



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO ESTRUCTURAL Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE ROLIDO PARA BUQUES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

BENALCÁZAR VACA SEBASTIAN ALEJANDRO
sebastian.benalcazar@epn.edu.ec

RIBADENEIRA PAZMIÑO BENITO ALEX
benito.ribadeneira@epn.edu.ec

DIRECTOR: GUACHAMIN ACERO WILSON IVÁN, PhD.
wilson.guachamin@epn.edu.ec

QUITO, Enero 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Sebastian Alejandro Benalcázar Vaca y Benito Alex Ribadeneira Pazmiño**, bajo mi supervisión.

Wilson Iván Guachamin Acero.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Benalcázar Vaca Sebastian Alejandro y Ribadeneira Pazmiño Benito Alex**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Benalcázar Vaca Sebastian Alejandro

Ribadeneira Pazmiño Benito Alex

DEDICATORIA

A mi madre Lourdes, quien es y será el pilar fundamental de mi vida.

Sebastian Benalcázar

A todas las personas que han estado durante mi carrera universitaria. A mis maestros, familia, amigos, novia, vecinos y a todos los tutores que brindan su conocimiento a través de páginas de libre acceso como Youtube.

Benito Ribadeneira

AGRADECIMIENTO

A nuestras familias, por su apoyo incondicional

A la Escuela Politécnica Nacional, por haber forjado nuestros caminos profesionales y
brindarnos una nueva visión del mundo.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica por transmitirnos su vasto
conocimiento y experiencia dentro y fuera de las aulas.

A nuestro maestro y amigo Wilson Guachamín, por guiarnos, motivarnos y siempre
brindarnos una mano amiga.

Sebastian Benalcázar y Benito Ribadeneira

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Alcance	3
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 Dinámica de buques	4
1.2 Efectos de cargas marinas sobre un buque	5
1.3 Parámetros operacionales convencionales de buques	7
1.4 Sistemas de compensación para rolido	8
1.5 Modelo numérico hidrodinámico	10
1.5.1 Caracterización de olas	10
1.5.2 Espectro de ruido blanco	11
1.5.3 Espectro tipo JONSWAP	12
1.5.4 Método en el dominio del tiempo.	13
1.5.5 Método en el dominio de la frecuencia.	14
1.6 Modelo numérico estructural	15
1.6.1 Consideraciones para diseño estático y trabajo a fatiga	15
1.6.2 Criterios para selección de materiales	16
1.6.3 Cargas hidrodinámicas	18
1.7 Análisis y diseño estructural	20
1.7.1 Diseño de puntos de izaje	20
1.7.2 Diseño de losas de concreto	25
1.7.3 Selección de vigas	28
1.7.4 Diseño de resortes planos rectos	30
1.7.5 Diseño de bisagras	32
1.8 Análisis de componentes a fatiga	35
1.8.1 Ciclos de flujos de lluvia para trabajo a fatiga	35
1.8.2 Daño acumulado por fatiga	36

1.9	Herramientas computacionales	37
1.9.1	Código para el análisis del modelo hidrodinámico	37
1.9.2	Software para el análisis del modelo estructural.....	37
2	METODOLOGÍA.....	39
2.1	Modelado del sistema	43
2.1.1	Diseño conceptual.....	43
2.1.2	Geometría del sistema acoplado	45
2.2	Método numérico para análisis hidrodinámico	47
2.2.1	Análisis en dominio del tiempo.....	47
2.2.2	Análisis en dominio de la frecuencia.....	48
2.3	Análisis de operabilidad	49
2.3.1	Operabilidad basada en resultados del dominio de tiempo	49
2.3.2	Operabilidad basada en resultados del dominio de la frecuencia.....	50
2.4	Método numérico estructural	51
2.4.1	Cargas hidrodinámicas	51
2.4.2	Análisis estructural estático.....	53
2.4.3	Análisis estructural a fatiga	59
3	Resultados y discusión.....	61
3.1	Simulación hidrodinámica	61
3.1.1	Evaluación de límites operacionales en función de H_s y T_p	61
3.1.2	Evaluación de funciones de transferencia	64
3.1.3	Respuestas dinámicas	67
3.2	Operabilidad	69
3.2.1	Resultados de la operabilidad para análisis en el dominio del tiempo....	69
3.2.2	Resultados de la operabilidad para análisis en el dominio de la frecuencia	70
3.2.3	Comparación de los resultados de operabilidad en dominio de tiempo y dominio de la frecuencia.....	72
3.3	Diseño estructural	74

3.3.1	Dimensionamiento estático y simulación FEM la oreja de izaje	75
3.3.2	Selección de cadenas y grilletes	75
3.3.3	Diseño de losas de concreto	77
3.3.4	Dimensionamiento estático y simulación FEM de la estructura principal	78
3.3.5	Dimensionamiento estático y simulación FEM del resorte	79
3.3.6	Dimensionamiento estático y simulación FEM de la bisagra	81
3.3.7	Diseño para trabajo a fatiga	83
3.4	Análisis de Factibilidad y costos	84
3.5	Caso de estudio para las costas ecuatorianas	86
4	CONCLUSIONES	90
5	RECOMENDACIONES	92
6	TRABAJO FUTURO	93
	Referencias Bibliográficas	94
	Anexos	99

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Grados de libertad de un buque en movimiento libre	4
Figura 2. Caracterización geométrica del centro de gravedad y metacentro de un buque convencional.....	5
Figura 3. Rolido de un buque bajo cargas de oleaje.	5
Figura 4. Choque de olas sobre la cubierta.....	6
Figura 5. Efecto del choque de olas en el casco del buque.	6
Figura 6. Golpeteo de líquidos en tanques de almacenamiento.	6
Figura 7. Momentos flectores y fuerzas cortantes.....	7
Figura 8. Tanques de compensación pasivos (izquierda) y activos (derecha).....	8
Figura 9. Aletas de compensación pasivas (izquierda) y activas (derecha).....	8
Figura 10. Sistema de compensación de flotación “Flopper Stopper”.....	9
Figura 11. Sistemas de compensación pasivo de rolido.	9
Figura 12. Parámetros característicos de una ola.	10
Figura 13. Serie de tiempo y espectro de una ola considerando $H_s = 6[m]$ y $T_p = 8[s]$	11
Figura 14. Comparación entre espectro de ruido blanco y espectro tipo JONSWAP. .	13
Figura 15. Representación esquemática de una curva S-N.....	17
Figura 16. Fuerzas que intervienen en la placa durante un ciclo de movimiento.....	18
Figura 17. Representación de una placa de compensación y un disco de Morrison. ..	19
Figura 18. Representación de un punto de izaje.....	21
Figura 19. Esquema de oreja de izaje.....	21
Figura 20. DCL de una oreja de izaje.....	22
Figura 21. Esquema de grillete.....	24
Figura 22. Esquema de una losa de concreto.....	25
Figura 23. DCL de la losa.....	27
Figura 24. Especificaciones de vigas tipo W.....	28
Figura 25. Ejemplo de resorte plano recto (trampolín de piscina)	30
Figura 26. Esquema del DCL de un resorte plano recto.	30
Figura 27. Esquema de bisagra.....	33
Figura 28. DCL de un pasador con 5 áreas de corte.....	33
Figura 29. Descripción del método Rainflow.	35
Figura 30. Metodología.....	40
Figura 31. Metodología del modelo numérico hidrodinámico.....	41
Figura 32. Metodología del modelo numérico estructural.....	42

