

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Diseño de mástil para buques atuneros que minimicen fallos estructurales de límite elástico en maniobras de captura.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero naval

Presentado por:

Álvaro José Ortega Montesdeoca

Josue Segundo Iñiguez Veintimilla

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres, Manuel Iñiguez y María Veintimilla por su inmensurable apoyo para lograr este objetivo. A mis hermanos, Jean y Andrea, ejemplos de superación y humildad.

Josue Iñiguez

“No esperes ya que pueda aconsejarte
Tu santo juicio a tu albedrío abona
Y debes por ti mismo gobernarte
Pues te enmitro y te pongo la corona”

Dante. A.

Álvaro Ortega

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme vivir esta meta cumplida, a mis padres por ser un soporte y luz en cada paso de mi vida, y mi más sincero agradecimiento a mi tutor PhD. Patrick Townsend por su enseñanza y apoyo en esta etapa académica.

Josue Iñiguez

Agradezco a mis padres por resistir una larga espera, a mis hermanos por su amistad y ejemplo, a mi tutor por su camaradería y enseñanzas, y finalmente mi compañera de vida, quien ayudó a darle sentido a mi vida en estos años.

Álvaro Ortega

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Álvaro José Ortega Montesdeoca* y *Josué Segundo Iñiguez Veintimilla* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Álvaro Ortega



Josué Iñiguez

EVALUADORES

.....
MSc. David Plaza

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD. Patrick Townsend

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Ecuador es el productor atunero más grande de la región y NIRSA posee una de las flotas más importantes, donde estas embarcaciones utilizan el sistema de mástil para sus maniobras de captura, estructura que posee un alto índice de siniestros por fallas y falta de mantenimiento. Por esta razón se analizó la estructura global del mástil de la embarcación pesquera Rosa aplicando el método de elementos finitos en diferentes condiciones, incluyendo izaje de panga, red y levantamiento de chinguillo. Para esto se desarrolló un modelo geométrico mediante el software RHINOCEROS para su respectivo análisis y simulación en el programa ANSYS 2021, finalmente se consideró la reducción de los espesores debido al efecto de corrosión.

Los resultados comprobaron que el esfuerzo de normal por carga lateral tiene mayor influencia en la operación del mástil, mientras que el efecto de corte y pandeo por carga axial es despreciable. Por otro lado, se confirmó que el levantamiento de panga es la condición más crítica de carga. En conclusión, modificando la sección transversal a circular y añadiendo un estructural central de refuerzo se obtuvo una reducción y mayor al 50% en el esfuerzo máximo alcanzado en la zona del mástil propensa a falla, y a futuro sería recomendable analizar la distribución de esfuerzos incluyendo escuadras en la estructura ya que se encontraron mástiles que no poseen estos elementos y además sería factible encontrar formas alternas de subir la panga a popa.

Palabras Clave: mástil, elementos finitos, corrosión, esfuerzo normal.

ABSTRACT

Ecuador is the largest tuna producer on the Latin American region and NIRSA has one of the most important fleet, and these ships use the mast in order to capture the fish, however this structure has a high risk of fatality due to structural failure and lack of maintenance. For this reason, the global mast structure of the fishing vessel ROSA was analyzed by Finite elements method and on different load conditions, including net hauling, skiff lifting, and brailer lifting. A geometrical model was developed using RHINOCEROS to simulate the structural behavior on ANSYS 2021 R2, finally the thickness reduction was considered due to corrosion.

The results show that the normal stress due to bending lateral load has major influence on the mast safety, meanwhile the shear stresses and buckling are insignificant. The skiff lifting was the most critical operation. In conclusion, by modifying the transversal section of the mast and adding one middle structural, a 50% normal stress reduction on the failure zone was obtained. In the future it would be positive to analyze the stresses distribution under the presence of brackets on the mast structure because there are some mast that do not have this important structural. And it would be feasible to find alternate ways to lift the skiff on the stern.

Keywords: mast, finite elements, corrosion, normal stress.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Justificación del problema	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Marco teórico.....	7
1.4.1 Características principales del buque modelo y mástil	7
1.4.2 Características principales del buque	7
1.4.3 Características principales del mástil.....	8
1.4.4 Visita técnica.....	8
1.4.5 Descripción del modelo de elementos finitos	10
1.4.6 Cargas de levantamiento	10
CAPÍTULO 2.....	15
2. Metodología	15
2.1 Desarrollo del modelo geométrico	16
2.2 Importación de modelo	18

2.3	Material y espesores de las estructuras	18
2.4	Generación de Malla	20
2.4.1	Tamaño de malla	20
2.5	Simulación de cargas sobre la arboladura	21
2.5.1	Peso estructural	21
2.5.2	Pluma principal en izaje de red	21
2.5.3	Pluma principal en izaje de panga	25
2.5.4	Pluma de salabardo	28
2.5.5	Pluma auxiliar	31
CAPÍTULO 3.....		35
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
3.1	Parámetros de aceptación de resultados	35
3.1.1	Convergencia de malla	35
3.2	Resultados	36
3.2.1	Deflexiones	36
3.2.2	Distribución de esfuerzos.....	38
3.2.3	Efecto de corrosión	44
3.3	Modificación estructural.....	49
3.3.1	Mástil	50
3.4	Análisis de resultados.....	55
CAPÍTULO 4.....		59
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	59
4.1	Conclusiones.....	59
4.2	Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....		62
APÉNDICES.....		63

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NIRSA	Negocios Industriales Real S.A.
EMSA	Agencia Europea de Seguridad Marítima
SOLAS	Convenio Para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar
MEF	Método de Elementos Finitos
ER	Estribor
BR	Babor
BP	Buque Pesquero
FS	Factor de seguridad
LOA	Eslora total
N/A	No aplica
ICCAT	International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas

SIMBOLOGÍA

m	Metros
mm	Milímetro
lbs	Libras
kg	Kilogramos
kN	Kilo-newtons
ft	Pies- unidades inglesas
GT	Tonelaje de registro bruto
Ton	Tonelada
Long-tons	Tonelada larga
Knots	Nudos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de buques atuneros NIRSA.....	1
Figura 1.2 Pesca de cerco.....	2
Figura 1.3 Mástil colapsado Ecuador.	4
Figura 1.4 Mástil colapsado España.....	4
Figura 1.5 Esquema estructural del mástil modelo.....	9
Figura 1.6 Mástil modelo.	9
Figura 1.7 Ángulos para estudio durante el izamiento de la carga.	10
Figura 1.8 Arrastre de panga.....	11
Figura 1.9 Modelo de mástil- Elizabeth BP.....	13
Figura 1.10 Modelado de mástil - Elizabeth BP.....	14
Figura 2.1 Proceso empleando Elementos finitos.	16
Figura 2.2 Diferentes vistas del modelo geométrico.....	17
Figura 2.3 Modelo geométrico General en Rhinoceros.	17
Figura 2.4 Modelo importado en Ansys.	18
Figura 2.5 Importación por capas.	19
Figura 2.6 Definición de espesores.	19
Figura 2.7 Visualización de la malla.	21
Figura 2.8 Ilustración de movimiento de Power Block.	22
Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre, panga.	25
Figura 2.10 Cotas lineales y de ángulos desde la panga.	27
Figura 2.11 Chinguillo de pesca.	29
Figura 2.12 Ilustración de maniobra de la pluma auxiliar.	32
Figura 3.1 Detalles de simulación.....	36
Figura 3.2 Modelado geométrico en Ansys.	36
Figura 3.3 Respuesta de mástil en operaciones de pesca.....	37
Figura 3.4 Respuesta de mástil en operación de pesca, vista en planta.....	38
Figura 3.5 Cargas para comprobación de esfuerzo uni-axial.	39
Figura 3.6 Comprobación de esfuerzo normal uni-axial.....	39
Figura 3.7 Resultados de esfuerzo normal y de corte por levantamiento de panga a 45 grados.	40

Figura 3.8 Esfuerzo equivalente en la estructura para operación de pesca.	41
Figura 3.9 Esfuerzo normal y equivalente durante la maniobra de captura.....	42
Figura 3.10 Esfuerzo cortante durante operaciones de pesca	43
Figura 3.11 Corrosión detectada en la estructura de soporte del mástil.....	44
Figura 3.12 Esfuerzos en la abertura – entre descansos de la estructura de mástil.	45
Figura 3.13 Esfuerzo equivalente en el mástil por abertura en uno de los vientos.....	45
Figura 3.14 Esfuerzo equivalente en abertura.....	46
Figura 3.15 Esfuerzo equivalente en la estructura circundante.....	46
Figura 3.16 Esfuerzo normal y esfuerzo equivalente en mástil para estructura en falla.	47
Figura 3.17 Deformación total.	48
Figura 3.18 Esfuerzo normal y equivalente en falla – durante operación de pesca.....	48
Figura 3.19 Deformación por falla estructural en el mástil – operación de pesca.....	49
Figura 3.20 La distribución del esfuerzo normal no es uniforme en el mástil (comprobar).	50
Figura 3.21 Distribución de esfuerzos en secciones transversales.....	51
Figura 3.22 Esfuerzo de corte y equivalente durante el izaje de panga a 45 grados. ...	52
Figura 3.23 Esfuerzos normales durante el izaje de panga a 45 grados.....	52
Figura 3.24 Esfuerzos normales y cortantes durante el izaje de panga a 45 grados cuando colapsa un soporte.....	53
Figura 3.25 Esfuerzo equivalente y normal durante las operaciones de pesca cuando falla un soporte.	53
Figura 3.26 Esfuerzo de corte durante las operaciones de pesca cuando falla un soporte.	54
Figura 3.27 Comparación de esfuerzos en mástil rectangular y propuesta de solución diferentes condiciones.....	55
Figura 4.1 Resultados en el viento y mástil por levantamiento de panga a 20 grados .	67
Figura 4.2 Resultados en el viento y mástil por levantamiento de panga a 60 grados. .	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características principales de la embarcación.	7
Tabla 1.2 Características principales del mástil.....	8
Tabla 1.3 Datos de movimiento de panga.	11
Tabla 1.4 Datos de los equipos de la arboladura.	11
Tabla 1.5 Dimensiones y pesos de aparejos de pesca	12
Tabla 2.1 Parámetro de la dimensión de mástil, Bureau Veritas.....	20
Tabla 2.2 Dimensiones de pluma principal en operación.	23
Tabla 2.3 Cargas en la pluma principal a diferentes inclinaciones.	24
Tabla 2.4 Cargas en el anclaje de polea del mástil.	24
Tabla 2.5 Cargas en la base de pluma en el mástil.....	25
Tabla 2.6 Cargas aplicadas al mástil en diferentes inclinaciones.....	27
Tabla 2.7 Carga aplicadas en la base de la pluma principal.	28
Tabla 2.8 Dimensiones durante las operaciones del chinguillo.	30
Tabla 2.9 Cargas aplicadas al mástil.....	30
Tabla 2.10 Cargas aplicada en la base de la pluma principal.....	31
Tabla 2.11 Carga dinámica por maniobra de chinguillo.....	32
Tabla 2.12 Dimensiones del sistema de arboladura.....	33
Tabla 2.13 Tensiones en diferentes posiciones por la pluma auxiliar.....	33
Tabla 2.14 Cargas transmitidas por maniobra de pluma auxiliar.....	34
Tabla 3.1 Resultados obtenidos aplicando MEF.	40
Tabla 3.2 Influencia de esfuerzo de corte.	42
Tabla 3.3 Análisis de estabilidad lateral por carga axial – mástil.....	43
Tabla 3.4 Comparación del esfuerzo permisible Burea Veritas/SNAME.	49
Tabla 3.5 Ángulo de escora permisible de acuerdo a Lloyd's Register.	55

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La empresa Negocios Industriales Real S.A. (NIRSA) con sede en Posorja, provincia del Guayas posee embarcaciones atuneras, las cuales son parte de la segunda flota más grande a nivel mundial, detrás de Tailandia, y siendo la de mayor tamaño en la región del Pacífico Oriental con 116 embarcaciones y una capacidad de más de 93000 toneladas (Autoridad Portuaria de Manta, 2022) [1]. Debido a su importancia en la economía local, el presente proyecto se centra en contribuir a la seguridad de la nave y la tripulación durante las maniobras de pesca. Actualmente la empresa opera con 13 embarcaciones para la pesca de túnidos que van desde los 380,5 GT (Tonelaje de Registro Bruto, por sus siglas en inglés) hasta los 2210 GT, como se aprecia en la figura 1.1.

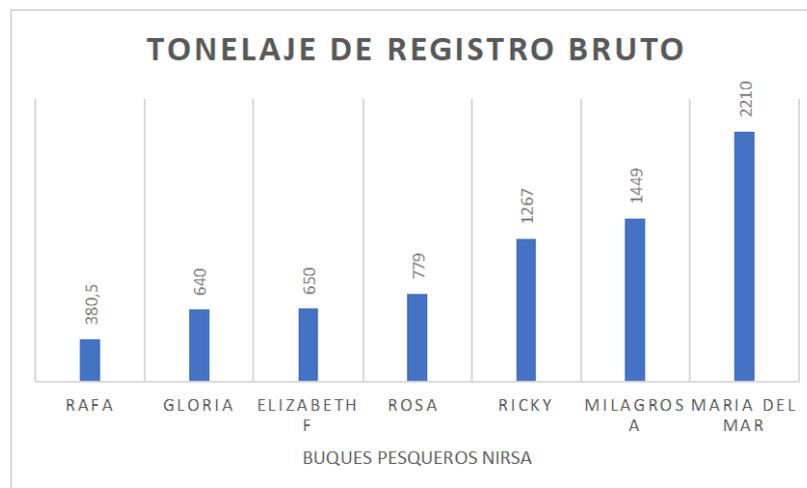


Figura 1.1 Clasificación de buques atuneros NIRSA

[Fuente propia]

Estos buques están autorizados a navegar en la zona oriental del océano pacífico, hasta los 50°W, la cual se caracteriza por tener un estado de mar en la escala Beaufort 4 a 5, donde se observa longitud mediana de olas con rompimiento total de cresta y superficie del agua con espuma blanca. Y realizan sus operaciones de la siguiente manera:

El buque lanza una red de cerco de gran magnitud al océano, donde se ha evidenciado la presencia un cardumen de túnidos, la cual, con la navegación en círculo de la nave, llega a cerrarse, tal como se aprecia en la figura 1.2.

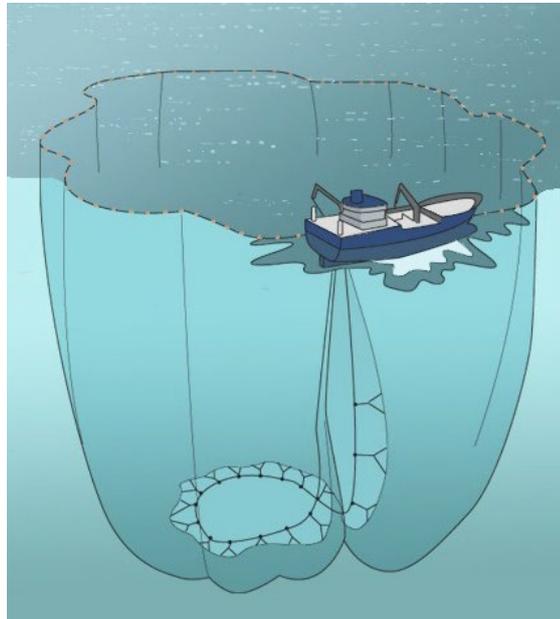


Figura 1.2 Pesca de cerco

[Fuente: www.espesca.com]

Acto seguido, con la ayuda de la pluma principal y sus aparejos de pesca, se procede a recoger la red para acercar el cardumen al lado de babor de la embarcación. Y finalmente con la pluma de salabardo y el *chinguillo* se recogen pequeñas porciones de atún, para soltar la pesca en el acceso principal a cubierta, vaciando la red de cerco para repetir el proceso en otra latitud oceánica.

Esta operación, debido a su magnitud, somete a grandes cargas y esfuerzos al **mástil** de la embarcación, en el cual están montados los aparejos de pesca. Por lo que existe el peligro de falla estructural durante las maniobras de captura, poniendo en riesgo la seguridad de la vida de los tripulantes de cubierta, así como la integridad de la embarcación, lo cual representa grandes pérdidas económicas para la empresa.

Según (EMSA, 2019), los buques pesqueros se sitúan en la categoría con mayor número de pérdidas humanas, y el 65% de los factores contribuyentes están relacionados con las operaciones a bordo. [2]

La importancia de este estudio radica en la alta frecuencia con que estas fallas estructurales se presentan durante la pesca, a nivel local e internacional. Ya que la información al respecto es escasa e insuficiente, incluso en las clasificadoras; para obtener una solución de diseño adecuado al problema que se describe a continuación, es imprescindible analizar las causas y condiciones en las cuales se dan estos accidentes marítimos. Un método de análisis adecuado para este estudio es el de elementos finitos, con el fin de someter al modelo estructural de mástil, a las cargas descritas anteriormente, y observar zonas donde el esfuerzo alcanza valores excesivos que comprometen la integridad el objeto de estudio; con ello se pueden establecer factores de seguridad para el diseño adecuado de mástil, resistente a las sometidas durante las maniobras de captura.

1.1 Descripción del problema

Los buques atuneros mencionados previamente, durante sus maniobras de captura están sometidos a grandes cargas de trabajo, especialmente la estructura de soporte de los aparejos de pesca, el mástil. Con mucha frecuencia, en los años y meses previos a este estudio, se han presentado accidentes marítimos en buques pesqueros de bandera nacional y extranjera, por acciones relacionadas con la captura de pescado figura 1.3 y 1.4. En los cuales el mástil llega a un sometimiento por fuerzas externas que supera su capacidad de resistencia, en otras palabras, las acciones de pesca han superado el esfuerzo límite de la estructura del mástil, con lo cual este colapsa, y debido a su magnitud, pone en peligro la seguridad de los pescadores, así como la integridad de los equipos de pesca en cubierta y de la embarcación.



Figura 1.3 Mástil colapsado Ecuador.

[Fuente: NIRSA S.A]



Figura 1.4 Mástil colapsado España

Existen diversas razones por las cuales este tipo de siniestro existe, los cuales pueden ser, por un exceso de compresión en el mástil debido a una carga cíclica generada por la naturaleza de las olas, en otras palabras, cuando la red de pesca o la panga, se encuentran en su estado para el cual fueron diseñados, es decir, sumergidos o parcialmente sumergidos en el agua, estos elementos poseen una fuerza boyante o de empuje, que disminuye su peso relativo a cuando se encuentran fuera del mar. Cabe recalcar que el agua está en constante movimiento por olas, y estas al ser caracterizadas por crestas y valles, van a generar en cierto momento una pérdida de flotabilidad en el objeto sostenido por la pluma que está conectada al mástil, generando así un incremento de carga en la estructura, superando el límite permisible.

