la inclusión de un refuerzo vertical adicional al otro lado del mamparo hacia proa.

Con este refuerzo adicional, el gradiente de esfuerzos se desplaza por este para desembocar en la vagra al otro lado del mamparo, posibilitando de esta forma eliminar el cartabón de conexión con el doblefondo [ver figura 16]. De esta manera, los esfuerzos en la curvatura del refuerzo disminuyen un 27% y en la unión con el doblefondo en un 40%.

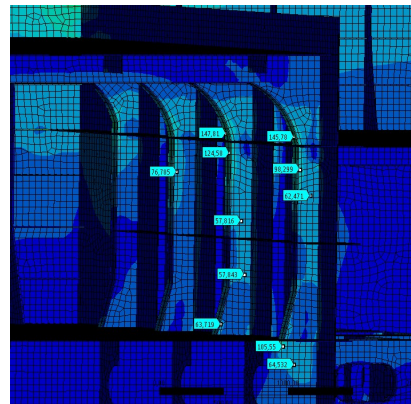


Figura 15. Refuerzos verticales del mamparo 18 como T250X6+100X8 ($\sigma_{e_max}=147,8$ MPa). Fuente: elaboración propia

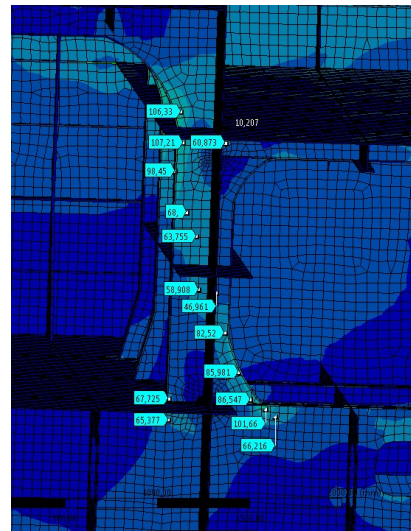


Figura 16. Refuerzos verticales del mamparo 18 como T200X6+100X8 y T100X6+80X8 en proa ($\sigma_{e_max}=107,2$ MPa). Fuente: elaboración propia

Tras el mamparo 18 hacia popa, en la región de habitabilidad, fue ubicado un puntal cuya finalidad es disminuir la distancia no soportada de la eslora. Con este puntal, la conexión con la eslora muestra valores

de esfuerzos cercanos a 70 MPa [ver figura 17]. No obstante, se evaluó el efecto de eliminar el puntal y la cuaderna correspondiente en el nivel de esfuerzos y se encontró que al eliminar el puntal los esfuerzos en la eslora son 1,6 veces mayores, pero aun contando con un factor de seguridad de 4,7. Los esfuerzos asociados a la ubicación del puntal disminuyeron un 42% [ver figura 18].

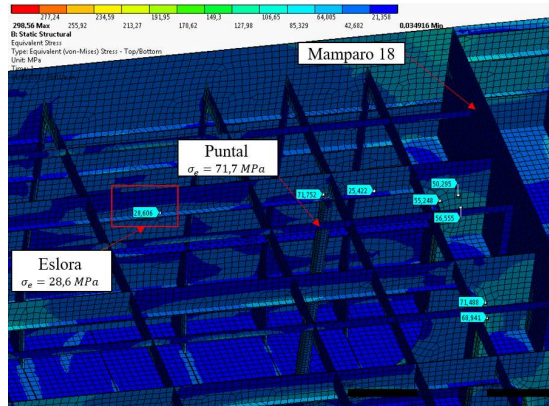


Figura 17. Estructura en habitabilidad con el puntal ($\sigma_{e_max}=71,7$ MPa) Fuente: elaboración propia