Figura 33. Principio de funcionamiento del sistema de compensación pasivo de rolido	43
Figura 34. Diseño conceptual de la placa compensadora de rolido.	44
Figura 35. Comportamiento de las placas centrales como resortes durante los diferentes movimientos del sistema.	44
Figura 36. Esquema del buque utilizado	46
Figura 37. Configuraciones de dos y cuatro placas de la Tabla 4	46
Figura 38. Fracción de la serie de tiempo del rolido del buque para $H_s = 3.5[m]$ y $T_p = 8s$	47
Figura 39. Esquema del espectro de ruido blanco utilizado.	48
Figura 40. Diagrama explicativo de la operabilidad en el dominio del tiempo.	50
Figura 41. Representación esquemática de una comparación de respuesta de rolido con el límite operacional para hallar la zona de operabilidad.....	50
Figura 42. Diagrama S-N para el acero ASTM A572 GR50.	51
Figura 43. Relación entre CD y KC para una placa rectangular perforada, sometida a oscilaciones forzadas.	52
Figura 44. Distribución de elementos críticos de la placa de compensación.	53
Figura 45. DCL simplificado de la viga 1.	54
Figura 46. DCL simplificado de la viga 2.	55
Figura 47. DCL simplificado de la viga 3.	55
Figura 48. Relación de T_y con $R3$	57
Figura 49. Bisagra utilizada.	58
Figura 50. Metodología para el cálculo del daño por fatiga.....	60
Figura 51. Límites operacionales H_s , T_p para configuraciones de 2 placas (izquierda) y 4 placas (derecha) con un ángulo de incidencia de las olas de 45°	62
Figura 52. Límites operacionales H_s , T_p para configuraciones de 2 placas (izquierda) y 4 placas (derecha) con un ángulo de incidencia de las olas de 90°	63
Figura 53. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 0°	64
Figura 54. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 30°	64
Figura 55. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 60°	65
Figura 56. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 90°	65

Figura 57. Relación entre los 360° de incidencia de las olas y la función de transferencia de la configuración Tipo 3.....	66
Figura 58. Operabilidad en el dominio del tiempo considerando un ángulo de incidencia de las olas de 45° y un rolido máximo de 0.5°, 1° y 2°.....	69
Figura 59. Operabilidad en el dominio del tiempo considerando un ángulo de incidencia de las olas de 90° y un rolido máximo de 0.5°, 1° y 2°.....	70
Figura 60. Operabilidad mensual acumulada.....	71
Figura 61. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolido de 2° y el promedio de operabilidad del mes de Julio respectivamente.....	72
Figura 62. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolido de 2° y la máxima operabilidad del mes de Julio respectivamente.....	73
Figura 63. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolido de 2° y la menor operabilidad del mes de Julio respectivamente.....	73
Figura 64. Factor de seguridad de la oreja.....	75
Figura 65. Geometría de la eslinga.....	76
Figura 66. Representación de la estructura interna de las losas de concreto.....	78
Figura 67. Factor de seguridad de la estructura principal.....	79
Figura 68. Deformación máxima del resorte.....	80
Figura 69. Factor de seguridad del resorte.....	81
Figura 70. Factor de seguridad del ensamble de la bisagra completa.....	82
Figura 71. Factor de seguridad del pasador.....	82
Figura 72. Factor de seguridad del ensamble del pasador, la argolla y la placa de sujeción.....	83
Figura 73. Relación entre el rolido de las configuraciones de 4 placas con una incidencia de las olas de 90° y las condiciones oceanográficas del Ecuador.....	88
Figura 74. Relación entre el rolido de las configuraciones de 2 placas con una incidencia de las olas de 90° y las condiciones oceanográficas del Ecuador.....	89
Figura 75. Relación entre el límite de rolido de 2° y 3° con la configuración Tipo 3 y un ángulo de incidencia de las olas de 90°.....	89

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Extracto del Scatter Diagram del Atlántico norte.	14
Tabla 2. Factores de reducción de resistencia.	16
Tabla 3. Espesor mínimo de vigas no pre-esforzadas o losas en una dirección.....	26
Tabla 4. Detalle de placas del sistema de compensación.....	45
Tabla 5. Parámetros principales del buque de carga.	46
Tabla 6. Resumen de reacciones, momentos y esfuerzos máximos de las vigas 1,2,3 presentadas en las Figura 45, Figura 46 y Figura 47 respectivamente.....	56
Tabla 7. Curvas de H_s y T_p admisibles para un ángulo máximo de rolo del buque de 2° sin sistema de compensación con un ángulo de incidencia de las olas de 45°	62
Tabla 8. Relación entre la tensión máxima y mínima al variar el peso sumergido de la configuración Tipo 3.	67
Tabla 9. Variación del rolo en función de la rigidez en los cables del sistema de izaje y el paso del tiempo en las simulaciones.	68
Tabla 10. Valores máximos de la tensión y mínimos de la fuerza inercial para todas las combinaciones de H_s y T_p con un rolo límite de 2°	68
Tabla 11. Dimensionamiento de la oreja	75
Tabla 12. Carga máxima de las eslingas.....	76
Tabla 13. Datos técnicos de las cadenas seleccionadas	77
Tabla 14. Dimensionamiento de las losas de concreto	77
Tabla 15. Análisis y diseño de la estructura principal.....	78
Tabla 16. Dimensionamiento del resorte.	80
Tabla 17. Dimensionamiento de la bisagra.	81
Tabla 18. Resumen de resultados del análisis a fatiga.	83
Tabla 19. Porcentaje de daño considerando el registro del diagrama de dispersión del Atlántico Norte.	84
Tabla 20. Resumen de costos del sistema de compensación.....	85
Tabla 21. Comparación de los costos asociados a la implementación del sistema.	86
Tabla 22. Promedio mensual de H_s en las costas ecuatorianas, durante el periodo de observación 1991-2015	87
Tabla 23. Condiciones de ola frente al borde costero continental.....	87
Tabla 24. Descripción de los estados de mar.....	88
Tabla 25. Cantidad de soldadura por componente del sistema de compensación.	128
Tabla 26. Rubro 1.....	128
Tabla 27. Rubro 2.....	129
Tabla 28. Rubro 3.....	130

Tabla 29. Rubro 4.....	131
Tabla 30. Rubro 5.....	132
Tabla 31. Rubro 6.....	133
Tabla 32. Rubro 7.....	134

RESUMEN

El presente proyecto de titulación desarrolla una metodología para el análisis dinámico y diseño estructural de un sistema de compensación pasivo de rolido para buques, empleando el código del estado del arte en ANSYS-AQWA para la simulación hidrodinámica y el software MATLAB para el diseño estructural por fatiga estocástica. El caso de estudio contempla un buque de 5000 toneladas en reposo, al que se acoplan distintas configuraciones del sistema de compensación. Este sistema está conformado por perfiles de acero, losas de concreto y un sistema de resortes planos para aumentar la estabilidad dinámica. Inicialmente, se realiza un diseño conceptual sobre el cual se ejecutan simulaciones hidrodinámicas en el dominio del tiempo y la frecuencia en ANSYS-AQWA para obtener parámetros de respuesta como tensiones y fuerzas hidrodinámicas, necesarias para un análisis de operabilidad. Seguido de ello, estos parámetros de respuesta se utilizan para el diseño estático en ANSYS-STRUCTURAL y a fatiga en MATLAB para optimizar la geometría y los materiales utilizados en el diseño conceptual. Finalmente, se analiza el sistema optimizado en una operación marina potencial para las costas ecuatorianas.