Además, es importante conocer de primera mano que el sistema de paga para la tripulación en cubierta se compone de: sueldo base más comisión por tonelada de pesca. Lo cual motiva al capitán y su tripulación a capturar mayor cantidad de pesca en el menor tiempo posible, sometiendo a los equipos a grandes esfuerzos de trabajo, y en el proceso puede darse un exceso de carga que rebasa la permisibilidad de la estructura del mástil, incurriendo en un fallo y/o colapso que pone en riesgo sus vidas, así como la integridad de toda la embarcación. Por ello, sería de gran ayuda entender a fondo el comportamiento de la estructura del mástil cuando es sometido a cargas excesivas, con el fin de capacitar a la tripulación de la nave sobre los valores máximos de levantamiento de pesca para evitar poner sus vidas en riesgo a causa de accidente en altamar. Sin embargo, determinar estas cargas (pesos) en la pluma del mástil, no es tarea fácil, ya que son cargas de naturaleza dinámica que varían en el tiempo. Por ejemplo: Se conoce el peso de toda la red, pero no el peso de la porción de red que está fuera del agua, cuya magnitud depende de la extensión de la línea y el ángulo que forma respecto a la vertical, valores que varían de acuerdo al estado del mar.

Finalmente, debido a la sucesión repetitiva de estos casos a nivel mundial la Guardia Costera de los Estados Unidos de América emitió una alerta, advirtiendo sobre los colapsos recurrentes en mástiles de buques pesqueros, con lo cual recomienda a los armadores conocer los límites de diseño de la arboladura, además planificar el mantenimiento o modificaciones de aparejos de pesca con un Ingeniero naval o experto en la materia (UNITED STATES COAST GUARD, 2022) [3], ya que gran parte de la selección de equipos montados sobre la arboladura son escogidos de manera empírica.

Por la evidencia presentada (AIMEX SERVICE GROUP, 2022) de accidentes a nivel mundial y su similitud con accidentes locales, junto con la poca información disponible, se llega a la hipótesis de que el diseño de mástil para buques pesqueros atuneros no es el adecuado, ya que no cumple con las sollicitaciones de esfuerzos a los que es sometido durante la pesca.

1.2 Justificación del problema

Puesto que el mástil es un elemento estructural vital en las operaciones de buques atuneros, la empresa debe asegurar el correcto funcionamiento de la arboladura de la embarcación durante la pesca. Por lo que con un diseño innovador que cumpla con todas las características necesarias de resistencia estructural y estabilidad, para la operación de la pluma y pescantes, garantiza el cumplimiento del estatuto del Convenio Para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), al no representar un riesgo para la seguridad de la vida humana en el mar. Además de no afectar la producción ni la inversión monetaria del buque en maniobras de captura.

Al término de este trabajo, se presentará un cuadro comparativo del gasto monetario en las reparaciones en puerto, versus el costo de oportunidad, representado por la ganancia estimada de pesca si la embarcación no hubiese sufrido el daño estructural, es decir, los ahorros que representa para la empresa en los costos de reparación y al mismo tiempo la máxima producción de la embarcación en operabilidad continua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un mástil para buques pesqueros de mediana capacidad, que minimice fallos estructurales y el riesgo laboral asociado a la tripulación.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las cargas a las que se somete el sistema de pesca del mástil.
2. Comprender la distribución de momentos y esfuerzos la estructura del mástil provenientes de la carga.
3. Analizar las condiciones y causas comunes de falla estructural en mástiles de buques pesqueros durante operaciones de pesca.
4. Proponer un diseño adecuado de mástil, considerando las zonas vulnerables observadas en la transmisión de esfuerzos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Características principales del buque modelo y mástil

El mástil característico sujeto a análisis se encuentra anclado a la cubierta del buque modelo con las siguientes características: El material de construcción de la nave es acero naval, construido alrededor de 1978 en San Diego, California; con 51,52 metros de eslora, 10,67 metros de manga y 8,10 metros de puntal. El buque lleva una red de cerco de 45 toneladas de peso y tiene capacidad de almacenamiento en las cubas de 567 toneladas de pesca.

El mástil en cuestión tiene una altura de 17 metros aproximadamente desde su anclaje en la cubierta del parque de pesca, hasta su parte más alta, donde descansa la cofa. El mástil está sujeto a dos tirantes a través de refuerzos horizontales con tubos de 07 pulgadas en dos descansos externos por encima de la cubierta más alta. Además, está anclado en 03 cubiertas. El espesor promedio del mástil es de 17 [mm]. Los tirantes y refuerzos horizontales son de sección constante y de espesor promedio de 11 [mm].

1.4.2 Características principales del buque

A continuación, se muestra la tabla 1.1 con las características del buque modelo:

Tabla 1.1 Características principales de la embarcación.

Tipo de embarcación	Pesquero de cerco refrigerado
Armador	NIRSA S.A.
Material del casco	Acero naval
Material de la superestructura	Acero naval
Eslora total	51,52 [m]
Manga	10,67 [m]
Puntal	08,10 [m]
Calado	06,10 [m]
Velocidad de diseño	12 [Knots]

Tipo de embarcación	Pesquero de cerco refrigerado
Dotación mínima	22 tripulantes

[Fuente: Propia]

1.4.3 Características principales del mástil.

El mástil se encuentra anclado a tres cubiertas de la embarcación a través de conexiones de refuerzos con la estructura del buque, pero los mismos no son de interés de este estudio, ya que los lugares concurrentes de falla se presentan lejos de estas zonas de anclaje, la cual se considerará completamente empotrada. Podemos observar las características en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Características principales del mástil.

Longitud total de mástil	16,87 [m]
Longitud total de tirantes	13,23 [m]
Separación entre tirantes	07,36 [m]
Diámetro externo de los tirantes	180 [mm]
Espesor de los tirantes	15 [mm]
Diámetro de los refuerzos horizontales	180 [mm]
Espesor de los refuerzos horizontales	15 [mm]

1.4.4 Visita técnica

El día 20 de octubre de 2022 se realizó una visita técnica a las instalaciones de NIRSA S.A. en Posorja, con el fin de levantar con exactitud los datos correspondientes a 04 embarcaciones que son denominados pesqueros de mediano tamaño, a fin de hacer una comparativa sobre cuál es el modelo más representativo del problema. Se evidenció falta de información sobre este particular en los planos de distribución originales de las embarcaciones medidas, tal como las escuadras y planchas de soporte para anclajes a las cubiertas. Así mismo se tomaron espesores como se observa en la fig. 1.5 para realizar un estudio de la condición general del mástil y verificar su afectación debido a la corrosión.

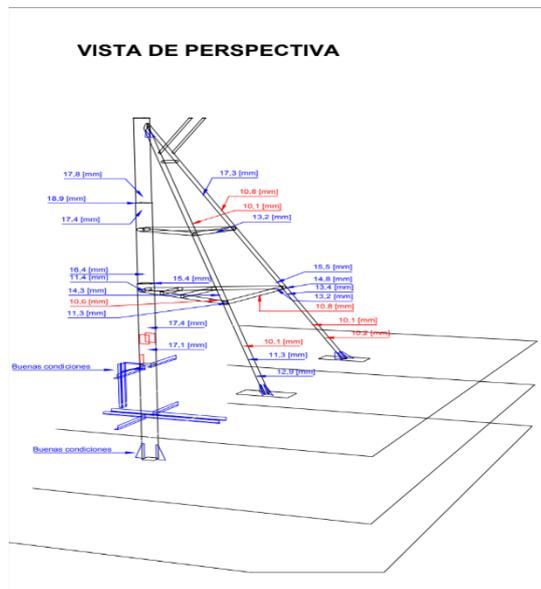


Figura 1.5 Esquema estructural del mástil modelo
[Fuente: propia]

En la visita se levantó la información de la estructura como se observa la fig. 1.6 para dibujar los planos de dimensiones generales y estructurales del mástil con todos sus componentes.



Figura 1.6 Mástil modelo.
[Fuente: Propia]

1.4.5 Descripción del modelo de elementos finitos

Para analizar el mástil por el método de elementos finitos se necesita producir un modelo geométrico, generando superficies a partir de los planos o bosquejos obtenidos y así, modelando completamente los componentes que comprende el sistema de un mástil mediante el software RHINOCEROS 3D. De esta manera al efectuar la importación del modelo geométrico desde el programa ANSYS WORKBENCH 2022, nos aseguramos que todas las superficies del modelado estén conectadas correctamente para llevar a cabo el análisis correspondiente.

En el modelado de una estructura por el MEF se consideran las cargas externas que ejercen sobre ella. Cuando el sistema del mástil está operando no posee cargas definidas para izarla, por esta razón, es imprescindible emplear las cargas máximas teniendo en cuenta las características de la red de pesca. Para un estudio simplificado, desarrollaremos tres configuraciones importantes en el proceso de carga como se puede mostrar en la fig.1.7.

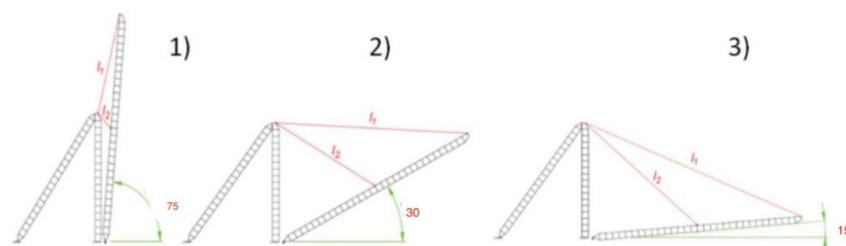


Figura 1.7 Ángulos para estudio durante el izamiento de la carga.

[Fuente: Propia]

1.4.6 Cargas de levantamiento

Las embarcaciones pesqueras tienen tres operaciones principales entre ellas es el arrastre de panga como se puede apreciar en la fig. 1.8 y sus respectivos datos de operación en la tabla 1.3 , esta maniobra se realiza antes y después de la faena de pesca.

1.4.6.1 Arrastre de la panga



Figura 1.8 Arrastre de panga

Tabla 1.3 Datos de movimiento de panga.

Casco	Peso estimado 35 [ton]
Motor	Caterpillar 3412
Transmisión	5.42:1
Ángulo de arrastre de la panga	25° respecto de la horizontal

[Fuente: Propia]

A continuación, se detallan los datos de los equipos que son parte de la arboladura y proporcionados por la empresa NIRSA S.A, (tabla 1.4).

Tabla 1.4 Datos de los equipos de la arboladura.

		MARCA	MODELO	MASA [KG]	LINE PULL [LB]	[KN]
PLUMA PRINCIPAL	Power block	MARCO	PB-56 MARCO	1800	20240,0	89956
	Winche doble/single ER/BR	PULLMASTER	M-18-3-101-3	300	18000	80000
	Winche OSTA ER/BR	PULLMASTER	M-12-3-97-7	249	12121	53871
	Winche trincador del power block	PULLMASTER	PL-5-12-210-1	67	4500	20000
	Pluma	N/A	N/A	3000		

PLUMA BR	Winche salabardo BR	PULLMASTER	M18-3-101-1	300	18000	80000
	Winche bonche	PULLMASTER	M12-3-97-7	249	12121	53871
	Pluma	N/A	N/A	2000		
PLUMA ER	Winche salabardo ER	PULLMASTER	M12-3-97-7	249	12121	53871
	Winche templador de plumas	PULLMASTER	M-6-12-70-1	112	6000	26667
	Pluma	N/A	N/A	2000		
MASTIL	Winche amantillo principal	PULLMASTER	M18-3-101-1	300	18000	80000
	Winche amantillo BR	PULLMASTER	M12-3-97-7	249	12121	53871
	Winche amantillo ER	PULLMASTER	M12-3-97-7	249	12121	53871
CARGA	RED	N/A	N/A	38000		
	PANGA	N/A	N/A	29000		

[Fuente: NIRSA S.A.]

De la misma manera detallamos las dimensiones y pesos de los aparejos de pesca de sus respectivas embarcaciones, Rosa BP y Elizabeth BP, los cuales comparten equipos similares. Además, tras un análisis se obtuvieron las capacidades (tabla 1.5) de las plumas con la información provista por NIRSA S.A, cuyos planos y dimensiones figura 1.9 y 1.10 se obtuvieron tras una visita técnica.

Tabla 1.5 Dimensiones y pesos de aparejos de pesca

						SNAME	
	[m]	[m]	[ft]	[long-tons]	[long-tons]	[lbs]	
	Rosa	Elizabeth	Longitud promedio	Capacidad	Capacidad FS	Pluma-peso	Peso sobre la punta
LOA	51,7	51,5	169,2				
Pluma principal	17,5	17,5	57,4	24,2	8,1	6720,0	5,3
Pluma 1	12,0	12,0	39,4	44,0	14,7	4480,0	6,0
Pluma 2	11,0	11,0	36,1	44,0	14,7	3764,4	1,2

[Fuente: Propia]

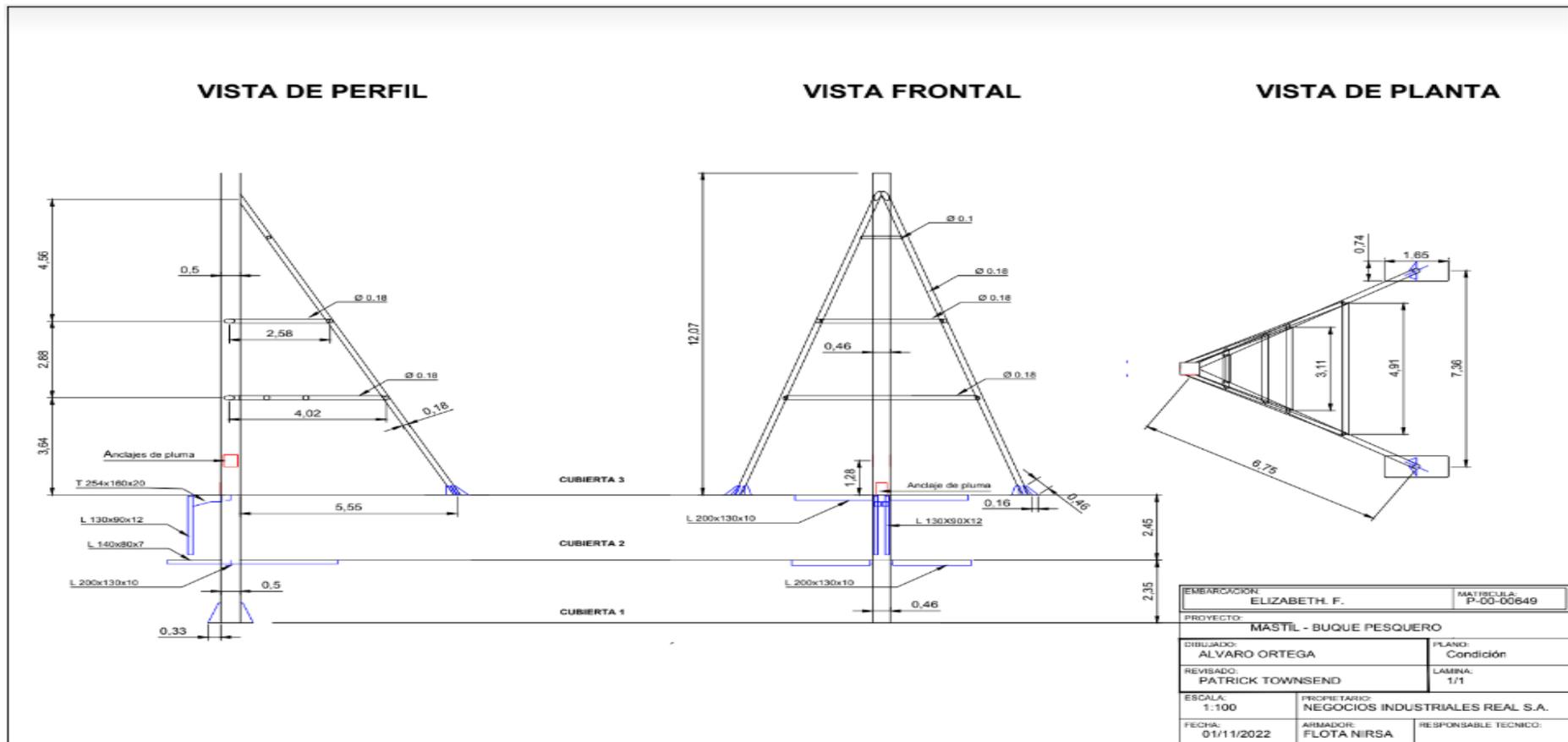


Figura 1.9 Modelo de mástil- Elizabeth BP.

[Fuente: Propia]

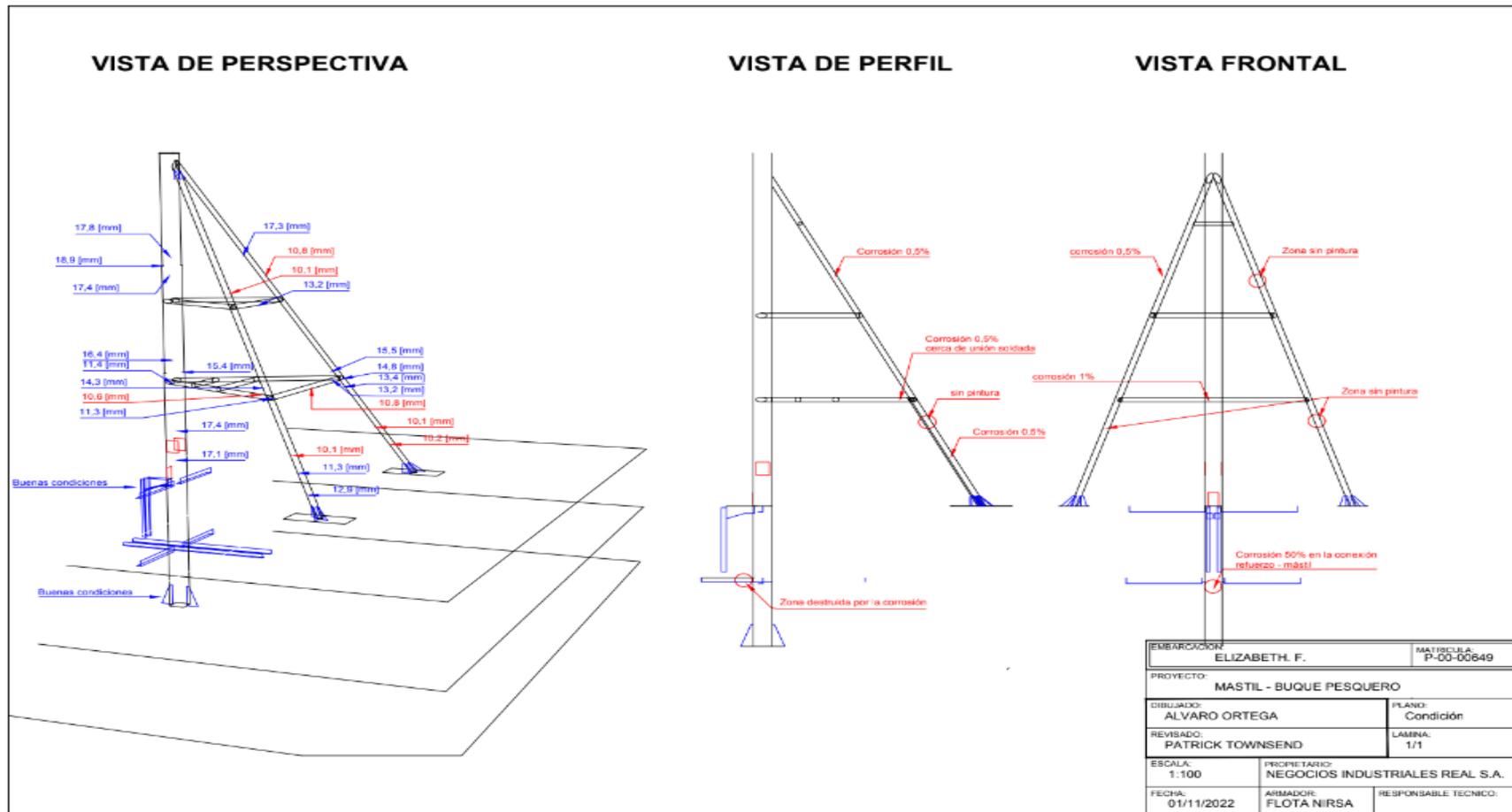


Figura 1.10 Modelado de mástil - Elizabeth BP.

