

Análisis estructural de la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas con una grúa sobre orugas

Structural analysis of the main deck of a platform supply vessel with a crawler crane

José Hernández-Hernández^{1,3a}, Edna D. Rosas-Huerta^{1,3b}, José A. de Jesús Rodríguez-Morales^{1a}, Diego Fabián Hernández-Méñez^{1b}, Agustín L. Herrera-May^{1,2}

¹Maestría en Ingeniería Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, México. Correo electrónico: ^a pepe.caz96@gmail.com, ^b hemdf387@gmail.com.

²Micro and Nanotechnology Research Center, Universidad Veracruzana, México.
Correo electrónico: leherrera@uv.mx. Orcid: ^a [0000-0002-7373-9258](https://orcid.org/0000-0002-7373-9258)

³Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, Universidad Veracruzana, México.
Correo electrónico: ^a josehernandez02@uv.mx, ^b edrosas@uv.mx.

Recibido: 2 octubre, 2021. Aceptado: 15 enero, 2022. Versión final: 2 abril, 2022.

Resumen

Los buques de apoyo para plataformas de la industria petrolera tienen versatilidad de operación y capacidad de modificación estructural. Este artículo presenta una propuesta de instalación de una grúa sobre orugas sobre la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas petroleras, el cual realizará operaciones de mantenimiento en mar adentro. Esta propuesta incluye los resultados del análisis estructural de la cubierta principal, donde se considera el refuerzo con dos vigas NVA36. Este análisis estructural incorpora la integridad de la cubierta principal considerando la grúa y las cargas mediante modelos del método de elementos finitos (MEF). Los resultados obtenidos muestran que la cubierta principal requiere el refuerzo propuesto para disminuir las tensiones máximas de Von Mises hasta 218,71 MPa para la estructura de la cubierta principal y 201,67 MPa en las vigas de refuerzo. Estas tensiones máximas no superan las tensiones admisibles y de fluencia del material de la cubierta principal. El refuerzo de la cubierta principal que soporta la grúa sobre orugas permite la operación segura del buque de apoyo mar adentro.

Palabras clave: buque de apoyo a plataformas; cubierta principal; grúa sobre orugas; esfuerzo de Von Mises; esfuerzo admisible; método de elementos finitos.

Abstract

Support vessels for platforms in the oil industry have operation versatility and capacity for structural modification. This article presents a proposal for the installation of a crawler crane on the main deck of a platform support vessel, which will carry out offshore maintenance operations. This proposal includes the results of the structural analysis of the main deck, considering its reinforcement with two NVA36 beams. This structural analysis incorporates the integrity of the main deck, taking into account the crane and loads through finite element method (FEM) models. The obtained results show that the main deck requires the proposed reinforcement to decrease the maximum stresses of von Mises up to 218.71 MPa for the structure of the main deck and 201.67 MPa for the reinforcement beams. These maximum stresses do not exceed the allowable and yield stresses of the main deck material. The reinforcement of the main deck that supports crawler crane allows safe operation of the offshore support vessel.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: J. Hernández-Hernández, E. D. Rosas-Huerta, J. A. de Jesús Rodríguez-Morales, D. F. Hernández-Méñez, A. L. Herrera-May, "Análisis estructural de la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas con una grúa sobre orugas," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 2, pp. 87-106, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2-2022008>.

Keywords: platform supply vessel; main deck; crawler crane; Von Mises stress; allowable stress; finite element method.

1. Introducción

En los últimos años, la industria del petróleo y gas en México ha considerado la exploración y producción de hidrocarburos mar adentro, donde operan diversos sistemas flotantes de producción de hidrocarburos. El mantenimiento de estas instalaciones requiere la planificación de los diferentes servicios para satisfacer las necesidades de infraestructura para una operación continua [1].

Las embarcaciones de apoyo mar adentro transportan suministros, personal y equipos. Además, estas embarcaciones con equipo especializado pueden realizar trabajos de mantenimiento a instalaciones petroleras mar adentro. Por ejemplo, una grúa a bordo de un barco colocada de forma permanente o temporal puede mover cargas entre barcos, mantener cargas en una posición dada, remover pilotes o apoyar en operaciones de amarre [2]. Generalmente, en la etapa inicial del diseño de las embarcaciones, no se considera la instalación o reemplazo de diferentes tipos de grúas sobre las cubiertas principales. La instalación de estas grúas y sus condiciones de operación pueden alterar el comportamiento estructural de la cubierta principal y generar tensiones máximas que dañen la seguridad estructural.

Lee y colaboradores [3] estudiaron la influencia de los modos de operación de grúas pórticos en un sistema flotante de producción, almacenamiento y abastecimiento (FPSO, por sus siglas en inglés). Un prototipo del FPSO fue desarrollado a una escala 1:200, y el comportamiento de las fuerzas de viento sobre las grúas pórticos fue registrado mediante pruebas de túnel de viento. La condición del modo de operación de estas grúas incrementó la magnitud de las fuerzas de viento hasta un 8,6 % respecto a su condición de reposo. Sin embargo, estos estudios no reportaron el efecto de las grúas en la respuesta estructural de la cubierta principal del FPSO. Khudhur [4] reportó modelos del método de elementos finitos (MEF) usando el programa ANSYS para estimar las deflexiones máximas y la distribución de los esfuerzos en la estructura de una grúa en condiciones de operación. Krokowski y Maczyński [5] presentaron modelos MEF de los principales componentes de una grúa de columna para determinar su funcionamiento estructural dinámico.

En los modelos de MEF, se pueden incorporar las fuerzas y momentos sobre la estructura de la grúa, debido al peso, tipo de carga que transporta y condiciones de operación.

Estos modelos pueden ayudar a predecir las tensiones y deflexiones máximas en las estructuras de refuerzo, adaptadas sobre la cubierta principal de las embarcaciones, para la instalación de diferentes tipos de grúas. Así, los ingenieros navales podrían diseñar las mejores estructuras de refuerzo para cada tipo de grúa, que permitan una operación estructural confiable para las embarcaciones de apoyo mar adentro.

Para efectuar servicios de mantenimiento a una instalación mar adentro, se requirió la instalación de una grúa sobre orugas OTT Manitowoc serie 555 en la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas [6], [7]. Para garantizar la seguridad estructural de la cubierta principal del buque, se propuso el refuerzo de la cubierta mediante vigas NVA36. Se realizó el análisis estructural de la cubierta principal considerando la operación de la grúa sobre orugas y usando modelos del MEF con el programa Sesam-DNV [8]; en estos modelos no se incluyeron posibles efectos de abolladura y pandeos locales del refuerzo. Además, se desarrolló una metodología enfocada en la seguridad estructural de la cubierta principal, realizando una serie de revisiones y análisis que identifican las tensiones máximas admisibles [9]. La carga máxima que produce la grúa en la cubierta se determinó utilizando el programa estimador de presión ejercida sobre el suelo de Manitowoc [10], el cual estima la presión que ejercen los puntos de apoyo de la grúa en la cubierta.

Se seleccionaron las normas estándares *offshore* (OS) [11], las recomendaciones prácticas (RP) [12] y las reglas de clasificación de buques emitidas por DNV-GL [13], [14], las cuales especifican los criterios de diseño estructural de la embarcación [2], [15]. Esto se fundamenta en el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés) [16].

La cubierta principal sin refuerzo presenta un esfuerzo máximo de Von Mises de 966,82 MPa, el cual supera el esfuerzo de fluencia y de ruptura de su material. Para disminuir este esfuerzo máximo, se propuso un refuerzo de la cubierta principal usando dos vigas NVA36 en el área donde se ubica la grúa. El refuerzo propuesto permitió disminuir las tensiones máximas en la cubierta principal y en las vigas a 218,719 MPa y 201,67 MPa, respectivamente. Estos esfuerzos son inferiores al esfuerzo admisible (237,85 MPa) del material de la cubierta principal y de las vigas de refuerzo. Con el refuerzo propuesto, la cubierta principal tiene un comportamiento estructural seguro que permite la

instalación y operación de una grúa de orugas OTT Manitowoc serie 555.

2. Descripción teórica

En esta sección se especifican las características de la grúa sobre orugas sobre la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas; este buque opera en aguas tranquilas. Se incluyen las cargas de la grúa sobre orugas, además, en esta sección se presentan los componentes estructurales, de acuerdo con las reglas de DNV y API 2C [7], [12], [17], y se determinan el factor dinámico y los esfuerzos admisibles de la estructura de la cubierta principal.