Palabras clave: Sistema de compensación, rolido, simulación hidrodinámica, simulación estructural, operabilidad, análisis a fatiga.

ABSTRACT

This project develops a methodology for dynamic analysis and structural design of a passive roll compensation system for ships using the state of the art code ANSYS-AQWA for hydrodynamic simulation and MATLAB software for stochastic fatigue structural design. The case study contemplates a 5000-ton resting ship, to which different configurations of the compensation system are coupled. This system is made up of steel beams, reinforced concrete plates and a spring system to increase dynamic stability. Initially, a conceptual design is carried out, on which hydrodynamic simulations are run using time and frequency domain methods in ANSYS-AQWA to obtain response parameters such as tensions and hydrodynamic forces, which are necessary for the operability analysis. Following this, these response parameters are used for static design in ANSYS-STRUCTURAL and fatigue in a MATLAB toolbox to optimize the geometry and materials used in the conceptual design. Finally, the performance of the optimized system is assessed for a potential marine operation for the Ecuadorian coasts.

Keywords: Compensation system, roll, hydrodynamic simulation, structural simulation, operability, fatigue analysis.

ANÁLISIS DINÁMICO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE ROLIDO PARA BUQUES

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de actividades en altamar requiere de la planeación y ejecución de operaciones marinas considerablemente complejas, esta es la razón por lo cual se hace uso estricto de normativas y códigos para desempeñarlas. Las operaciones marinas se ven directamente influenciadas por parámetros medioambientales y otros factores de la zona donde se realizan las actividades, condicionando el comportamiento dinámico de una estructura marina (Li, Guachamín Acero, Gao, & Moan, 2016).

Modelar el comportamiento dinámico de una estructura marina es vital para la obtención de su respuesta dinámica y operabilidad. Normativas internacionales como "Det Norske Veritas" (DNV) y estudios realizados por grupos de investigación alrededor del mundo concuerdan en que un procedimiento sistemático para determinar límites operacionales se basa en el estudio de las respuestas dinámicas bajo diversas condiciones de mar. Estas a su vez se fundamentan en formulaciones de espectros paramétricos de energía de olas que aportan un método simple e ideal para representar su comportamiento (Li, Guachamín Acero, Gao, & Moan, 2016) (Det Norske Veritas, 2011)

El conocer el comportamiento de las olas, las respuestas dinámicas de un buque y sus límites operacionales para una operación marina no reduce la probabilidad de producirse una catástrofe o un daño estructural considerable. Para aumentar la confiabilidad y la seguridad se puede utilizar dispositivos externos de compensación de movimiento. Estos equipos son bastante variados y pueden influir de manera activa o pasiva sobre la dinámica del sistema marino (Kula, 2015).

Las investigaciones que contemplan una estructura marina que acopla un sistema de compensación activo o pasivo de manera industrial son bastante escasas. Normalmente se aplican en barcos pequeños y veleros deportivos. Desde un punto de vista holístico, el análisis posee una gran dificultad y se ha estudiado de manera teórica en instalaciones de turbinas eólicas utilizando plataformas elevables y placas de compensación "Flopper Stopper" y en análisis paramétricos de sistemas de compensación utilizando simulaciones hidrodinámicas (Jiang, Guachamin Acero, Gao, & Li, 2017) (Gordon, 2021).

En una actividad industrial, los intereses económicos son primordiales, y el uso de un sistema de compensación pasivo podría reducir de manera significativa los costos

operativos, comparados con los altos costos de un sistema de compensación activo. Para ello es necesario realizar una metodología de diseño adecuada que proporcione información para evaluar la factibilidad técnica y económica de una propuesta.

En el Ecuador, las operaciones marinas en sus costas se desarrollan en base a conocimientos empíricos salvo actividades portuarias y militares específicas. Generalmente no se considera ni evalúa actividades críticas ni límites operacionales con la rigurosidad que normas internacionales exigen. Una consecuencia de esto es el reporte de accidentes de embarcaciones que afectan a la seguridad y bienestar de tripulantes, flora y fauna del sector (Delgado Toala, 2007).

Considerando que casi la totalidad del comercio del Ecuador se realiza por mar, es vital disponer de estructuras marinas capaces de ofrecer seguridad en potenciales aplicaciones como recuperación de barcos siniestrados, mantenimiento de bahías de puertos, instalación de plataformas de explotación de hidrocarburos, parques eólicos, entre otros (COMEX, 2013).

Bajo estas premisas, el proyecto pretende desarrollar una metodología para el análisis dinámico y diseño estructural de un sistema de compensación de rolido para un buque utilizado en actividades de construcción y mantenimiento de infraestructuras marinas.

Objetivo general

Diseñar estructuralmente y simular dinámicamente un sistema de compensación de rolo para buques.

Objetivos específicos

- Obtener parámetros de diseño en base a una revisión bibliográfica de literatura científica y de ingeniería.
- Establecer una metodología que permita realizar el diseño estructural de un sistema de compensación de rolo.
- Realizar modelos numéricos del buque con sistemas de compensación pasivos de rolo.
- Optimizar la cantidad y las dimensiones de los sistemas de compensación pasivos.
- Dimensionar estructuralmente el sistema seleccionado y optimizado en base a los resultados obtenidos de las simulaciones dinámicas.
- Divulgar los resultados a través de una publicación científica.

Alcance

Desarrollar la metodología para el diseño estructural y la simulación dinámica de un sistema de compensación pasivo de rolo para buques de mediano y gran calado en reposo, sirviendo como base preliminar y aproximada para el diseño mecánico y determinación de la factibilidad técnica y económica de la aplicación del sistema. Además, se analiza la implementación en una potencial aplicación en las costas ecuatorianas bajo condiciones oceanográficas locales.

Este estudio amplía las ideas expuestas por J. Gordón (2021), donde se ejecuta un estudio preliminar de un sistema de compensación pasivo mediante simulaciones hidrodinámicas en el dominio del tiempo.