[Fuente: Propia]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Con el fin de minimizar los fallos estructurales de un mástil sometido a cargas durante maniobras de captura, se deben considerar, en la etapa de diseño, las zonas más críticas de toda la estructura, teniendo en cuenta la transmisión de esfuerzos por los componentes del sistema de arboladura (plumas, mástil, tirantes y cables). De manera general, esta estructura tiene un factor de seguridad alto debido a los grandes esfuerzos durante operaciones de pesca, además de no contar con un sistema auxiliar si el mástil falla, poniendo en peligro la seguridad de la embarcación y deteniendo la producción inmediatamente. Por ello, se deben determinar las cargas aplicadas a las plumas en diferentes escenarios o condiciones de carga, por ejemplo: izaje de panga, levantamiento de *chinguillo* o izaje de red. Y a su vez, para hallar los puntos críticos en la estructura, es importante analizar cómo se distribuyen estos esfuerzos.

Para analizar la estructura global del sistema de arboladura se desarrolló un modelo 3D con el fin de aplicarle posteriormente el método de elementos finitos (MEF), figura 2.1. En el presente trabajo se empleó un software de análisis y simulación de elementos finitos en el que se aplicó la partición del dominio para su respectivo mallado, fijando condiciones de fuerzas externas e inerciales, las cuales producen cargas de tipo flexural y torsional debido a la ubicación de conexiones del resto de componentes del sistema, en otras palabras, anclajes de poleas. En esta metodología se procura determinar la magnitud de los esfuerzos y deflexiones que ocurren en el mástil y de esta manera identificar las zonas críticas de la estructura mencionada sujeta a posibles fallas.

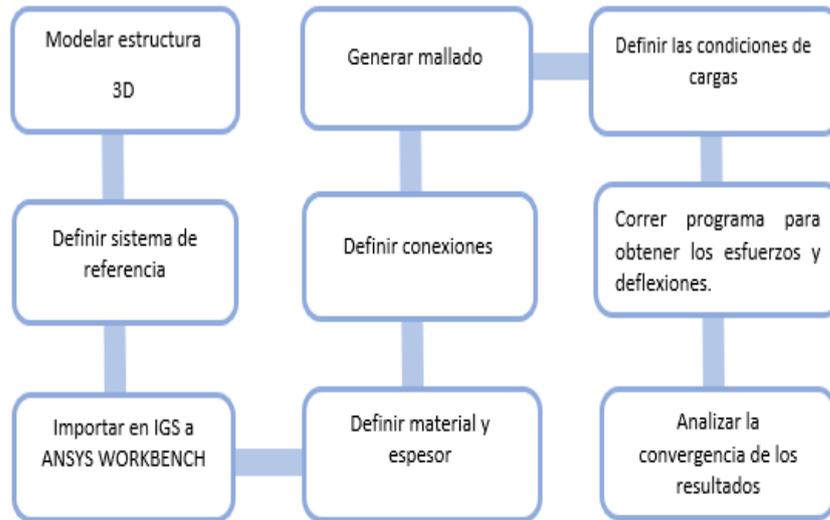


Figura 2.1 Proceso empleando Elementos finitos.

2.1 Desarrollo del modelo geométrico

Considerando el plano de la estructura de las mediciones tomadas en la planta de NIRSA en Posorja, se generó el modelo geométrico 3D en el software RHINOCEROS como se observa en la figura 2.2 y figura 2.3 para su respectiva importación al programa de simulación estructural. Todos los detalles de la estructura con sus refuerzos en general fueron modelados como superficies a partir de sus curvas; se lo puede apreciar en la figura 1.9 y figura 1.10. Cabe recalcar que todas las dimensiones del modelo fueron tomadas en la visita técnica, y existe una variación de ellas con respecto de los planos originales del mástil presentados en los planos de distribución de la empresa.

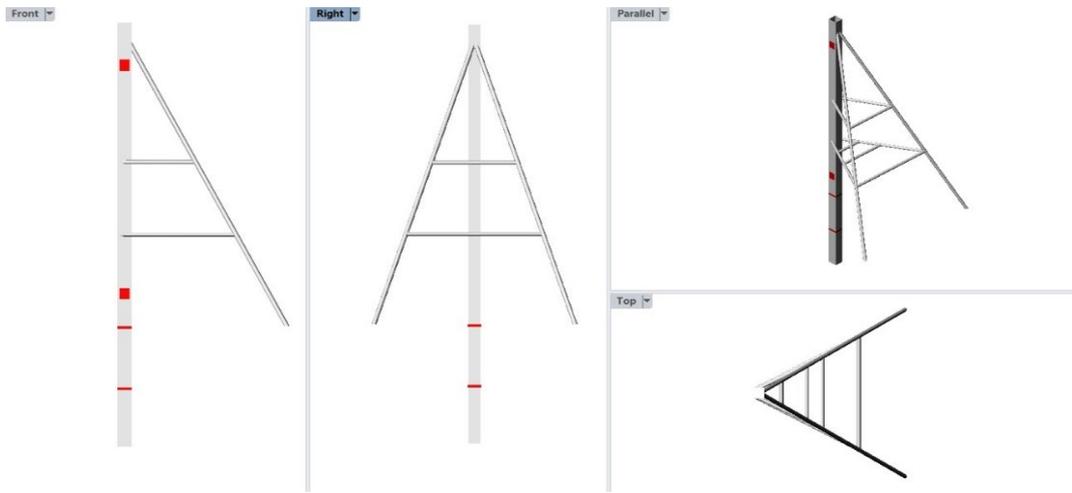


Figura 2.2 Diferentes vistas del modelo geométrico.

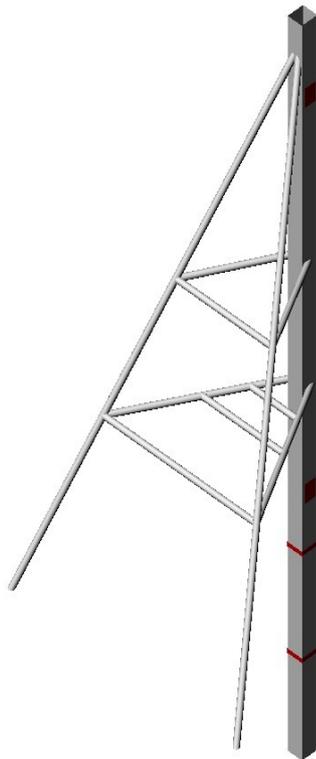


Figura 2.3 Modelo geométrico General en Rhinoceros.

2.2 Importación de modelo

Una vez realizado el modelo geométrico, este fue guardado con extensión IGS, de esta manera se lo importó a ANSYS WORKBENCH 2021R2. Para un correcto manejo del programa se definió el origen del sistema de referencia, el eje “x” en dirección de banda a banda, el eje “z” en el sentido de la línea de crujía, eje “y” en dirección del de la altura del mástil y todas las estructuras fueron importadas por capas, como se observa en la Figura 2.4.

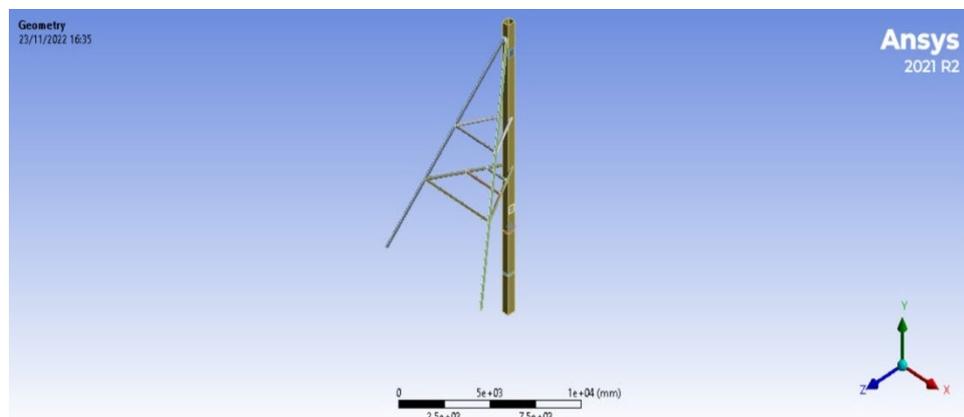


Figura 2.4 Modelo importado en Ansys.

2.3 Material y espesores de las estructuras

Aquí se observa la importancia de importar la estructura por capas, ya que de esta manera los espesores fueron definidos de manera rápida y sencilla. Los materiales y espesores son tomados de la referencia de Bureau Veritas indica, que para mástiles de espesor menor a 20 [mm] se necesita un acero de grado A o AH. [5] Este paso que es importante para la ejecución del programa se lo puede apreciar en la figura 2.5 y figura 2.6.

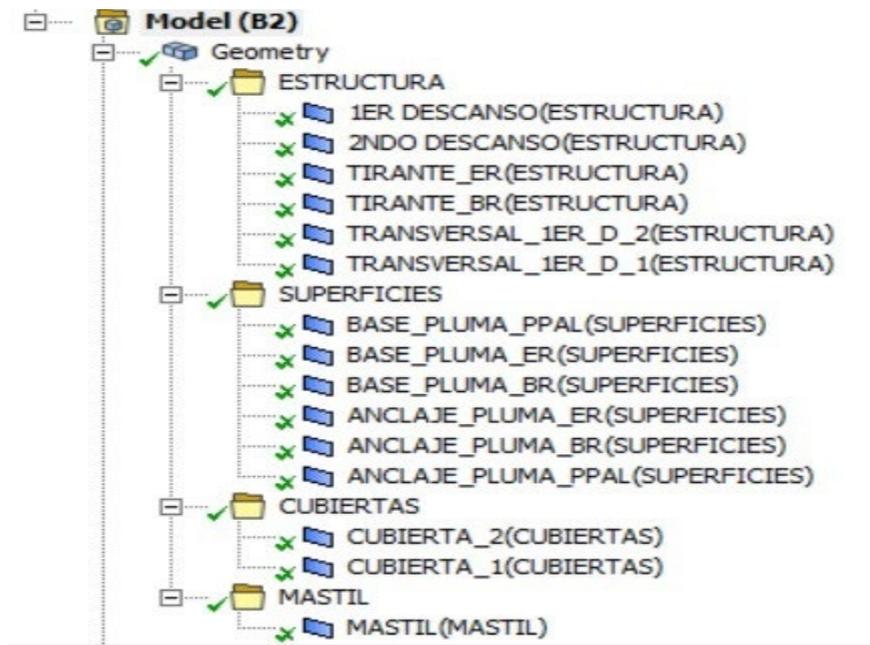


Figura 2.5 Importación por capas.

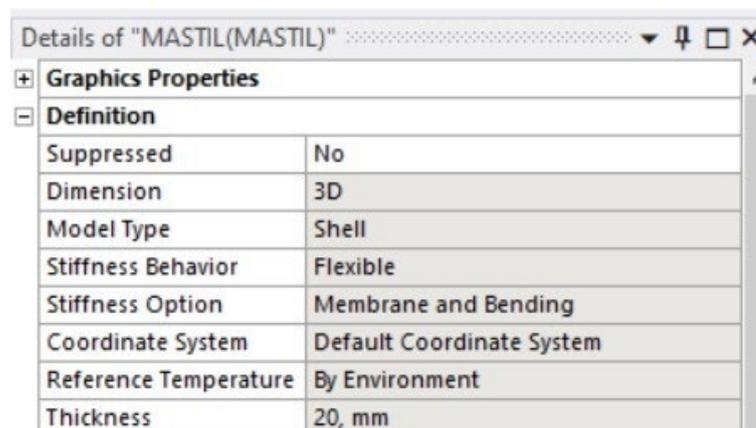


Figura 2.6 Definición de espesores.

La referencia *Ship design and construction* concuerda con la clasificadora *Bureau Veritas* al relacionar las dimensiones, de la sección transversal de un mástil en general con su espesor como indica en la Tabla 2.1. Y se tiene que esta relación debe ser menor al valor indicado por la clasificadora, que corresponde a un valor dividido para la raíz cuadrada del esfuerzo de fluencia de diseño.

Tabla 2.1 Parámetro de la dimensión de mástil, Bureau Veritas.

Dimensiones de mástil	t [mm]	17	460
Espesor / ancho	b/t	27,1	La relación debe ser menor al valor de la clasificadora
NR 526, Ch3, Sec 4 BV 9.4.4	$720/\sqrt{Re}$	38,5	

Con lo cual se comprueba, de primera mano, que el mástil cumple al menos con dos requerimientos generales para todo tipo de mástiles o grúas de cubierta, los cuales son: la relación del espesor con el ancho de la sección transversal del mástil, y que este se encuentre empotrado con al menos dos cubiertas, o una cubierta y apoyado en una superestructura, tal como se mostró en los planos constructivos líneas arriba.

2.4 Generación de Malla

Debido al número de elementos estructurales relativamente bajo, en comparación a una embarcación completa, se realizaron las conexiones de forma manual, considerando el orden de cada conexión, es decir, bordes con superficies, o superficies con superficies. De igual manera, se debe tener cuidado al conectar los nodos de dos elementos diferentes, con el fin de obtener una malla adecuada y una transición de elementos del dominio correspondiente a la exactitud requerida para este estudio.

2.4.1 Tamaño de malla

Para definir el tamaño de la malla, seguimos los parámetros que la sociedad clasificadora (DNV, Finite Element Analysis) y alega que el tamaño de la malla no debe ser superior a 50 [mm] con el propósito de obtener resultados más confiables, figura 2.7.

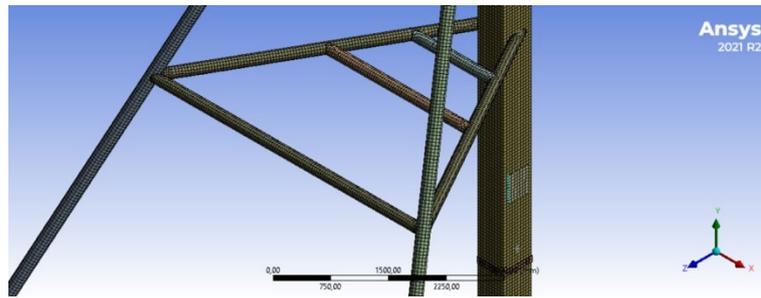


Figura 2.7 Visualización de la malla.

2.5 Simulación de cargas sobre la arboladura

2.5.1 Peso estructural

Debido a la magnitud de los elementos a ser estudiados, es importante considerar su propio peso en este estudio. Además, las plumas, al no ser motivo del presente estudio no serán dibujadas debido a su complejidad en cuanto a poleas y cables, pero sus pesos estarán representados por cargas puntuales en los puntos de anclajes al mástil, para cada pluma. Dichos pesos se encuentran detallados en las tablas 1.4 y 1.5.

Se debe entender que durante las maniobras de captura, las tres plumas trabajan al unísono, debiendo analizar así cada una de ellas de manera individual, pero acorde a la maniobra de pesca, por ejemplo: levantamiento de chinguillo en la pluma de salabardo, junto con el izaje de red en la pluma principal, más la acción de movimiento de la pesca sobre la cubierta con la pluma auxiliar. Y de igual manera, ya que este es un mástil cuadrado, se debe considerar la recomendación presentada en Ship Design And Construction, de analizar las cargas en el mástil cuando la pluma está alineada con la zona de menor inercia transversal, es decir, con una esquina de la sección del mástil.[4]

2.5.2 Pluma principal en izaje de red

Durante la operación de pesca, la pluma principal es la única que se encuentra en movimiento horizontal y vertical. Sin embargo, dichos movimientos se realizan de manera casi estática, y el rango en ambos planos no supera los 5 grados, ya que

se utiliza esta pluma únicamente para izar y acomodar la red en la cubierta principal, mientras esta es recogida y cerrada por los elementos auxiliares de pesca que se encuentran en cubierta, como el pescante de babor. Cabe mencionar que la velocidad de izaje de red en el power block se encuentra alrededor de medio metro por segundo, es decir unos dos kilómetros por hora, por lo que la carga dinámica se considera nula. Se obtuvieron estos valores al conocer la longitud de la red y el tiempo de captura, que es máximo de una hora por cerco, ya que, si este tiempo se extiende más, la pesca se daña debido a influencias biológicas, y la misma no es recibida en puerto, representando así una pérdida económica para la empresa.

Para obtener la fuerza transmitida desde la pluma principal, por la maniobra de levantamiento de red, se considera principalmente la red mojada que se encuentra fuera del agua, entendiéndose que existe un factor que diferencia el peso de la red seca con el de la red mojada, siendo este último hasta un 30% mayor cuando se la saca del agua, dependiendo de la composición de las fibras. Para ello se mide los claros existentes desde el centro del power block, hasta la cubierta principal y hasta la línea de agua, adicionando estos valores y multiplicándolos por el factor de red mojada por el peso por unidad de red, tal como se detalla en la siguiente ecuación, que se obtuvo a través del diagrama de fuerzas estáticas de la figura 2.8.