2.1. Descripción del buque

La [figura 1](#) muestra el plano del buque de apoyo a plataformas propuesto para instalar la grúa sobre orugas; las dimensiones principales de este buque se reportan en la [tabla 1](#). La sección de cubierta principal se ubica en el costado de babor entre las cuadernas -06 y 06. La [figura 2](#) muestra una vista en planta de la sección entre las estaciones -6 a 20. La cubierta principal está formada por los siguientes perfiles estructurales: placa de cubierta de 12 mm de espesor; refuerzos longitudinales formados por perfiles bulbos (FB 100 × 10, HP 160 × 8, HP 180 × 8, HP 200 × 9, HP 280 × 12); cartelas (placas de soporte) de

8 mm, 10 mm, 11 mm, 15 mm, 16 mm y 20 mm de espesor; y 2 puntales de tubería de 254 mm de diámetro cédula 80. La [figura 3](#) representa la forma y los parámetros geométricos de los perfiles bulbos.

El material de los elementos estructurales de la cubierta es del tipo NVA36, con un límite elástico (σ_y) de 355 MPa. La [figura 4](#) muestra el modelo del MEF de la estructura en 3D de la sección de la cubierta principal; este modelo se utiliza para predecir la distribución de los esfuerzos en la estructura y sus valores máximos. El modelo considera los lados de babor y estribor de la cubierta principal, que son simétricos respecto a la línea centro. La [figura 5](#) muestra la estructura interna del modelo de la sección de la cubierta principal.

Tabla 1. Características y dimensiones principales del buque de apoyo a plataformas

Parámetro	Valor	Unidad
Eslora total (LOA)	92,4	m
Eslora entre perpendiculares (Lpp)	80,75	m
Manga moldeada	18,8	m
Puntal a la cubierta principal	7,6	m
Calado a la línea de carga	6,21	m
Carga máxima de cubierta	2600	ton
Resistencia de la cubierta	10	ton/m ²

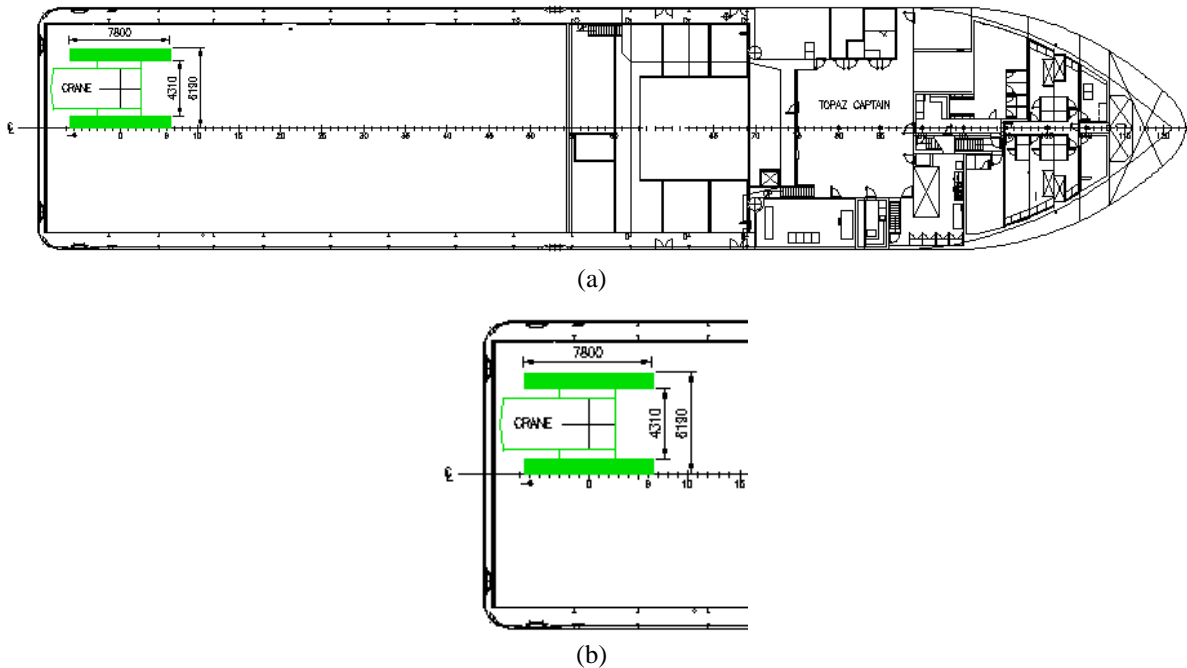


Figura 1. Vista en planta de la (a) cubierta principal de un buque de apoyo mar adentro y (b) de la posición de grúa sobre orugas.

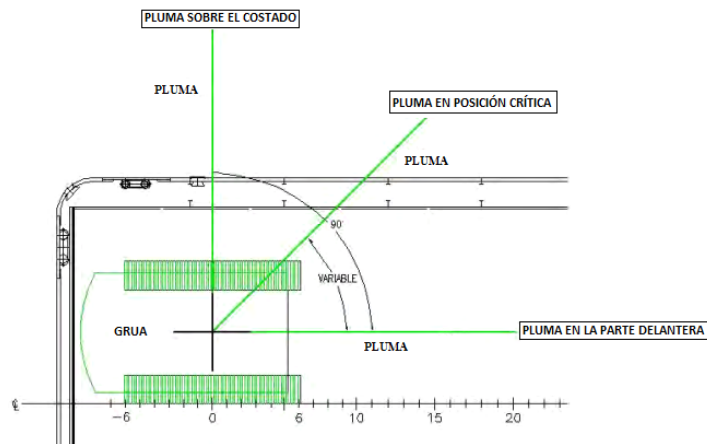


Figura 2. Vista en planta de la sección de cubierta principal del PSV.

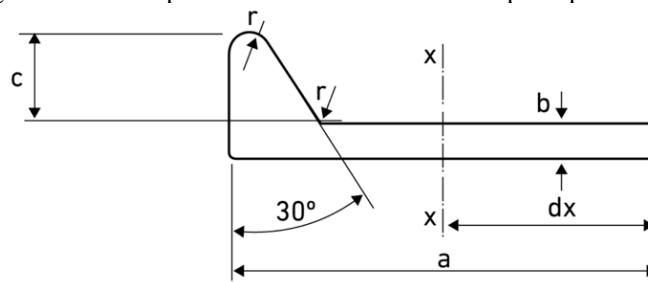


Figura 3. Características de los refuerzos tipo perfil bulbo (HP) [18].



Figura 4. Modelo del MEF de la sección de la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas.

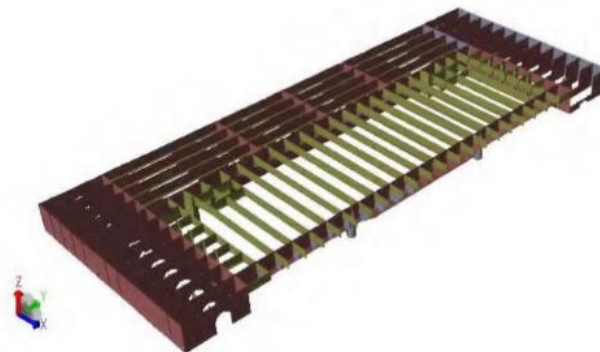


Figura 5. Modelo del MEF de la estructura interna de la cubierta principal de un buque de apoyo a plataformas.

2.2. Descripción de la grúa sobre orugas

La grúa sobre orugas propuesta es de la marca Manitowoc 555, serie 2 OTT [6], la cual tiene una capacidad de operación bajo diferentes condiciones de carga. La **tabla 2** incorpora las características principales de la grúa sobre orugas. Las principales dimensiones de los componentes de la grúa sobre orugas se indican en la **figura 6**.