1 MARCO TEÓRICO

El marco teórico relacionado al proyecto es necesario para el desarrollo de una metodología para el diseño e implementación de un sistema de compensación pasivo para rolido empleando herramientas computacionales de ingeniería. El proceso comienza con una revisión de bibliografía, la cual engloba los conceptos fundamentales de operaciones marinas.

1.1 Dinámica de buques

La descripción del comportamiento dinámico de un buque se caracteriza definiendo sus grados de libertad.

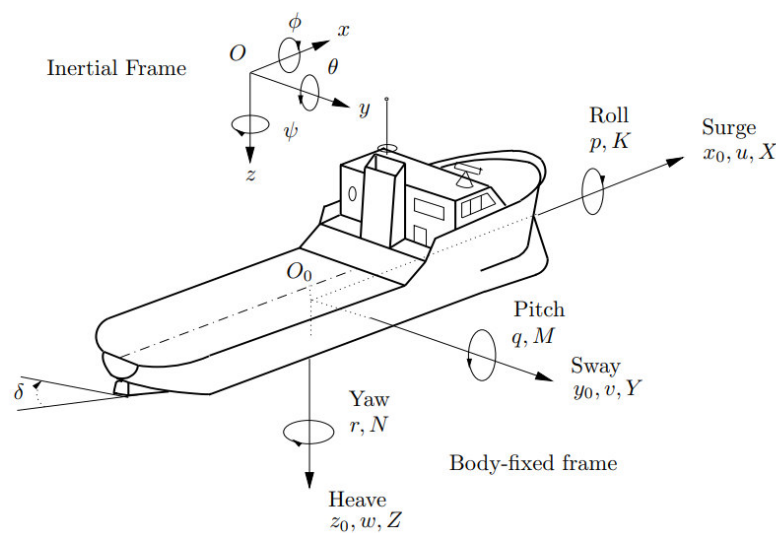


Figura 1. Grados de libertad de un buque en movimiento libre

(Pérez & Blanke, 2002)

La Figura 1 muestra los seis posibles grados de libertad de un buque en movimiento libre, de los cuales, se hará énfasis en el rolido o “Roll”. Este representa la rotación cíclica al rededor el eje longitudinal del barco y además es la causa principal de la inestabilidad, la falta de confort y el riesgo de volcamiento. El movimiento oscilatorio de rolido se ve influenciado por las cargas marinas a las que se somete el buque y a la geometría del mismo.

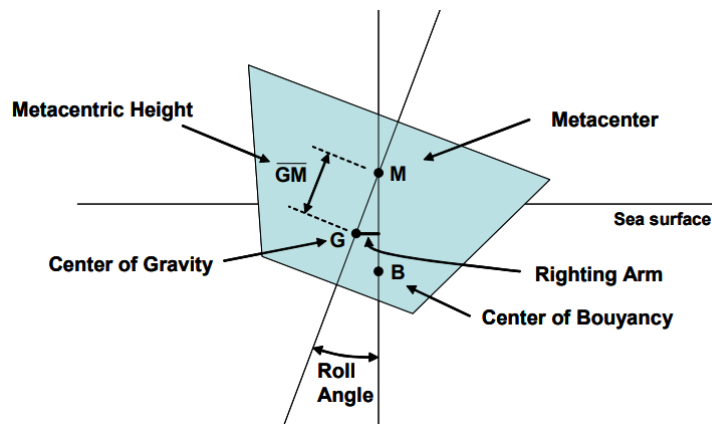


Figura 2. Caracterización geométrica del centro de gravedad y metacentro de un buque convencional.

(Doerry, 2008)

La Figura 2 especifica la ubicación habitual de los puntos geométricos de interés en un buque convencional. Entre estos parámetros, la altura metacéntrica (GM) es un parámetro fundamental en la estabilidad de un buque. Este parámetro debe ser positivo para evitar volcamiento y sirve para determinar la frecuencia natural de rolido.

1.2 Efectos de cargas marinas sobre un buque

El desarrollo de actividades en el mar induce una variedad de cargas marinas que afectan en diversas escalas al comportamiento dinámico de los navíos.

Aceleraciones verticales y movimientos relativos entre el buque y las olas:

Responsables de generar las respuestas que afectan la carga útil y al equipo a bordo, además de ser la principal causa del mareo en los tripulantes, ver Figura 3.



Figura 3. Rolido de un buque bajo cargas de oleaje.

(Faltinsen, 1990)

Choque de olas en el casco: Son las responsables de dañar las estructuras del buque, generando en ellas fatiga y daños locales, llegando a afectar incluso a la cubierta e instalaciones por el acumulamiento de agua, ver Figura 4.



Figura 4. Choque de olas sobre la cubierta.

(Faltinsen, 1990)

Efecto del rompimiento de olas: Son las responsables de producir volcaduras en buques de menor tamaño al afectar directamente a su estabilidad, ver Figura 5.



Figura 5. Efecto del choque de olas en el casco del buque.

(Faltinsen, 1990)

Golpeteo de líquidos dentro de tanques de almacenamiento: Este tipo de cargas posee especial relevancia en buques encargados de transportar carga en estado líquido. Esto puede provocar una gran presión local en sus contenedores, provocando comportamientos inestables en el buque, ver Figura 6.

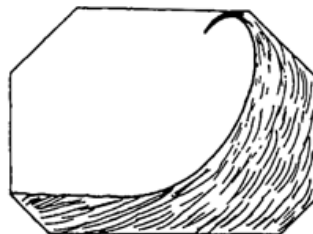


Figura 6. Golpeteo de líquidos en tanques de almacenamiento.

(Faltinsen, 1990)

Momentos flectores, torsores y fuerzas cortantes: En buques de gran envergadura estas cargas pueden llegar a provocar saltos y latigazos como una respuesta elástica a la interacción con las olas en el casco, ver Figura 7.

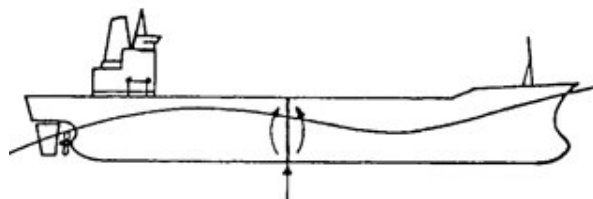


Figura 7. Momentos flectores y fuerzas cortantes.

(Faltinsen, 1990)

Para recrear y simular de manera precisa todos estos efectos en conjunto se caracterizan las condiciones ambientales a través de los parámetros oceanográficos y meteorológicos que consideran la direccionalidad de las olas, el viento y la corriente.

1.3 Parámetros operacionales convencionales de buques

Una operación marina se entiende como un término genérico que abarca las actividades desarrolladas en un ambiente marino bajo la influencia de diversos parámetros medioambientales (Noble Denton, 2015).

