



Artículo

Análisis Estructural de la Cubierta de una Barcaza de Carga sobre Cubierta, mediante el Método de Elementos Finitos para Predecir los efectos de la Corrosión y la Fatiga en el Esfuerzo de Colapso

Structural Analysis of the Deck of a Deck-Cargo Barge using the Finite Element Method to Predict the Effects of Corrosion and Fatigue on Collapse Stress

Alfonso E. Arrieta Z. 

Magister en Ingeniería Naval. Docente de la Universidad ECCI, docente Universidad Libre de Bogotá, docente Instituto Técnico Central La Salle, docente Universidad Distrital Francisco José de Carldas. Bogotá D.C., email: blindados19@gmail.com

Resumen: Este artículo analiza el riesgo de colapso en las estructuras de casco de barcasas en la navegación comercial fluvial, específicamente por los efectos de la corrosión y la fatiga. Aunque en Colombia existen pocos casos documentados, a nivel internacional se han registrado incidentes significativos, como los ocurridos en Paraguay y Serbia, donde las estructuras de las barcasas colapsaron debido a estos factores.

El estudio se centra en la aplicación de elementos finitos (EF) para modelar la estructura de una barcaza que transita por el Río Meta, en Colombia. Se establecieron tres objetivos específicos: crear un modelo matemático del casco de la barcaza considerando el comportamiento no lineal del material, simular el impacto de la fatiga y la corrosión en los esfuerzos de colapso de la estructura.

Para lograrlo, se usaron los elementos SHELL181 y BEAM188 en el software ANSYS Workbench 2019, lo que permitió simular detalladamente el comportamiento estructural bajo condiciones extremas. La corrosión reduce el espesor de las secciones estructurales, como láminas de cubierta y fondo, riostas y puntales, lo que disminuye su resistencia y acelera el colapso plástico bajo cargas. Los resultados mostraron que la fatiga, combinada con la corrosión, reduce significativamente la vida útil de la barcaza, aumentando el riesgo de falla estructural.

El análisis reveló que la reducción del espesor debido a la corrosión genera incrementos en los esfuerzos equivalentes, lo que compromete la integridad de la estructura, llevando a un colapso plástico cuando los esfuerzos alcanzan niveles críticos. Este estudio destaca la importancia de considerar tanto la corrosión como la fatiga en el diseño y mantenimiento de las barcasas fluviales para evitar fallas catastróficas.

Palabras clave: Colapso estructural; Corrosión; Fatiga; Elementos finitos; Barcasas fluviales



Citación: Arrieta Z., Alfonso E. - 3.
Title. Análisis estructural de la cubierta de una barcaza de carga sobre cubierta, mediante el método de elementos finitos para predecir los efectos de la corrosión y la fatiga en el esfuerzo de colapso. *DERROTERO* 2025, 1, 1-29. <https://doi.org/>

Recibido: 26/02/2025

Revisado: 04/05/2025

Aceptado: 25/07/2025

Publicado: 25/07/2025



Derechos de autor: © 2024 por autores.

Licenciado por Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", COL.

Este artículo es de libre acceso distribuido en las términos y condiciones de *Creative Commons Attribution* (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: This paper analyzes the risk of collapse in the hull structures of barges in commercial river navigation, specifically due to the effects of corrosion and fatigue. Although there are few documented cases in Colombia, significant incidents have been reported internationally, such as those in Paraguay and Serbia, where the hull structures of barges collapsed due to these factors.

The study focuses on the application of finite element analysis (FEA) to model the structure of a barge operating on the Meta River in Colombia. Three specific objectives were established: to create a mathematical model of the barge's hull considering the nonlinear behavior of the material, to simulate the impact of fatigue and corrosion on the collapse efforts of the structure.

To achieve this, SHELL181 and BEAM188 elements were used in the ANSYS Workbench 2019 software, allowing for detailed simulation of the structural behavior under extreme conditions. Corrosion reduces the thickness of the structural sections, which decreases their strength and accelerates plastic collapse under loads. The results showed that fatigue, combined with corrosion, significantly reduces the barge's service life, increasing the risk of structural failure.

The analysis revealed that the reduction in thickness due to corrosion leads to increases in equivalent stresses, compromising the integrity of the structure and leading to plastic collapse when stresses reach critical levels. This study highlights the importance of considering both corrosion and fatigue in the design and maintenance of river barges to avoid catastrophic failures.

Keywords: Keyword Keywords: Structural collapse; Corrosion; Fatigue; Finite elements; River barges

Introducción

El boletín tecnológico de la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia, publicado en 2016 bajo el título "Barcazas", resalta la necesidad urgente de expandir y modernizar la flota de barcazas fluviales en el país para satisfacer las crecientes demandas del sector. Se espera un aumento del 400% en el transporte de carga por vías fluviales, lo que requiere mejorar tanto la capacidad como la seguridad de las embarcaciones. Actualmente, Colombia dispone de aproximadamente 208 barcazas monocasco, las cuales, según el artículo 5 de la Resolución 1918 de 2015, deben ser reemplazadas por barcazas de doble casco. Este cambio no solo busca optimizar la eficiencia operativa, sino también incrementar la seguridad en el transporte de productos petroquímicos, asfaltos, hidrocarburos y sus derivados a lo largo del río Magdalena, un corredor clave que conecta centros de producción como Barrancabermeja con la costa Caribe.

Por otro lado, el Plan Maestro Fluvial 2015 subraya el vasto potencial de Colombia en el campo de la navegación fluvial, reconociéndolo como un sector esencial para el desarrollo económico del país. No obstante, también señala la ausencia de políticas y programas enfocados en la modernización, sostenibilidad ambiental y optimización de la flota. En consecuencia, es fundamental implementar medidas que mejoren la eficiencia constructiva y estructural de las barcazas para asegurar un crecimiento sostenible y competitivo.

Aunque el sector fluvial colombiano posee grandes oportunidades de expansión, su progreso depende en gran parte de la mejora en los procesos constructivos de las embarcaciones. En este sentido, la construcción de barcazas debe seguir estándares más rigurosos que garanticen una mayor resistencia estructural frente a cargas dinámicas, impactos y condiciones ambientales adversas. Además, la adopción de nuevas tecnologías en diseño y fabricación, como el uso de software avanzado para simulación estructural, materiales más resistentes a la corrosión y técnicas de soldadura optimizadas, contribuirá a producir embarcaciones más seguras y duraderas.

Un desafío crítico que enfrenta la industria es el riesgo de fallos estructurales imprevistos en las barcazas, lo que podría generar accidentes con consecuencias humanas, materiales y ambientales graves. Por ello, es esencial analizar la resistencia al colapso estructural, considerando los efectos de la corrosión y la fatiga de los materiales. La implementación de metodologías de inspección y mantenimiento basadas en monitoreo estructural continuo permitirá predecir fallas y extender la vida útil de las embarcaciones, mejorando así la seguridad operativa.

En definitiva, esta investigación busca aportar a la optimización del diseño y construcción de barcazas en Colombia, proporcionando datos clave para mejorar su desempeño estructural. Para ello, se ha tomado como referencia una barcaza de fabricación colombiana, la más grande que opera en la hidrovía del río Meta, construida mediante métodos tradicionales en sus orillas. El análisis de su estructura permitirá identificar posibles mejoras en los procesos constructivos, con el objetivo de fortalecer la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de la flota fluvial del país.

Contribuciones

El desarrollo de la navegación fluvial en Colombia enfrenta un desafío crucial: la modernización de su flota y la optimización de los procesos constructivos de las embarcaciones. Tradicionalmente, las barcazas han sido construidas mediante métodos convencionales que, si bien han garantizado la operatividad del sector, presentan deficiencias significativas en términos de resistencia estructural, seguridad y durabilidad. En este contexto, la presente investigación representa un avance importante, al proporcionar información técnica esencial para mejorar los estándares de construcción y diseño de barcazas en el país.

Uno de los principales aportes de este estudio es la evaluación de las debilidades estructurales derivadas de la corrosión y la fatiga de los materiales, dos factores que impactan directamente en la vida útil y la seguridad de las embarcaciones. A través del análisis de una barcaza construida con métodos tradicionales en el río Meta, se ha identificado la urgente necesidad de incorporar tecnologías más avanzadas en la fabricación naval. La integración de software de simulación estructural, el uso de materiales con mayor resistencia a la corrosión y la adopción de técnicas de soldadura optimizadas permitirán la construcción de embarcaciones más seguras y eficientes, minimizando así el riesgo de fallos estructurales y accidentes.

Adicionalmente, esta investigación pone de relieve la importancia de establecer un enfoque preventivo en la industria naval, incorporando metodologías de monitoreo estructural continuo y estrategias de mantenimiento predictivo. Estas prácticas no solo contribuirán a mejorar la seguridad operativa de la flota fluvial colombiana, sino que también optimizarán la eficiencia económica del sector, reduciendo los costos asociados con reparaciones imprevistas y fallos estructurales.

En un escenario en el que se proyecta un crecimiento sostenido de la navegación fluvial, los resultados de este estudio ofrecen una base técnica sólida para la modernización del sector. La implementación de soluciones innovadoras en la construcción naval permitirá a Colombia no solo fortalecer su infraestructura fluvial, sino también avanzar hacia una industria más competitiva, sostenible y segura.

Es así que, con este trabajo se sientan las bases para transformar los métodos constructivos de las naves fluviales en el país, impulsando un cambio hacia un modelo de desarrollo que priorice la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad en la navegación por los ríos colombianos.

Trabajos Relacionados

Cameron, N., Nadeau, D., & Losciuto, E. (1997). Ultimate Strength Analysis of Inland Tank Barges. *Journal of Ship Research*, 41(3), 135-146, aborda en este artículo, el análisis de la resistencia última de las barcasas, lo cual guarda una estrecha relación con el enfoque de esta tesis sobre la resistencia estructural de las barcasas. Ambos estudios se centran en la mejora del diseño y la operación de las barcasas fluviales para evitar colapsos, con énfasis en los elementos estructurales, especialmente la cubierta, y en la influencia de la carga sobre la estabilidad. La metodología de análisis de los esfuerzos críticos, incluida la validación de los métodos propuestos por la casa clasificadora, se alinea con la aplicación de elementos finitos en la tesis para predecir fallos estructurales.

Meinken, S., & Schluter, B. (2001). Collapse Behaviour of a Push-Barge. *Proceedings of the 2nd International Conference on Marine Structure*, 1, 210-220. Estudio que investiga el comportamiento estructural de las barcasas, considerando el impacto de la corrosión y las colisiones en la deformación estructural. Al igual que nuestra investigación, el análisis no lineal mediante el método de elementos finitos y el estudio de la corrosión como factor determinante en el colapso estructural de las barcasas son puntos en común.

Salazar, L., Hernández, J., Rosas Huerta, R., Iturbe, A., & Herrera, A. (2021). Structural Analysis of a Barge Midship Section Considering the Still Water and Wave Load Effects. *Marine Structures*, 45, 231-243. Este artículo examina las fallas estructurales en la sección media de las barcasas debido a la corrosión y al impacto de las olas. Coincide con la tesis en cuanto al estudio de la influencia de la corrosión; sin embargo, este artículo se enfoca más en las secciones medias y en el efecto de las olas, mientras que la tesis se centra en el colapso estructural general de la barcaza de carga.

Kalyanasundaram (2017), en su tesis titulada "Hull Girder Ultimate Strength of a Ship Using Nonlinear FE Method," analiza la capacidad estructural del casco de un buque portacontenedores de más de 150 metros de eslora, con cubierta abierta, enfocado en cómo los momentos verticales afectan su resistencia general. Utiliza métodos iterativos para calcular la capacidad del barco, considerando los momentos verticales como una carga crítica, y aplica factores de seguridad para abordar incertidumbres como las propiedades de los materiales y los efectos de la corrosión que reducen las dimensiones estructurales. El autor emplea un enfoque no lineal con elementos finitos para mejorar la comprensión de los resultados, teniendo en cuenta la combinación de diferentes cargas.

Este proyecto presenta una gran similitud con la tesis de Kalyanasundaram, especialmente en el uso de métodos de análisis y en el enfoque hacia la resistencia estructural. No obstante, las diferencias principales radican en el tipo de embarcación analizada. Mientras que la tesis se centra en grandes buques portacontenedores con cubierta abierta, el proyecto propuesto se enfoca en determinar la carga sobre cubierta que podría causar el colapso de una barcaza fluvial. Esta diferencia en el tipo de embarcación y el objetivo del estudio marca la principal distinción entre ambos trabajos.

H.W. Leheta, A.M. Elhewy, W. El Sayed Mohamed (2013) "Finite element simulation of barge impact into a rigid wall." Este trabajo aborda las colisiones entre barcos y puentes. Aunque estos incidentes son poco comunes, la historia demuestra que han ocurrido con cierta frecuencia a lo largo del tiempo. Diversos estudios han documentado fallos en puentes ocasionados por impactos de barcos desde el año 1850, y otros han elaborado listas de accidentes graves, incluidos aquellos en los que los puentes han colapsado debido a estos impactos. Las estadísticas revelan un incremento en el número de colisiones a finales de los años 70 y principios de los 80, seguido de una disminución. Sin embargo, desde inicios de los años 90, el número de estos incidentes ha vuelto a aumentar, especialmente en regiones como Alemania. Las consecuencias de estos accidentes pueden ser devastadoras, como el caso del choque ocurrido en 2005 en Krems, Austria, donde se desplazó un pilar del puente más de 2 metros, y otro similar en 2007 en China, donde un barco impactó un puente, causando su colapso.