Tabla 2. Características de la grúa sobre orugas Manitowoc 555 series 2 OTT

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad	150	ton
Momento máximo de carga	539	ton-m
Longitud máxima de la pluma	76,2	m
Motor	340	253 kW
Velocidad vertical	130	m/min
Tracción del cable	147	kN

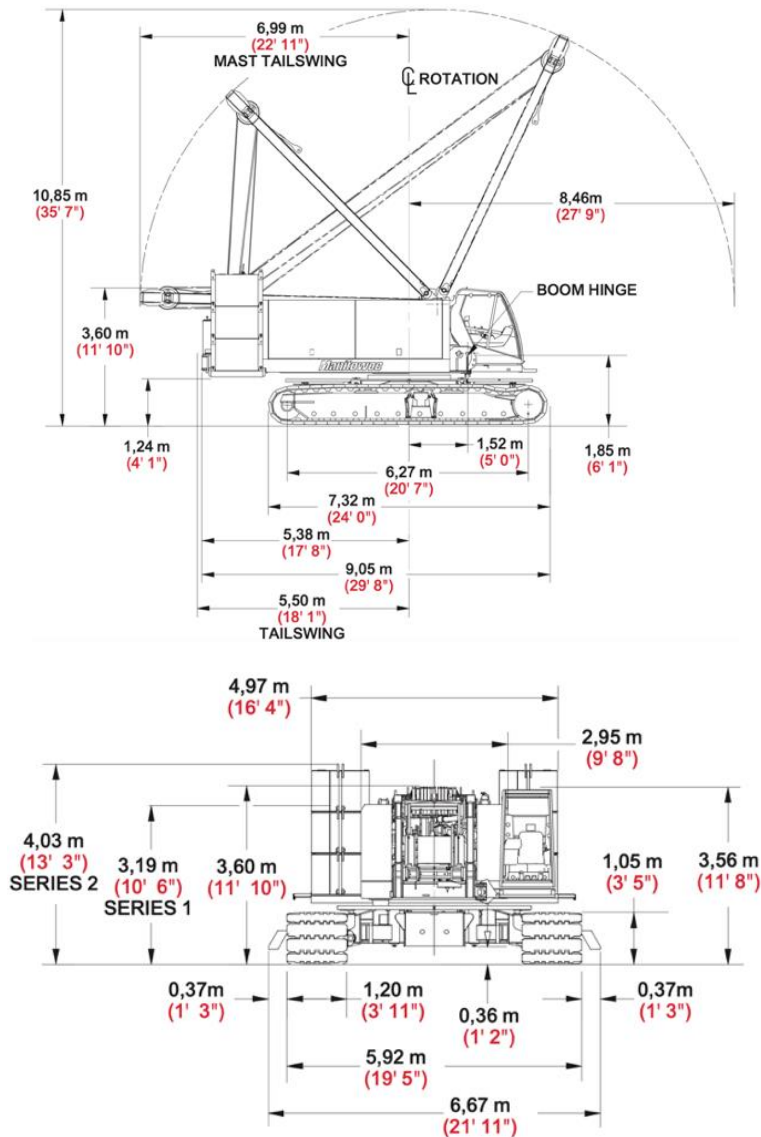


Figura 6. Dimensiones de la grúa sobre orugas Manitowoc 555.

2.3. Efectos de la instalación de la grúa

Para instalar una grúa móvil sobre una estructura flotante, se analizan sus repercusiones sobre la operación del sistema flotante [19]:

- El efecto de la grúa sobre el francobordo.
- La disminución de carga para lograr sostener la grúa y las cargas dinámicas.
- El alcance de carga de la embarcación para una instalación y funcionamiento óptimo de la grúa.
- Prevenir posibles deslizamientos de la grúa a los costados de la embarcación con la correcta instalación de soportes o restricciones.
- Determinar la correcta instalación y aseguramiento de la grúa para prevenir movimientos involuntarios cuando no opere en aguas tranquilas.
- Prevenir posibles escoras y cambios de calados provocados por la operación de la grúa sobre la estructura flotante.
- Esfuerzos resultantes por la operación de la grúa.

2.3.1. Pruebas de la grúa móvil montadas en el buque

Antes de la aplicación de carga en la grúa móvil instalada a bordo de un buque, se debe verificar [19]:

- Que estén correctamente asegurados los anclajes y amarres de la grúa.
- Que la configuración de la grúa esté de acuerdo con las especificaciones del fabricante para su operación.
- Que no existan defectos en la configuración que impidan que la grúa móvil opere la carga de prueba de manera segura en el buque.

Un requisito es evaluar el funcionamiento de la grúa sin carga para comprobar el correcto funcionamiento de controles, sistema de frenado y otros dispositivos [19]. Además, se debe examinar el indicador de capacidad nominal para asegurar que se encuentre en su capacidad nominal y así identificar cualquier alteración en el radio de trabajo [19].

2.3.2. Evaluación posterior a la operación de la grúa

Se realiza una inspección detallada en la estructura de soporte de la grúa, la cubierta principal y en los refuerzos, posterior a la operación de la grúa. Además, para realizar una evaluación posterior a la operación, se verifica que no exista daño estructural o mecánico en la combinación de buque y grúa.

2.3.3. Límites del estudio

La instalación de la grúa móvil requiere analizar diversos factores y estudiar el comportamiento estructural de la relación buque-grúa (deformaciones y tensiones máximas en la sección del buque donde se instalará y operará la grúa). Este trabajo se limita al comportamiento estructural de la cubierta principal en condiciones de operación de la grúa en aguas tranquilas (tres casos de carga con tres diferentes posiciones de operación de la pluma de la grúa), donde el buque soporta las mayores condiciones de carga y puede derivar en una falla de la estructura en la cubierta principal.

2.4. Análisis de resistencia estructural

Las reglas DNV-GL [9] especifican tres análisis estructurales para el tipo de buque:

- a) Resistencia global. Se evalúan las tensiones en los refuerzos del casco; se proponen las condiciones correctas a los modelos estructurales parciales de los modelos del MEF.
- b) Parcial del buque. Se examina la resistencia de los refuerzos estructurales longitudinales, mamparos y soportes primarios.
- c) Local. Se evalúan los niveles de esfuerzos locales para el estado límite último (ELU).

2.4.1. Análisis de resistencia estructural local

El análisis de resistencia estructural local incluye los detalles estructurales de la sección de la cubierta principal y sus refuerzos. Además, en este análisis se evalúan los refuerzos longitudinales sujetos a grandes deflexiones. Las cartelas dobles con base blanda pueden ser suficientes para adaptarse al mayor esfuerzo de flexión en el mamparo transversal.

El comportamiento estructural de la cubierta principal del buque fue obtenido usando modelos del MEF con el programa GeniE-Sesam [20]. De esta forma, se puede obtener mayor detalle en los elementos donde se prevén esfuerzos elevados; es necesario un análisis avanzado de los esfuerzos en los puntos con mayor tensión.

2.4.2. Estado límite último (ELU)

Actualmente, la industria marina se enfoca en el diseño del estado límite. Durante la última década, se han desarrollado diversos métodos de diseño basados en los estados límite últimos (ELU).

En la evaluación, las placas están rodeadas por miembros de soporte y solo contienen deflexiones relacionadas con su fabricación [2]:

$$w_{opl} = \frac{b}{200} \quad (1)$$

donde w_{opl} es la deflexión inicial máxima de la placa y b , el ancho de la placa entre refuerzos (ver la figura 7).

El pandeo corresponde a la deflexión inicial de la placa, además, se considera que no existen esfuerzos residuales en las placas. Los miembros de soporte (por ejemplo, refuerzos longitudinales) pueden presentar deflexiones iniciales por su fabricación, las cuales se estiman como [2]:

$$w_{oc} = w_{os} = \frac{a}{1000} \quad (2)$$

donde w_{oc} es la deflexión inicial de los refuerzos verticales, w_{os} es la desviación inicial lateral de los miembros horizontales y a es una longitud del refuerzo, como se define en la figura 7.

El patrón de deflexión inicial vertical y lateral de los refuerzos corresponde a la resistencia mínima al pandeo de los refuerzos. Se observa en la estructura que sus placas reforzadas en la cubierta principal y en el fondo tienen un espesor desigual.

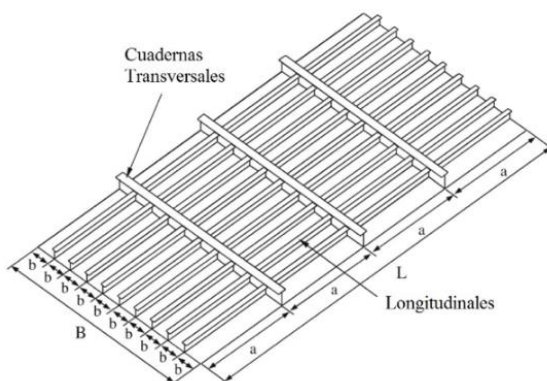


Figura 7. Ejemplo de una estructura para un análisis de ELU.