Los parámetros operacionales de un buque no son más que condiciones marinas y ambientales permisibles para el desempeño óptimo del mismo. El término operabilidad que será tratado en este y futuros capítulos se refiere al porcentaje de tiempo en que una estructura marina se encuentra en sus condiciones óptimas de operación para ejecutar un trabajo. Donde, si se habla de un 100% de operabilidad anual, la estructura marina o buque podrá trabajar sin problemas los 365 días del año y así proporcionalmente. Para garantizar la ejecución segura de una operación marítima, los límites operacionales establecen datos máximos de condiciones ambientales como: magnitud y dirección del viento, altura y periodo de ola, entre otros (ISO, 2020).

Acorde a lo establecido por el manual DNV-OS-H101 (2011), los criterios operacionales para el planeamiento y ejecución de operaciones marinas más relevantes son la altura significativa de las olas (H_s) y su periodo pico (T_p). Estas variables se pueden asociar a un parámetro limitador (S_c) y a un parámetro de comparación que define el límite operacional permitido (R_{allow}) (Guachamin Acero W. I., 2016).

$$S_c(H_s, T_p) \leq R_{allow} \quad (1)$$

1.4 Sistemas de compensación para rolido

En el diseño de un buque se busca el menor movimiento a bordo mientras es sometido a todo el conjunto de cargas marinas. Esto requiere de un óptimo diseño estructural del buque, una balanceada distribución de cargas y, para ciertos casos, un sistema de compensación ya sea activo o pasivo.

Un sistema de compensación pasivo es aquel que no requiere de un suministro de energía ni de un control para su funcionamiento. Es decir, es independiente y trabaja por su propia cuenta. Mientras que un sistema de compensación activo induce movimientos de masas o superficies de control, requiere bombas, energía, y sistemas de control electrónicos, ver Figura 8 y Figura 9 (Kula, 2015).

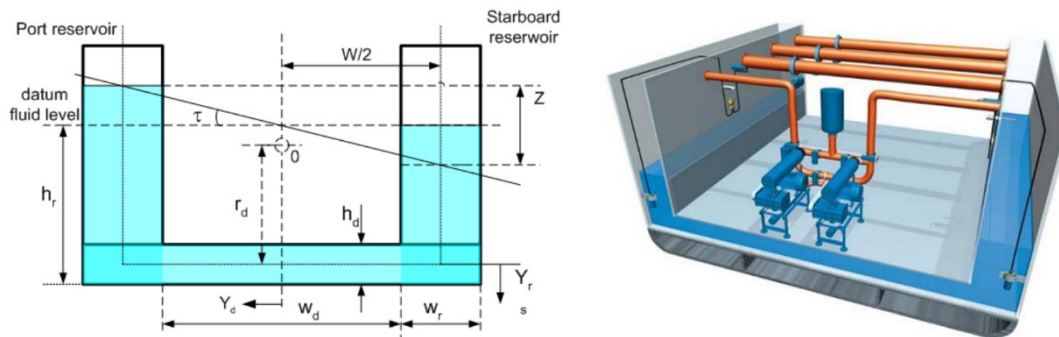


Figura 8. Tanques de compensación pasivos (izquierda) y activos (derecha)

(Kula, 2015)

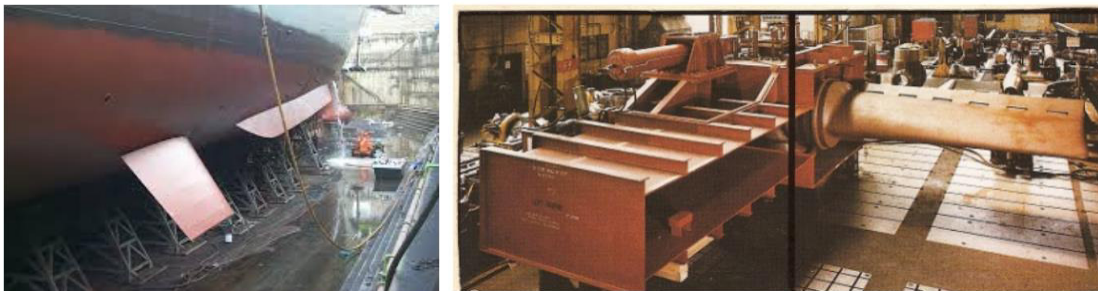


Figura 9. Aletas de compensación pasivas (izquierda) y activas (derecha)

(García, 2021) (Kula, 2015)

Entre las principales ventajas de un sistema de compensación pasiva destacan: bajo costo de producción y mantenimiento, facilidad en su instalación y alta durabilidad. Mientras que los sistemas activos ofrecen: una alta eficiencia y un mejor manejo del control del sistema, aunque su costo es elevado. En aplicaciones industriales a gran escala, la información sobre sistemas de compensación pasivo para rolido es casi

inexistente, limitándose únicamente a compensadores dinámicos y estudios teóricos (Jiang, Guachamin Acero, Gao, & Li, 2017). Según Li y otros (2016) el sistema de compensación de rolido en buques de gran calaje debe mejorar las condiciones de operación, incrementar la ejecución de tareas a bordo, reducir los riesgos de volcadura, aumentar el confort y su instalación debe ser sencilla.

Existen varios ejemplos de placas compensadoras como los conocidos “Flopper Stopper”, dispositivos sencillos pero robustos que no son más que planchas forradas de válvulas de plástico elaboradas artesanalmente para reducir el rolido de los veleros deportivos o naves pequeñas, ver Figura 10 (Dashew S & Dashew L, 2001).



Figura 10. Sistema de compensación de flotación “Flopper Stopper”.

(Dashew S & Dashew L, 2001)

Además, existe una variedad de opciones que cumplen con su función y mantienen el mismo principio como las mostradas en la Figura 11.

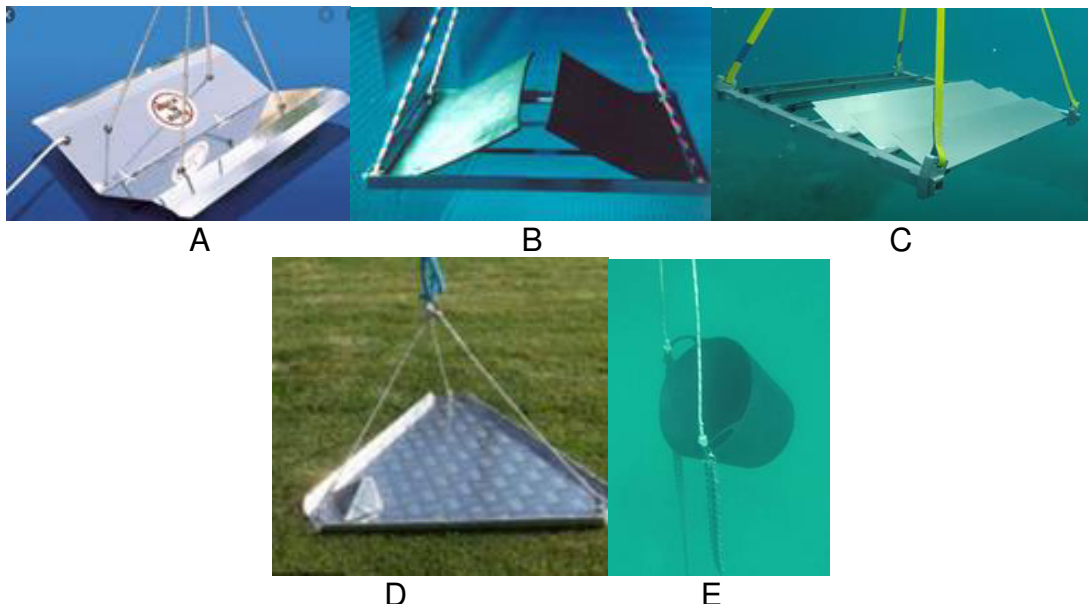


Figura 11. Sistemas de compensación pasivo de rolido.