Garbatov, Y., & Guedes Soares, C. (2005). Evaluación de la confiabilidad por fatiga de uniones soldadas de ferrys muy rápidos, teniendo en cuenta la carga de vehículos. *Journal of Marine Structures*, 18(1), 1-23. Aunque este artículo trata sobre la fatiga en ferrys, las similitudes con la tesis radican en el análisis de la fatiga estructural. Ambos estudios aplican el método de elementos finitos para modelar la fatiga y la corrosión, destacando puntos críticos en la estructura y evaluando el daño por fatiga.

Ayyub, B. M., Stambaugh, K. A., McAllister, T. A., de Souza, G. F., & Webb, D. (2012). Structural life expectancy of marine vessel: Ultimate strength, corrosion, fatigue, fracture, and systems. *Journal of Marine Science and Technology*, 17(2), 162-175. Este artículo proporciona un análisis de la vida útil estructural de las embarcaciones, centrándose en la fatiga, la corrosión y la fractura. La metodología presentada es similar a la de la tesis, dado que ambas se enfocan en la confiabilidad estructural y los factores que afectan la integridad de las barcas, además de utilizar simulaciones numéricas para modelar estos procesos.

Royani, A., Prifiarni, S., Priyotomo, G., Triwardono, J., & Sundjono. (2019). Corrosion rate and life expectancy of carbon steel in freshwater. *Corrosion Science*, 148, 16-25. Este artículo se enfoca en la tasa de corrosión del acero en agua dulce, un factor relevante para el estudio de las barcas. La investigación respalda el análisis de la corrosión en la tesis, ya que las condiciones de agua dulce en los ríos influyen directamente en la tasa de corrosión en las estructuras de acero.

Bureau Veritas. (2013). Directrices para la protección contra la corrosión aplicables a los buques de navegación en aguas interiores. Bureau Veritas. Las recomendaciones de Bureau Veritas para prevenir la corrosión en embarcaciones fluviales son altamente relevantes para la tesis, que también se enfoca en mitigar los efectos de la corrosión. Ambas investigaciones buscan mejorar la vida útil de las barcas mediante estrategias de mantenimiento y de protección contra la corrosión.

Materiales y Métodos

Dado el enfoque y los procedimientos necesarios, la investigación se llevó a cabo con un enfoque cuantitativo y exploratorio, tal como lo indican Hernández, Fernández y Baptista (2014). La metodología cuantitativa implica la recolección y el análisis de datos provenientes de diversas fuentes.

Los pasos metodológicos seguidos para alcanzar los resultados son los siguientes:

Revisión de los antecedentes, estado del arte y marco teórico existente: Este paso se centra en la recopilación de información relacionada con el colapso de barcas fluviales o estructuras similares, proporcionando una base sólida para la investigación.

Consecución de los planos de una barca: Se seleccionó una barca de las que transitan por el río Meta. El tipo de barca escogido para el desarrollo de este trabajo es la de "Carga sobre Cubierta", debido a su alta prevalencia en los ríos de Colombia y a la baja rigidez a la flexión que presenta, derivada de su alta relación manga/puntal es 7.04 mts. (razón entre la manga que es 15mts y el puntal /2.3mts). Es importante destacar que el modelo de simulación a desarrollar será aplicable a todos los tipos de barca, con la única variación de la sección transversal.

Desarrollo de un modelo con elementos finitos 1D y 2D tipo Shell: Este modelo se ubica en el espacio y contendrá la curva de esfuerzo-deformación unitaria que resume el comportamiento elasto-plástico. Dicho modelo permitió la simulación del colapso de la estructura de una barca tipo "Carga sobre Cubierta", considerando la influencia de la corrosión en la estructura. Se prevé que el análisis sea de tipo **no lineal geométrico** (debido a la deformación lateral que, a su vez, reduce la resistencia de los elementos sometidos a compresión), así como **no lineal de material** (pues las deformaciones podrían llevar al material a esforzarse más allá del límite proporcional).

Desarrollo de un modelo con elementos finitos para simular y/o analizar el efecto de la fatiga: Este modelo permitió evaluar el potencial colapso de la estructura de la barca fluvial tipo "Carga sobre Cubierta" en un escenario donde también esté presente la corrosión, lo cual es crucial para entender el comportamiento estructural en condiciones adversas.

Resultados

La propuesta de este proyecto se desarrolló en el marco teórico y conceptual del análisis estructural no lineal, tomando en cuenta la fatiga y la corrosión como factores que contribuyen al colapso plástico en estructuras navales y fluviales. Para alcanzar los resultados esperados, se analizará una barcaza de tipo "Carga sobre Cubierta" de construcción nacional, en la cual se simularán los efectos de la corrosión y la fatiga para determinar su influencia en el colapso plástico de la estructura. El colapso es una falla que podría ocurrir a mitad del ciclo de vida de la embarcación, lo cual, según A. Meinken y H. Schluter (2001), es el tiempo promedio en el que comienzan a manifestarse los primeros efectos de la corrosión que afectan el deterioro dimensional de los componentes estructurales.

Colapso Plástico

Gaylord y Gaylord (1980) describen el mecanismo cinemático de colapso como un estado en el cual una estructura desarrolla un número suficiente de rótulas plásticas, ubicadas de tal manera que la convierten en un sistema inestable, incapaz de mantener el equilibrio bajo cualquier circunstancia. El proceso de fallo que conduce al colapso de la estructura es complejo y no permite predecir el orden en que ocurrirán los eventos que lo desencadenan.

Pandeo y carga crítica

El pandeo en columnas está influenciado por factores como la rigidez a la flexión y la esbeltez de la columna. Este fenómeno ocurre cuando una carga axial centrada provoca que el elemento se vuelva inestable y comience a desviarse lateralmente (Popov, 2000). La carga centrada que desencadena este comportamiento se conoce como carga crítica. En el caso de las columnas esbeltas, una vez retirada la carga, la columna recupera su forma original, lo que implica que no queda ninguna deformación permanente. Los esfuerzos generados son menores que el límite de fluencia (ver figura 1).

Existe una fórmula analítica clásica que describe este comportamiento lineal, conocida como la ecuación de Euler (Popov, 2000). La expresión de Euler es:

$$P_{Cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde:

- E es el módulo elástico del material.
- I es el momento de inercia de la sección transversal de una columna.
- L es su longitud.

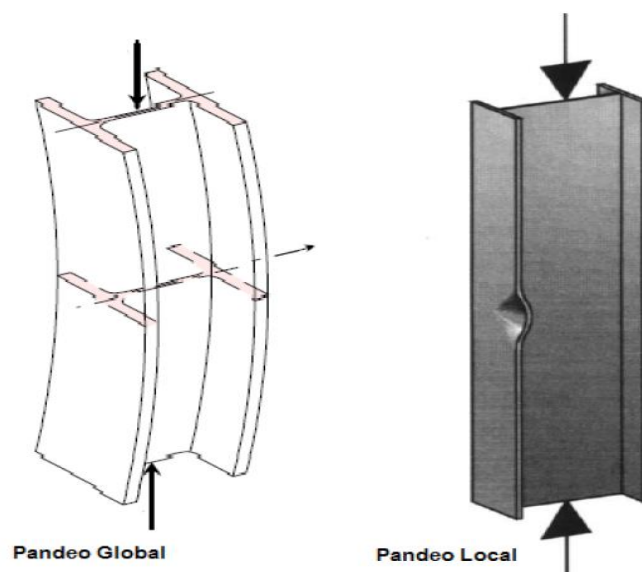


Figura 1 Pandeo Global y Pandeo Local en Miembros a Compresión. Marmolejo C.A. (2014)

Comportamiento Elasto-plástico

La dinámica del colapso se explica mediante el comportamiento elastoplástico del material. Para entender la elastoplasticidad, es fundamental describir las propiedades elásticas y plásticas de un material. El comportamiento elastoplástico abarca el paso por la zona elástica, la transición de la elasticidad a la plasticidad, y finalmente, el comportamiento en la zona plástica. Por ello, se requiere el uso de una gráfica para caracterizar los materiales, como es común en Ingeniería, donde cada material presenta propiedades distintivas.

La curva que caracteriza este comportamiento se obtiene a partir de pruebas experimentales de tensión simple, en las cuales se identifican puntos clave que revelan las propiedades específicas del material bajo ensayo, como se muestra en la figura 2. El esfuerzo de cedencia, que marca típicamente el final de la zona elástica, es uno de estos puntos importantes.

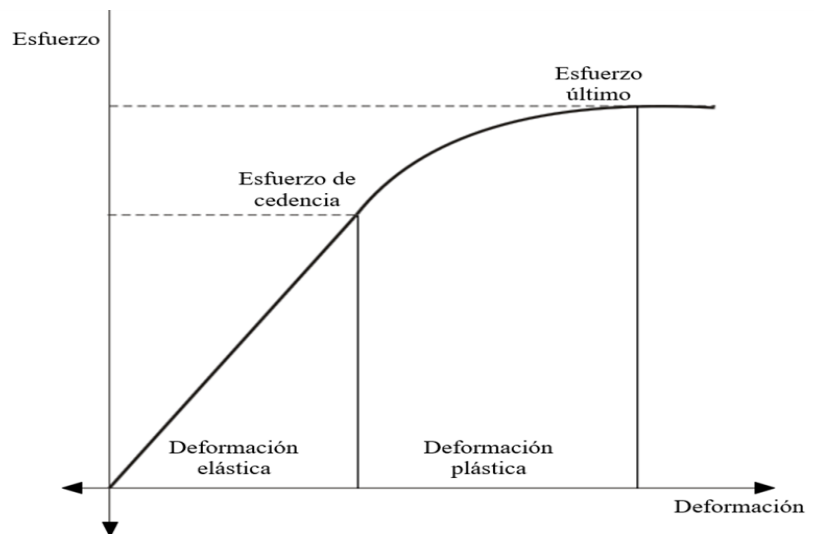


Figura 2 Comportamiento elastoplástico de un acero, Juárez O.M. (2011)

Miembros a flexión

Gaylord y Gaylord (1980) explican que el pandeo puede ocurrir en elementos sometidos a flexión. Este fenómeno es causado por el esfuerzo a compresión debido a la flexión, y puede presentarse de tres maneras distintas:

- Pandeo local en patines (inelástico)
- Pandeo lateral torsional
- Pandeo lateral torsional inelástico

Las diferentes formas de pandeo tanto en elementos a compresión como a flexión hacen parte del mecanismo de colapso de una estructura, como se muestra en la figura 3.

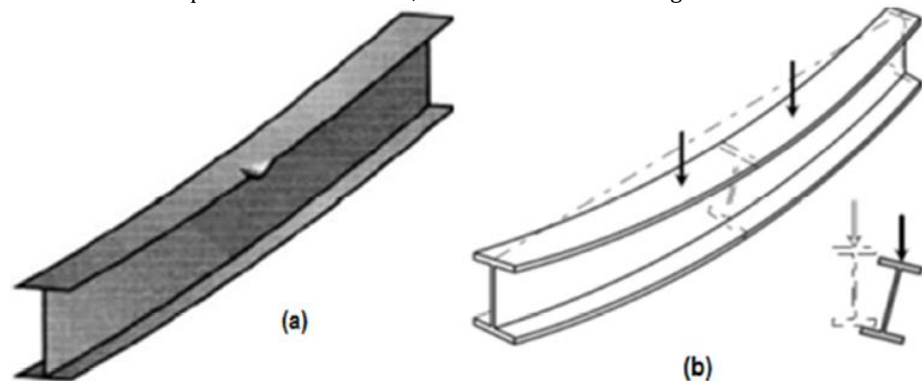


Figura 3 Pandeo Local y Pandeo Lateral Torsional, Carlos Amador Marmolejo Castro (2014)

Pandeo en placas

Las placas son componentes básicos, presentes en el planchaje de la cubierta, en los patines y almas de vigas y columnas de la estructura de una barcaza. Por eso el estudio de su comportamiento estructural es importante. En una placa se puede desarrollar, la falla por fluencia, el pandeo elástico y el pandeo inelástico, por las mismas razones que se analizaron en el pandeo de columnas. A diferencia de las columnas, esta vez regidas por la relación de la longitud del lado cargado con el espesor, en lugar que la relación de esbeltez, O.W. Blodgett (1976). El pandeo en placas se puede dar, cuando se somete a una excesiva compresión a lo largo de dos de sus lados opuestos, como se muestra en la figura 4. El valor del esfuerzo crítico de una plancha rectangular puede ser obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr} = \frac{K\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad en compresión (acero=30000 psi)

t = espesor de la placa, pulgadas.

b = ancho de la placa, pulgadas

a = longitud de la placa, pulgadas

ν = relación de Poisson (para el acero es =3.0)

K = depende del factor de forma de la placa b/a

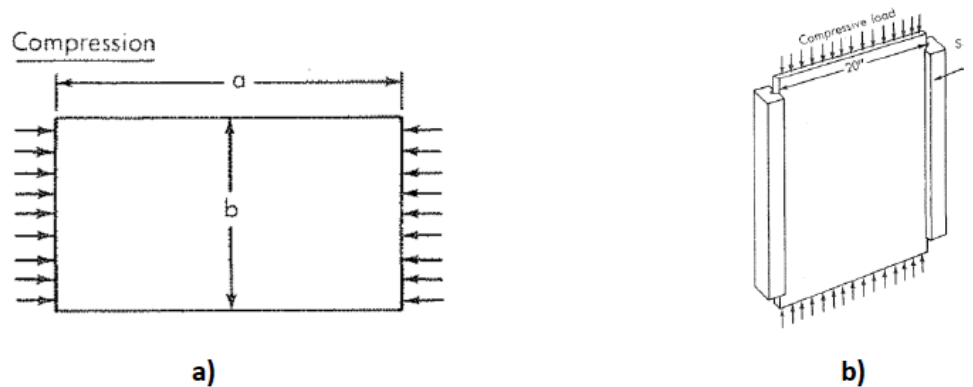


Figura 4 Placa plana a compresión Design of Welded Structures O. W. Blodgett.