2.5. Reglas DNV-GL

Para realizar el análisis de la estructura de la cubierta principal, se deben considerar las normas y reglas de la sociedad de clasificación donde esté registrada; en este caso, se utilizaron las normas DNV-GL. Con estas normas, se determinaron los valores máximos admisibles

de la sección de cubierta principal del buque. En este análisis se calcula el espesor mínimo requerido de la cubierta y se compara con el espesor de placa de cubierta instalada (12 mm) para clasificarla como estructura segura. Así, se evalúa si es apropiado el espesor. Además, se evalúan las cargas y el factor dinámico. También, se obtiene un factor de rendimiento para estudiar la resistencia a la fatiga.

2.5.1. Espesor mínimo de la placa de cubierta

Las tensiones máximas se producen en la sección central de la cubierta principal y de la placa de fondo. La cubierta es el conjunto estructural principal del buque que mantiene su resistencia longitudinal ante el efecto del momento de flexión longitudinal en el casco. La placa tiene el 40 % de la eslora del buque y un espesor mínimo (t) permitido por las sociedades de clasificación. El espesor mínimo debe cumplir con la norma DNV-GL. En particular, el espesor neto (unidades mm) de la placa, utilizando la siguiente regla DNV-GL [21], debe ser mayor a:

$$t = a + bL_2\sqrt{k} \quad (3)$$

donde k es un factor que se determina por el esfuerzo de fluencia del material, a y b son coeficientes definidos en la regla DNV-GL y L_2 es la eslora del buque (en metros).

El factor k para el acero normal y de alta resistencia para el casco y el escantillado se definirá con los valores de la tabla 3.

Tabla 3. Esfuerzos mínimos de fluencia para determinar el valor de k

Esfuerzos mínimos de fluencia (N/mm ²)	k
235	1
315	0,78
355	0,72
390	0,66/0,68
460	0,62

La cubierta principal debe diseñarse con un escantillado para una carga mínima de 1,5 ton/m², considerando 80 % de la presión del mar. Las cargas superiores a 4 ton/m² no requieren combinarse con la presión del mar. En las áreas de cubierta para unidades de carga pesada, la estructura se reforzará contra el peso máximo esperado. El espesor de las placas de la cubierta, bajo cualquier diseño, no será inferior a 7,0 mm [22]. La tabla 4 presenta los resultados del cálculo del espesor mínimo requerido por la placa de cubierta (t_{min}), realizado con las reglas DNV-GL.

Tabla 4. Espesor mínimo requerido por la placa de la cubierta principal, determinado mediante la regla de DNV-GL

Espesor de la placa de cubierta (mm)		Estatus
Espesor instalado	Espesor mínimo	
12	7	OK

El buque cuenta con una placa de cubierta de 12 mm que satisface los requerimientos mínimos de la embarcación respecto a las normas DNV-GL, garantizando la resistencia del arreglo estructural.

2.5.2. Cargas

La carga producida por la grúa móvil en cubierta se determinó con un estimador de presión diseñado por el fabricante [10] para diferentes condiciones de carga operativa; este estimador de presión determina la fuerza que ejercen las orugas de la grúa sobre la cubierta del buque. Para realizar la estimación de presión, se debe conocer el modelo, contrapeso y posición de las orugas; configuración, posición de la pluma; superficie de operación; carga de elevación, y ubicación de la carga de elevación. Las cargas consideradas para el análisis son el peso operativo de la grúa sobre orugas de 135.146 ton más el peso de la carga por levantar. Las posiciones de operación de la pluma, mostradas en la figura 8, con la carga a elevar son:

- La posición de la pluma sobre el frente (0°).
- La posición de la pluma en un giro crítico (19°).
- La pluma sobre el costado (90°).

Para evaluar los efectos del peso de la grúa y el izaje de la carga, se utilizó el programa estimador de presión ejercida sobre el suelo de Manitowoc [10], para determinar los datos de presión sobre el suelo.

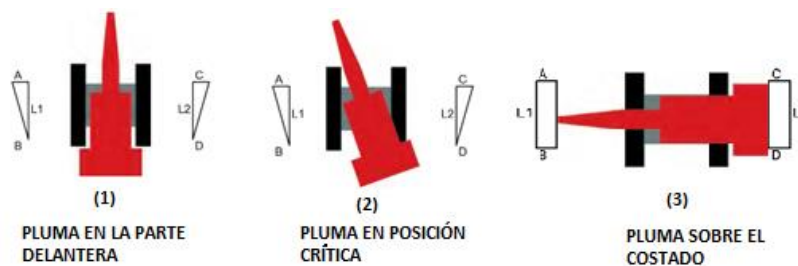


Figura 8. Posiciones de operación de la pluma de la grúa sobre orugas.

2.5.3. Factor dinámico

La resistencia estructural del soporte de la grúa móvil (incluido el pedestal) se analizó bajo una carga de diseño, que consiste en el peso de trabajo (W) multiplicado por un factor dinámico ψ , más el peso propio [17]. Sin embargo, el factor dinámico aplicable para grúas instaladas en buques normalmente se analiza con las normativas de las sociedades de clasificación. Para el caso particular del buque, se estudia mediante la norma DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch11 [17]. El factor dinámico no se tomará por debajo del valor indicado en la tabla 5.

En las grúas mar adentro, las cargas de diseño para la estructura de soporte se consideran como cargas de diseño multiplicadas por un factor de seguridad adicional. Las grúas mar adentro aprobadas por API 2C tienen estructuras robustas con menor número de dispositivos y accesorios. De acuerdo con la norma API 2C, se pueden determinar las cargas de trabajo seguras (SWL) basadas en esfuerzos admisibles, coeficientes dinámicos C_v , cargas dinámicas y autenticación de diseño, mediante una prueba del prototipo con celdas medidoras de deformación, con un valor de $C_v * SWL$ o con una prueba de carga pesada (*heavy lift*) de $2 * SWL$. Esta especificación propone tres métodos para calcular las fuerzas dinámicas sobre una grúa mar adentro en un estado de mar especificado: método específico del buque, método general y método dinámico (solo para ascensores externos en estructuras con soporte inferior).

Tabla 5. Factor dinámico requerido por DNV-GL

Sitio de operación	Carga de trabajo (W)	Factor dinámico ψ
Puerto	W	1,1
Mar adentro	$10 \text{ kN} < W \leq 2500 \text{ kN}$	1,3
	$W > 5000 \text{ kN}$	1,1

De acuerdo con la norma API 2C, las embarcaciones tipo plataformas flotantes y barcos grúa se pueden determinar mediante el método específico del barco o el método general. Las grúas con apoyo inferior se determinan mediante el método general o, con restricciones especiales, con el método dinámico. Considerando que el buque de apoyo a plataformas realizará operaciones en el golfo de México, se propuso el método dinámico de la norma API, especificación 2C [7]. Este método es aplicado para estructuras con apoyo inferior en condiciones de mar y viento suaves, en este caso de estudio, se aplicó a buques en el golfo de México. Este método solo se utiliza en situaciones donde la posición del buque de suministro se mantiene constante en relación con la plataforma. En estas condiciones especiales, se puede usar un factor dinámico de 2, y las fuerzas de viento se pueden considerar nulas. Utilizando este método, la velocidad mínima del gancho (V_{h_min}) no debe ser inferior a 0,67 ft/s (40 ft/min).

2.5.4. Casos de carga

El modelo de plataforma se analiza con una condición estática con las siguientes cargas:

- Condición estática.
- Se agregó un 5 % de contingencia al peso de la grúa.
- Se agregó el factor dinámico de 2, determinado con la norma API 2C [7].

Por lo tanto, se estima que la presión ejercida por las orugas sobre la cubierta del buque se multiplica un factor total de 2,05.

2.5.4.1. Casos de carga I

En este caso, la carga de elevación de la grúa sobre orugas es 51,2 ton, con radio de trabajo de 10 m. La [figura 9](#) ilustra la posición de carga a 0° para el caso de la carga I. La [tabla 6](#) muestra la carga aplicada para el caso I.



Figura 9. Vista de carga aplicada a la cubierta principal para el caso de carga I de la grúa sobre orugas con una posición de la pluma a 0° .

Tabla 6. Estimación de la carga aplicada para el caso de carga I

(a) Grúa a 0°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	410	840,5	Presión C (kPa)	410	840,5
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	3,9		L2 (m)	3,9	
(b) Grúa a 19°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	436,8	895,44	Presión C (kPa)	337,3	691,47
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	4,6		L2 (m)	3,6	
(c) Grúa a 90°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	228,2	467,81	Presión C (kPa)	28,7	58,84
Presión B (kPa)	228,2	467,81	Presión D (kPa)	28,7	58,84
L1 (m)	6,3		L2 (m)	6,3	

2.5.4.2. Casos de carga II

En el caso de carga II, la carga de elevación de la grúa sobre orugas sobre la cubierta principal es 39,1 ton con un radio de trabajo de 12 m. La figura 10 muestra la posición de carga a 0° para el caso de carga II. La tabla 7 registra la carga aplicada para este caso II.