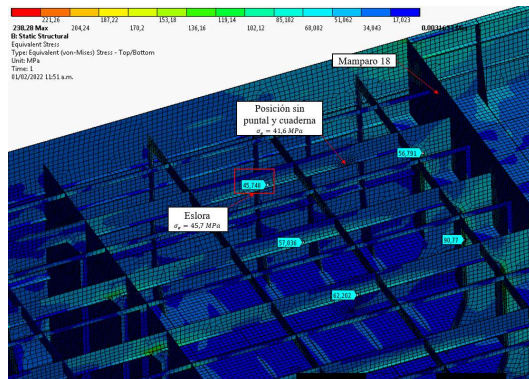


Figura 18. Estructura en habitabilidad sin el puntal ($\sigma_{e_max}=45,75$ MPa) Fuente: elaboración propia

El esfuerzo máximo reportado se encuentra en la conexión entre el cilindro del propulsor simplificado con sus refuerzos aledaños [ver figura 19]. Sin embargo, la magnitud de esfuerzos tiene un carácter focalizado cuya deformación plástica no comprometería la resistencia general del refuerzo. No obstante, en la geometría del modelo, en donde existen transiciones súbitas de rigidez como aristas vivas, bordes agudos, o contactos puntuales entre varias superficies; los esfuerzos reportados en los nodos cerca de estas regiones podrían no corresponder a la realidad. Estas regiones son identificadas por la rápida transición o elevado gradiente desde magnitudes de esfuerzos relativamente bajas hasta valores significativamente altos [7]. Dado lo anterior, se considera el máximo nivel de esfuerzo reportado en la figura 19 no corresponden a la realidad.

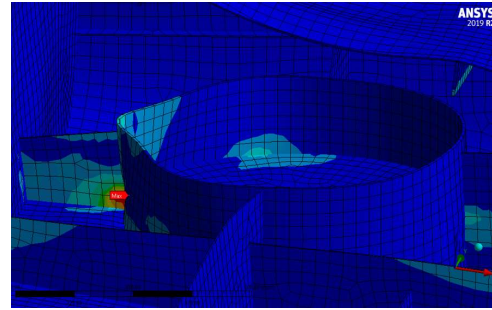


Figura 19. Máximo valor reportado en región del propulsor Fuente: elaboración propia

Al comparar los resultados de los factores de seguridad obtenidos por normas de escantillonado con los resultados de análisis directo, se puede observar que, en la gran mayoría de los casos, los resultados de escantillonado son más conservadores. La única excepción encontrada se da en las vagras en regiones sin doblefondo. Esto se puede deber a las transiciones de altura con el doblefondo, y el efecto de la conexión de los puntales [ver tabla 6].

Estos efectos no son considerados en las generalidades de las normativas provistas por las sociedades de clasificación que compensan falta de particularidad con un factor de seguridad más conservador. En el caso de la presente embarcación con las particularidades de una cubierta principal discontinua y la concentración de esfuerzos producto de las transiciones entre el fondo y doblefondo a mitad de la eslora del casco, se tiene en estas últimas, valores de esfuerzos superiores a los esperados por las normativas y, por ende, habría una sobre estimación de la resistencia estructural de esa región.

Tabla 6. Módulo de sección en la cuaderna maestra

Factores de seguridad estructurales		
Elemento Estructural	F.S escantillón [2]	F.S Análisis Directo
Vagras	4,13	3,23
Vagras doblefondo	1,8	3,38
Varengas	1,13	1,7
Cuadernas carga	4,01	7,5
Esloras bodega	1,21	1,74
Fondo	1,1	2,31
Costado	1,18	2,58
Cubierta de carga	1,37	3,10
Cubierta habitabilidad	1,61	4,8

Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis Modal

En el análisis modal (o vibración libre) se evaluaron las frecuencias en la que las vibraciones pueden ocasionar fenómeno de resonancia en los diversos componentes

de la estructura. La mayoría de las frecuencias encontradas residían en laminas cuyos rigidizadores fueron suprimidos por las simplificaciones del modelo. Sin embargo, la mínima frecuencia de resonancia reportada se da en la varenga de la estación 5 con cuya altura da soporte al pedestal del propulsor [ver figura 20]. La frecuencia de resonancia se daría a 26,7 Hz. La ubicación de la base de generadores y la inclusión de estructura terciaria como cartabones en conexión con las vagras, aumentaría esta frecuencia. Se toma esta frecuencia como primera referencia para selección de equipos rotodinámicos en cercanías a esta varenga.