A (Magma Products, 2021); C (The everlasting FlopStopper, 2021);

B,D (Boats-From, 2021); E (Steve Neal, 2021)

1.5 Modelo numérico hidrodinámico

El desarrollo de un modelo hidrodinámico coherente a las condiciones oceanográficas en las que se encuentra un sistema de compensación de características similares a las mostradas en la Figura 10 y Figura 11, requiere de un estudio holístico de todo el sistema. Este modelo debe considerar un sistema acoplado de múltiples cuerpos rígidos, cuyas respuestas dinámicas se determinan resolviendo ecuaciones de movimiento en el dominio del tiempo y la frecuencia. El dominio de la frecuencia se caracteriza por aplicarse a sistemas no lineales y procesos estacionarios. Por el contrario, en casos donde el sistema se desarrolle de manera no estacionaria sobre sistemas no lineales, deberá ejecutarse el análisis en el dominio del tiempo (Guachamin Acero W. I., 2016).

1.5.1 Caracterización de olas

Para desarrollar de manera completa los análisis del modelo numérico es necesario definir de manera precisa el comportamiento de las olas en tiempo y espacio. La superficie de una ola se desenvuelve en un plano bidimensional que varía en el tiempo, del cual se extraen e identifican definiciones operacionales y naturales de una ola individual como se muestra en la Figura 12 (Brodtkorb, y otros, 2000).

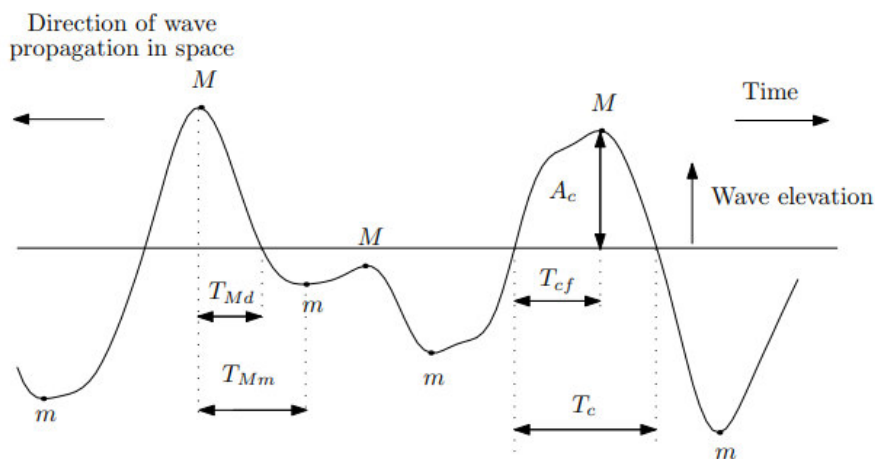


Figura 12. Parámetros característicos de una ola.

(Brodtkorb, 2004)

Donde:

A_c es la amplitud de la ola

T_c representa el periodo de la cresta

T_{cf} es el periodo mayor de una cresta irregular

M y m son los máximos y mínimos entre cresta y valle respectivamente

T_{Mn} y T_{Md} denotan al periodo entre un máximo, un mínimo y entre un máximo y el cruce del punto medio de la ola

Un estado de mar habitual se caracteriza por medio de la altura de las olas que se producen en un intervalo de tiempo. Al aplicarse la transformada de Fourier (FT) sobre estos datos se obtiene el espectro de frecuencias o espectro de energía que actúa directamente sobre el barco. Si se integra este espectro, se obtiene el primer momento espectral o varianza (m_0) correspondiente al área bajo la curva del espectro a lo largo de una banda de frecuencias definida como se muestra en la Ecuación (2), ver Figura 13 (Brodtkorb, y otros, 2000).

$$m_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{\phi} d\omega \quad (2)$$

Al extraer la raíz cuadrada del primer momento espectral se encuentra la desviación estándar (σ) del espectro. El valor de σ representa el valor de la media cuadrática o desviación estándar (rms).

$$\sqrt{m_0} = rms \quad (3)$$

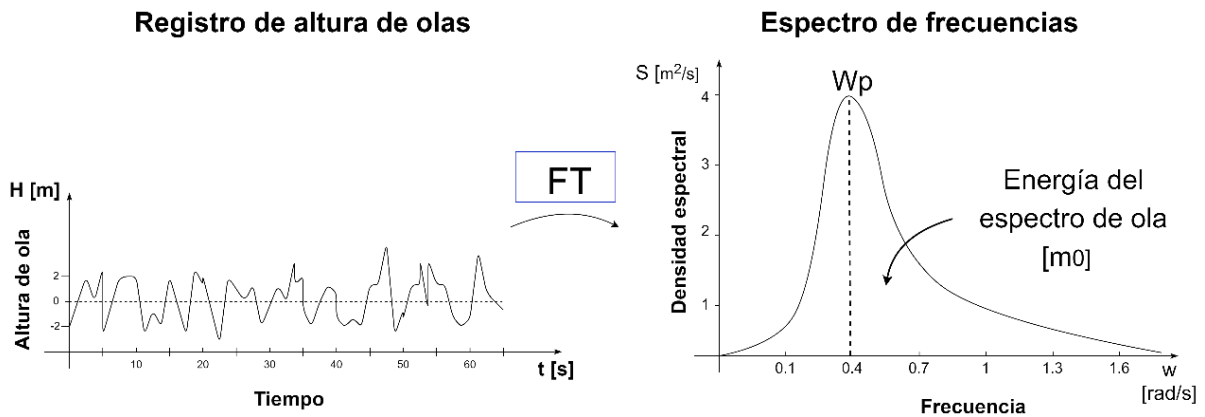


Figura 13. Serie de tiempo y espectro de una ola considerando $H_s = 6[m]$ y $T_p = 8[s]$.

(Propio)

1.5.2 Espectro de ruido blanco

El ruido blanco (WN) es una señal de valores aleatorios, sin relación en el tiempo, por lo que posee una densidad espectral constante (Howard, 2015) (Pishri-Nik, 2016).

En simulaciones marinas, un espectro de olas de ruido blanco o “White noise wave spectrum” es un espectro de energía de olas constante, el cual es utilizado principalmente para excitar al buque con la misma intensidad en todas las bandas de

frecuencia dentro de sus límites establecidos, como se muestra en la Figura 14. Al excitar con la misma energía todos los modos de vibración de un sistema se facilita el análisis y la identificación de frecuencias naturales.