2.5.4.3. Casos de carga III

En el caso de carga III, la carga de elevación considerada es 28,6 ton, con un radio de trabajo de 15 m. La figura 11 muestra la posición de carga a 0° para el caso de carga II. La tabla 8 reporta la carga aplicada para este caso de carga III.



Figura 10. Vista de carga aplicada a la cubierta principal para el caso de carga II de la grúa sobre orugas con una posición de la pluma a 19°.

Tabla 7. Estimación de la carga aplicada para el caso de carga II

(a) Grúa a 0°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	375,4	769,57	Presión C (kPa)	375,4	769,57
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	4		L2 (m)	4	
(b) Grúa a 19°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	400,1	820,21	Presión C (kPa)	306,4	628,12
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	4,8		L2 (m)	3,7	
(c) Grúa a 90°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	212,6	435,83	Presión C (kPa)	28,7	58,84
Presión B (kPa)	212,6	435,83	Presión D (kPa)	28,7	58,84
L1 (m)	6,3		L2 (m)	6,3	

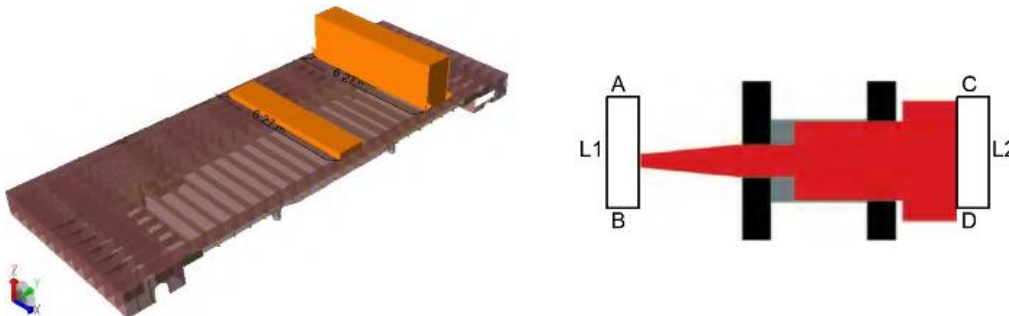


Figura 11. Vista de carga aplicada a la cubierta principal para el caso de carga III de la grúa sobre orugas con una posición de la pluma a 90°.

Tabla 8. Estimación de la carga aplicada para el caso de carga III

(a) Grúa a 0°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	354,7	727,14	Presión C (kPa)	354,7	727,14
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	4		L2 (m)	4	
(b) Grúa a 19°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	378	774,9	Presión C (kPa)	378	774,9
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)	4,8		L2 (m)	3,7	
(c) Grúa a 90°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	200,6	411,23	Presión C (kPa)	27	55,35
Presión B (kPa)	200,6	411,23	Presión D (kPa)	27	55,35
L1 (m)	6,3		L2 (m)	6,3	

3. Resultados y discusión

Las figuras 12 y 13 muestran el mallado uniforme del modelo del MEF de la sección exterior e interior de la cubierta principal del buque de apoyo a plataformas. Este mallado fue desarrollado mediante el programa SESAM GeniE. Para este análisis estructural se modelaron placas, cartelas, cuadernas y elementos estructurales principales de la cubierta principal. El mallado es cuadrangular y los refuerzos usan elementos tipo placa. Los refuerzos fuera de las zonas de mallado fino se modelan utilizando elementos viga. El mallado incluye placa de cubierta, refuerzos longitudinales y transversales, cuadernas y mamparo longitudinal.

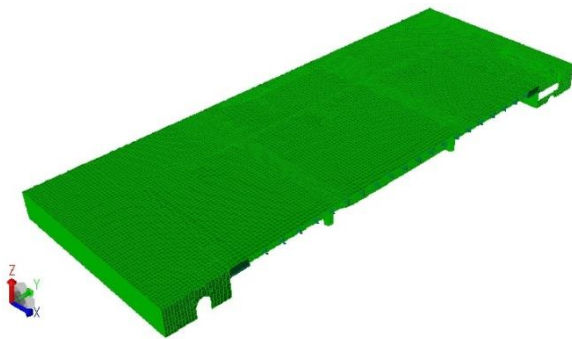


Figura 12. Mallado del modelo del MEF de la estructura externa cubierta principal del buque de apoyo a plataformas.

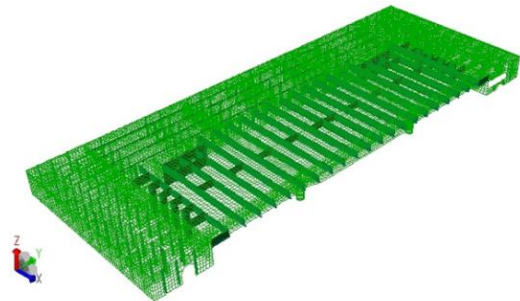


Figura 13. Mallado del modelo del MEF de la estructura interna de la cubierta principal del buque de apoyo a plataformas.

3.1. Consideraciones del modelo MEF

En la estructura del modelo del MEF de la cubierta principal se verificaron:

- Corrugaciones y refuerzos correspondientes.
- Para el análisis estructural local, elementos de placa a una distancia no inferior a “b” del área de consideración y del punto de mayor esfuerzo considerado.

La región de mallado fino se aplicó en el área de alta tensión. El tamaño de elementos dentro de las zonas de mallado fino no debe ser superior a 50 mm × 50 mm. La extensión de la zona de mallado fino no debe ser menor de 10 elementos en todas las direcciones.

Para garantizar la calidad de los resultados del análisis, el modelo debe satisfacer criterios y requisitos de las sociedades de clasificación.

Se consideraron los criterios DNV [21] para validar los modelos 3D que describen cómo utilizar un modelo local de malla fina.

Se debe verificar del modelo:

- Propiedades de los materiales: módulo de elasticidad, módulo de Poisson y densidad del material.
- Espesor de elemento: el espesor neto de la placa.

3.2. Consideraciones del modelo MEF

Se deben ubicar en los extremos para evitar movimientos del cuerpo rígido, de forma que absorban fuerzas cortantes desequilibradas y permitan ajustes de cargas [21].

Las condiciones de frontera en proa y popa deben ser fijas y permitir que la sección transversal pueda girar libremente. La figura 14 muestra las condiciones de frontera en los bordes del modelo para obtener el equilibrio estático.

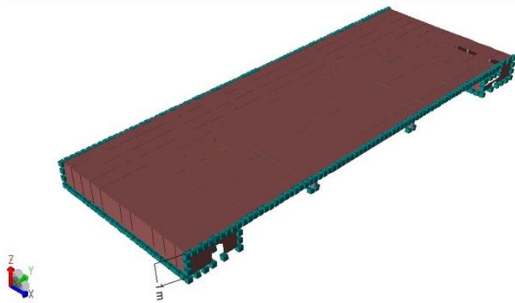


Figura 14. Condiciones de frontera para el modelo del MEF de la cubierta principal del buque de apoyo a plataformas.

3.3. Factor de utilización de rendimiento de mallado fino

El factor de utilización de rendimiento de mallado fino (λ_f) de la sección de plataforma se determina con los resultados de esfuerzos de Von Mises (σ_{vM}) obtenidos en el análisis estructural del modelo del MEF [9]. Este factor se obtiene con la relación entre σ_{vM} y el esfuerzo de fluencia (σ_y) del material, sin exceder $1,2*ff$ para una operación segura. El parámetro ff es un factor de fatiga tomado como 1,0 en general y 1,2 para detalles donde la resistencia a la fatiga se verifica mediante tensiones de puntos calientes. Por tanto, los resultados de la tensión de los elementos estructurales de la plataforma principal deben satisfacer el parámetro correspondiente al factor utilizado. El límite elástico del material de los elementos estructurales es de 355 MPa.

3.4. Criterios para la verificación de los resultados

Se debe comprobar los resultados respecto a los criterios de aceptación dentro del área de evaluación del modelo del MEF para todos los elementos estructurales [9]. En todas las placas y elementos estructurales evaluados, los esfuerzos de Von Mises (σ_{vM}) se calcularon en función de esfuerzos normales y cortantes del elemento de placa [9]:

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (4)$$

donde σ_x y σ_y son esfuerzos normales y τ_{xy} es el esfuerzo cortante.