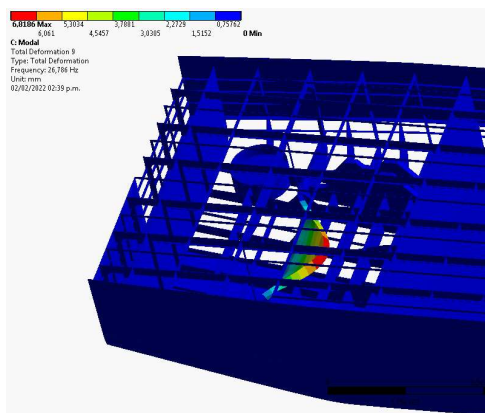


Figura 20. Frecuencia natural mínima en sala de máquinas (26,7 Hz) Fuente: elaboración propia

3.3. Análisis de Pandeo

Se realizó un análisis de pandeo lineal (eigenvalue Buckling) con un modelo segmentado entre mamparos para estudiar la sección media de la embarcación cuya carencia de doblefondo y mayor longitud de puntales y mamparos longitudinales las harían más propensas a presentar fallas por inestabilidades dadas por cargas compresivas.

De este modelo seccionado se encontró que los mamparos longitudinales presentan un menor factor multiplicador de pandeo con un valor de 6,6. Al ser este factor superior a 1, se considera que los elementos estructurales no fallarán por pandeo [ver figura 21].

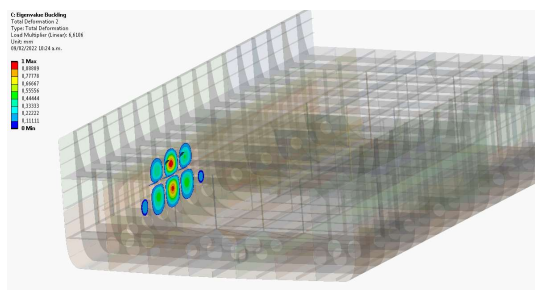


Figura 21. Factor multiplicador al pandeo (6,61) y región crítica Fuente: elaboración propia

Para conocer el factor de seguridad a pandeo de los puntales se obtuvo del modelo las cargas axiales y, de forma separada, los esfuerzos axiales de los puntales para comprobar el factor de seguridad a fallas por fluencia [ver figura 22 y 23].