Fatiga en estructuras

López Matus (2016) en su trabajo "Análisis de Fatiga de un Casco de Flotación de un Sistema Oceánico durante la Transportación" señala que la creciente actividad de exploración de petróleo y gas en zonas costa afuera ha impulsado significativamente la investigación sobre cómo las estructuras offshore responden a la fatiga. Estas estructuras están constantemente sometidas a cargas generadas por las olas, el viento y las corrientes marinas. La fatiga es un fenómeno crítico que causa la falla de componentes mecánicos expuestos a cargas cíclicas. A diferencia de otros tipos de falla, la fatiga no requiere una carga elevada ni provoca un daño inmediato; más bien, la falla se manifiesta tras una exposición prolongada a cargas repetitivas, lo que resulta en un daño acumulativo hasta alcanzar un punto crítico. En la figura 5 podemos ver las etapas de la fatiga.

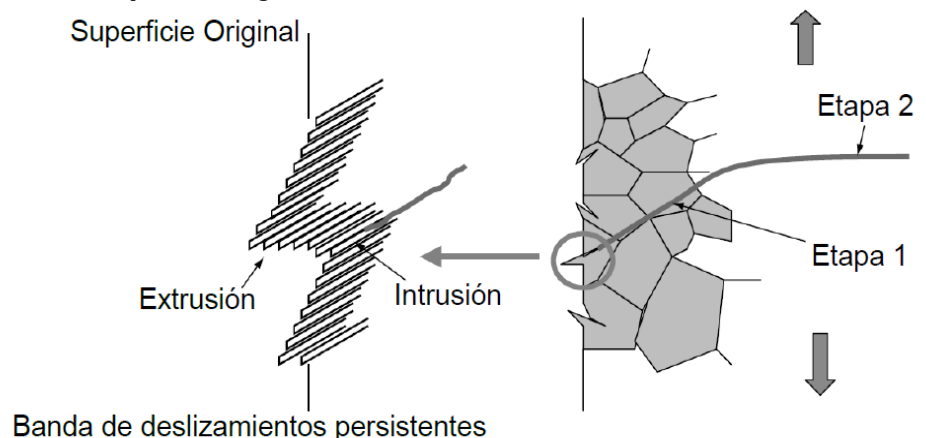


Figura 5 Etapas de la fatiga en una placa delgada bajo carga cíclica de tensión mostrando las etapas 1 y 2. I. López Matus (2016).

En la figura 6 se aprecia el fenómeno de iniciación de grietas en el acero.

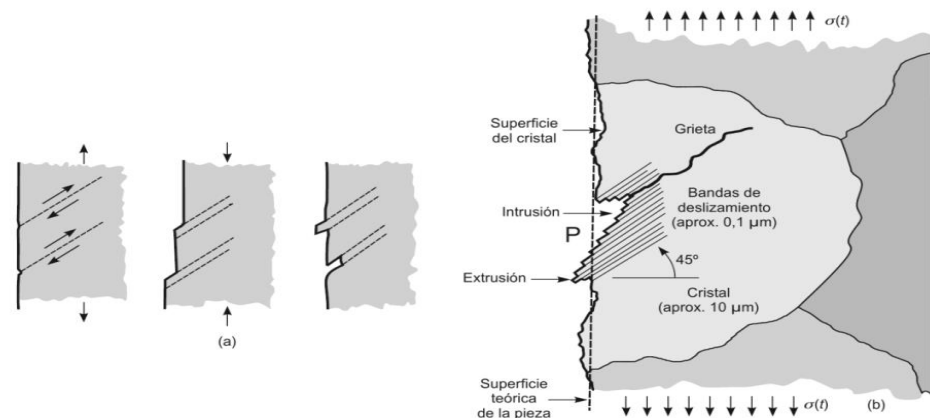


Figura 6 Representación de la Iniciación o Nucleación de Grietas en Metales: (a) Deslizamientos Iniciales, Intrusiones y Extrusiones, (b) Agrietamiento de un Grano. te: I. López Matus (2016)

Corrosión en estructuras y control de la corrosión en embarcaciones fluviales

Aunque existe una amplia cantidad de información sobre los modelos y procesos de corrosión en embarcaciones marinas, el conocimiento específico sobre embarcaciones fluviales es limitado. Debido a esta falta de datos, se tomó como referencia un modelo de corrosión aplicado a tuberías de acero de bajo carbono en contacto con agua dulce, A. Royani, S. Prifiharni, G. Priyotomo, J Triwardono and Sundjono (2019). Los datos indican que la tasa de corrosión del acero al carbono en agua dulce varió entre 0,41 y 0,76 MPY (milésimas de pulgada por año). A partir de esta tasa de corrosión, es posible estimar la vida útil restante del acero.

De esta manera, la proyección de la pérdida de espesor en función de los años puede observarse en la siguiente gráfica. De esta, se estima que se estaría perdiendo 0,5 mm de espesor en las láminas de la embarcación en 25 años.

Un objetivo o propósito adicional de este trabajo es de aportar bases o criterios para la elaboración de metodologías, para el control de la corrosión en la estructura de las barcasas. La protección contra la corrosión es un factor determinante en la seguridad y longevidad de las embarcaciones fluviales. Un enfoque adecuado en diseño, materiales, mantenimiento e inspección reduce costos operativos y evita fallos estructurales que puedan comprometer la embarcación. Bureau Veritas, ha contribuido en este aspecto publicando el siguiente documento. "Guidelines for Corrosion Protection Applicable to Inland Navigation Vessels" Bureau Veritas (2013).

Tipos de barcasas

Existen cuatro tipos de barcasas, la tabla 1 muestra los tipos de barcasas, y en la figura 7, se aprecian barcasas que operan en la hidrovía del Río Meta.



Figura 7 Barcasas típicas que operan en el Río Meta

Tabla 1 Tipos de barcazas

Ítem	Tipos
1	Tipo de Carga Sobre Cubierta
2	Tipo Tolva
3	Tipo Tanque
4	Tipo Dual

Ficha técnica de la barcaza

La barcaza que se seleccionó como objeto de estudio, es una barcaza del tipo de “Carga sobre Cubierta” que opera en la hidrovía del Río Meta en los llanos de Colombia.

Tabla 2 Parámetros dimensionales de la barcaza

<i>Ítems</i>	<i>Descripción</i>	<i>Uni.</i>	<i>Magnitud</i>
1	Eslora total	M	62
2	Manga	M	15
3	Puntal	M	2.13
4	Calado máximo	M	1.83
5	Francobordo	M	0.3
6	Peso en rosca	Tons	297.64
7	Peso muerto	Tons	1322.192
8	Coefficiente de bloque	n.a.	0.97

Tabla 3 Características de los elementos estructurales

Ítem	Descripción	Material	Cantidad[m ² /und.]
1	Forro o casco, conformado por fondo, cubierta, laterales y espejos de proa y popa con espesor de 3/8"	A-36	2131,8 m ²
2	Planchuelas de Proa y Popa con espesor de 3/8"	A-36	50 und.
3	Cuadernas Típicas en platina de 3/8"	A-36	40 und.
4	Puntales verticales en ángulo de 4"x4"x3/8"	A-36	80 und.
5	Refuerzos longitudinales de fondo en ángulo de 4"x4"x3/8"	A-36	30 und.
6	Refuerzos longitudinales de cubierta en ángulo de 4"x4"x3/8"	A-36	30 und.
7	Diagonales transversales de cuaderna en ángulo de 3"x3"x1/4"	A-36	80 und.
8	Diagonales longitudinales en ángulo de 3"x3"x1/4"	A-36	100 und.
9	Mamparo longitudinal en lámina de 3/8"	A-36	2 und.
10	Mamparo de colisión en lámina de 3/8"	A-36	2 und.
11	Cuadernas medianas en platina de 3/8"	A-36	2 und.
12	Cuadernas pequeñas en platina de 3/8"	A-36s	2 und.

La figura 8, muestra el arreglo estructural de la barcaza en estudio

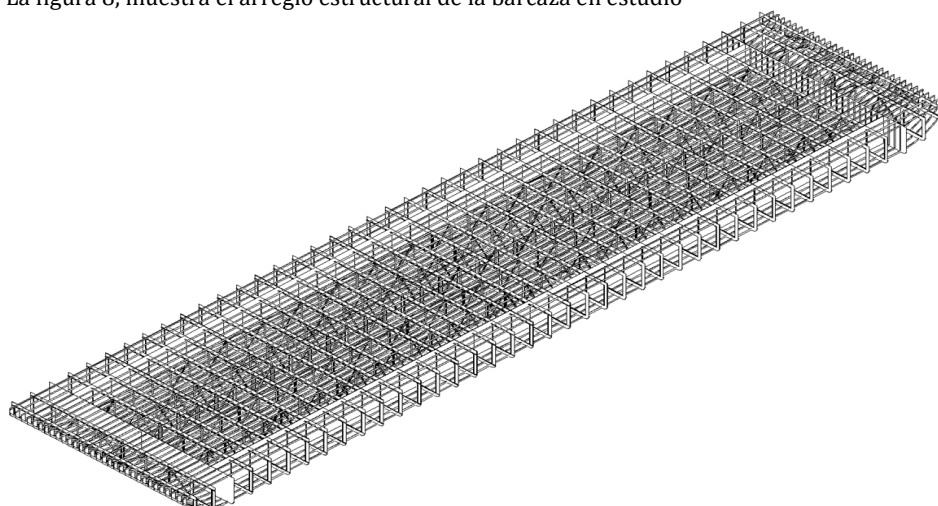


Figura 8 Arreglo estructural de la barcaza

Descripción del modelo

El modelo establecido para la ejecución de las simulaciones que nos conducirán a los resultados concluyentes es la cuarta parte de la barcaza elegida de “Carga sobre Cubierta”. Se toma la cuarta parte, porque la barcaza tiene dos planos de simetría, un plano longitudinal en la crujía y otro plano de simetría transversal en la sección maestra. Esta decisión nos permite un ahorro computacional importante. Ver figura 9

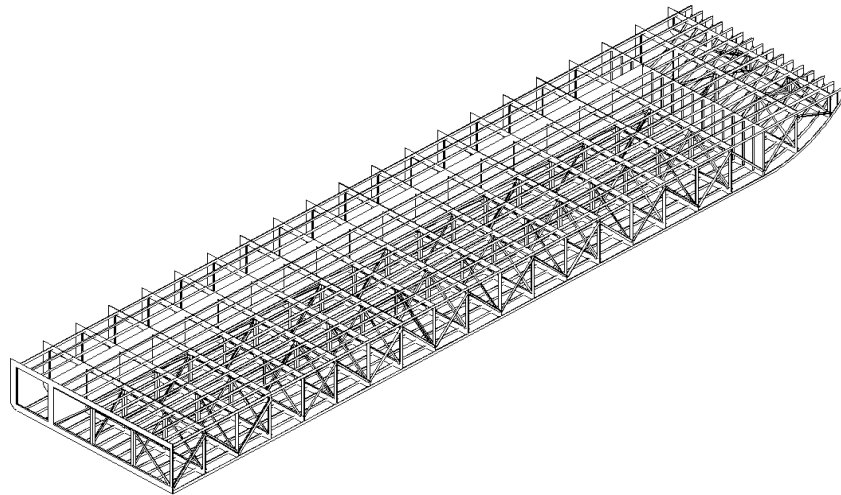


Figura 9 Modelo optimizado ($\frac{1}{4}$ de barcaza)

Presiones de diseño

Las presiones de diseño aplicadas al modelo son tomadas de la normativa de Lloyds Register para embarcaciones especiales y están configuradas o adaptadas para una embarcación fluvial, con una altura de ola de 0,6 m, una velocidad vertical de 2,61kts, un calado de 1,8 m y un desplazamiento total de 1620 toneladas. Ver tabla 4.

De la aplicación de dicha normativa, se obtuvo la estimación de presiones que serán usados como entrada para el modelo.

Tabla 4 Presiones de diseño

Ítem	Descripción	Valor [Kg/m ²]
1	Presión Hidrostática	31,6
2	Presión Hidrodinámica	18,0
3	Presión cubierta expuesta	34,1
4	Presión por carga sobre cubierta	8,1

Criterios de aceptación para los niveles de esfuerzos obtenidos

Los criterios de aceptación hacen referencia a las características que debe tener la embarcación para ser considerada segura según los requerimientos de la normativa.

Para el casco, estos criterios son los niveles de esfuerzos permisibles. Estos esfuerzos se clasifican en esfuerzos equivalentes de Von Mises, Esfuerzos directos (que serían los esfuerzos normales en todas las direcciones) y los esfuerzos cortantes. Los esfuerzos axiales se aplican para los elementos de tensión compresión como los pilares. La tabla de abajo relaciona el tipo de elemento; ya sea transversal y longitudinal con su nivel de esfuerzo permisible.