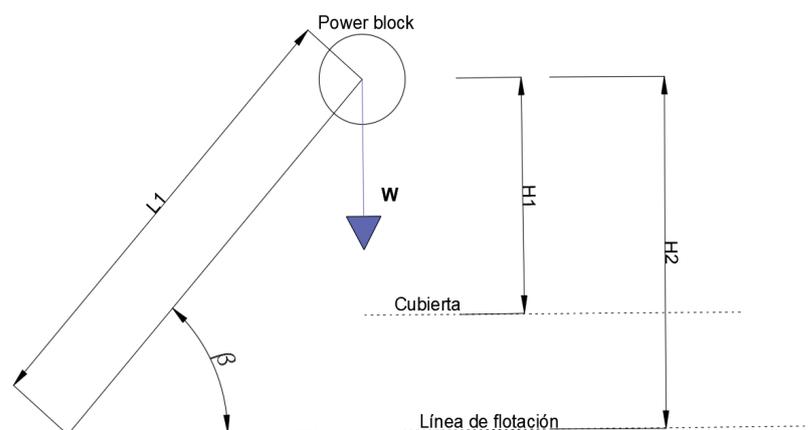


Figura 2.8 Ilustración de movimiento de Power Block.

$$(H1 + L1) * F * P = W$$

F: Factor de red mojada

P; Peso de red por unidad de longitud $\left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}} \right]$

Adicionalmente, se estima el peso de los elementos de arrastre como son: el power block, más los dos winches montados en la pluma más su propio peso estructural, como se detalló anteriormente, y cuyos resultados se presentan en la tabla 2.2 y 2.3, para diferentes ángulos de inclinación de la pluma.

Tabla 2.2 Dimensiones de pluma principal en operación.

Power block	m [ton]	2,7
H1	H1 [m]	10,85
H2	H2 [m]	14,91
Factor de red mojada	f	1,3
angulo de levantamiento	grados	30
Peso de red unitaria	m [ton]	0,02
Longitud de pluma principal	L [m]	17,50
Carga total	SWL [ton]	3,96
Longitud de pluma	L [m]	17,50
Distancia hasta winche 1	d1 [m]	2,50
Distancia hasta winche 2	d2 [m]	5,52
Distancia al power block	d3 [m]	17,50
Distancia media a los tensores de pluma	d5 [m]	15,91
pluma y cables	m [ton]	3,00
winche principal	W1 [ton]	0,30
winche trincador	W2 [ton]	0,32
Carga en el gancho principal	W4 [ton]	3,96

Tabla 2.3 Cargas en la pluma principal a diferentes inclinaciones.

	H1	H2	Carga de red	Carga en gancho principal W [ton]
19,87	9,01	12,81	1,07	3,77
24,87	10,42	14,22	1,20	3,90
29,87	11,78	15,58	1,33	4,03
34,87	13,07	16,87	1,44	4,14
39,87	14,28	18,08	1,56	4,26
44,87	15,41	19,21	1,66	4,36
49,87	16,44	20,24	1,76	4,46
54,87	17,37	21,17	1,84	4,54
59,87	18,20	22,00	1,92	4,62

Las siguientes tablas 2.4 y 2.5, corresponde a la carga aplicada en diferentes ángulos de operación. De esta manera se identifica la situación crítica en la operación.

Tabla 2.4 Cargas en el anclaje de polea del mástil.

Posición	Horizontal	Tensión respecto de la pluma	Tensión respecto del mástil	Tensión aplicada al mástil [ton]		
	θ_1	θ_2	θ_3	T1-resultante	Xcomponente	Ycomponente
1	19,87	38,36	71,51	9,02	-8,55	-2,86
2	24,87	39,47	75,40	8,70	-8,42	-2,19
3	29,87	40,41	79,47	8,34	-8,20	-1,52
4	34,87	41,14	83,73	7,94	-7,89	-0,87
5	39,87	41,62	88,26	7,50	-7,50	-0,23
6	44,87	41,78	3,09	7,02	-7,01	0,38
7	49,87	41,54	8,33	6,52	-6,45	0,94
8	54,87	40,81	14,06	5,99	-5,81	1,46
9	59,87	39,42	20,45	5,45	-5,10	1,90

Tabla 2.5 Cargas en la base de pluma en el mástil.

Posición	pluma y cables	winche principal	winche trincador	Carga en el gancho principal	Carga aplicada en la base de la pluma principal [ton]		
					Y	X	Resultante
1	-3,00	-0,30	-0,32	-3,77	-4,52	8,55	9,68
2	-3,00	-0,30	-0,32	-3,90	-5,32	8,42	9,96
3	-3,00	-0,30	-0,32	-4,03	-6,12	8,20	10,23
4	-3,00	-0,30	-0,32	-4,14	-6,89	7,89	10,48
5	-3,00	-0,30	-0,32	-4,26	-7,65	7,50	10,71
6	-3,00	-0,30	-0,32	-4,36	-8,36	7,01	10,91
7	-3,00	-0,30	-0,32	-4,46	-9,02	6,45	11,09
8	-3,00	-0,30	-0,32	-4,54	-9,62	5,81	11,24
9	-3,00	-0,30	-0,32	-4,62	-10,14	5,10	11,35

2.5.3 Pluma principal en izaje de panga

El levantamiento de panga es la maniobra principal durante la operación de pesca, ya que es lo realiza en el inicio y finalización de la faena. A continuación, detallamos las fuerzas que participan en esta operación, figura 2.9, las cuales están sujetas a la geometría del diagrama mostrado en la figura 2.10.

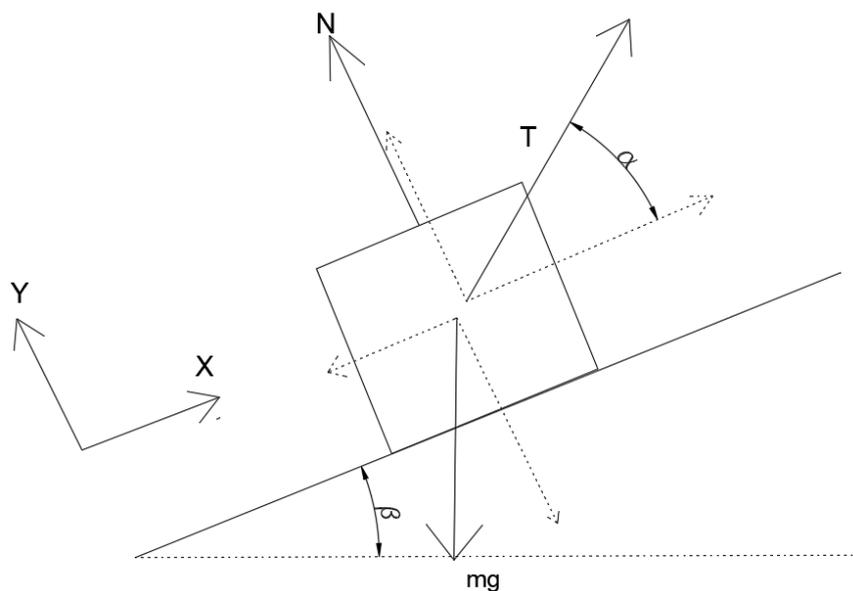


Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre, panga.

Fuente: [Propia]

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= 0 \\ N + T \sin \alpha &= mg \cos \beta\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= 0 \\ T \cos \alpha + \mu_s(mg \cos \beta - T \sin \alpha) - mg \cos \alpha &= 0\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$T = \frac{mg(\sin \beta - \mu_s \cos \beta)}{(\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha)}\quad (2.3)$$

Reemplazando las variables, con los valores de ángulos obtenidos en los planos de la embarcación y la visita técnica realizada en las instalaciones de NIRSA en Posorja, además se considera que el izaje de la panga no se realiza de un solo tirón, si no de manera cuasi estática, con el fin de realizar la maniobra correctamente, por lo tanto se tiene que la tensión en el cable es de aproximadamente 7,2 toneladas, valor que está por debajo de la capacidad máxima del winche de panga, sin presentarse un sobredimensionamiento en la capacidad de arrastre del mismo. De igual forma, se debe entender que esta tensión varía de acuerdo con el ángulo de inclinación de la pluma principal, sin embargo, dicha variación de la tensión está por debajo de una tonelada.

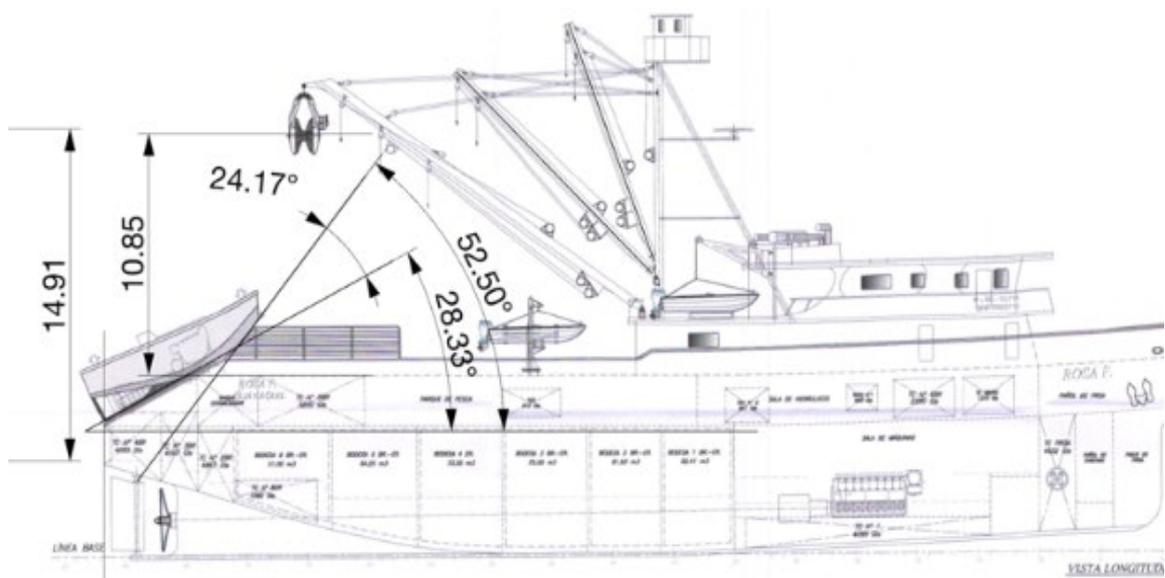


Figura 2.10 Cotas lineales y de ángulos desde la panga.

Para identificar la situación crítica de la maniobra, se determina las cargas aplicadas en diferentes condiciones de operación, esto quiere decir de acuerdo al ángulo de inclinación como se observa en la Tabla 2.6 y 2.7.

Tabla 2.6 Cargas aplicadas al mástil en diferentes inclinaciones.

Posición	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	Tensión aplicada al mástil [ton]		
				T1-resultante	Xcomponente	Ycomponente
1	20	23,27	38,36	26,32	-24,96	-11,10
2	25	15	39,47	26,41	-25,55	-11,39
3	30	9,02	40,41	26,03	-25,59	-11,24
4	35	3,34	41,14	25,52	-25,37	-10,93
5	40	88,26	41,62	24,93	-24,91	-10,50
6	45	83,63	41,78	24,32	-24,28	10,00
7	50	79,34	41,54	23,76	-23,51	9,48
8	55	75,34	40,81	23,30	-22,60	8,96
9	60	71,49	39,42	23,04	-21,59	8,48

Tabla 2.7 Carga aplicadas en la base de la pluma principal.

Posiciones	Pesos puramente verticales [ton]				Carga aplicada en la base de la pluma principal [ton]		
	Power block	Pluma	Winche 1	Winche 2	Y	X	Resultante
1	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-6,22	14,64	15,91
2	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-6,41	15,77	17,02
3	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-6,81	16,12	17,50
4	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-7,23	16,04	17,59
5	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-7,68	15,60	17,39
6	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-28,12	14,89	31,82
7	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-27,48	13,97	30,83
8	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-26,80	12,87	29,73
9	-2,70	-3,00	-0,30	-0,32	-26,12	11,62	28,59

2.5.4 Pluma de salabardo

Esta pluma se utiliza principalmente para el levantamiento del chinguillo, es decir, para mover la pesca desde la red al costado de la nave, hacia el acceso a las cubas, que se encuentra en crujía de la cubierta principal. Cabe recalcar que durante esta operación, la pluma se encuentra estática, y solo es el gancho quien baja o sube desde la punta de la pluma. Es decir, solo se realiza movimiento en el plano vertical, figura 2.11. Mientras que, para mover la carga en el plano horizontal, hacia la embarcación, se utiliza el gancho de la pluma auxiliar, la cual también esta fija.



Figura 2.11 Chinguillo de pesca.

Fuente: [International MCS network, purse seine fishing]

En cuanto a la carga estática, el chinguillo, o brail en inglés, cuando es lanzado a la red, este se hunde por su propio peso, permitiendo que el pescado ingrese sin dificultad, sus dimensiones están indicadas en la tabla 2.8. En cuanto se levanta de la superficie del agua, debido a sus dimensiones y al factor de estiba del pescado y el agua atrapada entre los peces, la carga total tal como indica la ICCAT “La pesca es transferida desde el cerco hacia la cubierta con la ayuda de una red con capacidad de hasta 10 toneladas de pesca por carga” [6] considerando que estos valores dependen de las dimensiones del chinguillo, los cuales están en un promedio de 4 a 7 toneladas.

En cuanto a la carga dinámica, se considera el efecto de levantamiento de la carga, la cual está influenciada por la altura del francobordo más la altura del chinguillo, y el tiempo que le toma a la carga recorrer esa distancia vertical. Además, se debe

tener en cuenta el efecto de balance del buque, relacionando el periodo con el factor añadido a la carga estática.

Tabla 2.8 Dimensiones durante las operaciones del chinguillo.

			t [s]	fbalance [ton]	flevantamiento [ton]
Chinguillo	∅ [m]	2	1	5,36	9,38
	L [m]	3	2,5	0,86	1,50
	V [m3]	9,42	3	0,60	1,04
Factor de estiba	F	0,85	4	0,34	0,59
Porcentaje de carga	%	80,0%	5	0,21	0,38
Peso	m [ton]	6,57	6	0,15	0,26
Altura de balance	h [m]	4	7	0,11	0,19
Altura de levantamiento	h [m]	7	8	0,08	0,15
Fuerza inducida por balance	f [ton]	0,60	9	0,07	0,12
Fuerza inducida por levantamiento	F [ton]	1,50	10	0,05	0,09
Carga total	SWL [ton]	8,67			

De esta manera se identifica la situación crítica del chinguillo en las tablas 2.9 y 2.10, cargas que son transmitidas al mástil.

Tabla 2.9 Cargas aplicadas al mástil.

Posición	Horizontal	Tensión respecto de la pluma	Tensión respecto del mástil	Tensión aplicada al mástil [ton]		
	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	T1-resultante	Xcomponente	Ycomponente
1	15,14	38,77	66,37	19,09	-17,49	-7,65
2	22,64	40,61	72,03	17,56	-16,70	-5,42
3	30,14	42,08	78,05	15,98	-15,64	-3,31
4	37,64	43,06	84,57	14,36	-14,30	-1,36
5	45,14	43,34	1,79	12,73	-12,72	0,40
6	52,64	42,63	10,01	11,10	-10,93	1,93
7	60,14	40,44	19,70	9,51	-8,95	3,20
8	67,64	36,04	31,60	8,01	-6,82	4,20
9	75,14	28,38	46,75	6,68	-4,58	4,87

Tabla 2.10 Cargas aplicada en la base de la pluma principal.

Posición	pluma y cables	Winche salabardo	Winche bonche	Carga en el gancho templador	Carga en el gancho principal	Carga aplicada en la base de la pluma principal [ton]		
						Y	X	Resultante
1	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-5,56	17,49	18,35
2	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-7,80	16,70	18,43
3	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-9,91	15,64	18,51
4	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-11,86	14,30	18,58
5	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-13,61	12,72	18,63
6	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-15,15	10,93	18,68
7	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-16,42	8,95	18,70
8	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-17,41	6,82	18,70
9	-2,00	-0,30	-0,25	-2,00	-8,67	-18,08	4,58	18,65

2.5.5 Pluma auxiliar

Esta pluma, como se mencionó líneas arriba se utiliza, durante la maniobra de captura, para mover la carga (el chinguillo) desde un costado de la embarcación hacia la línea de crujía, donde se encuentra el acceso de pesca hacia las cubas. Se considera que este movimiento es puramente horizontal y se realiza en un tiempo que oscila entre los 6 y 11 segundos, cuyo diagrama se representa en la figura 2.12.

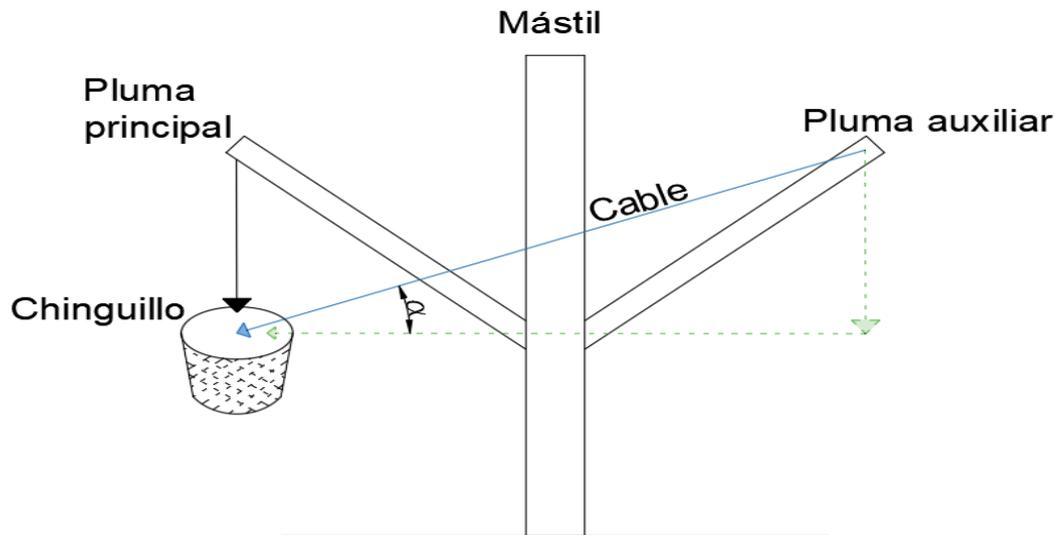


Figura 2.12 Ilustración de maniobra de la pluma auxiliar.

Con esta información de distancia y tiempo se puede, a través de un análisis dinámico, detallar la fuerza horizontal requerida para mover la carga; finalmente se la descompone para obtener la tensión puramente vertical y horizontal actuantes en la punta de la pluma, tabla 2.11, y con ello obtener las reacciones tanto en la base de la pluma y el anclaje de la polea en la punta del mástil, tabla 2.12.

Tabla 2.11 Carga dinámica por maniobra de chingullo.

t [s]	Tvertical [ton]
1	10,80
2	2,70
3	1,20
4	0,68
5	0,43
6	0,30
7	0,22
8	0,17
14	0,06

Tabla 2.12 Dimensiones del sistema de arboladura.