Con los resultados obtenidos en este estudio, se puede analizar los criterios de tensión admisible de Von Mises, para que estos no excedan los valores determinados en la siguiente ecuación [17].

$$\sigma_{vM} \leq 0,67R_y \quad (5)$$

donde R_y es el esfuerzo nominal de fluencia.

Por interés del estudio, la estructura está compuesta de acero NVA 36 con un esfuerzo de fluencia de 355 MPa, por lo que el esfuerzo admisible calculado con la ecuación anterior es 237,85 MPa.

4. Discusión

En esta sección, se presenta la discusión de los resultados del análisis estructural para los tres casos de carga de la grúa sobre la cubierta principal sin y con refuerzo.

Los esfuerzos en la cubierta principal, obtenidos antes de aplicar el refuerzo, fueron 966,82 MPa para el caso I, 901,11 MPa del caso II y 850,59 MPa del caso III, (ver figuras 15, 16 y 17). Estos no satisfacen los criterios permisibles y de utilización de malla. Los valores obtenidos del factor de utilización de malla son 2,72 del caso I, 2,54 del caso II y 2,40 del caso III. Estos valores son superiores al valor límite de 1,2. Además, los esfuerzos de Von Mises superan el límite elástico del material de la cubierta (355 MPa).

La **tabla 9** reporta los esfuerzos y factores obtenidos para el caso I y sus límites permisibles. Para el caso I, con la posición de la pluma de grúa a 90°, se registró la tensión máxima, la cual es superior al esfuerzo admisible (237,85 MPa) del material de la cubierta principal. Los elementos estructurales donde se presenta el mayor esfuerzo son en la unión de la cuaderna y la cubierta (**figura 15**); esto representa un gran peligro que provocaría un colapso de la estructura, de acuerdo con lo descrito en las normas [9], [13], [14], [17]. Para las tres posiciones de la pluma de la grúa del caso de carga I, las tensiones máximas superan el esfuerzo admisible de la cubierta principal. Por lo tanto, la instalación y operación de la grúa sobre orugas sobre la cubierta principal no es factible sin un adecuado refuerzo estructural.

La **tabla 10** indica los resultados del análisis de carga II. Para este caso, con las tres posiciones de la pluma de la grúa, los esfuerzos y factores resultantes no satisfacen los criterios de seguridad debido a que son mayores al esfuerzo admisible (237,85 MPa) del material de la cubierta principal.

La **figura 16** muestra la distribución de esfuerzos para el caso de carga II con la posición de la pluma de la grúa a 90°. Los elementos estructurales con las tensiones máximas se localizan en la cuaderna, en unión con la cubierta. Esta región de tensiones máximas es similar a la registrada en el caso I, y representa una condición no segura para la instalación y operación de la grúa sin utilizar un refuerzo.

Tabla 9. Resultados del análisis estructural de la cubierta principal sin refuerzo para el caso de carga I

(a) Grúa a 0°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	354,7	727,14	Presión C (kPa)	354,7	727,14
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)		4	L2 (m)		4
(b) Grúa a 19°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	378	774,9	Presión C (kPa)	378	774,9
Presión B (kPa)	0	0	Presión D (kPa)	0	0
L1 (m)		4,8	L2 (m)		3,7
(c) Grúa a 90°					
		Con factor			Con factor
Presión A (kPa)	200,6	411,23	Presión C (kPa)	27	55,35
Presión B (kPa)	200,6	411,23	Presión D (kPa)	27	55,35
L1 (m)		6,3	L2 (m)		6,3

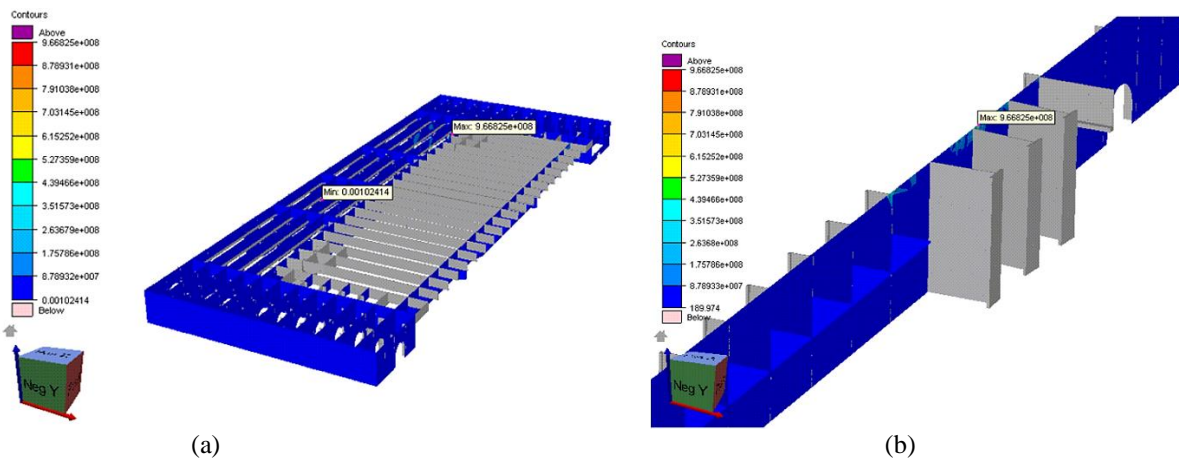


Figura 15. Tensiones máximas de von Mises (Pa) en la cubierta principal del modelo del MEF para el caso de carga I con la pluma de la grúa en una posición de 90°.

Tabla 10. Resultados del análisis estructural de la cubierta principal sin refuerzo para el caso de carga II

Tensiones máximas				El factor de utilización del rendimiento de malla fina		Estatus
Caso de carga II	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	Esfuerzo de von Mises (MPa)	Diseño	Admisible	
0°	355	237.85	618.52	1.74	1.2	No aprobado
19°	355	237.85	760.29	2.14	1.2	No aprobado
90°	355	237.85	901.11	2.54	1.2	No aprobado

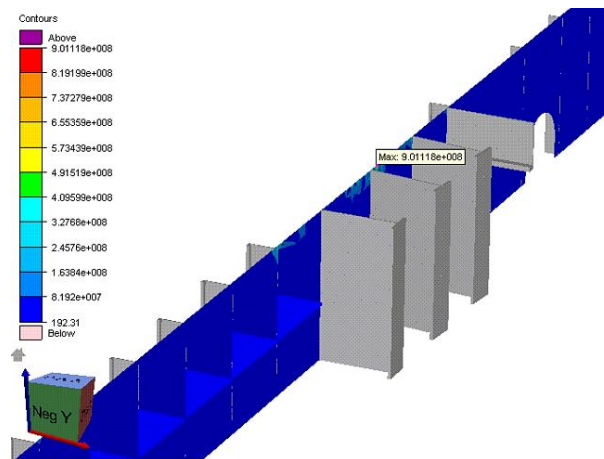


Figura 16. Tensiones máximas de von Mises (Pa) en la cubierta principal del modelo del MEF para el caso de carga II con la pluma de la grúa en una posición de 90°.

En la [tabla 11](#) se visualizan los resultados del análisis estructural de la cubierta principal para el caso de carga III. Para las tres posiciones de la pluma, se registran tensiones máximas muy superiores al esfuerzo admisible del material. La [figura 17](#) ilustra la distribución de los esfuerzos de Von Mises en la cubierta principal para el caso de carga III, con una posición de pluma de la grúa a 90°. Se observa que la cuaderna donde se produce la concentración de esfuerzos es la misma de los dos casos anteriores. Estos esfuerzos superan el esfuerzo admisible del material de la cubierta, lo cual provocará el colapso de la cubierta principal si no se realiza un adecuado refuerzo para instalar la grúa sobre orugas. Por lo tanto, es recomendable reforzar la zona de tensiones máximas o disminuir la carga para no superar el esfuerzo admisible del material.

Los resultados obtenidos en los tres casos de carga indican que la cubierta principal sin refuerzo especial no soportará las cargas por la instalación y operación de la grúa Manitowoc 555 serie 2 OTT. De esta forma, la instalación y operación de la grúa puede provocar un daño estructural al buque. Este daño estructural podría generar pérdidas económicas y afectar la integridad física de la tripulación.