Para definir los criterios de aceptación del diseño de la embarcación se usó como guía los parámetros sugeridos por la normativa de Lloyd's Register para análisis directos. En estos, se definen valores máximos para elementos longitudinales, transversales y pilares. Ver tabla 5

Tabla 5
Esfuerzos equivalentes admisibles

Ítem	Descripción elementos estructural	Esfuerzo admisible [MPa]
1	Elementos longitudinales	220
2	Elementos transversales	165
3	Puntales	157

Nota. Lloyd's Register Ship Right Design and Construction

La Tabla 6 muestra las equivalencias entre los perfiles estructurales comerciales y los perfiles estructurales adoptados en el modelo para facilitar la implementación de los elementos 2D tipo Shell.

Tabla 6
Equivalencias entre los perfiles estructurales comerciales y los perfiles estructurales

Ítem	Perfil Comercial	Perfil Equivalente	Propiedad
1	Angulo 4"x4"x 3/8" como refuerzo longitudinal de cubierta y fondo.	Platina 101.6 mm x 18.25 mm	Peso por unidad de longitud
2	Angulo 4"x4"x 3/8" como refuerzo longitudinal de cubierta y fondo, en la crujía.	Platina 101.6 mm x 18.25 mm	Peso por unidad de longitud
3	Angulo 4"x4"x 3/8" como puntal vertical.	Barra redonda o cuadrada de 18.6cm ²	Peso por unidad de longitud
	Angulo de 3"x3"x1/4" como refuerzo diagonal longitudinal y transversal	Barra redonda o cuadrada de 9.1cm ²	Peso por unidad de longitud
4	Angulo de 3"x3"x1/4" como refuerzo diagonal longitudinal en la crujía.	Barra redonda o cuadrada de 9.1cm ²	Peso por unidad de longitud

Condiciones de contorno del modelo

Las condiciones de contorno en un análisis estructural por elementos finitos definen las condiciones del análisis, donde se tienen en cuenta los apoyos, empotramientos, restricciones, fuerzas, aceleraciones, momentos que actúan sobre el elemento estructural que se está estudiando.

En el modelo se configuran restricciones de desplazamiento en los tres grados de libertad en los mamparos de proa, popa, y de crujía. Se configura una condición de simetría en dos ejes, siendo modelado solo ¼ de la barcaza.

Contactos del modelo

En la geometría del modelo desarrollado para alcanzar los objetivos de esta tesis, se emplearon contactos de tipo "Bonded". Este tipo de contacto es, sin duda, el más utilizado y sencillo de configurar, ya que restringe completamente cualquier movimiento relativo entre las partes, de manera similar a una unión soldada.

El contacto tipo Bonded permite la transmisión de fuerzas de compresión y tracción, pero no admite deslizamientos tangenciales relativos, lo que hace innecesario considerar el concepto de fricción. Su formulación es lineal, ya que no requiere iteraciones no lineales, y se basa en restricciones multipunto (MPC) aplicadas entre los nodos vecinos de la zona afectada, como se muestra en la figura 10, para confirmar la presencia de este tipo de contactos, se llevó a cabo un Análisis Modal.

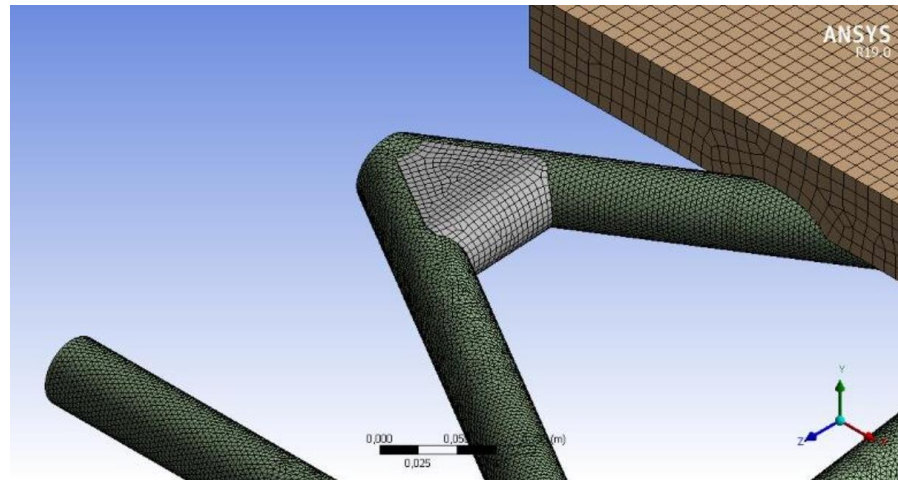


Figura 10 Contacto tipo Bonded (Cadavis, 2018)

Condiciones de carga en el modelo

La barcaza en estudio soportará una carga de 1620 toneladas sobre su cubierta, la barcaza está sujeta a una presión de empuje (presión hidrostática sobre el casco) y a un oleaje muy moderado, estas condiciones serán replicada en el modelo.

Modelo no lineal Ramberg-Osgood del material

Para la descripción del comportamiento no lineal del acero estructural A-36 modelo, se usó la ecuación Ramberg-Osgood, que es una expresión no lineal que se compone de la relación entre la tensión y la deformación de un material en el entorno de su límite elástico.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left[\frac{\sigma}{S_{ty}} \right]^{1/n}$$

El primer término de la ecuación, describe la parte elástica de la deformación y el segundo término representa el comportamiento plástico.

- ε : Deformación unitaria
- σ : Esfuerzo [N/m²]
- E: Modulo de Young [N/m²]
- S_{ty} : Esfuerzo ultimo [N/m²]
- n: Constante que depende del material

Los términos de la ecuación Ramberg-Osgood se puede apreciar o ver en las tablas 10,11 y 12, y en la figura 11 podemos ver la relación entre el esfuerzo real vs la deformación unitaria.

Tabla 7
Términos de la ecuación Ramberg-Osgood

Ítem	Descripción	Valor [MPa]/Valor Adimensional
1	Sy esfuerzo de fluencia	250
2	Su Resistencia ultima	400
3	E Modulo de Elasticidad (Young)	200000
4	e_L Deformación de alargamiento total Es la elongación total del material hasta la fractura, expresada en porcentaje. Aquí, $e_L=20\%$, indica que el material puede estirarse hasta un 20% de su longitud original antes de romperse.	20%
5	e_p Deformación plástica a la fluencia (Offset de 0.2%) Es la deformación plástica correspondiente al esfuerzo de fluencia, generalmente medida con el método del 0.2% de compensación. En este caso, $e_p=0.2\%$	0,2%
6	n Constante que depende del material	0,10206

Tabla 8
Datos para la curva esfuerzo real vs deformación unitaria

Strain mm/mm [e_{true}]	Stress MPa[S_{true}]
0	0
0,0002	20
0,000300002	40
0,000300002	60
0,000400028	80
0,000500252	100
0,000601506	120
0,000706819	140
0,000825232	160
0,000980011	180
0,001224642	200
0,001671561	220
0,002540666	240
0,00325	250,00
0,005601295	270,00
0,010012481	290,00
0,018008509	310,00
0,032019142	330,00
0,055802488	350,00
0,09502112	370,00
0,158011391	390,00
0,256794098	410,00

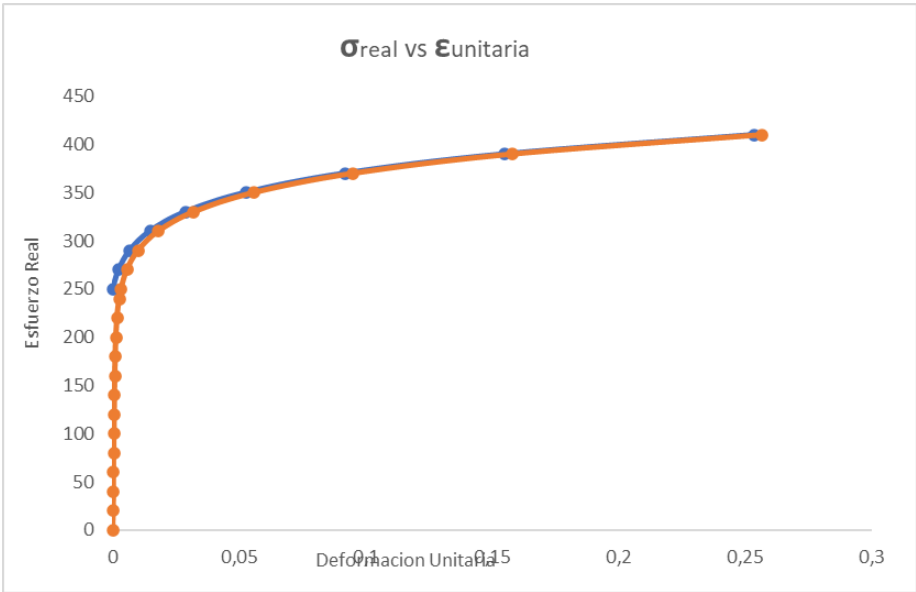


Figura 11 Grafica esfuerzo real vs deformación unitaria

Propiedades mecánicas del acero estructural A-36

Se seleccionaron láminas de acero A36 para la construcción de la embarcación. Este material es un acero dulce al carbono, que se caracteriza por ser un material de bajo contenido de carbono, elevada ductilidad y excelente soldabilidad, lo cual lo hace ideal para las aplicaciones estructurales y en construcciones navales de uso fluvial.

Tabla 10 Propiedades mecánica del acero A36

Ítem	Propiedad	Valor	Unidad
1	Esfuerzo de fluencia	235	MPa
2	Densidad	7850	Kg/m ³
3	Módulo de rigidez	200	GPa
4	Esfuerzo a la ruptura	460	MPa
5	Coefficiente de Poisson	0.3	—

Condición de frontera

Se configuran restricciones de desplazamiento en los tres grados de libertad en los mamparos de proa, popa. Se configura una condición de simetría en dos ejes, siendo modelado solo ¼ de la barcaza. Ver figura 12 y 13

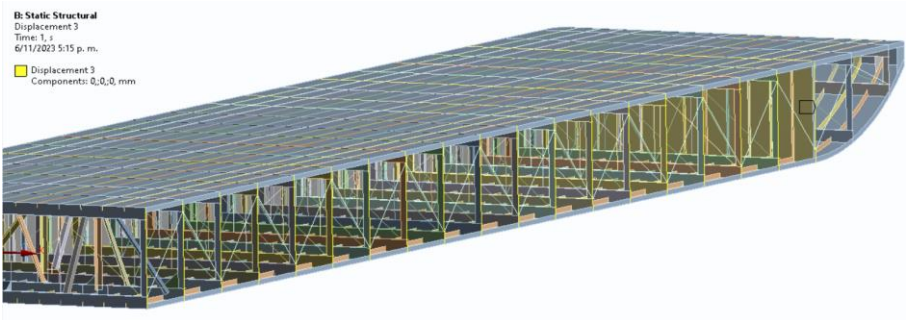


Figura 12 Restricciones de desplazamiento en el modelo-01

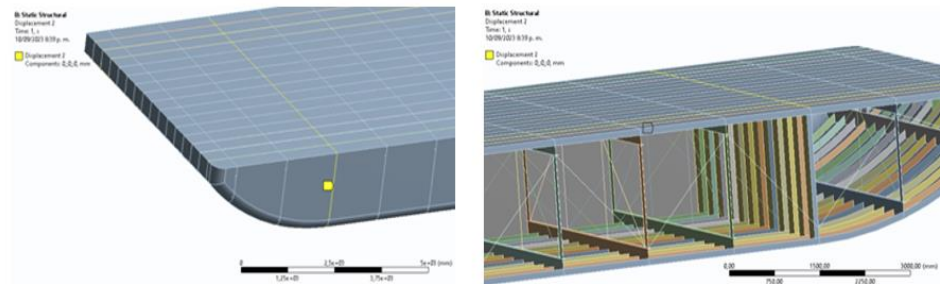


Figura 13 Restricciones de desplazamiento en el modelo-02

Modelo de Corrosión para el análisis de la fatiga

El colapso plástico de una barcaza fluvial, especialmente del tipo de carga sobre cubierta, puede estar significativamente influenciado por los efectos de la corrosión en el acero al carbono, que constituye un componente principal en su estructura. La corrosión del acero en contacto con el agua es un fenómeno complejo, afectado por la calidad del agua, la temperatura y las condiciones de operación a las que está sometida la barcaza, lo que a su vez puede debilitar progresivamente la resistencia estructural del acero. En un entorno fluvial, donde las condiciones del agua pueden variar considerablemente en términos de composición química y temperatura, la corrosión se convierte en un factor crítico que podría acelerar el deterioro de la barra.

La pérdida de masa debido a la corrosión, especialmente cuando no se controla adecuadamente, podría llevar a un adelgazamiento del material, comprometiendo la capacidad de la estructura para soportar las cargas operativas. Esto es especialmente relevante en el contexto del colapso plástico, donde una reducción en el espesor del acero podría precipitar el fallo estructural bajo condiciones de carga extremas. Por lo tanto, la corrosión no solo afecta la longevidad de la barcaza, sino que también juega un papel fundamental en la integridad estructural y en la prevención de fallos catastróficos.