Semimanga	SM [m]	5,35
Distancia de crujía a red	d [m]	7,35
Distancia de gancho a red	D [m]	10,025
Altura de gancho a chinguillo	H [m]	11
Masa chinguillo	m [ton]	6,57
Fuerza inducida por movimiento horizontal	f [ton]	0,68
Longitud de pluma	L [m]	13,00
Distancia hasta winche 1	d1 [m]	2,60
Distancia hasta winche 2	d2 [m]	4,61
Distancia al gancho principal	d4[m]	10,70
Distancia media a los tensores de pluma	d5 [m]	12,05
pluma y cables	m [ton]	2,00
Winche salabardo	W1 [ton]	0,25
Winche templador	W2 [ton]	0,11
Carga en el gancho principal	W4 [ton]	0,68

Se determina las cargas transmitidas al mástil em diferentes ángulos de inclinación y de esta manera identificar la situación crítica de la maniobra como se puede apreciar en las tablas 2.13 y 2.14.

Tabla 2.13 Tensiones en diferentes posiciones por la pluma auxiliar.

Posición	Horizontal	Tensión respecto de la pluma	Tensión respecto del mástil	Tensión aplicada al mástil [ton]		
	θ_1	θ_2		T1-resultante	Xcomponente	Ycomponente
1	9,61	41,47	58,14	2,64	-2,24	-1,39
2	17,11	43,97	63,14	2,44	-2,18	-1,10
3	24,61	46,24	68,37	2,23	-2,08	-0,82
4	32,11	48,19	73,92	2,02	-1,94	-0,56
5	39,61	49,68	79,93	1,79	-1,77	-0,31
6	47,11	50,50	86,61	1,57	-1,56	-0,09
7	54,61	50,28	4,33	1,34	-1,33	0,10
8	62,11	48,36	13,75	1,11	-1,08	0,26
9	69,61	43,48	26,13	0,90	-0,81	0,40

Tabla 2.14 Cargas transmitidas por maniobra de pluma auxiliar.

Posición	pluma y cables	Winche salabardo	Winche bonchete	Carga en el gancho principal	Carga aplicada en la base de la pluma principal [ton]		
					Y	X	Resultante
1	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-1,64	2,24	2,78
2	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-1,93	2,18	2,91
3	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-2,21	2,08	3,03
4	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-2,48	1,94	3,15
5	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-2,72	1,77	3,24
6	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-2,94	1,56	3,33
7	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-3,14	1,33	3,41
8	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-3,30	1,08	3,47
9	-2,00	-0,25	-0,11	-0,68	-3,43	0,81	3,53

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se resumen los resultados del análisis por MEF, de la distribución de esfuerzos para diferentes condiciones de carga del mástil (descritos en el capítulo 2), así mismo se analizaron los resultados de la propuesta de diseño para potenciar la seguridad de la estructura.

3.1 Parámetros de aceptación de resultados

Para un análisis usando MEF es importante aplicar criterios que respalden los diversos valores obtenidos de una data extensa de información. Por lo tanto, se valida los resultados en la convergencia de malla y en las diferentes condiciones de carga.

3.1.1 Convergencia de malla

Para este criterio se efectuaron tres refinamientos de malla obteniendo como una dimensión efectiva de malla siendo de 40mm, la cuál es menor al valor recomendado por DNV. Por lo tanto, el nivel de exactitud de los resultados será mayor de lo requerido por DNV.

Como se puede observar en la figura 3.1, el tiempo de ejecución del programa fueron 5 horas lo cual fue un límite ya que se debían simular varios escenarios para condición de carga con el fin de establecer una solución factible.

Details of "Solution (F4)"	
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
<input type="checkbox"/> MAPDL Elapsed Time	5 h 0 m
MAPDL Memory Used	1,6348 GB
MAPDL Result File Size	1,1763 GB
Post Processing	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

Figura 3.1 Detalles de simulación.

3.2 Resultados

3.2.1 Deflexiones

Se encontró que la inclinación de la pluma que mayor peligro supone para la estructura del mástil es la posición 6 con un ángulo de 44,87, grados respecto de la horizontal, figura 3.2, con una tensión de 24,32 toneladas aplicada en la parte superior del mástil, y 31 toneladas en la base de la pluma (parte inferior del mástil).

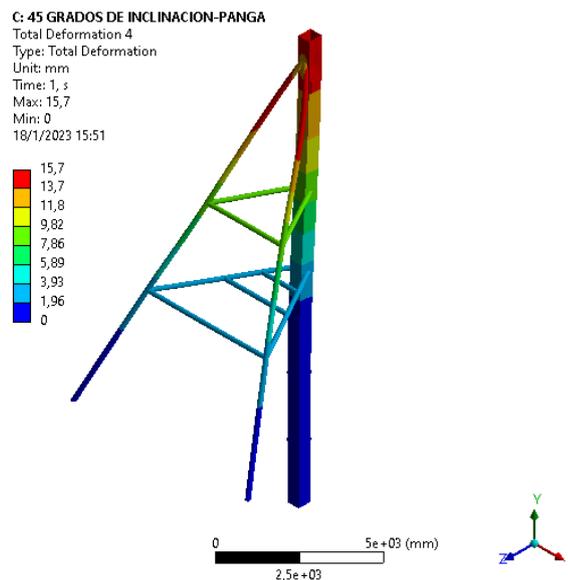


Figura 3.2 Modelado geométrico en Ansys.

Tal como se aprecia en la figura 3.1 correspondiente a la operación de la acomodación de la panga sobre sus patines, existe una deflexión aproximada de 12 milímetros en la zona alta de los dos refuerzos principales. Y se observó este comportamiento de pandeo debido a la longitud no soportada y la relación de esbeltez de estos estructurales. En adición la clasificadora recomienda realizar el análisis para el ángulo más pequeño (20 grados) y más grande respecto de la horizontal (60 grados).

Para la operación de pesca, figura 3.3 y 3.4, la cual consiste en el uso simultáneo de las tres plumas, se encontró una deformación asimétrica y en torsión, tal como se esperaba debido a la diferencia en magnitud de las cargas que soporta la pluma de babor y estribor. Se presenta una deformación a escala, la cual incrementa el resultado solamente en términos visuales.

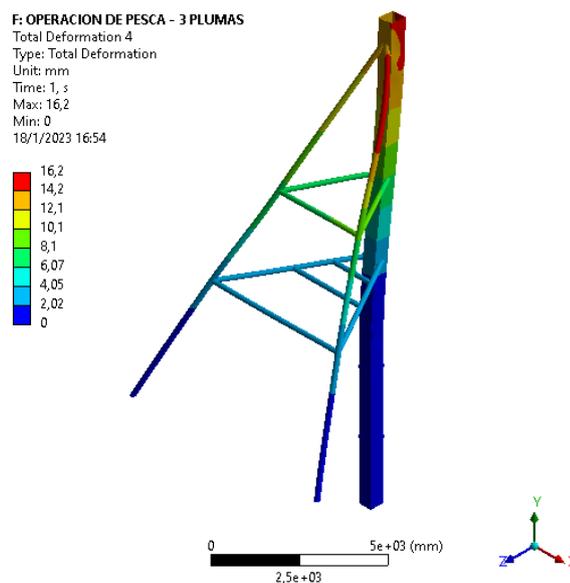


Figura 3.3 Respuesta de mástil en operaciones de pesca

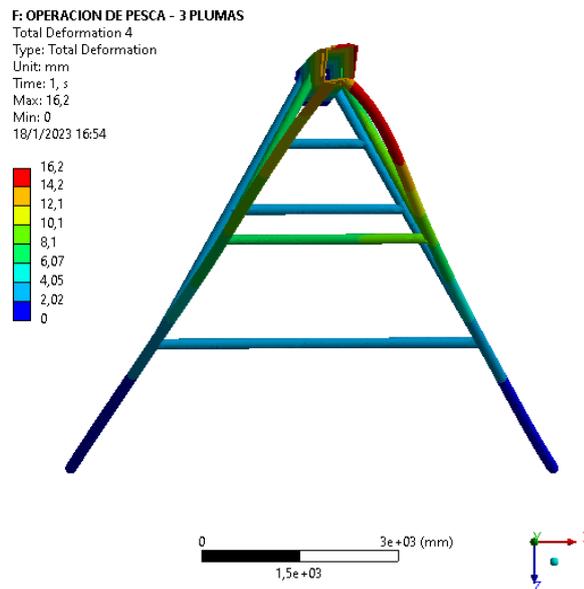


Figura 3.4 Respuesta de mástil en operación de pesca, vista en planta.

3.2.2 Distribución de esfuerzos

Los resultados encontrados en esta subsección se correlacionan con una problemática hallada en la flota atunera, la falta de mantenimiento y el efecto de corrosión en zonas de alto esfuerzo, lo que tiene como consecuencia la falla de la estructura de soporte y por lo tanto del mástil, el cual depende de la integridad de la anterior.

Se espera que la distribución de esfuerzos normales debido a las cargas, figura 3.5, no sea simétrica respecto del eje neutro del mástil debido a la carga axial más el momento uni-axial en cada eje transversal, figura 3.6. Para ello se realiza la comparación teórica en la tabla 3.1.

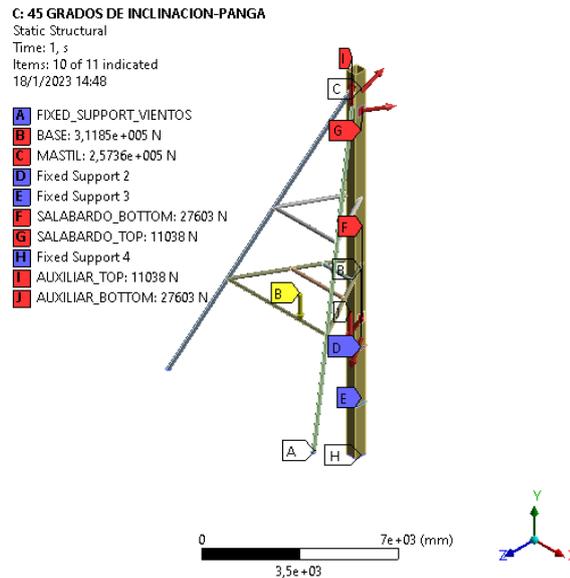


Figura 3.5 Cargas para comprobación de esfuerzo uni-axial.

Con el fin de comprobar los resultados, se trabajó solamente con las fuerzas puramente verticales para comparar valores teóricos de la ecuación de esfuerzo asimétrico con los resultados del programa, que corresponden al cálculo de excentricidad de la cara hacia popa del mástil, donde se aplica la fuerza de sujeción de la pluma, con ello se corrobora la confiabilidad en los resultados de la simulación al obtenerse un error por debajo del 10%.

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M_x y}{I_x} \pm \frac{M_y x}{I_y} \quad (3.1)$$

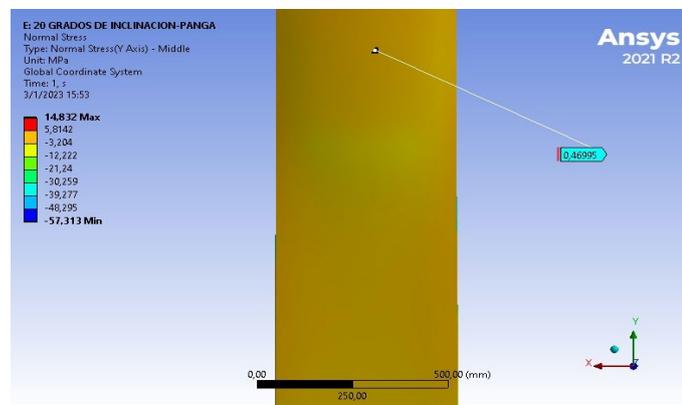


Figura 3.6 Comprobación de esfuerzo normal uni-axial

Tabla 3.1 Resultados obtenidos aplicando MEF.

ESFUERZO NORMAL UNI AXIAL		
CARGA EXCENTRICA [N]	P	-1,09E+05
CARGA TOTAL [N]	P	-1,05E+05
AREA SECCIONAL [mm ²]	A	4,29E+05
MOMENTO EN X [N-mm]	Mx	2,72E+07
MOMENTO EN Y	My	-
INERCIA EN X	Ix	3,86E+10
INERCIA EN Y	Iy	3,00E+11
DISTANCIA X EJE NEUTRO	x	230,00
DISTANCIA Y EJE NEUTRO	y	250,00
	P/A	-0,24
MY/Ix		0,18
MY/Iy		0,00
Esfuerzo por carga excéntrica	f	0,42
Ansys	f	0,45
Diferencia		8%

3.2.2.1 Operación Izaje de panga

Se muestran los resultados obtenidos más significativos de esfuerzo de corte y normal, figura 3.7, correspondientes a las estructuras con mayor peligro de falla.

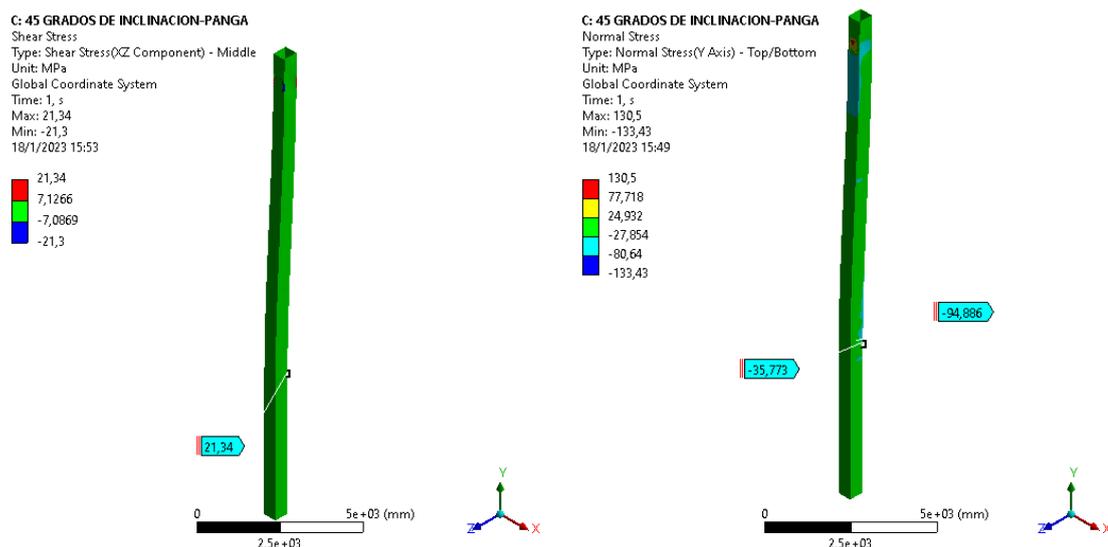


Figura 3.7 Resultados de esfuerzo normal y de corte por levantamiento de panga a 45 grados.

3.2.2.2 Operación de pesca

Ya que en este caso la carga no es simétrica respecto de la línea de crujía, la distribución de esfuerzos fue diferente para ambos lados de la estructura, figura 3.8, por lo que los resultados se muestran para toda la estructura, además se hace énfasis en mostrar los resultados de esfuerzo solamente para el mástil, figura 3.9.

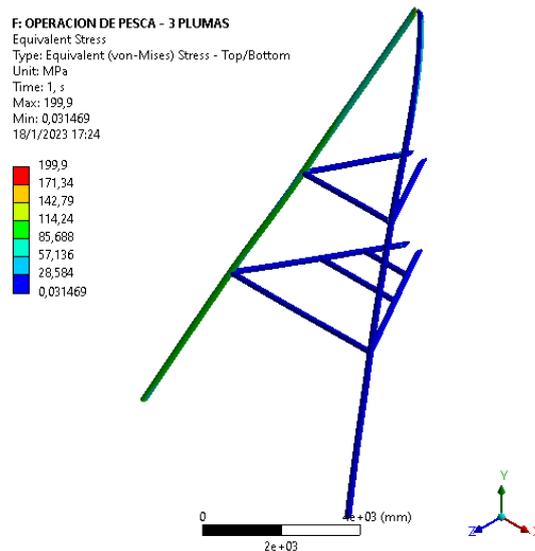


Figura 3.8 Esfuerzo equivalente en la estructura para operación de pesca.

Se observó en esta condición que el viento de soporte de estribor estaba sometido a una mayor tensión, por lo tanto, la distribución de esfuerzos alcanza valores que pueden elevarse debido a la reducción significativa de espesores por corrosión, efecto que sucede frecuentemente en la industria local.

Se debe recalcar que la zona de mayor esfuerzo corresponde a las uniones soldadas cerca del mástil debido a su configuración geométrica, sin embargo, ya que se encuentran altamente reforzadas con escuadras y plancha de hasta 50 milímetros, se abandona la consideración de posible falla en estas zonas, y este estudio se concentra alrededor.

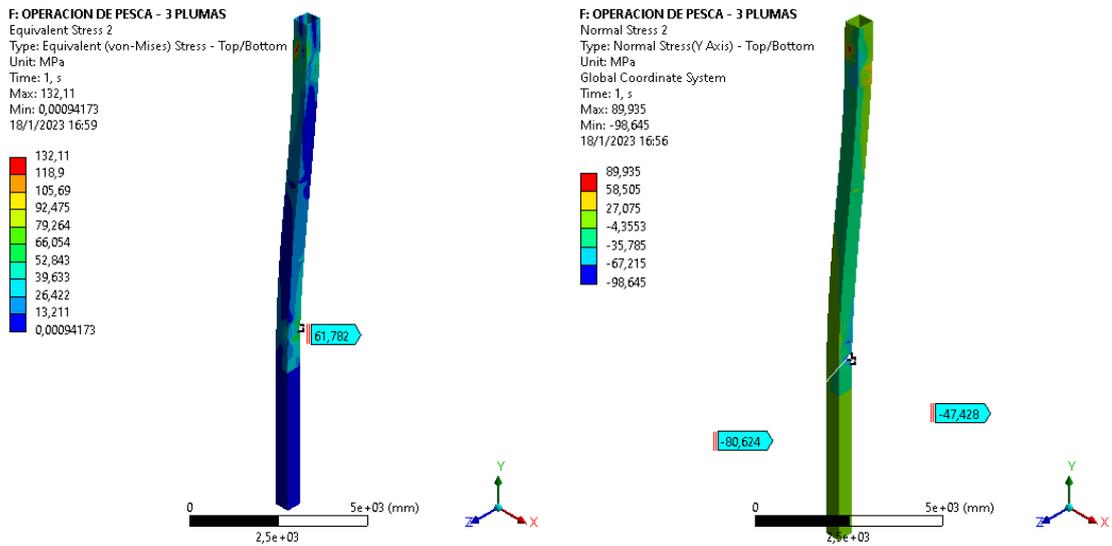


Figura 3.9 Esfuerzo normal y equivalente durante la maniobra de captura.