Para reforzar la cubierta principal, se consideraron dos propuestas. La primera consiste en reforzar y añadir más elementos estructurales por debajo de la cubierta, y la segunda propuesta incluye un refuerzo sobre cubierta. La primera propuesta aumentará el costo del refuerzo y se requerirá mayor tiempo de construcción en comparación con la segunda, la cual es más práctica, pues considera un refuerzo temporal sobre la cubierta que se puede construir en tierra, y requiere solo el tiempo de instalación y desinstalación en el buque. Esto puede disminuir el tiempo de inactividad y los costos por el refuerzo.

El refuerzo propuesto es instalar dos vigas NVA36 sobre la cubierta, y analizar su efecto en la sección donde se instalará la grúa sobre orugas. Para identificar si disminuyeron los esfuerzos y cumplir con los parámetros permisibles de la estructura [9], [13], [14], [17], se analizaron los casos más críticos (caso I a 19° y 90°).

Posterior al análisis, si la estructura cumple con los criterios en la condición más crítica, entonces las demás condiciones serán satisfactorias. La [figura 18](#) muestra las dimensiones de las vigas NVA36 para el refuerzo de la cubierta.

Tabla 11. Resultados del análisis estructural de la cubierta principal para el caso de carga III

Tensiones máximas				El factor de utilización del rendimiento de malla fina		Estatus
Caso de carga III	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Diseño	Admisible	
0°	355	237,85	584,54	1,65	1,2	No aprobado
19°	355	237,85	718,41	2,02	1,2	No aprobado
90°	355	237,85	850,59	2,4	1,2	No aprobado

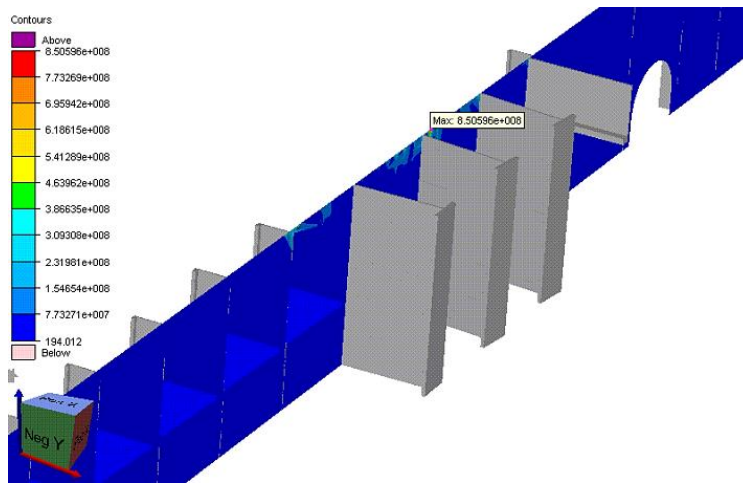


Figura 17. Tensiones máximas (Pa) obtenidos del caso de carga III con la pluma en una posición de 90°.

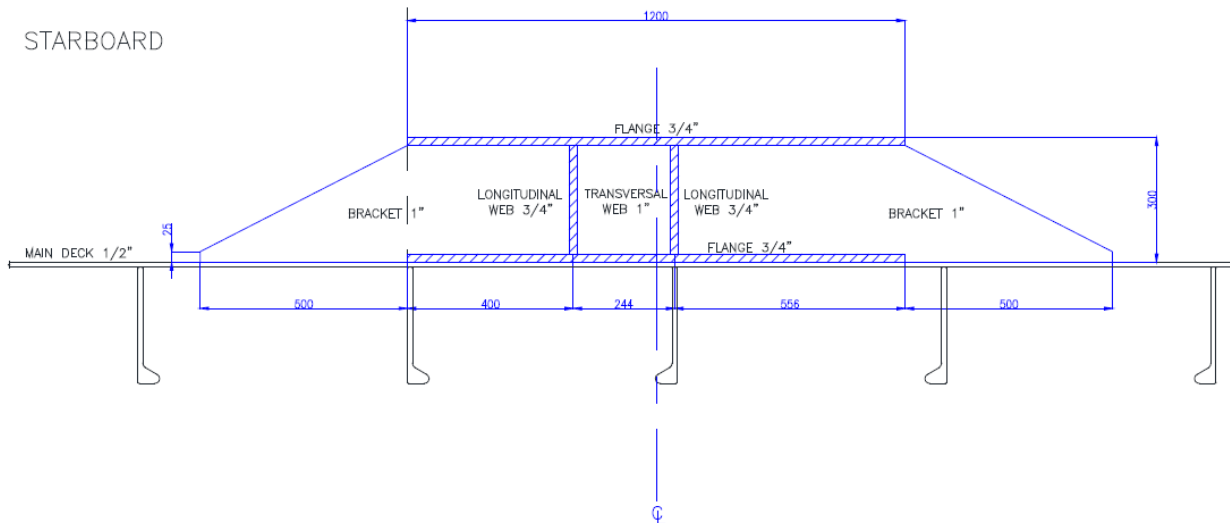


Figura 18. Vigas tipo NVA36 para refuerzo de cubierta principal de buque de apoyo a plataformas.

La figura 19 ilustra las vigas NVA36 en el modelo del MEF para el análisis estructural. En la figura 20, se visualiza la distribución de los esfuerzos obtenidos para el caso I. Este es el caso más crítico y se obtienen tensiones menores en comparación con el caso sin refuerzo. Los valores obtenidos satisfacen los criterios de

esfuerzos admisibles y el factor de rendimiento de la malla; se obtuvo un esfuerzo máximo de 218,719 MPa y factor de 0,92.

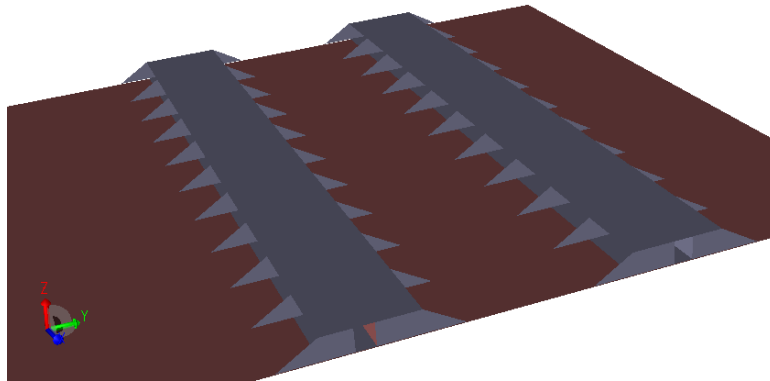


Figura 19. Modelo del MEF para las vigas tipo NVA36 del refuerzo de la cubierta principal de buque de apoyo a plataformas.

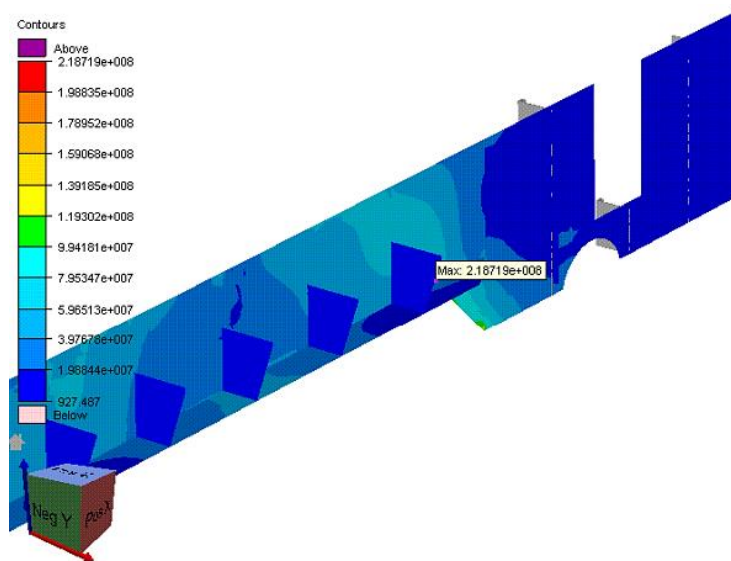


Figura 20. Distribución de las tensiones máximas (Pa) de Von Mises en la cuaderna 5 del modelo de MEF de la cubierta con refuerzo para el caso de carga I con la pluma a 19° grados.

La [tabla 12](#) muestra los valores del análisis estructural de la placa de la cubierta principal con el refuerzo propuesto, los cuales se comparan con los valores admisibles obtenidos de las reglas [\[9\]](#), [\[13\]](#), [\[14\]](#), [\[17\]](#).