De esta manera, la proyección de la pérdida de espesor en función de los años puede observarse en la siguiente gráfica, de esta, se estima que se estaría perdiendo 0,5 mm de espesor en las láminas de la embarcación en 25 años. No obstante, esta tasa podría ser mayor si se toma en consideración factores como la temperatura del río, los niveles de salinidad, contaminación e incluso la presencia de cierto tipo de bacterias. Ver figura 14.

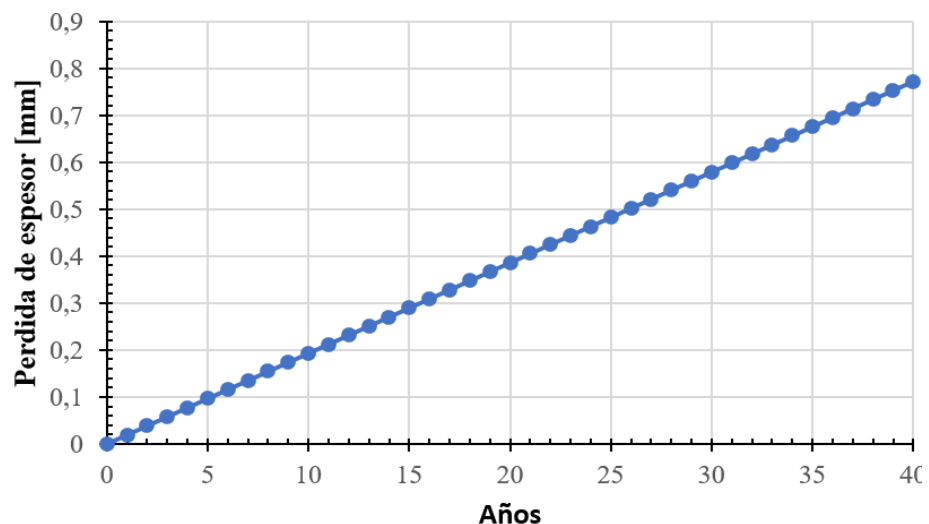


Figura 14 Estimación de pérdidas de espesor de la lámina por corrosión

Modelo de Resistencia estática

Para el modelo de resistencia estática, se escogió el modelo de energía de distorsión elástica de Von Mises, en el cual los esfuerzos normales y cortantes son incluidos en la determinación de un esfuerzo equivalente.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Modelo de estimación a fatiga

Para la evaluación de la vida a fatiga del material, se siguió una evaluación por curva S-N para un acero A36, la teoría de falla de Goodman, se optó por una razón de esfuerzos de 0 y por una razón de amplitud de 1.0. Se definió un patrón de cargas basado en la carga y descarga de la barcaza, ver figura 48. Las figuras 15 y 16 muestran curvas S-N del acero A36

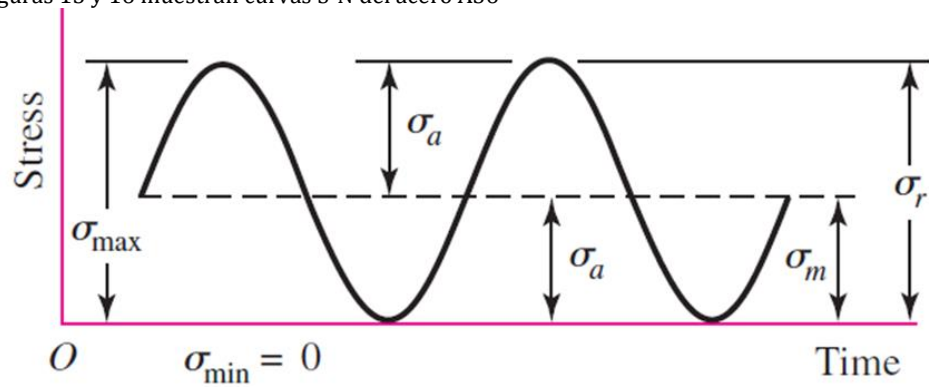


Figura 15 Variación sinusoidal del esfuerzo, Shigley's Mechanical Engineering Design, Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett

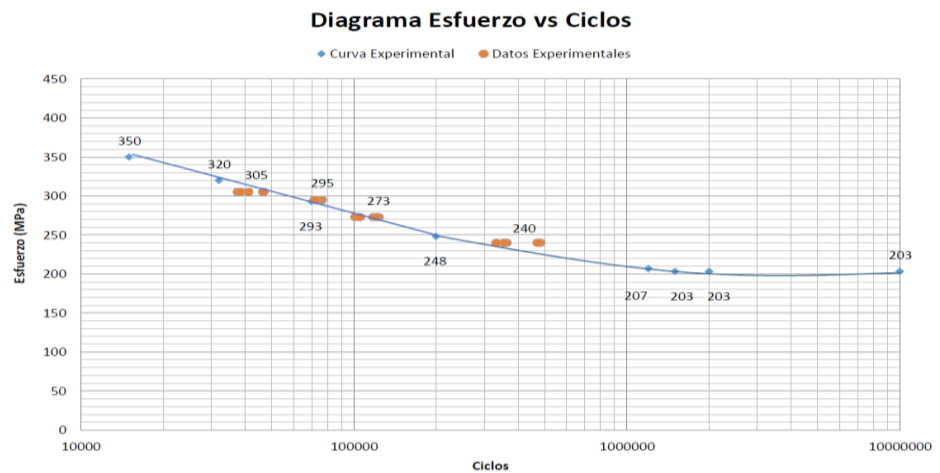


Figura 16 Curva S-N acero A36. Alfonso A. Celleri Calle (2014).

Discussão

El modelo se construye utilizando los elementos **BEAM188** y **SHELL181**, los cuales consideran los efectos de la corrosión y la fatiga. Este enfoque permite reducir los espesores de las secciones transversales de todas las partes de la estructura, lo que influye directamente en la capacidad de la barcaza para soportar cargas. La corrosión disminuye la resistencia estructural, acelerando el colapso plástico bajo cargas extremas.

La simulación incluye la aplicación gradual de cargas hasta alcanzar el estado de colapso plástico, lo que facilita la evaluación de la respuesta de la barcaza ante cargas extremas en condiciones en las que la corrosión ha deteriorado las secciones. La modelización precisa del material, que debe incluir propiedades elasto-plásticas, es fundamental para capturar el comportamiento no lineal del acero utilizado en la construcción de la barcaza.

Otro aspecto relevante es el uso de la simetría en el modelo, que optimiza los recursos computacionales y facilita un análisis detallado del comportamiento estructural en situaciones críticas, considerando el debilitamiento adicional provocado por la corrosión. Este objetivo fue logrado de manera efectiva (ver Figuras 17 y 18).

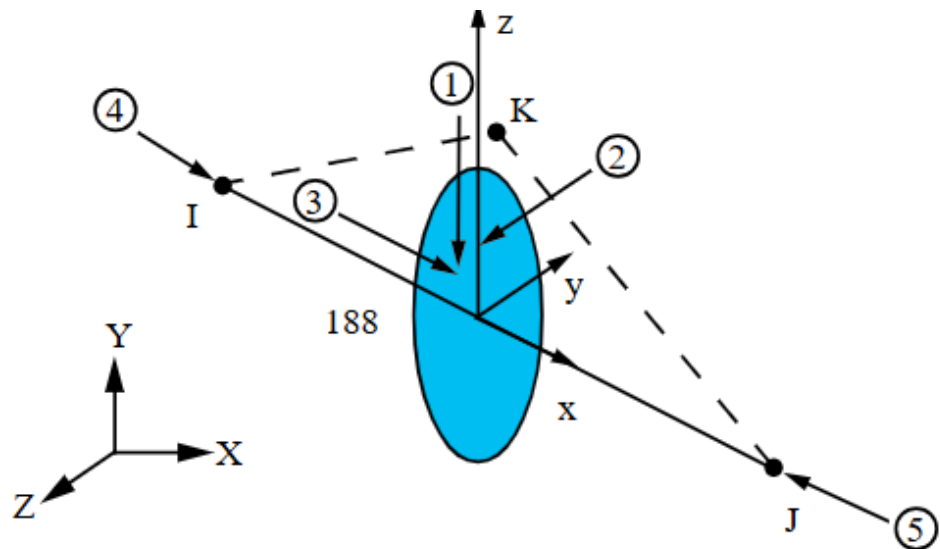


Figura 17 Elemento BEAM188.

https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html

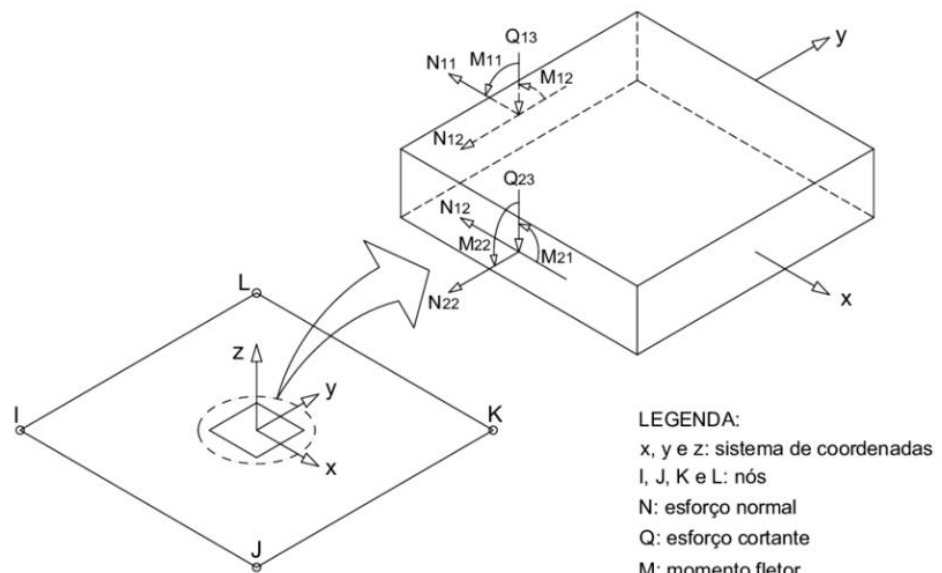


Figura 18 Elemento SHELL181. https://www.researchgate.net/figure/Figura-3Caracteristicas-do-elemento-SHELL-181-Fonte-Adaptado-do-ANSYSR-2018_fig3_359604068

En relación con la simulación del modelo para evaluar el efecto de la fatiga y su impacto en el esfuerzo de colapso de la estructura, se identificó que las fallas por fatiga generalmente ocurren en los detalles estructurales, y se dan en las conexiones estructurales entre puntales, riostras y baos. Por lo tanto, se evaluó la vida útil a fatiga de los detalles previamente discutidos y se seleccionó el más crítico de ellos como referencia para analizar el efecto de la reducción del espesor debido a la corrosión (ver Figura 19).

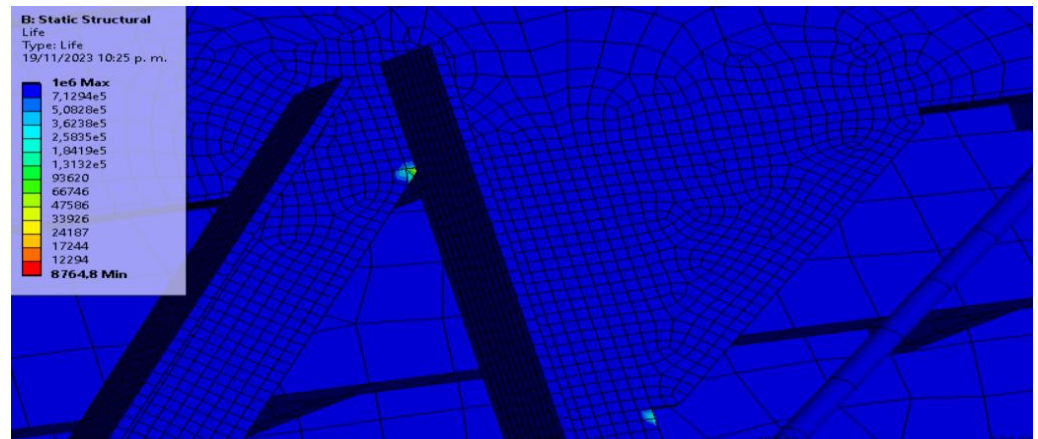


Figura 19 Vida a fatiga de junta o detalles estructurales bajo cubierta

El análisis de fatiga aplicado al fondo de la barcaza, utilizando el criterio de Goodman, revela que en esta zona se generan concentraciones de esfuerzo significativas, lo que incrementa su susceptibilidad a daños acumulativos por fatiga. Este fenómeno se ve intensificado, además, por la reducción del espesor del material. En cuanto a los esfuerzos equivalentes en el fondo, se observa que en la proa los valores son inferiores a 50 MPa, mientras que los esfuerzos superiores a este umbral corresponden a singularidades del modelo. En consecuencia, se obtiene un factor de seguridad cercano a 4.7 (ver Figura 20).