También se sospecha que debido a que una cara del mástil está en tensión y otra está en compresión, las cuales, dependiendo de las propiedades mecánicas del acero, este puede ser significativamente débil a los esfuerzos de corte. Debido a esto el mástil podría fallar por esfuerzo de corte antes de alcanzar el esfuerzo último de compresión.

Por ello se decidió verificar si cada una de las tres secciones soportadas por la estructura era susceptible a este tipo de esfuerzos, tabla 3.2, al aplicar un análisis estático donde si la relación de aspecto de la *viga* supera el 10%, entonces se debe considerar el esfuerzo de corte, figura 3.10.

Tabla 3.2 Influencia de esfuerzo de corte.

Influencia de esfuerzo de corte			H/L
Longitud no soportada	Ltop	4560	0,11
	Lmid	2880	0,17
	Lbott	3640	0,14
Altura de la sección transversal	H	500	

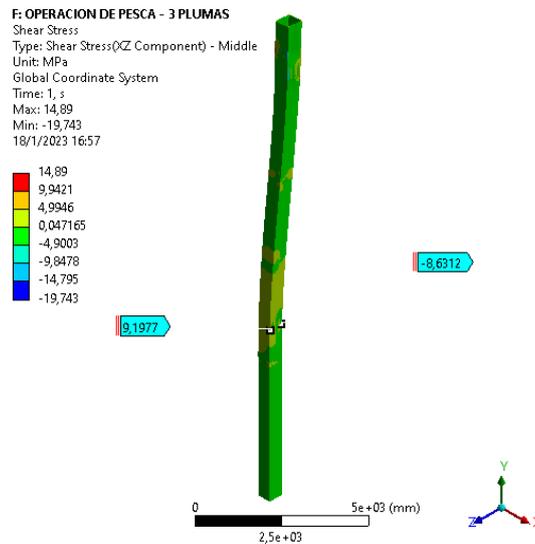


Figura 3.10 Esfuerzo cortante durante operaciones de pesca

Así mismo, se descartó que una de las posibles fallas sea debido a la pérdida de estabilidad lateral o *buckling* ya que en cada uno de los tramos soportados por la estructura del mástil se encontró que se denominan como columnas cortas y la carga crítica asciende a valores muy por encima de los que se puede alcanzar durante la operación de pesca, tabla 3.3. Además, con base en experiencia estadística se encontró que el punto de fluencia puede ser sobrepasado por el esfuerzo del material solo si la relación diámetro exterior sobre espesor de la sección transversal es mayor que 700 [4] (también aplicable a mástiles de sección rectangular), por lo que se descarta el efecto de pandeo por carga lateral.

Tabla 3.3 Análisis de estabilidad lateral por carga axial – mástil

Factor de condición de borde - sup	k	1
Factor de condición de borde- inf	k	0,7
Longitud no soportada - sup	lu	4560
Longitud no soportada - inf	lu	3650
Radio de giro-xx	Rxx [mm]	300
Radio de giro-yy	Ryy [mm]	265
Relación de esbeltez - sup		15,20
Relación de esbeltez - inf		8,52

Carga crítica de la columna		
Módulo de elasticidad [N/mm ²]	E	2,00E+05
Inercia [mm ⁴]	I _{xx}	3,86E+10
Longitud de columna	L	3650
Carga crítica de la columna [N]	P _{cr}	5,71E+09

3.2.3 Efecto de corrosión

Por la evidencia experimental hallada en visitas técnicas al muelle en Posorja, figura 3.11, se encontraron zonas con diferencias de hasta 7 milímetros a lo largo de un mismo estructural. Por lo que se procedió a realizar la simulación representando esta diferencia para las condiciones de carga presentadas previamente.



Figura 3.11 Corrosión detectada en la estructura de soporte del mástil.

Así mismo, se encuentran zonas donde la corrosión ha alcanzado profundidades excesivas en el material poniendo en peligro directamente la estabilidad del mástil, por lo que se procedió a modelar una grieta debido a corrosión en el viento de estribor (tal como se ve en la figura 3.14) para comprobar el incremento de esfuerzos en la estructura y en el mástil.

3.2.3.1 Análisis de la estructura – considerando corrosión

Primero se procedió a simular la grieta entre los dos descansos (accidente del B/P Rosa), figura 3.12 , y luego sobre el descanso superior , figura 3.14, para los cuales

se obtuvieron los resultados de esfuerzos transmitidos al mástil tal como se aprecia en la figura 3.13, y hacia la estructura circundante, figura 3.15.

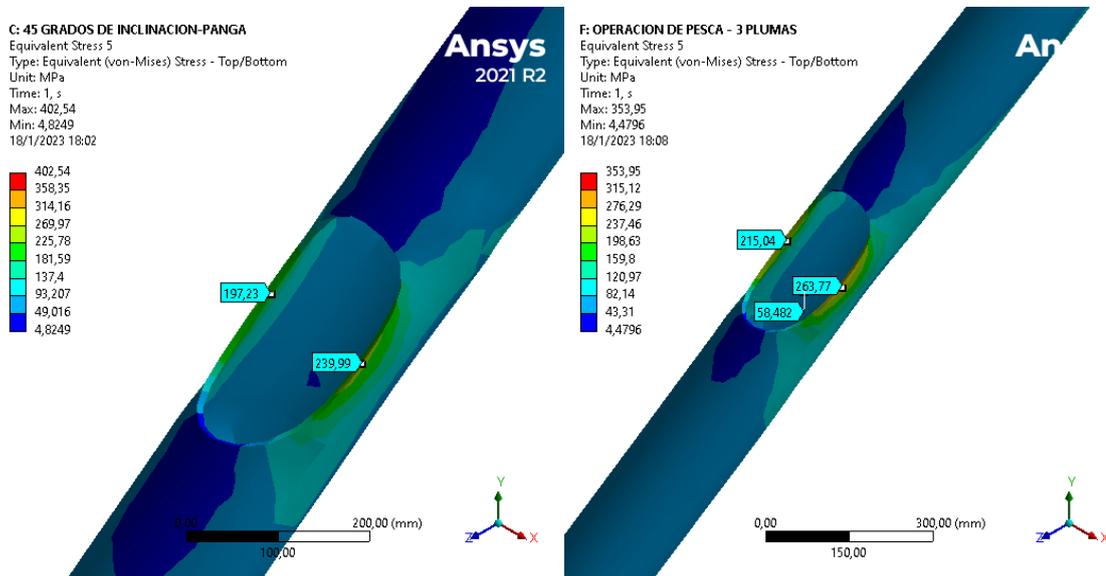


Figura 3.12 Esfuerzos en la abertura – entre descansos de la estructura de mástil.

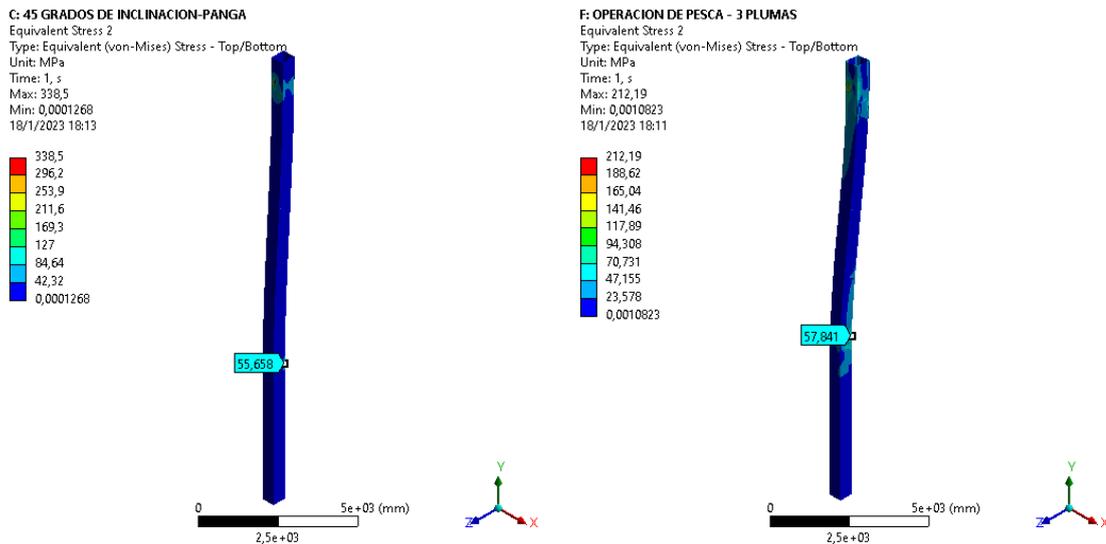


Figura 3.13 Esfuerzo equivalente en el mástil por abertura en uno de los vientos.

Conforme a la evidencia experimental hallada en la visita técnica a la embarcación, se procedió a simular también cuando la grieta por corrosión se encuentra por encima del descanso superior.

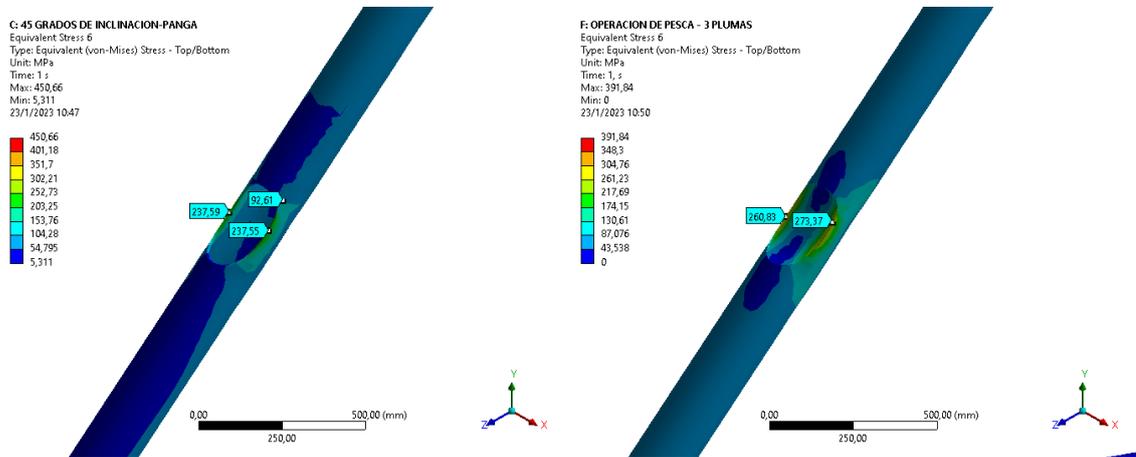


Figura 3.14 Esfuerzo equivalente en abertura.

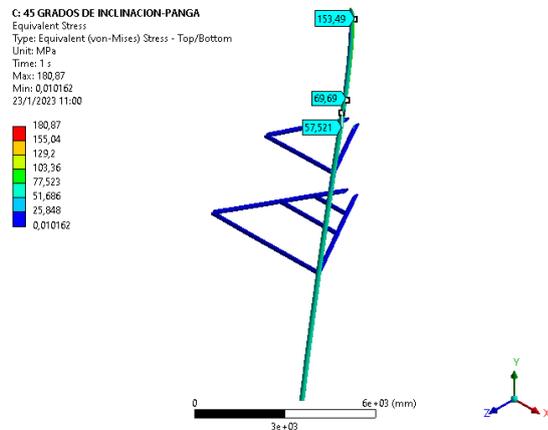


Figura 3.15 Esfuerzo equivalente en la estructura circundante.

Una vez que se conocieron las consecuencias de una grieta en uno de los vientos, más la reducción de espesores debido a la corrosión se verificó que existe una gran probabilidad de dejar a uno de los vientos totalmente inservible, por ello se ha procedido a simular las cargas con un solo viento trabajando, es decir en falla, con el fin de verificar el comportamiento de la estructura y conocer hasta qué zona de la curva *esfuerzo- deformación* llegará el esfuerzo en el mástil, para así proponer

una solución estructural que **en falla de uno de los largueros principales** minimice un posible colapso y que la estructura se mantenga en pie, y si bien, no operativa al 100% de su capacidad, esta tendría la posibilidad de continuar con la pesca a un menor ritmo y volver a puerto para las reparaciones necesarias o ser reparada en alta mar con los equipos de soldadura a bordo de la nave.

3.2.3.2 *Análisis de la estructura – considerando la falla de un soporte*

Se tiene que a pesar de que la carga es simétrica respecto a la línea de crujía en el izamiento de panga, el desbalance en los resultados se da debido al apoyo único del lado de babor, siendo este lado el único soporte para los esfuerzos transmitidos por la carga. Por lo cual se obtuvieron resultados de esfuerzos concentrados en una esquina del mástil para el levantamiento de panga (figura 3.16 y 3.17), y la operación de pesca (figura 3.18 y 3.19), cuya deformación es asimétrica.

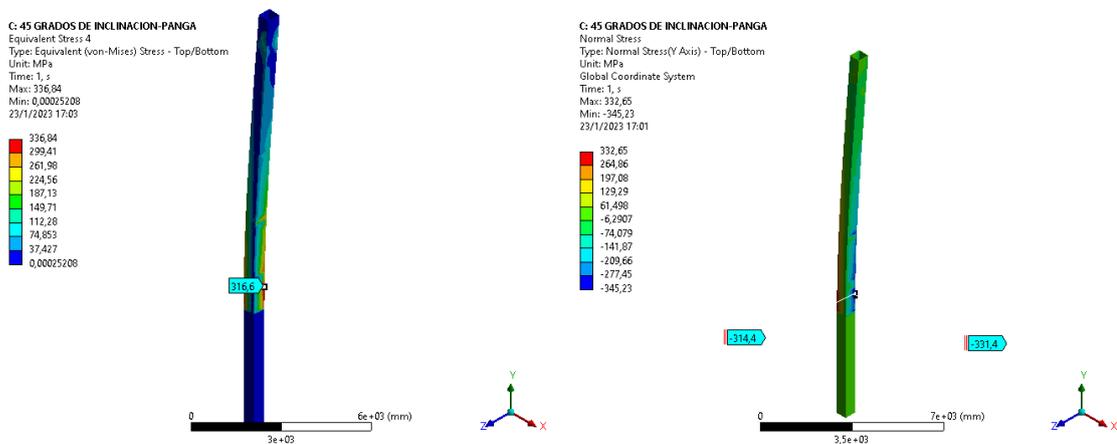


Figura 3.16 Esfuerzo normal y esfuerzo equivalente en mástil para estructura en falla.

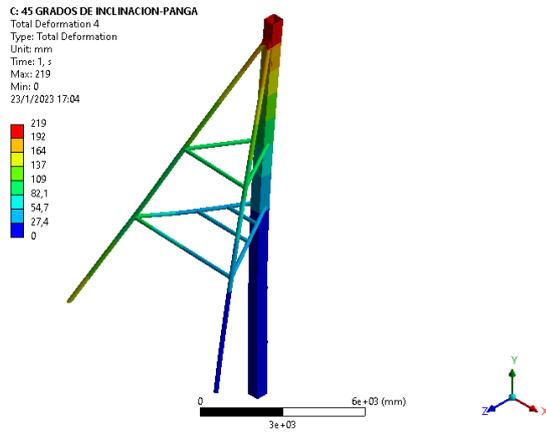


Figura 3.17 Deformación total.

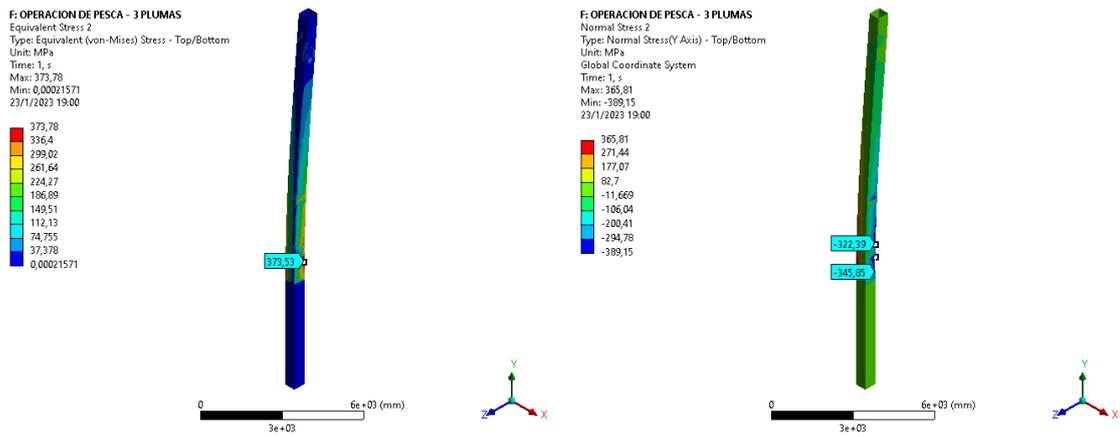


Figura 3.18 Esfuerzo normal y equivalente en falla – durante operación de pesca

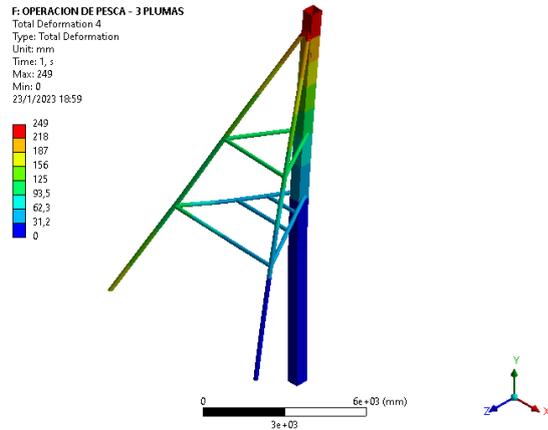


Figura 3.19 Deformación por falla estructural en el mástil – operación de pesca.

Para las tres condiciones de análisis se realiza una comparación de esfuerzo permisible (tabla 3.4), tanto para el esfuerzo normal y equivalente en la zona inferior del mástil que se encuentra cerca de una esquina donde reposa la base de la pluma principal, la cual es propensa a falla.

Tabla 3.4 Comparación del esfuerzo permisible Burea Veritas/SNAME.

Mástil rectangular - base pluma principal	Esfuerzo equivalente		Esfuerzo normal		Diferencia con esfuerzo permisible	
	Izaje de panga	Pesca	Izaje de panga	Pesca	Izaje de panga	Pesca
En condiciones normales	67	68	89	80	5,95%	4,76%
Con corrosión	68	58	151	78	79,76%	7,14%
En falla	342	360	318	377	278,57%	348,81%

Es importante entender que el esfuerzo normal ha sido medido en la cara de compresión del mástil, junto a la base de la pluma principal, donde se aplica una carga lateral obteniéndose pandeo en la zona más crítica del mástil debido a sus condiciones de frontera y carga.

3.3 Modificación estructural

Se realizó la siguiente modificación estructural (figura 3.20 y tabla 3.5) con el fin de minimizar el riesgo de falla estructural debido a un exceso de deformación, también considerando la pérdida de un viento y la funcionalidad de la estructura como un acceso de los pescadores hacia la cofa.