Para definir completamente este espectro se necesita el nivel de energía que corresponde a una altura de ola significativa o su correspondiente momento espectral, ver Ecuación (2), acorde a la forma rectangular del espectro mostrado en la parte izquierda de la Figura 14 a través de la Ecuación (4). Además, se delimita la banda de frecuencias donde trabaja el espectro de ruido blanco ($\omega_1 \rightarrow \omega_2$).

$$m_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{\phi} d\omega = a * (\omega_2 - \omega_1) \quad (4)$$

La varianza m_0 se relaciona con la altura significativa de las olas H_s como se muestra en la Ecuación (5). En esta ecuación, H_s corresponde a un valor dentro de los posibles valores que puede tomar del diagrama de dispersión mostrado en la Tabla 1.

$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} \quad (5)$$

Al reemplazar la Ecuación (4) en la (5) se obtiene H_s en función de los parámetros característicos del espectro, como se muestra en la Ecuación (6).

$$H_s = 4 * \sqrt{a * (\omega_2 - \omega_1)} \quad (6)$$

1.5.3 Espectro tipo JONSWAP

El espectro de ola tipo JONSWAP (JOint North Sea WAve Project), a diferencia del ruido blanco, es el resultado de un proyecto multinacional para caracterizar de manera estandarizada espectros de ola del Mar de Norte, ver Figura 14 (Brodtkorb, y otros, 2000). El espectro tipo JONSWAP es descrito por la siguiente ecuación:

$$S^+(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^M} \exp\left(-\frac{M}{N} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^N\right) \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega/\omega_p - 1)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (7)$$

Donde:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{si } \omega < \omega_p \\ 0.09 & \text{si } \omega > \omega_p \end{cases}$$

$$M = 5, N = 4$$

$$\alpha \cong 5.061 \frac{H_{m0}^2}{T_p^4} \{1 - 0.287 \ln(\gamma)\}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7 \text{ con un valor recomendado de } 3.3$$

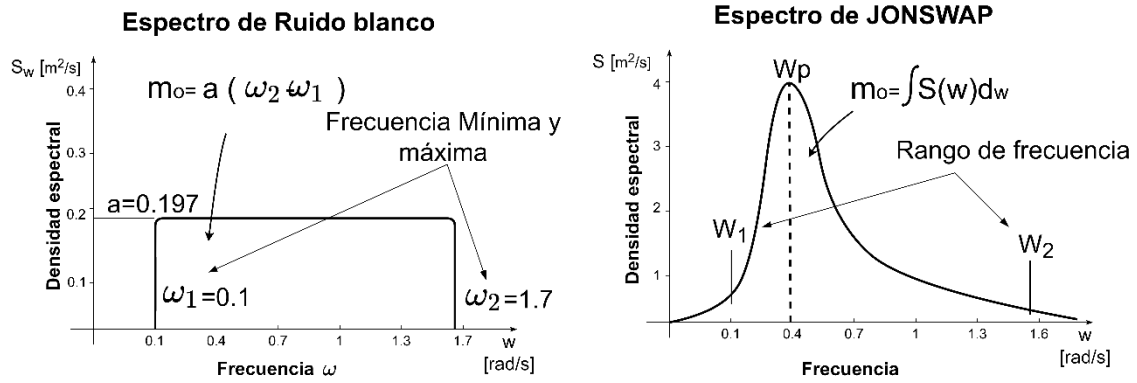


Figura 14. Comparación entre espectro de ruido blanco y espectro tipo JONSWAP.

(Propio)

1.5.4 Método en el dominio del tiempo.

El comportamiento dinámico de un sistema acoplado en el dominio del tiempo puede caracterizarse a través de la siguiente ecuación.

$$[M + A^\infty]\ddot{x}(t) + \int_0^t h(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + Kx(t) = F^{ext}(x, \dot{x}, t) \quad (8)$$

Donde:

M es la masa equivalente del sistema

A^∞ representa a la masa añadida de frecuencia infinita

h es la función de retardación, la cual agrupa la masa añadida y los coeficientes de amortiguamiento del sistema

K es la matriz de rigidez

F^{ext} son las fuerzas externas que actúan sobre el sistema donde se incluyen las fuerzas de las olas y fuerzas de acoplamiento

Los términos de la Ecuación (8) son matrices y vectores para los 6 grados de libertad del buque y esta utiliza diversos datos de entrada, entre ellas, la fuerza de oleaje, representada por medio de las combinaciones admisibles de H_s y T_p con un espectro de frecuencia tipo JONSWAP. Estos espectros son convertidos en series de tiempo a través de la transformada inversa de Fourier y luego convertidos en presión hidrodinámica en el modelo numérico de un cuerpo flotante. Estas combinaciones se obtienen en base a los valores más representativos de un diagrama de dispersión o “scatter diagram” como el obtenido para el Atlántico norte (ver Tabla 1) del manual

“Environmental conditions and environmental loads” (Det Norske Veritas, 2014). (Guachamin Acero, Gao, & Moan, 2017).

Para el estudio del comportamiento dinámico de placas estabilizadoras como se muestran en la Figura 10 y Figura 11, se utiliza la misma Ecuación (8), solo que, en el término de fuerzas externas (F^{ext}) se incluye la fuerza de arrastre (F_d).

Tabla 1. Extracto del Scatter Diagram del Atlántico norte.

(Det Norske Veritas, 2014).

H_s [m]	T_p [s]											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5	10,8	105,3	499,7	934,3	1163,1	831,3	474,2	175,6	68,9	21,3	4,5	1,0
1,5	2,1	23,0	507,7	1841,0	4691,0	6751,6	6963,6	5341,6	3060,1	1539,6	587,2	199,5
2,5	0,2	1,7	99,9	617,8	2018,7	4776,0	6665,5	7264,6	5415,2	3463,2	1761,4	746,0
3,5	0,0	0,0	17,5	176,5	648,3	2322,6	4101,0	5633,9	5222,5	3968,6	2468,6	1237,2

1.5.5 Método en el dominio de la frecuencia.

Dentro del dominio de la frecuencia se define el comportamiento dinámico de un cuerpo rígido al aplicarse la siguiente ecuación:

$$-\omega^2[M + A(\omega)]X(\omega) + i\omega B(\omega)X(\omega) + KX(\omega) = F^{ext}(\omega) \quad (9)$$

En esta ecuación se encuentran términos semejantes a la Ecuación (8) del dominio del tiempo, donde encontramos la matriz de masas equivalente M , la matriz de rigidez K y las fuerzas externas que actúan sobre el sistema F^{ext} . Además, se añade la matriz de masas añadidas (A) y coeficientes de amortiguamiento (B) (Guachamin Acero, Gao, & Moan, 2017).