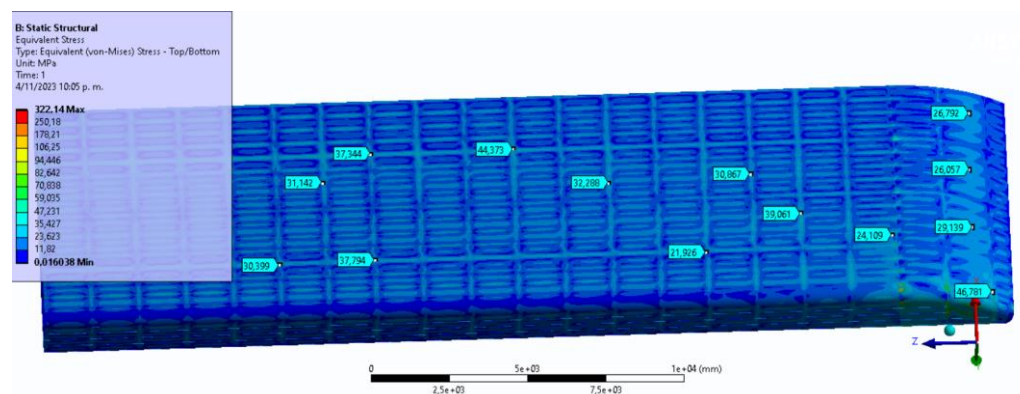


Figura 20 Esfuerzos en el fondo de la barcaza

En los refuerzos internos de la región de proa, se reportan valores cercanos a 160 MPa en las cuadernas, con un factor de seguridad de 1.5. Por otro lado, los refuerzos longitudinales de fondo presentan esfuerzos cercanos a 100 MPa, con un factor de seguridad asociado de 2.3. En cuanto a los refuerzos longitudinales de cubierta, ubicados cerca de la lámina de proa, los esfuerzos son cercanos a 120 MPa (ver Figura 21).

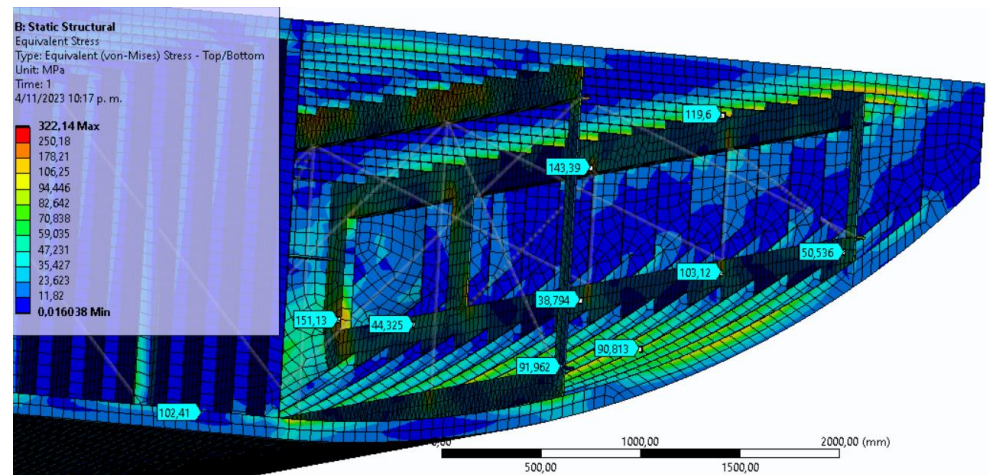


Figura 21 Nivel de esfuerzos en el fondo con riostras simplificadas como elementos unidimensionales

Los refuerzos del fondo presentan valores medios inferiores a 70 MPa. No obstante, en la región de unión de las riostras, los esfuerzos en las varengas aumentan a 170 MPa. Este comportamiento se debe a que el modelado de las riostras se realiza como elementos unidimensionales, unidos en un solo punto (ver Figura 22).

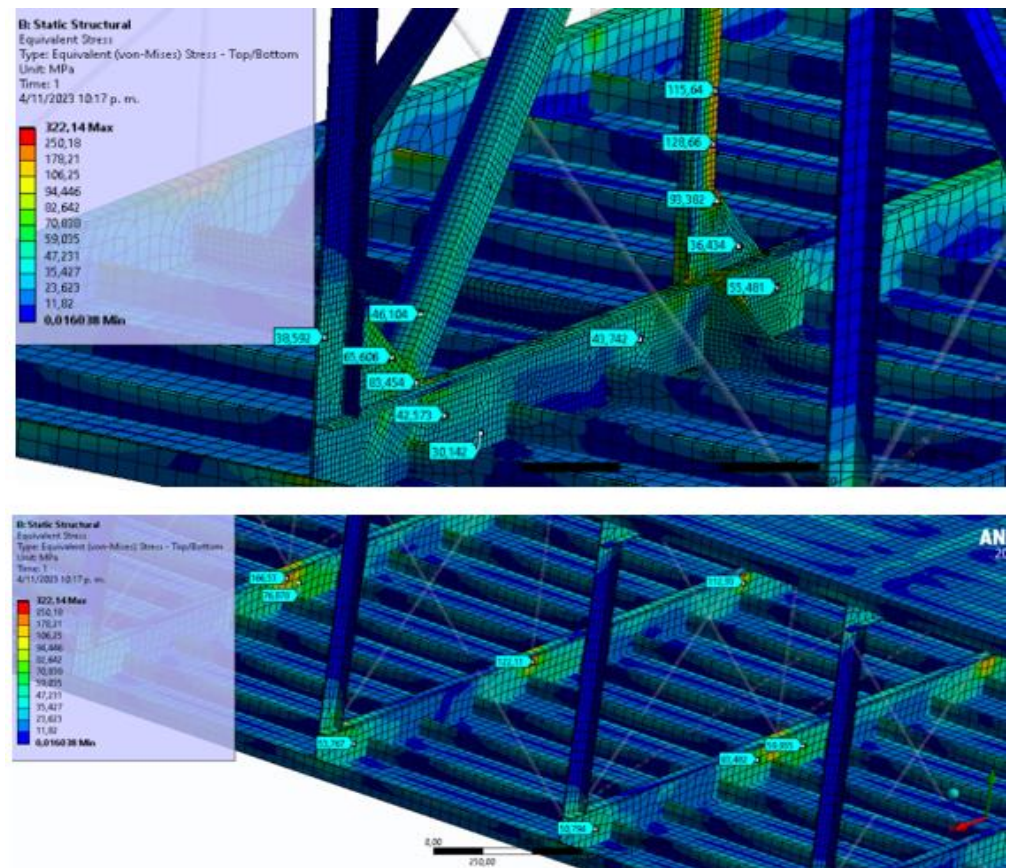


Figura 22 Nivel de esfuerzos en el fondo de con riostras modeladas como superficie

La cubierta, debido a las cargas ambientales y operativas descritas por la normativa, presenta un esfuerzo sobre la lámina inferior a 40 MPa. En consecuencia, el factor de seguridad asociado es de 5.8 (ver Figura 23).

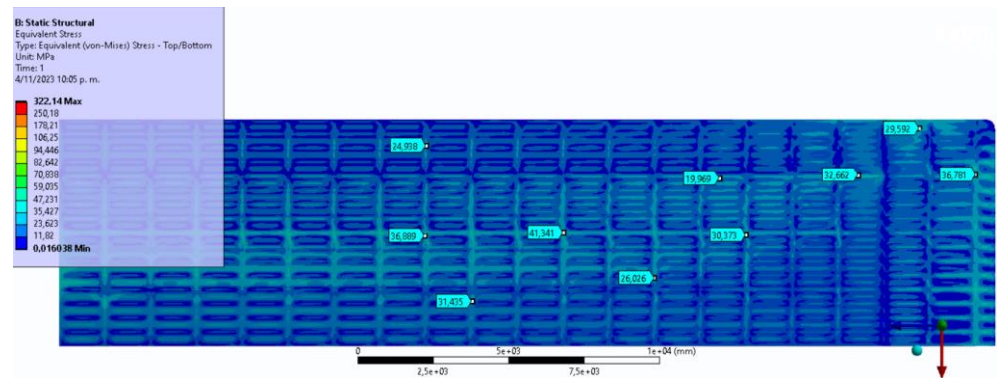


Figura 23 Esfuerzos en cubierta

En la cubierta, el comportamiento estructural difiere del observado en el fondo. Las variaciones en los esfuerzos parecen estar influenciadas por la distribución de la carga, así como por la respuesta estructural ante esfuerzos cíclicos. Aunque la fatiga no constituye el principal mecanismo de falla en esta zona, la pérdida de espesor incrementa la posibilidad de daño acumulativo. Además, la combinación de esfuerzos fluctuantes y corrosión podría acelerar la degradación, afectando la resistencia estructural a largo plazo.

Por otro lado, los baos bajo cubierta experimentan esfuerzos cercanos a los 150 MPa, especialmente cerca de la conexión con las riostras. Estos valores dan lugar a un factor de seguridad de 1.5 (ver Figura 24)."

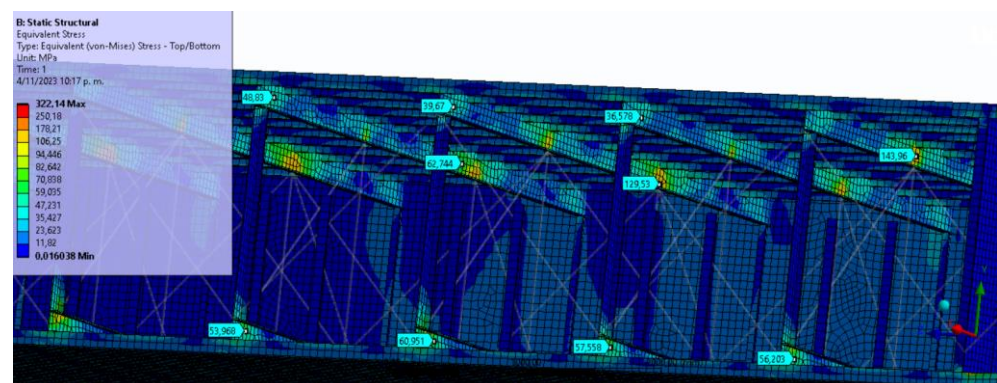


Figura 24 Esfuerzos en cubierta en refuerzos internos con riostras simplificadas como elementos

Al modelar con mayor detalle la unión de las riostras con los baos, se observó que los esfuerzos sobre los baos, inicialmente cercanos a 150 MPa, disminuyen a valores que oscilan entre 80 y 115 MPa. No obstante, algunos detalles estructurales presentan esfuerzos cercanos a 125 MPa y 240 MPa. Sin embargo, debido a su efecto local, la deformación plástica en estas zonas no afectaría significativamente el arreglo estructural de la embarcación (ver Figuras 25 a 28)