Con base en estos resultados, la cubierta principal con el refuerzo presenta una distribución de esfuerzos de Von Mises con magnitudes que no superan el esfuerzo admisible de su material. Así, las vigas NVA36 mejoran el comportamiento estructural de la cubierta principal, y disminuyen los esfuerzos para satisfacer los criterios definidos por las reglas DNV [\[9\]](#), [\[13\]](#), [\[14\]](#), [\[17\]](#).

A continuación, se presentan los esfuerzos y factores obtenidos en las vigas NVA36 del refuerzo para el caso de carga I con posición de la pluma de la grúa a 19° y 90°. La [figura 21](#) reporta la distribución de tensiones máximas de Von Mises en las vigas NV36 del refuerzo cuando la posición de la pluma es 90°.

La [tabla 13](#) indica los valores de las tensiones máximas de Von Mises de las vigas del refuerzo en comparación con las tensiones admisibles determinadas anteriormente. El refuerzo de las vigas NVA36 tiene un comportamiento estructural seguro para la carga máxima, caso de carga I. Con este refuerzo no se necesitará reforzar internamente la estructura de la cubierta principal para la instalación y operación de la grúa de orugas OTT Manitowoc serie

555. Además, este refuerzo es simple, lo cual permitirá disminuir los costos y tiempos de construcción y mantenimiento.

5. Conclusiones

Se analizó el comportamiento estructural de la cubierta principal de un buque de apoyo a plataforma considerando la instalación y operación de una grúa sobre orugas. Para garantizar el comportamiento estructural seguro de la cubierta principal, se reforzó la

cubierta con vigas NVA36. Se desarrollaron modelos del MEF para predecir las tensiones máximas en la cubierta principal para tres casos de carga de las actividades de la grúa en operaciones de mantenimiento en mar adentro. Los resultados del análisis estructural fueron satisfactorios; se obtuvieron tensiones máximas que no superaron el esfuerzo admisible del material de la cubierta principal. El refuerzo de la cubierta principal fue adecuado para una operación segura del buque sin poner en riesgo a la tripulación, a las plataformas cercanas y al medioambiente.

Tabla 12. Resultados del análisis estructural de la cubierta con refuerzo

Tensiones máximas				Factor de utilización del rendimiento de malla fina		Estatus
Caso de carga I	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Diseño	Admisible	
19°	355	237,85	218,719	0,92	1,2	Aprobado
90°	355	237,85	207,87	0,87	1,2	Aprobado

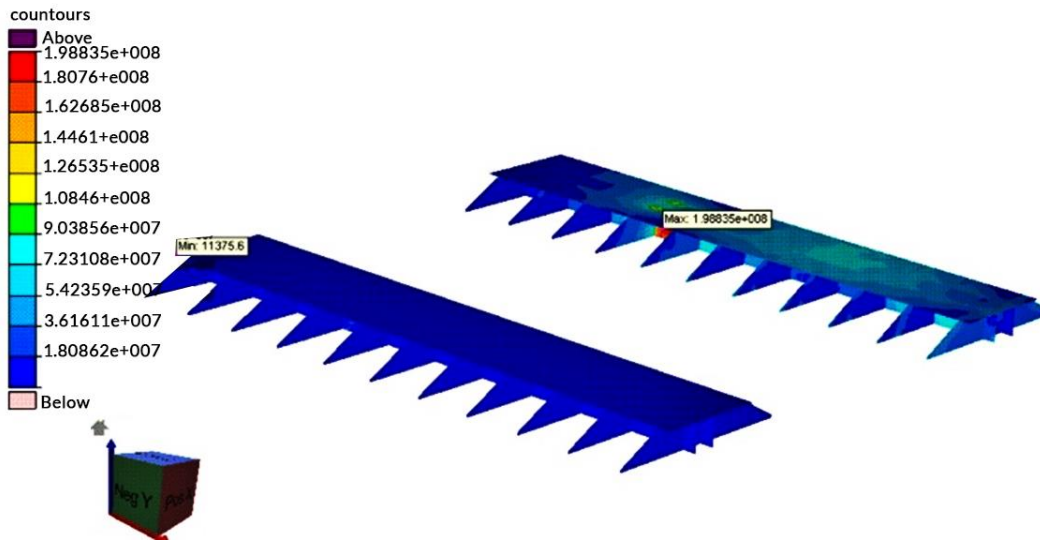


Figura 21. Distribución de las tensiones máximas (Pa) de von Mises en las vigas NVA36 del refuerzo propuesto, considerando el caso de carga I con la pluma a 90°.

Tabla 13. Resultados del análisis estructural del refuerzo propuesto con vigas tipo NVA36

Tensiones máximas				El factor de utilización del rendimiento de malla fina		Estatus
Caso de carga I	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Diseño	Admisible	
19°	355	237,85	201,67	0,85	1,2	Aprobado
90°	355	237,85	198,83	0,84	1,2	Aprobado

En futuros trabajos de investigación se desarrollarán modelos de MEF de refuerzo de la cubierta principal que incluyan efectos de abolladuras y pandeos locales.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Veracruzana por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] J. A. J. Rodríguez Morales, “Análisis de estabilidad e hidrodinámico de una plataforma SPAR en aguas profundas del Golfo de México”, trabajo de fin de grado, Universidad Veracruzana, Veracruz, 2020.
- [2] J. K. Paik, “Ultimate limit state performance of oil tanker structures designed by IACS common structural rules”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, pp. 1022-1034, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.07.002>
- [3] S. Lee, S. Lee, S.-D. Kwon, “Effects of Topside Structures and Wind Profile on Wind Tunnel Testing of FPSO Vessel Models”, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, 422, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8060422>
- [4] B. N. Khudhur, “Finite element analysis of the boom of crane loaded statically”, *Eng. Technol. J.*, vol. 31, 1626-1639, 2013.
- [5] J. Krukowski, A. Maczyński, “Application of the rigid finite element method for modelling an offshore pedestal crane”, *Arch. Mech. Eng.*, vol. 60, 451-471, 2013.
- [6] Crane Group, “Manitowoc model 555 Product Guide”, [En línea]. Disponible en: https://cranenetwork.com/uploads/specs/krzlhtcyctn3y dmanitowoc_555_150-ton_crawler_crane_network.pdf
- [7] API, *Offshore Pedestal-mounted Cranes: API Specification 2C*, 7th ed. USA: American Petroleum Institute, 2012.
- [8] SESAM DNV, “SESAM Software”, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/software/products/sesam-products.html>
- [9] DNV-GL, “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.7. Finite element analysis”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2020-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch7.pdf>
- [10] Manitowoc, “Ground Bearing Pressure Estimator”, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.manitowocdirect.com/en-GB/Tools/lift-planning/ground-bearing-pressure/Application-Download>
- [11] DNV-GL, “Offshore standards, DNVGL-OS-C102. Structural design of offshore ship-shaped units”, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/OS/2018-07/DNVGL-OS-C102.pdf>
- [12] MSL Engineering Limited, “Appraisal of API RP 2FPS, Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Floating Production Systems”, United Kingdom: HSE, 2001, [En línea]. Disponible en: <https://www.hse.gov.uk/research/otopdf/2001/oto01006.pdf>
- [13] DNV-GL, “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.5 Ch.10. Vessels for special operations”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2020-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt5Ch10.pdf>
- [14] DNV-GL, “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.6 Ch.5. Equipment and design features”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2020-02/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch5.pdf>
- [15] J. K. Paik, A. K. Thayamballi, “Some recent developments on ultimate limit state design technology for ships and offshore structures”, *Ships Offshore Struct.*, vol. 1, pp. 99-106, 2006, doi: <https://doi.org/10.1533/saos.2006.0110>
- [16] “Load and Resistance Factor Design (LRFD) Criteria for offshore Structures”, American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2016.
- [17] “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.11. Hull equipment, supporting structure and appendages”, DNV-GL, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ru-ship/2017-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch11.pdf>
- [18] “Special Profiles & Bulb Flats”, LOSAL, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.losal.es/llanta-con-bulbo/>

[19] “Vessel-Mounted Cranes”, Safe Work Australia, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1703/vessel-mounted-cranes-information-sheet.pdf>

[20] “DNV GL-Software”, Sesam GenieE, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/services/sesam-modules-for-fixed-structures-1120>

[21] “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.6. Hull local scantling”, DNV-GL, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ru-ship/2017-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch6.pdf>

[22] DNV-GL, “Rules for classification: Ships-DNVGL-RU-SHIP Pt.5 Ch.9. Offshore service vessels”, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt5Ch9.pdf>