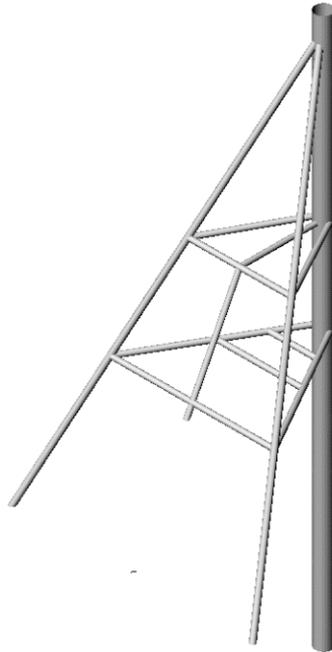


Figura 3.20 La distribución del esfuerzo normal no es uniforme en el mástil (comprobar).

3.3.1 Mástil

Se escogió un mástil de tipo circular debido a la deformación torsional obtenida por carga asimétrica durante operaciones de pesca, ya que esta concentra los esfuerzos en la esquina de babor hacia popa del mástil, (figura 3.21). Por lo que con esta nueva geometría de dimensiones comerciales se espera obtener un mejor comportamiento en las condiciones de análisis.

Con el fin de mejorar la respuesta del mástil por pérdida de uno de los soportes principales, se incluyó un refuerzo central que parte desde el descanso inferior, hacia el superior, y que se conecta directamente hacia el mástil de forma horizontal. No fue posible conectar este refuerzo al mástil en la parte superior, siguiendo la línea diagonal de los otros refuerzos, ya que esto no dejaría espacio para el acceso de la escalera que utilizan los pescadores para ingresar a la cofa. Sin embargo los resultados obtenidos, por falla de uno de los vientos fueron suficientemente buenos como se explicará en la siguiente sección.

Tabla 3.5 Características de la propuesta de solución.

Característica	Mástil	Refuerzos
Diámetro nominal	20"	7"
Cedula	80	80
Espesor [mm]	26,19	12,70
Peso [kg/m]	311,19	56,59

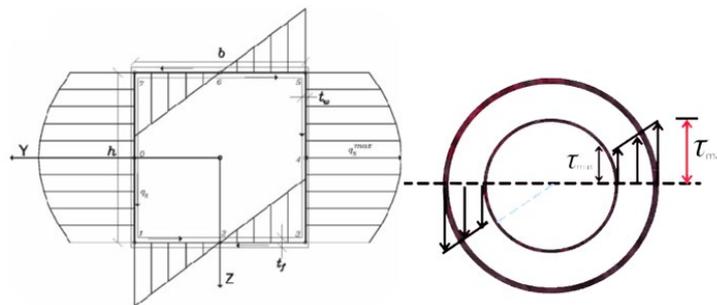


Figura 3.21 Distribución de esfuerzos en secciones transversales.

[Fuente: www.machinemfg.com]

Tabla 3.6 Aceptación de relación de aspecto – bureau veritas.

Mástil de sección circular - Relación de aspecto		
Diámetro	D	508
Espesor	t	26,19
NR 526, Ch3, Sec 4 BV 9.4.3	D/t	19,40

Con el fin de obtener un mástil lo de resistencia elevada con el menor peso posible se debe encontrar el **espesor comercial** (tabla 3.6) optimizado para que resista pandeo por carga lateral, además debe poseer suficiente área seccional para hacer frente a la compresión, y finalmente debe poseer suficiente inercia y longitud entre soportes para resistir el pandeo por carga axial, o *buckling* en inglés.

Con lo que finalmente se presentan los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos para las condiciones más críticas de análisis (figura 3.22 a la 3.26), o de falla obtenida para el mástil de sección rectangular.

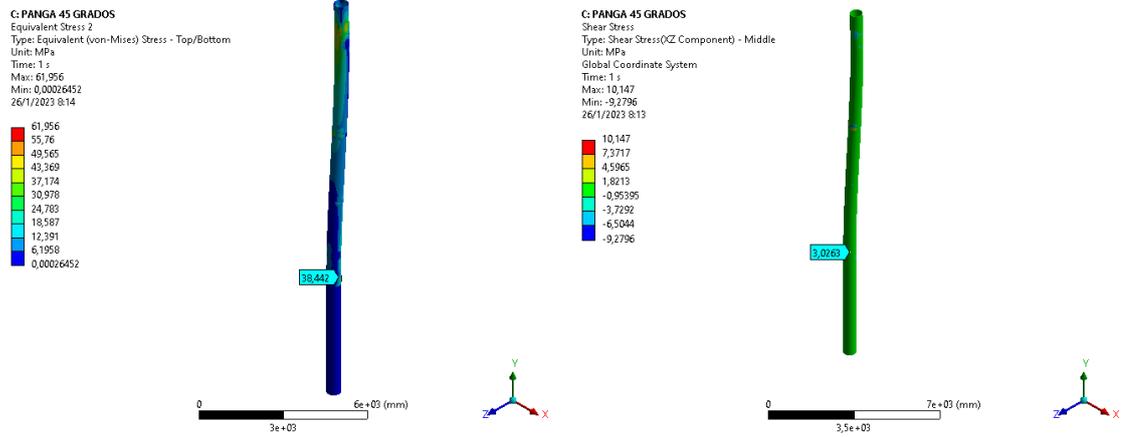


Figura 3.22 Esfuerzo de corte y equivalente durante el izaje de panga a 45 grados.

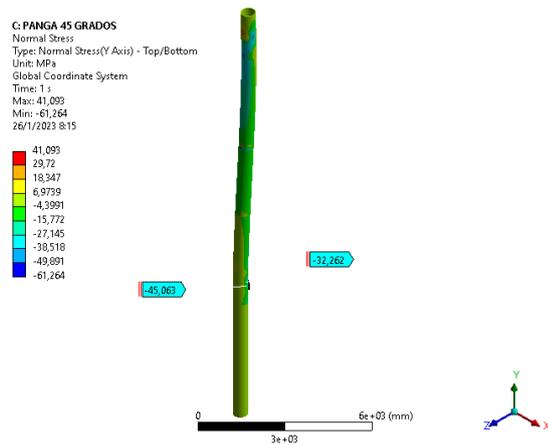


Figura 3.23 Esfuerzos normales durante el izaje de panga a 45 grados.

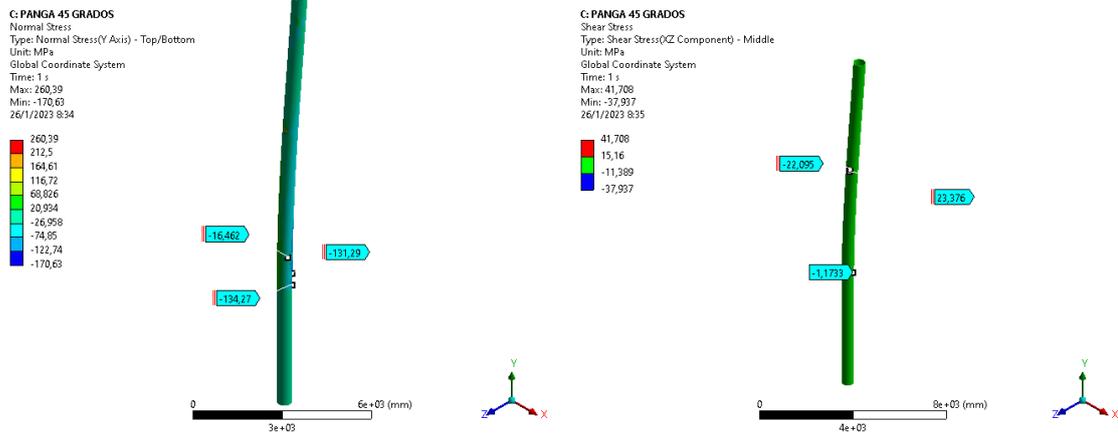


Figura 3.24 Esfuerzos normales y cortantes durante el izaje de panga a 45 grados cuando colapsa un soporte.

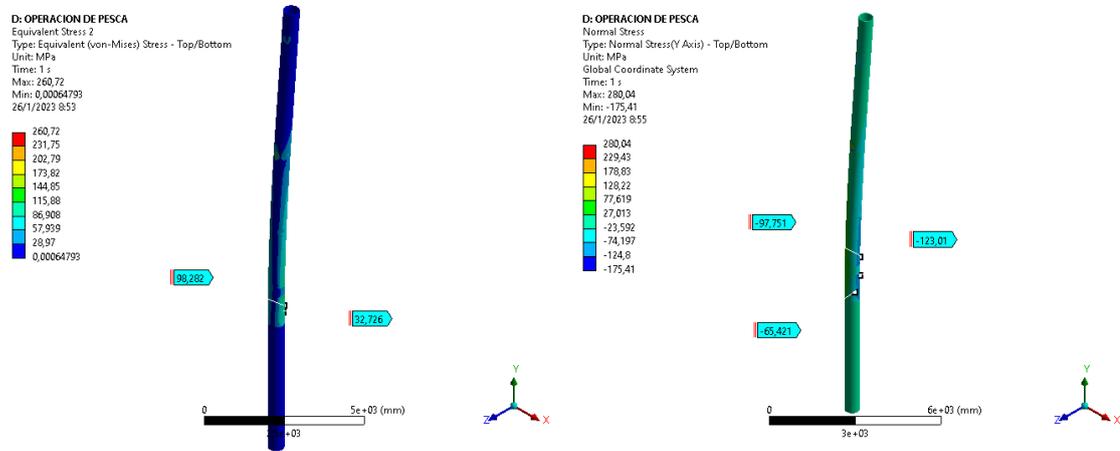


Figura 3.25 Esfuerzo equivalente y normal durante las operaciones de pesca cuando falla un soporte.

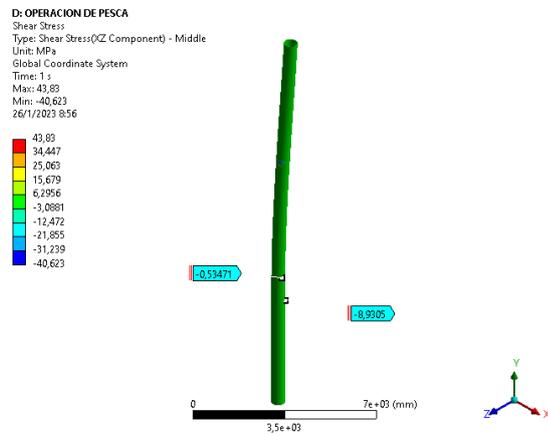


Figura 3.26 Esfuerzo de corte durante las operaciones de pesca cuando falla un soporte.

De igual manera que para el mástil de sección rectangular, se realizó el análisis de esfuerzos permisibles para el mástil de sección circular para las tres condiciones de análisis (tabla 3.7) y cuya comparación de propuesta solución versus mástil rectangular se presenta en la figura 3.27.

Tabla 3.7 Comparación del esfuerzo permisible SNAME/Bureau Veritas

Mástil circular - base pluma principal	Esfuerzo equivalente		Esfuerzo normal		Diferencia con esfuerzo permisible	
	Izaje de panga	Pesca	Izaje de panga	Pesca	Izaje de panga	Pesca
En condiciones normales	31	53	42	54	50,00%	35,71%
Con corrosión	36,8	31	71	58	15,48%	30,95%
En falla	103	105	135	154	60,71%	83,33%

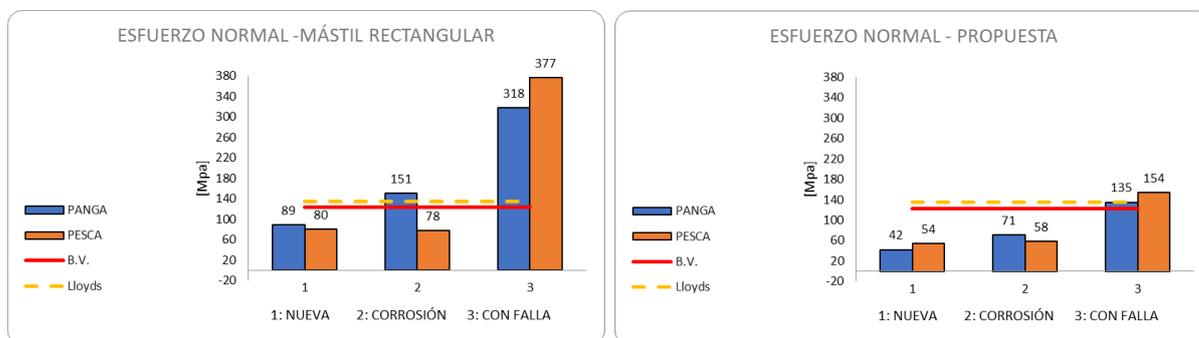


Figura 3.27 Comparación de esfuerzos en mástil rectangular y propuesta de solución diferentes condiciones.

Finalmente se presenta el cálculo de estabilidad transversal (tabla 3.5) o inclinación hacia una banda cuando se realiza el levantamiento puramente vertical de la carga máxima durante la operación de pesca, cuyo límite establecido es de 5 grados.

Tabla 3.5 Ángulo de escora permisible de acuerdo a Lloyd's Register.

Ángulo de escora - LR Code for Lifting Appliances in a Marine Environment, July 2021, incorporating Notice No. 1 & 2 CH2 SEC 7.1.4		
Desplazamiento [tons]	Δ	1795,73
Altura metacéntrica [m]	GM	0,46
Crujía - carga lateral [m]	Lever	7,35
Carga [tons]	SWL	8,67
Angulo de escora [grados]	Υ	4,43

3.4 Análisis de resultados

Se ha encontrado que la estabilidad del mástil depende directamente de la estructura de soporte, y especialmente de los dos largueros principales denominados vientos. Sin embargo, se encontró a través de evidencia experimental que la falta de mantenimiento produce una reducción significativa de espesores con diferencias de hasta 7 milímetros, la cual produce grietas a largo plazo, incrementando así la concentración de esfuerzos en la estructura de soporte del

mástil, seguida de una alta concentración de esfuerzos de compresión en la cara de popa del mástil provocando una falla eminente.

En un principio se pensó que una causa posible de falla se debía a la inestabilidad lateral por carga axial, o *buckling* en inglés, sin embargo, se encontró evidencia estadística que indica que la relación de aspecto diámetro exterior para espesor debe ser mayor a 700 para alcanzar el punto de fluencia por esfuerzo normal de compresión. Por lo que tal como se aprecia en la tabla 3.6 la relación de aspecto es menor a 20, y además debido al espaciamiento entre los soportes del mástil, todas sus secciones se consideran como columnas cortas, siendo casi imposible alcanzar valores de carga axial de tal magnitud para producir *buckling*, incluso si la carga es excéntrica como en el presente estudio.

De la misma manera se consideró la posibilidad de falla por esfuerzo de corte antes que pandeo por carga lateral, y los resultados de las simulaciones indicaron que a pesar que el mástil rectangular produce un incremento en el valor del esfuerzo en las esquinas, con corrosión y en falla de uno de los soportes, el valor alcanzado en las peores condiciones de carga estaba por debajo de 110 N/mm².

Quedando, así como última causa de falla los valores de esfuerzo normal en la cara de compresión del mástil, junto a la base de la pluma principal, la cual ejerce una carga lateral y opuesta a su contraparte en la parte superior del mástil. Los resultados arrojados por las diferentes simulaciones, tanto con corrosión como en falla de uno de los soportes, coinciden con la evidencia de accidentes marítimos, tal como es el caso del buque pesquero Rosa F. figura 3.20 y figura A1, A2.

Se establecen recomendaciones de esfuerzo máximo permisible según la referencia [4] que indica un factor de seguridad de 5 con respecto del esfuerzo último de fluencia del material, valor correspondiente a 84 Mpa. Y la referencia [5] indica un valor máximo de esfuerzo en la cara de compresión del mástil equivalente a 134 Mpa, correspondiente a la máxima carga de levantamiento. Así que se tomó el menor de estos valores como referencia límite debido a la importancia del mástil

en cuanto a la seguridad de la nave y la tripulación, como se explicó en capítulos anteriores.

Con ello se determinó que la causa de falla estructural corresponde generalmente a la operación de izaje de panga (lo cual concuerda con el accidente del BP Rosa), seguida por las consecuencias de la falta de mantenimiento en la estructura de soporte. Tal como se puede apreciar en la tabla 3.4 correspondiente al mástil rectangular donde se observó en la cara de compresión y en el lado de babor, cerca de la base de la pluma principal, un esfuerzo normal de 89 Mpa para el izaje de panga en condiciones normales de trabajo (es decir: considerando la estructura como nueva), valor que supera el límite establecido según la referencia [4]; lo cual solo empeora al disminuir los espesores en la estructura de soporte e incluir grietas por corrosión, con lo que se llegó a observar una diferencia de 80% con respecto al límite establecido, y si bien el esfuerzo normal en el mástil ha salido de la zona segura, aún está en la zona elástica.

Sin embargo, no se puede decir lo mismo de la estructura de soporte porque, tal como se aprecia en la figura 3.16 el esfuerzo equivalente ha superado con creces la zona plástica del material, siendo la deformación irreversible y provocando la falla de uno de los vientos o largueros principales. Lo cual nos conduce al último resultado que corresponde al análisis de la estructura en falla, donde los esfuerzos obtenidos en la cara de compresión del mástil fueron mucho mayores que 230 Mpa provocando una deformación permanente, resultados que concuerdan y coinciden con accidentes en buques pesqueros.

Finalmente se pensó en una solución estructural que considerase la falta de mantenimiento, la presencia de corrosión, grietas y la falla de un viento en la estructura de soporte del mástil. Con lo cual se obtuvieron los resultados de la tabla 3.7, la cual demuestra una mejor distribución de esfuerzos en la zona de compresión del mástil debido a que no existen esquinas y los mismos se distribuyen de manera uniforme. Se observó una reducción significativa de esfuerzos comparados con el mástil rectangular, además los mismos para condiciones

normales de trabajo y con presencia de corrosión y grietas se hallan por debajo del límite de seguridad de 80 Mpa. También se consideró la rotura de un viento por corrosión, y los esfuerzos obtenidos si bien superaban el límite de seguridad permitido, aún estaban por debajo de la zona plástica, con lo que la estructura del mástil podría ser reparada en altamar o continuar trabajando con una capacidad reducida hasta volver a puerto. Dicha solución estructural incluyó la presencia de refuerzos adicionales que no interfieren con el uso del mástil, para que siempre en falla de un estructural, sean dos los que soporten al mástil durante maniobras de captura.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se analizó la estructura de un mástil correspondiente a un buque pesquero de mediana capacidad (600 a 800 GT) con cargas correspondientes a levantamiento de panga y operación de pesca, además en diferentes escenarios tal como presencia de corrosión y disminución de espesores, con la falla de un elemento estructural principal y con la estructura en buen estado. Dichas condiciones fueron modeladas con elementos finitos utilizando el software Ansys 2021-R2 y se consideraron factores por fuerzas dinámicas durante las operaciones de pesca que incrementan la magnitud de las cargas soportadas por el mástil. Con lo cual, después de haber analizado los resultados en el capítulo previo, se llega a las siguientes conclusiones:

4.1 Conclusiones

Se generó una discretización adecuada de la estructura del mástil utilizando elementos finitos, verificando que existe una discrepancia entre los planos originales de la embarcación y lo que se encontró durante la visita técnica por lo que se analizó el modelo que presenta la condición actual de la estructura, con ello se generaron las superficies en el software RHINOCEROS y se importaron a ANSYS en formato IGS con el fin de colocar las cargas puntuales a las que el mástil está sometido, las cuales fueron aplicadas en superficies con comportamiento rígido (espesor mayor a 30 mm) que sirven de soporte para la base de la pluma (parte inferior del mástil) y para los anclajes de polea (parte superior).