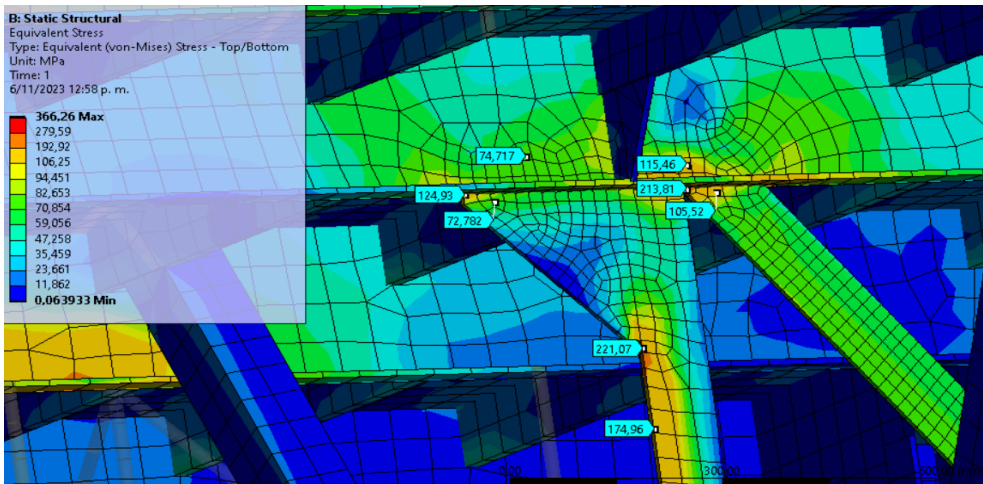


Figura 25 Conexión en detalle de las riostras con el bao

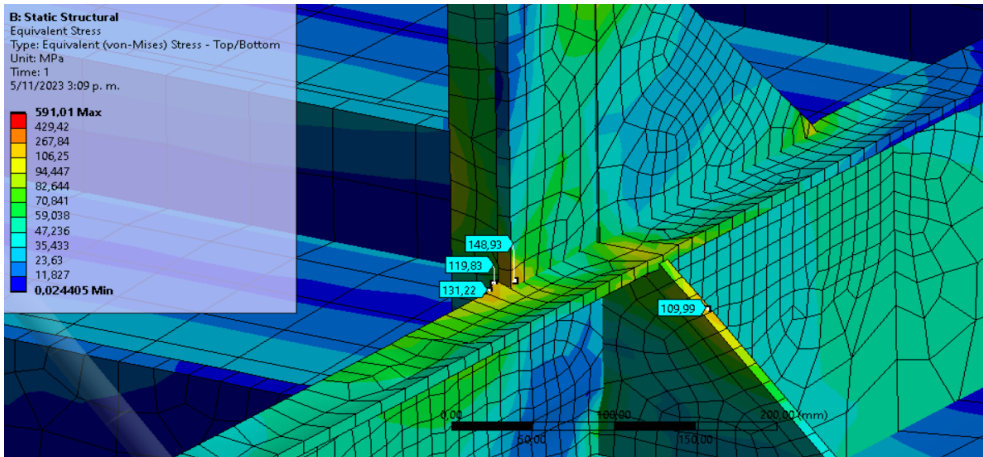


Figura 26 Conexión en detalles de las riostras con el fondo

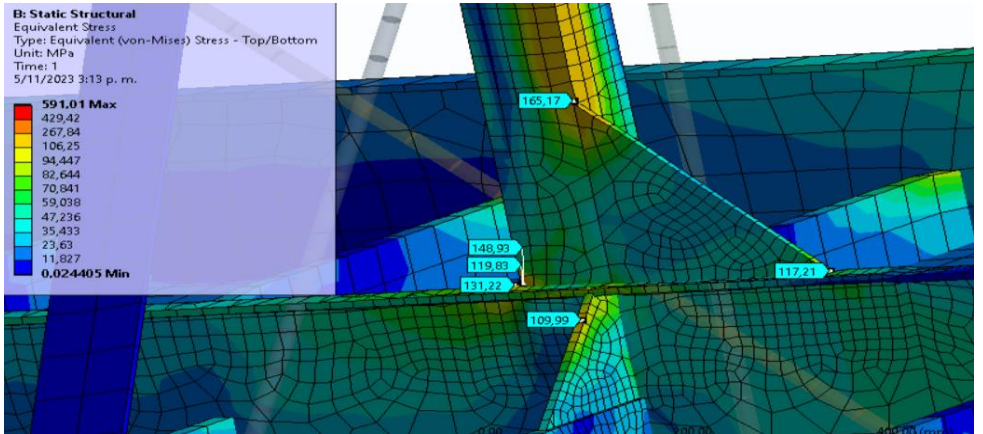


Figura 27 Conexión en detalles de las riostras con el fondo

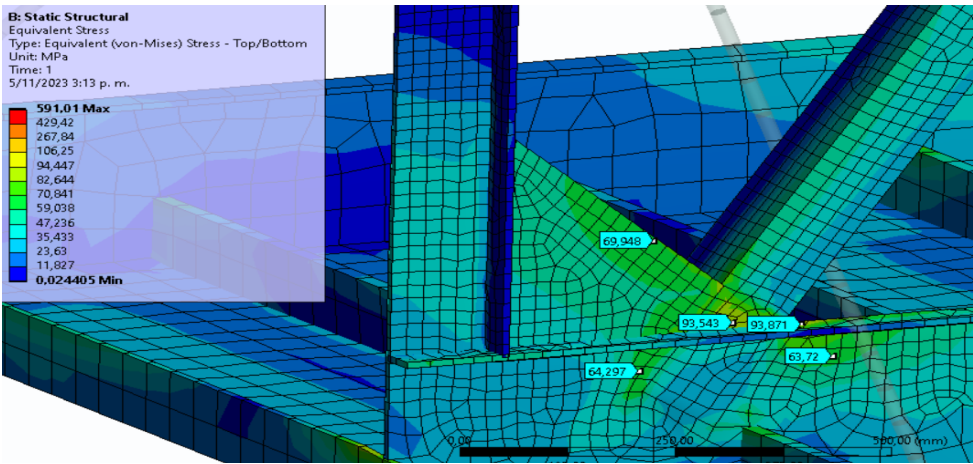


Figura 28 Conexión en detalle de las riostras con el fondo hacia la crujía

El estudio confirma que la fatiga es un factor determinante en el colapso plástico de la barcaza, especialmente en el fondo, donde la combinación de altos esfuerzos y corrosión compromete gravemente la resistencia estructural. Aunque la cubierta presenta menor criticidad, sigue siendo vulnerable en condiciones adversas. Por ello, resulta esencial contar con medidas de inspección y mantenimiento para prevenir fallas prematuras y garantizar la durabilidad de la estructura.

En la imágenes siguientes, se ilustran las deflexiones del centro de la barcaza bajo arrufo, tanto con las presiones aplicadas como con su espesor original. Se observa que el centro de la barcaza experimentaría deflexiones cercanas a 61 mm. Estas deflexiones se encuentran dentro del régimen elástico, de acuerdo con la distribución de esfuerzos que se presenta a continuación. Para más detalles, consulte la Figura 29 y la Figura 30

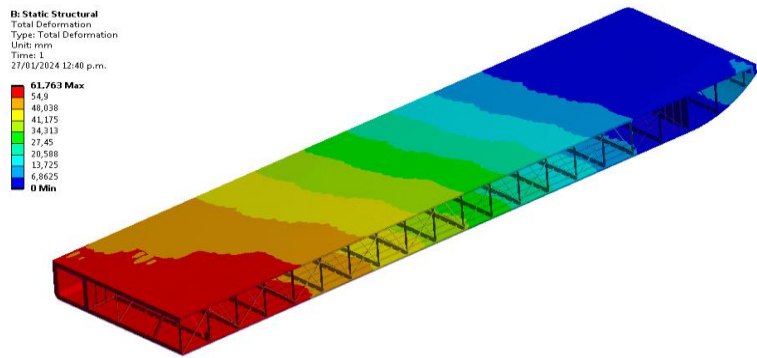


Figura 29 Deflexión del modelo con su espesor original

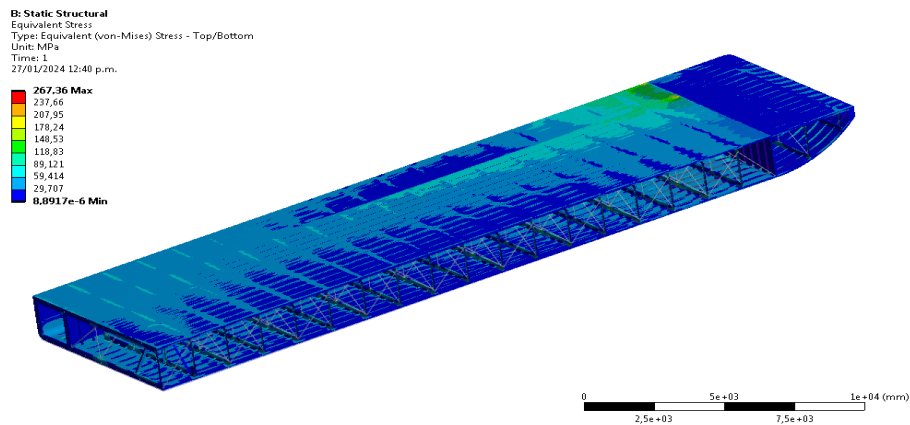


Figura 30 Esfuerzo equivalente del modelo de la barcaza con el espesor original

Al analizar el interior de la barcaza, específicamente en las cercanías de su zona media, se observa que la cubierta presenta esfuerzos cercanos a 70 MPa. Por otro lado, los refuerzos exhiben un esfuerzo nominal cercano a 65 MPa. Además, algunos concentradores de esfuerzo, ubicados cerca de los detalles de conexión, presentan esfuerzos cercanos a 200 MPa. En este contexto, se puede concluir que la barcaza se encuentra en un régimen lineal-elástico de deformación. Para mayor detalle, consulte las Figuras 31 y 32.

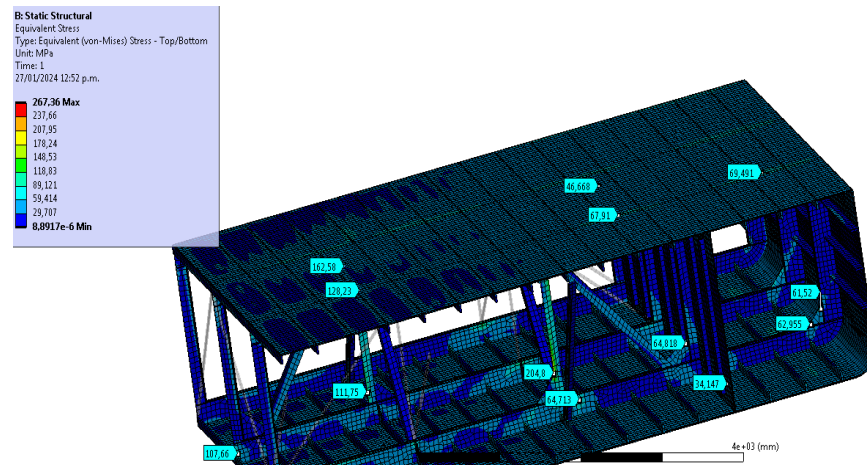


Figura 31 Esfuerzo equivalente en la sección media de la barcaza con el espesor original

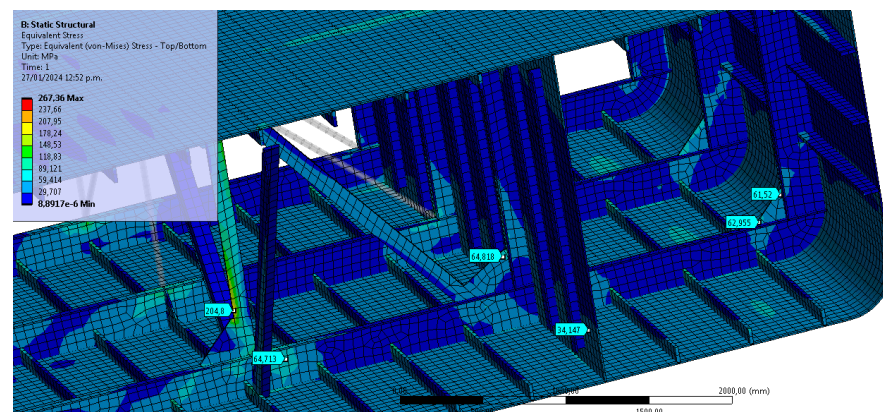


Figura 32 Esfuerzo equivalente de elementos en la sección media de la barcaza con el espesor original

Al reducirse el espesor de los paneles estructurales a 8,5 mm, las deflexiones en la sección media de la embarcación aumentan a 75 mm. Además, los esfuerzos equivalentes sobre la cubierta se incrementan a 90 MPa, mientras que los esfuerzos en la estructura interna ascienden a cerca de 100 MPa. Por otro lado, las concentraciones de esfuerzo, localizadas cerca de algunos detalles, alcanzan los 235 MPa, lo que corresponde al límite de fluencia del material. Para más detalles, consulte las Figuras 33 y 34.

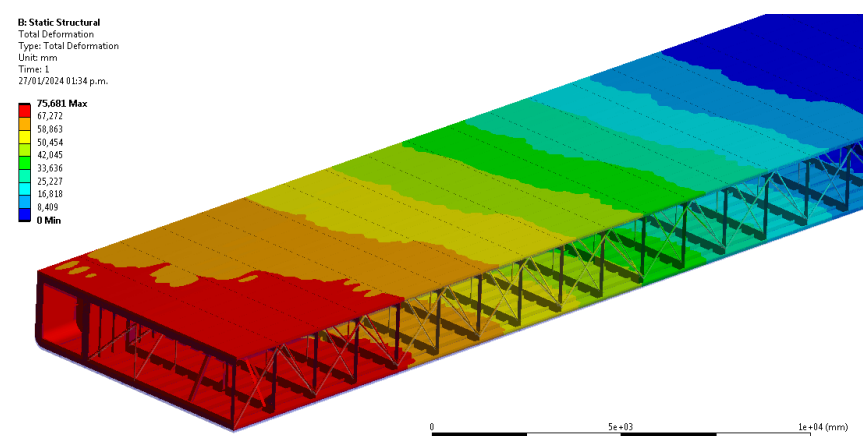


Figura 33 Deflexión del modelo con espesor de paneles de 8.5mm

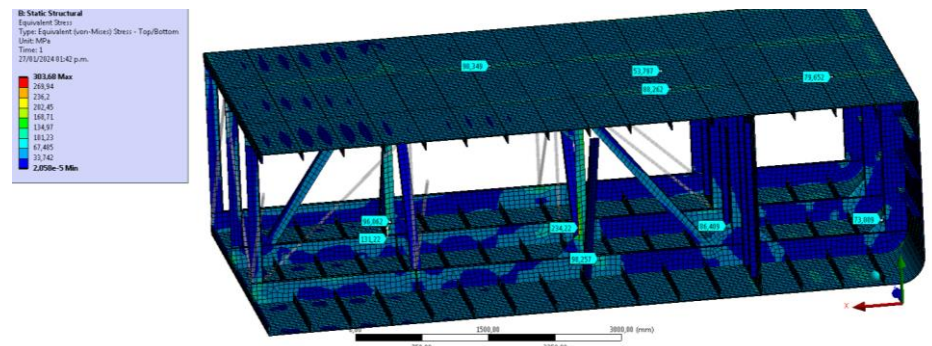


Figura 34 Esfuerzo equivalente de elementos en la sección media con espesor de 8.5 mm

Al establecer el espesor de los paneles de la estructura en 7,5 mm, se observa que la deflexión en la sección media de la barcaza alcanza los 86 mm. Además, los esfuerzos equivalentes en la cubierta aumentan a 103 MPa, mientras que en algunos detalles estructurales se llegan a registrar valores de hasta 235 MPa. Una vez que se supera el régimen elástico, las deformaciones y los esfuerzos dejan de mantener una relación lineal. En consecuencia, las deformaciones elevadas provocan incrementos de esfuerzos relativamente bajos. Para obtener más detalles, consulte las Figuras 35 y 36