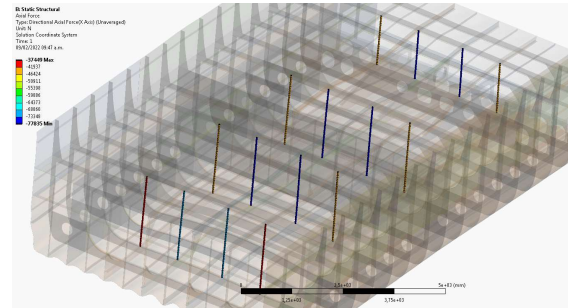


Figura 22. Carga axial en puntales. Fuente: elaboración propia

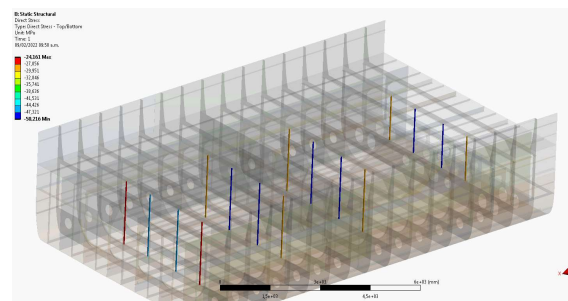


Figura 23. Esfuerzo axial en puntales. Fuente: elaboración propia

A partir de las cargas axiales en cada puntal y usando las relaciones para columnas tipo Euler, se encontró la carga crítica a pandeo en función del módulo de elasticidad, inercia, área seccional y longitud de la columna [7] [10]. La carga axial máxima se da en los puntales más cercanos a la línea de crujía con un valor de 77,8 kN. La carga crítica al pandeo mínima, asumiendo una columna empotrada en ambos extremos es de 900,6 kN. En este caso, se tendría un factor de seguridad a pandeo de 11,6.

El esfuerzo axial máximo reportado tiene lugar también en los puntales más cercanos a la línea de crujía con un valor de 50,21 MPa, esto es un factor de seguridad de 3,12. De esta manera, una falla por sobrecarga compresiva es más crítica que una falla por pandeo ya que la carga requerida para la primera es 2,9 veces menor a la necesaria para generar una falla por pandeo.

4. Conclusiones

Los espesores de láminas y dimensiones de refuerzos del arreglo estructural del Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje Liviano presentan esfuerzos menores a los esfuerzos equivalentes admisibles definidos por el análisis directo y las formulaciones de las normativas.

Algunos elementos estructurales en transiciones del fondo presentan esfuerzos superiores a los esperados en los planteamientos por la normativa, conllevando a una sobrevaloración de su resistencia.

El análisis directo permite identificar regiones con posibilidad de realizar un mejoramiento estructural con base en la distribución de esfuerzos obtenidos. Esto con el fin de mejorar el espacio disponible al interior de la embarcación, disminución de factores de seguridad y subsecuente reducción de peso como parte de los objetivos de la formulación del proyecto.

La menor frecuencia de resonancia se encuentra en la varenga de popa que sirve de soporte a la base del propulsor con un valor de 26,7 Hz

El arreglo estructural de la sección media, el más propenso a presentar pandeo, reporta un factor multiplicador de carga mínimo de 6,6, al ser este mayor a la unidad, el arreglo estructural de la embarcación no presentará pandeo.

5. Agradecimientos

Se agradece a la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial COTECMAR y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación MINCIENCIAS por los apoyos recibidos para el desarrollo de la presente investigación.

6. Referencias

[1] COTECMAR. Diseño Básico y Prototipo Virtual de una Unidad Tipo Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje Liviano para la ARC. Formulario de proyecto Minciencias 75777. 2019.

[2] D. Alvarado, E. Flores, O. Vásquez. Ship Synthesis Model for the Conceptual Design of a Riverine Logistic Support Ship. [manuscrito enviado a publicación]. Developments and Advances in Defense and Security. Proceedings of MICRADS 2022

[3] Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Special Service craft" July 2020.

[4] ABS. Rules for Building and Classing. Steel Vessels under 90 meters – Part 3: Hull Construction and Equipment. July 2019.

[5] COTECMAR. CT-ARC-3500-181-02. Cartilla de escantillonado. Proyecto BALC-L. 2021.

[6] DNV-GL. DNVGL-CG-0127. Class Guideline Finite Element Analysis. 2015

[7] Lloyd's Register. ShipRight Design and construction. Direct calculations for special service craft of metallic constructions. 2015.

[8] Song, G., Chuxia, Q., Kun, L. Stress Assessment for 2D Corner based on Singularity Strength Method. International Conference on Civil and Hydraulic Engineering. IOP Publishing. 2018.

[9] Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Structural Hot-Spot Stress Determination Using Finite Element Analysis. In: Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components. IIW Collection. Springer, Singapore. 2018.

[10] Budynas, R. Nisbett, J. Shigley's Mechanical Engineering Design. Chapter 4: Deflection and stiffness. 2012

[11] Lloyd's Register, Rules for the manufacture, testing and certifications of materials, London: Lloyd's Register Group, July 2020.