Se determinó tras un análisis complejo de todas las posibles situaciones de carga que incluyeron el trabajo conjunto de las tres plumas durante la operación de pesca, que la condición más crítica de carga corresponde al levantamiento de la panga donde la pluma principal está inclinada a 45 grados respecto de la horizontal, ángulo que coincide con un incremento en la magnitud de carga aplicada en la base

de la pluma, parte inferior del mástil rectangular donde es más propenso a deformarse o quebrarse y los esfuerzos de diseño superan los valores en el rango recomendado de [123 - 134] N/mm² de Lloyds Register [7] y Bureau Veritas [5] respectivamente, situación que empeora cuando se considera corrosión por el ambiente salino y falla de un estructural principal.

Se confirmó que el mástil rectangular presenta un problema de diseño ya que al levantar el chingillo desde una banda de la embarcación, la pluma está alineada con la esquina de la sección rectangular (zona de menor inercia), con lo que se incrementa la probabilidad de falla estructural; problema que fue corregido con la propuesta solución de un mástil de sección circular que distribuye mejor los esfuerzos a lo largo del perímetro.

Se descartó el pandeo por carga axial o *buckling* como una posibilidad de falla ya que la distribución de soportes transversales divide al mástil en secciones de menor longitud y además la relación de aspecto Diámetro / espesor de la sección transversal es menor a 700, límite señalado en Sname Ship Design And Construction [4]. También se descartó el esfuerzo de corte como una posibilidad de falla dado que los valores máximos obtenidos para las tres condiciones de análisis en ambos mástiles (rectangular y circular) fueron menores que el esfuerzo de corte permisible del material, 110 N/mm².

Se estableció que la presencia de corrosión encontrada en uno de los estructurales principales, debido a la falta de mantenimiento son una causa de falla ya que el esfuerzo equivalente encontrado en la abertura supera el límite elástico del material provocando un exceso de deformación y consecuentemente el incremento de esfuerzo normal en la zona propensa a falla en el mástil.

Se determinó que una causa de falla corresponde a la presencia de corrosión por falta de mantenimiento, provocando grietas en los estructurales principales y cuyo esfuerzo equivalente supera el límite elástico del material generando una elongación excesiva e incrementando los esfuerzos transmitidos al mástil.

Se verificó que la propuesta solución, la cual incluye un mástil de sección circular y un estructural adicional mejora la respuesta de esfuerzos máximos alcanzados para las tres condiciones analizadas, incluyendo corrosión y falla de un estructural principal en diferentes situaciones de carga. Esta modificación representa una reducción mayor al 50% en el esfuerzo máximo alcanzado en la zona del mástil propensa a falla.

Se comprobó que el factor de seguridad incrementa en la propuesta solución para las tres condiciones de análisis, pasando de 4,7 (mástil rectangular) a 10 (mástil circular), de 2,8 a 5,9 con presencia de corrosión y de 1,3 a 3,1 con falla de un estructural con lo que se corrobora la viabilidad de la solución, es decir que el mástil puede seguir operando a menor proporción a pesar de la falla o rotura de un estructural principal.

Se corroboró que la estabilidad de la embarcación se mantuvo intacta con la modificación estructural, dado que no hubo un cambio sustancial en la estructura, ni en las dimensiones de las plumas o anclajes de soporte. Puesto que el valor máximo de inclinación en levantamiento de carga fue de 4,47 grados a babor, el cual es menor que la inclinación permisible de 5 grados establecida Lloyds Register [7] .

4.2 Recomendaciones

Se recomienda analizar el comportamiento de la distribución de esfuerzos con presencia de escuadras en la estructura y comparar los resultados con una estructura sin estos elementos, con el fin de exponer los beneficios de un buen diseño.

Considerando la falla de un estructural principal, situación que reduce la capacidad de levantamiento del mástil, se sugiere analizar opciones de levantamiento de la panga sobre sus patines que no utilicen al mástil durante la operación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Autoridad Portuaria de Manta (2022, Octubre 30) Disponible en :

<https://www.puertodemanta.gob.ec/la-mayor-flota-pesquera-del-ecuador-esta-en-manta/>

[2] Sector marítimo (2022, Octubre 28) Disponible en: <https://sectormaritimo.es/informe-anual-2019-de-emsasobre-accidentes-maritimos>

[3] United States Coast Guard (2022, 11 octubre) Disponible en :

https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/DCO%20Documents/5p/CG-5PC/INV/Alerts/USCGSA_1022.pdf?ver=-vzjcb_JumfnU9kgfVJ0qg%3D%3D

[4] Amelio M. D' Arcangelo (1969), "Ship Design and Construction", Society of Naval Architects and Marine Engineers (U.S.).

[5] Bureau Veritas. (2022). Rules for the Certification of Lifting Appliances onboard Ships and Offshore Units

[6] International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (2008) , General description of fishing operations with the purse seine gear.

[7] Lloyd's Register. (2021). Rules and Regulations for Clasifications all ships. En Rules and Regulations for the Clasifications of ships. London.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Imágenes de sistema de mástil de buque pesquero Rosa.

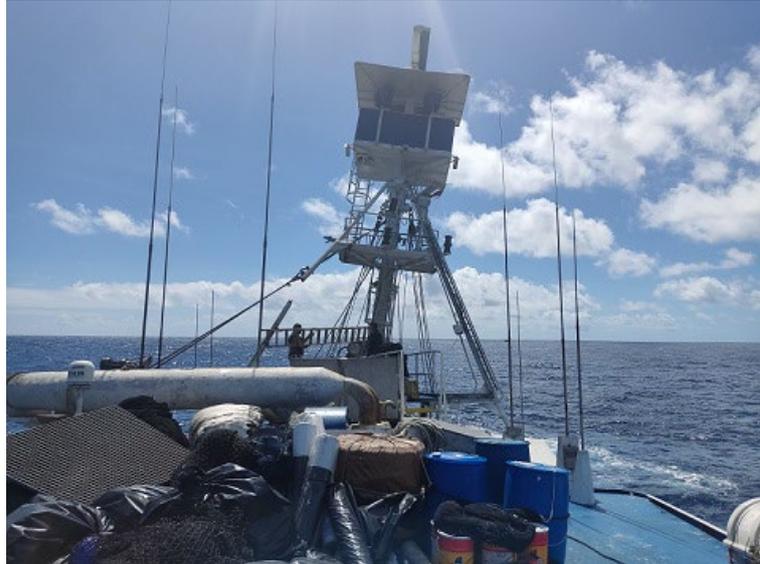


Figura A. 1 Colapso de mástil en el Rosa BP



Figura A. 2 Colapso de mástil en el Rosa BP vista de popa



UNITED STATES COAST GUARD
U.S. Department of Homeland Security

MARINE SAFETY ALERT

Inspections and Compliance Directorate

October 11, 2022
Washington D.C.

Safety Alert 10-22

MODIFICATIONS TO FISHING VESSEL LIFTING GEAR

A recent marine casualty resulting in a death and injury on board a commercial fishing vessel serves as a reminder of the dangers associated with modifying lifting gear on fishing vessels. Significant modifications to the main and auxiliary booms of a purse seine fishing vessel contributed to the catastrophic failure of the vessel's mast. Failures of masts, booms, and lift cables have frequently occurred on purse seine vessels resulting in loss of life and severe injuries. Over the years, numerous casualties have occurred onboard a variety of fishing vessel types due to modifications to lifting gear or changes in vessel operations (e.g., new fisheries). Significant alterations or repairs to a vessel's hull, boom, or towing points may adversely affect structural integrity and load bearing limits.



Figura A. 3 Alerta Guardia Costera Estadounidense

APÉNDICE B

Respuestas del mástil en diferentes condiciones

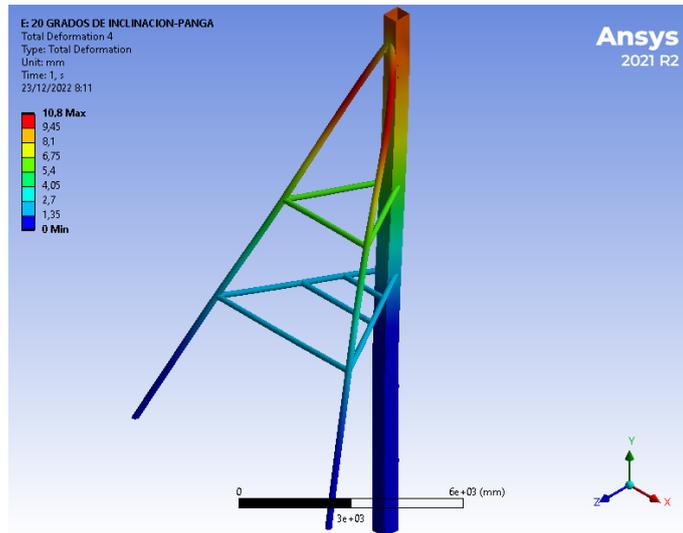


Figura B. 1 Respuesta de mástil en izamiento de panga con ángulo de 20 grados.

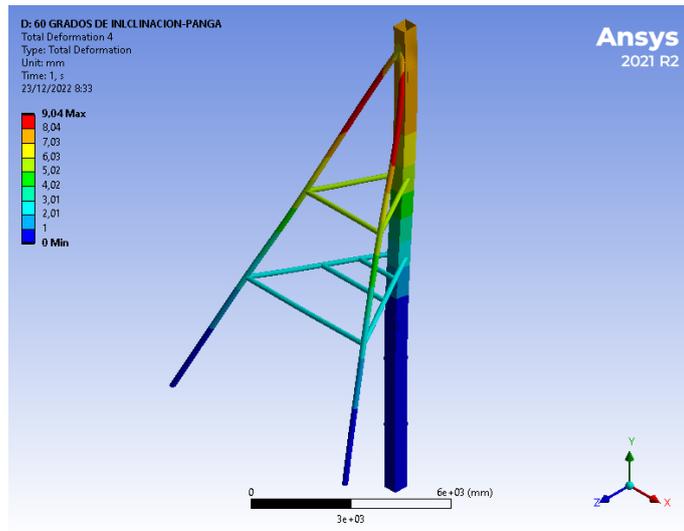


Figura B. 2 Respuesta de mástil en izamiento de panga con ángulo de 60 grados.

Tabla A. 1 Características y dimensiones de tubos de acero.

NOMINAL PIPE SIZE	OD	SCHEDULE DESIGNATIONS		WALL THICKNESS		WEIGHT		ID		
				INCH	MM	LBS/ FOOT	KG/ METER	INCH	MM	
16 400	16.000 406.4	10	10S	0.188	4.78	31.78	47.34	15.624	396.84	
				0.250	6.35	42.09	62.65	15.500	393.70	
		20		0.312	7.92	52.32	77.83	15.376	390.56	
				0.375	9.53	62.64	93.27	15.250	387.34	
		STD	30	40S	0.500	12.70	82.85	123.31	15.000	381.00
					0.656	16.66	107.60	160.13	14.688	373.08
		XS	40	80S	0.844	21.44	136.74	203.54	14.312	363.52
					1.031	26.19	164.98	245.57	13.938	354.02
		60			1.219	30.96	192.61	286.66	13.562	344.48
					1.438	36.53	223.85	333.21	13.124	333.34
		80			1.594	40.49	245.48	365.38	12.812	325.42
18 450	18.000 457	10	10S	0.188	4.78	35.80	53.31	17.624	447.44	
				0.250	6.35	47.44	70.57	17.500	444.30	
		20			0.312	7.92	58.99	87.71	17.376	441.16
					0.375	9.53	70.65	105.17	17.250	437.94
		STD	30	40S	0.438	11.13	82.23	122.38	17.124	434.74
					0.500	12.70	93.54	139.16	17.000	431.60
		XS	40	80S	0.562	14.27	104.76	155.81	16.876	428.46
					0.750	19.05	138.30	205.75	16.500	418.90
		60			0.938	23.83	171.08	254.57	16.124	409.34
					1.156	29.36	208.15	309.64	15.688	398.28
		80			1.375	34.93	244.37	363.58	15.250	387.14
					1.562	39.67	274.48	408.28	14.876	377.66
100			1.781	45.24	308.79	459.39	14.438	366.52		
20 500	20.000 508	10	10S	0.218	5.54	46.10	68.61	19.564	496.92	
				0.250	6.35	52.78	78.56	19.500	495.30	
		20			0.312	7.92	58.99	87.71	19.376	491.16
					0.375	9.53	70.65	105.17	19.250	488.94
		STD	30	40S	0.500	12.70	104.23	155.13	19.000	482.60
					0.594	15.09	123.23	183.43	18.812	477.82
		XS	40	80S	0.812	20.62	166.56	247.84	18.376	466.76
					1.031	26.19	209.06	311.19	17.938	455.62
		60			1.281	32.54	256.34	381.55	17.438	442.92
					1.500	38.10	296.65	441.52	17.000	431.80
		80			1.750	44.45	341.41	508.15	16.500	419.10
					1.969	50.01	379.53	564.85	16.062	407.98
22 550	22.000 559	10	10S	0.218	5.54	50.76	75.55	21.564	547.92	
				0.250	6.35	58.13	86.55	21.500	546.30	
		20			0.312	7.92	67.86	101.15	21.376	541.16
					0.375	9.53	80.69	120.14	21.250	539.94
		STD	30	40S	0.500	12.70	114.92	171.10	21.000	533.60
					0.875	22.23	197.60	294.27	20.250	514.54
		XS	40	80S	1.125	28.58	251.05	373.85	19.750	501.84
					1.375	34.93	303.16	451.45	19.250	489.14
		60			1.625	41.28	353.94	527.05	18.750	476.44
					1.875	47.63	403.38	600.67	18.250	463.74
		80			2.125	53.98	451.49	672.30	17.750	451.04

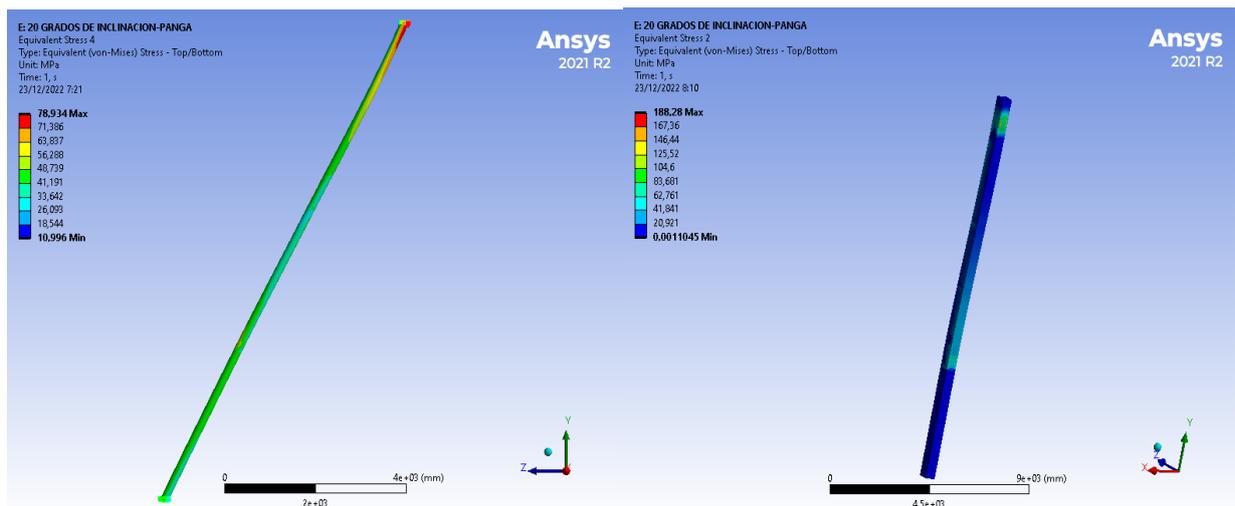


Figura 4.1 Resultados en el viento y mástil por levantamiento de panga a 20 grados .

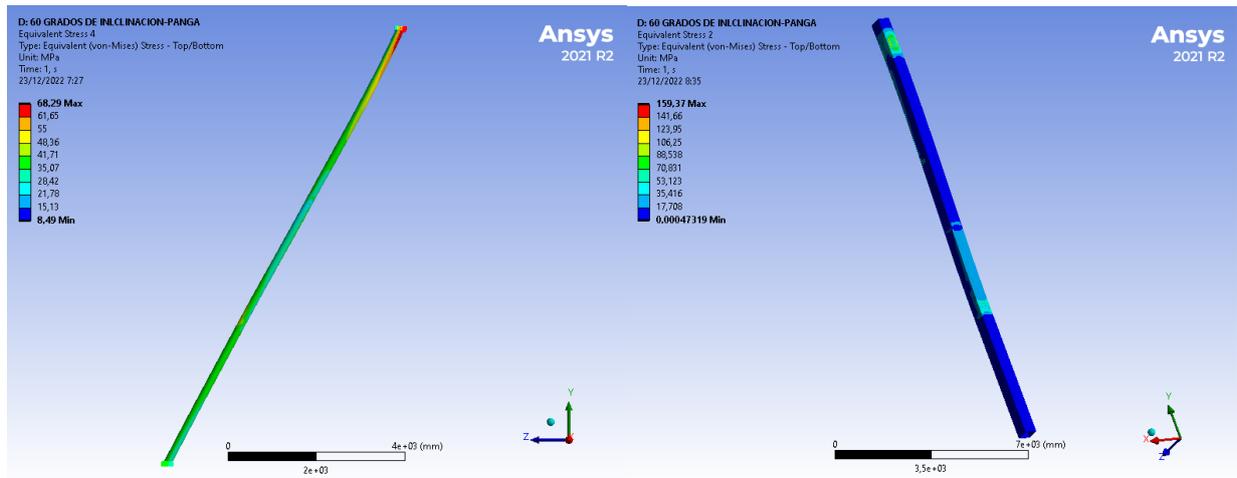


Figura 4.2 Resultados en el viento y mástil por levantamiento de panga a 60 grados.