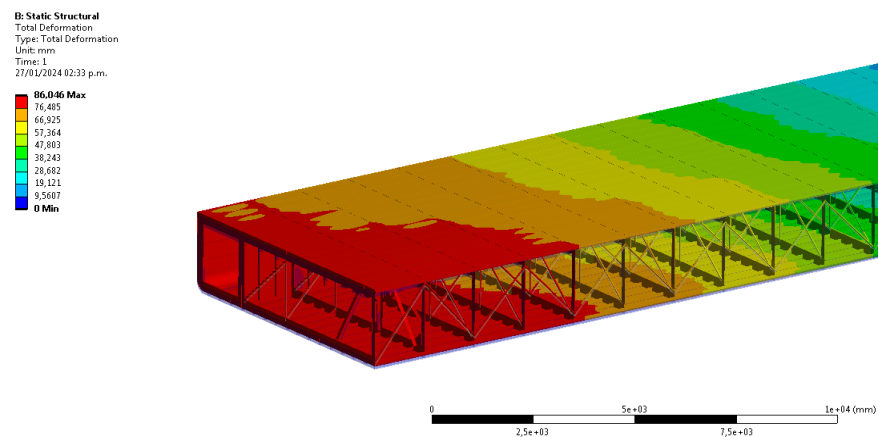


Figura 35 Deflexión del modelo con espesor de panel de 7.5 mm

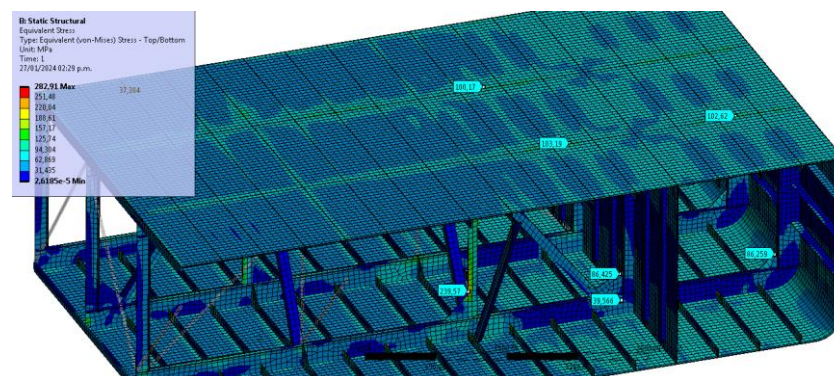


Figura 36 Esfuerzo equivalente de elementos en la sección media de la barcaza con espesor de 7.5 mm

Al reducirse el espesor de los paneles a 3,5 mm, las deflexiones en la zona media de la embarcación alcanzan hasta 300 mm. En cuanto al estado general de los esfuerzos, estos se sitúan alrededor de los 170 MPa, lo que, por consiguiente, excede el esfuerzo equivalente permisible para los elementos transversales. Además, una proporción significativa de los elementos longitudinales experimenta esfuerzos superiores a 220 MPa. Para más detalles, consulte las Figuras 37 y 38.

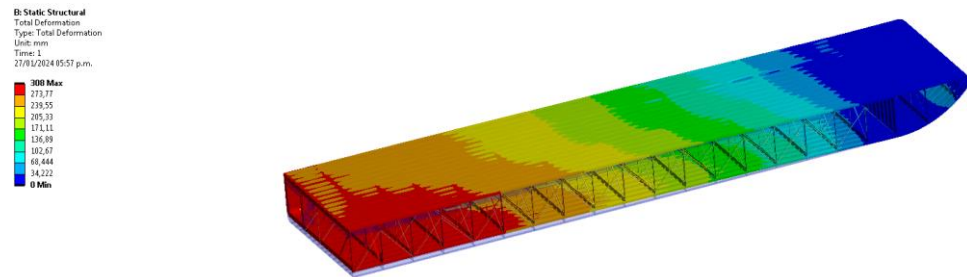


Figura 37 Deflexión del modelo con espesor de paneles de 3.5 mm

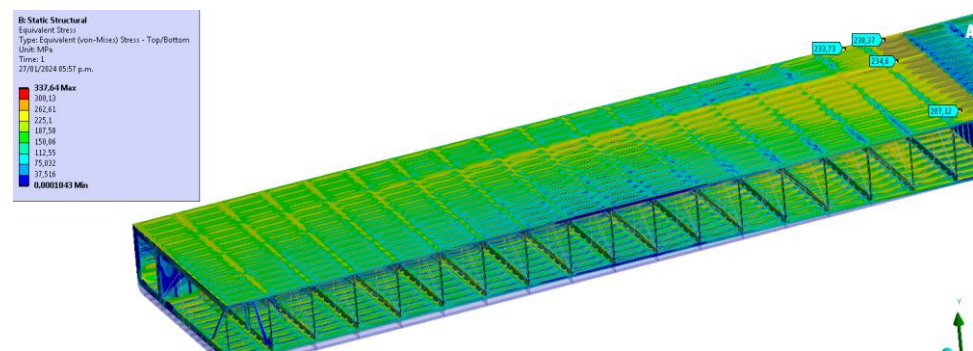


Figura 38 Esfuerzo equivalente del modelo de la barcaza con espesor de 3.5 mm

El estudio determina que la disminución del espesor tiene un impacto significativo en la integridad estructural. En este sentido, se identificó que, por cada milímetro (1 mm) de reducción en el espesor, el esfuerzo equivalente de Von Mises aumenta en un 14%, lo que, a su vez, indica que la estructura debe soportar una mayor carga debido a la pérdida de capacidad resistente. Además, esta reducción afecta negativamente la vida útil de la barcaza, disminuyéndola en aproximadamente 9,000 ciclos. Para obtener más detalles, consulte la Figura 39.

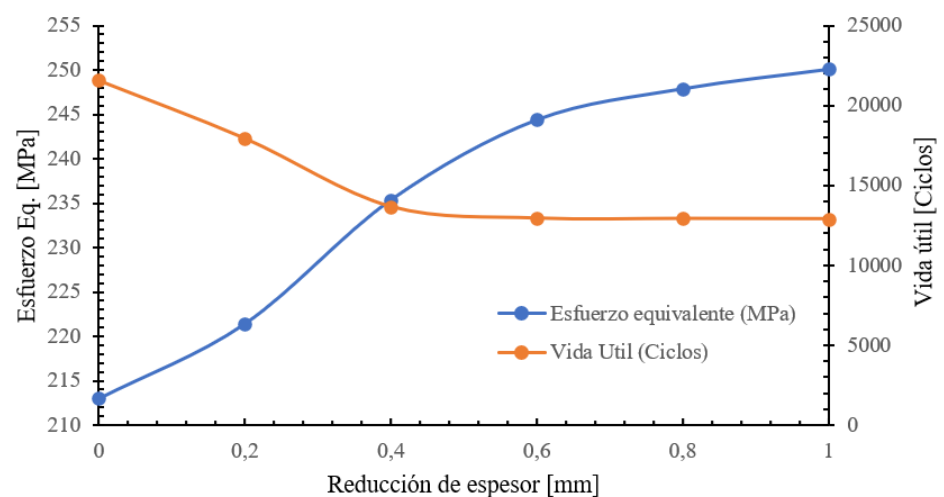


Figura 39 Esfuerzo vs reducción de espesor & Esfuerzo vs Vida Útil

Conclusiones

El estudio confirma que la fatiga es un factor determinante en el colapso plástico de la barcaza, especialmente en el fondo, donde la combinación de altos esfuerzos y corrosión compromete gravemente la resistencia estructural. Sin embargo, aunque la cubierta presenta menor criticidad, sigue siendo vulnerable en condiciones adversas. Por lo tanto, resulta esencial contar con medidas de inspección y mantenimiento para prevenir fallas prematuras y garantizar la durabilidad de la estructura.

A medida que disminuye el espesor de los elementos estructurales, la estructura de la barcaza experimenta un aumento progresivo de las deformaciones y de los esfuerzos internos. **En este contexto**, con un espesor de 8.5 mm, la deflexión en la sección media aumenta a 75 mm, y los esfuerzos en la estructura alcanzan valores de hasta 235 MPa, lo que prácticamente coincide con el límite de fluencia del material. **Esto** indica que, en este estado de corrosión o deterioro, la estructura de la barcaza se encuentra en el inicio de una deformación plástica, lo que podría comprometer su integridad estructural si el deterioro por corrosión continúa o las cargas aumentan.

Cuando la corrosión reduce el espesor a 7.5 mm, las deformaciones aumentan a 86 mm, y los esfuerzos internos comienzan a superar los 235 MPa en ciertos detalles estructurales. En este punto, la relación entre esfuerzo y deformación deja de ser lineal. Esto se debe a que se evidencia un cambio en el comportamiento mecánico del material al entrar en la zona plástica, lo que implica que, aunque las deformaciones aumentan significativamente, los esfuerzos no crecen en la misma proporción. Este fenómeno es característico de los materiales que han alcanzado su límite plástico, lo que significa que la estructura ha perdido gran parte de su capacidad para soportar cargas adicionales sin sufrir daños permanentes.

La estructura de la barcaza ingresa a la zona plástica cuando ha perdido el 21.25% de su espesor. En el caso más extremo, donde el espesor de los paneles se reduce de manera considerable a valores como 3.5 mm, la deflexión en la zona media de la embarcación alcanza los 300 mm, lo que representa un incremento drástico con respecto a las condiciones iniciales. Además, los esfuerzos generales en la estructura superan los 170 MPa, excediendo ampliamente los valores permisibles para los elementos transversales y longitudinales, que registran esfuerzos superiores a 220 MPa. Este escenario confirma que, con un espesor tan reducido, la estructura entra en un estado crítico de deformación, lo que podría dar lugar al colapso total de la embarcación.

De manera simultánea, la fatiga ha venido aportando un daño acumulativo, lo que podría perfectamente adelantar el colapso de la embarcación.

En cuanto al análisis lineal del pandeo en relación al colapso, se puede concluir lo siguiente:

- Para un espesor de 5 mm, el factor es menor a 1, lo que indica que la estructura no puede soportar la carga sin fallar.
- Para un espesor de 7 mm, el factor es 0.96, lo que sigue indicando que el pandeo ocurre, aunque la resistencia ha mejorado.
- A partir de 7.5 mm, el factor es mayor que 1, lo que significa que los paneles pueden resistir sin fallar por pandeo dentro del rango de carga evaluado.

Este comportamiento se debe a que el espesor influye directamente en la rigidez a la flexión de los paneles, lo cual afecta su capacidad para soportar cargas sin deformaciones excesivas.

Además, la reducción del espesor estructural tiene un impacto significativo en la respuesta mecánica de la barcaza, y **si no** se considera cuidadosamente, puede llevar a una disminución drástica de su vida útil y seguridad operativa. Por lo tanto, cualquier modificación en el diseño debe ser acompañada de un análisis detallado que garantice un equilibrio adecuado entre eficiencia estructural, resistencia y seguridad.

Referencias

- Ayyub, B. M., Stambaugh, K. A., McAllister, T. A., de Souza, G. F., & Webb, D. (2012). Structural life expectancy of marine vessel: Ultimate strength, corrosion, fatigue, fracture, and systems. *Journal of Marine Science and Technology*, 17(2), 162-175.
- Bureau Veritas. (2013). Directrices para la protección contra la corrosión aplicables a los buques de navegación en aguas interiores. Bureau Veritas.
- Cadavid, Camilo & Patiño, Iván & Lemmel, Karen. (2018). Análisis por elementos finitos del desempeño estructural de jaula de seguridad para vehículo Renault Logan bajo normatividad FIA. *Revista CINTEX*. 23. 35-53. 10.33131/24222208.312. Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Ivan-Patino-2/publication/336979281/figure/fig2/AS:11431281190868921@1695523946458/Figura-9-Detalle-de-la-malla-de-las-cartelas.jpg>
- Cameron, R. D., Nadeau, D., & Losciuto, E. (1997). Ultimate strength analysis of inland tank barges. *Journal of Ship Research*, 41(3), 135-146.
- Garbatov, Y., & Guedes Soares, C. (2005). Evaluación de la confiabilidad por fatiga de uniones soldadas de ferrys muy rápidos, teniendo en cuenta la carga de vehículos. *Journal of Marine Structures*, 18(1), 1-23.
- Meinken, S., & Schluter, B. (2001). Collapse behaviour of a push-barge. *Proceedings of the 2nd International Conference on Marine Structure*, 1, 210-220.
- Popov, E.P. (2000) *Mecánica de Sólidos*. 2da. Edicion. Pearson Education.
- Royani, A., Prifiharni, S., Priyotomo, G., Triwardono, J., & Sundjono. (2019). Corrosion rate and life expectancy of carbon steel in freshwater. *Corrosion Science*, 148, 16-25.
- Salazar, L., Hernández, J., Rosas Huerta, R., Iturbe, A., & Herrera, A. (2021). Structural analysis of a barge midship section considering the still water and wave load effects. *Marine Structures*, 45, 231-243.

Biografía de los Autores



Alfonso Eliecer Arrieta Zapata. Magister en Ingeniería Naval Docente de la Universidad ECCI, Universidad Libre de Bogotá, Instituto Técnico CCentral La Salle, Universidad Distrital Francisco José de Carldas

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales y no reflejan necesariamente las opiniones de DERROTERO y/o de los editores. DERROTERO y/o los editores se deslindan de cualquier responsabilidad por daños o perjuicios a personas o bienes que puedan surgir como resultado de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido. Se recomienda a los lectores verificar de manera independiente la información antes de basarse en ella.