Este método requiere que la Ecuación (9) sea lineal para obtener las funciones de transferencia. Cuando se utiliza un espectro de ruido blanco en un sistema no lineal, el espectro de ola se utiliza en conjunto con las funciones de transferencia o "response amplitude operators" (RAOs), para generar el espectro de rizado del buque (S_ϕ). Si a este espectro se lo relaciona nuevamente con un espectro de ruido blanco, se obtiene la función de transferencia del sistema acoplado como se indica en la Ecuación (10), de la cual se extrae la función de transferencia como se muestra en la Ecuación (11) (Det Norske Veritas, 2014).

$$S_\phi = (F_T)^2 \cdot S_\omega \quad (10)$$

$$F_T = \sqrt{\frac{S_\phi}{S_\omega}} \quad (11)$$

Donde:

S_ϕ es el espectro de respuesta para rolido

S_ω es el espectro de oleaje WN o JONSWAP

F_T o RAO es la función de transferencia del buque en rolido

1.6 Modelo numérico estructural

El diseño de una estructura marina similar a las mostradas en la Figura 10 y Figura 11 desde un punto de vista generalista utiliza artificios matemáticos capaces de predecir el comportamiento de todos sus componentes. Su estructura abarca:

Las consideraciones de diseño. (1.6.1)

La caracterización del material utilizado. (1.6.2)

Definición de las cargas relevantes que actúan sobre el sistema. (1.6.3)

El estudio del comportamiento estático de los componentes del sistema. (1.7)

Finalmente, un análisis a fatiga para determinar la vida útil del sistema. (1.8)

1.6.1 Consideraciones para diseño estático y trabajo a fatiga

Tomando en cuenta los desafíos que conlleva un diseño libre de fallas durante su servicio, se emplean técnicas capaces de predecir de manera realista el comportamiento y las expectativas de vida de un componente bajo condiciones complejas de carga estática y a fatiga.

El diseño estático posee sus cimientos en el análisis del comportamiento de un sistema en equilibrio. Para identificar los mecanismos de falla bajo cargas combinadas debe desarrollarse metodologías que ofrezcan una retroalimentación adecuada al diseño basándose en: la modificación de las condiciones de control, cargas relevantes que interactúen de manera significativa con el sistema, geometría del diseño conceptual y selección de materiales.

Las combinaciones de carga en un régimen estático inducen esfuerzos en los elementos de una estructura e influyen en el diseño estructural elástico por esfuerzos permisibles, específicamente al factor de seguridad. El manual de construcción en acero de la AISC pretende determinar esfuerzos en secciones críticas bajo un régimen elástico o plástico.

Esto se consigue mediante factores de corrección de resistencia del material mostrado en la Tabla 2 (American Institute of Steel Construction (AISC), 2011).

Tabla 2. Factores de reducción de resistencia.

(American Institute of Steel Construction (AISC), 2011)

Factor de reducción de resistencia del material	Criterio de falla
0.9	Deformación plástica
0.75	Fractura por cortante o tracción
0.85	Pandeo
0.9	Flexión o cortante
0.9	Compresión axial y flexión

Los criterios de diseño a fatiga para componentes metálicos implican las limitaciones del diseño estático, desarrollándose tradicionalmente bajo una filosofía de diseño aplicada a esfuerzos y deformaciones lineales de elementos que requieran una alta expectativa de vida o una gran cantidad de ciclos.

La fatiga se define como una forma de falla que ocurre en componentes y estructuras sometidas a cargas o esfuerzos dinámicos fluctuantes (Callister & Rethwisch, 2014).

1.6.2 Criterios para selección de materiales

La selección de materiales se concreta a través de la definición de condiciones de trabajo y entorno de operación del sistema. Además, otros factores importantes que influyen en la selección son la disponibilidad en el mercado y su costo final.

Considerando las cargas estocásticas y el ambiente corrosivo de las olas en mar abierto, los materiales utilizados en estructuras marinas deben ofrecer características como: una elevada resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, una elevada trabajabilidad y soldabilidad.

Normalmente, en el marco del diseño mecánico convencional se considera para el diseño únicamente cargas estáticas y no se contempla la fatiga del material producto de la aplicación de fuerzas que varían en el tiempo. La selección efectiva de un material utilizado bajo cargas estocásticas merma esta carencia y se basa en el cálculo del daño a fatiga utilizando la curva S-N o curva de Wohler del material. Esta se representa usualmente de manera logarítmica con el objetivo de reflejar el comportamiento en una recta los ensayos a fatiga del material. La curva se desarrolla en dos rangos específicos

de trabajo, uno en un alto número de ciclos (*HCF*) y otro en bajo número de ciclos (*LCF*) (ver Figura 15) (Det Norske Veritas, 2014) (Marquis & Solin, 1997).

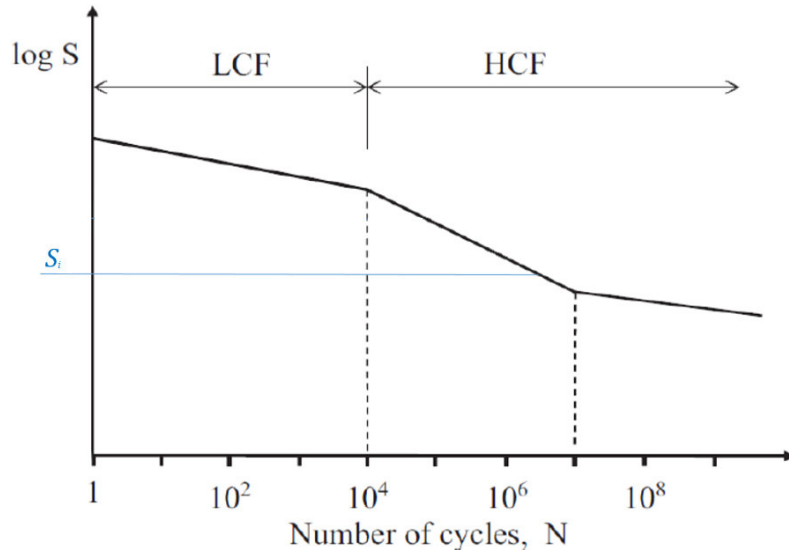


Figura 15. Representación esquemática de una curva S-N.
(Det Norske Veritas, 2014)

La curva S-N se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \Delta \sigma \quad (12)$$

Donde:

N es la predicción del número de ciclos a los cuales ocurrirá una falla dentro del rango de esfuerzos S_i

S_i es el rango de esfuerzos

m es la pendiente negativa de la curva S-N

$\log \bar{a}$ es el punto de corte sobre el eje $\log N$

De manera análoga, es posible caracterizar una expresión para la curva S-N de una junta soldada. Esto requiere ampliar la Ecuación (12) para obtener la Ecuación (13).

$$\log N = \log \bar{a} - \frac{m}{4} \log \left(\frac{t}{25} \right) - m \log \Delta \sigma \quad (13)$$

Donde:

t es el espesor de referencia de la soldadura, igual a 25 mm para toda conexión no tubular.

1.6.3 Cargas hidrodinámicas

El diagrama de cuerpo libre (DCL) mostrado en la Figura 16 indica las fuerzas que intervienen en un ciclo de movimiento vertical de un sistema de compensación de rolido similar a los mostrados en la Figura 10.

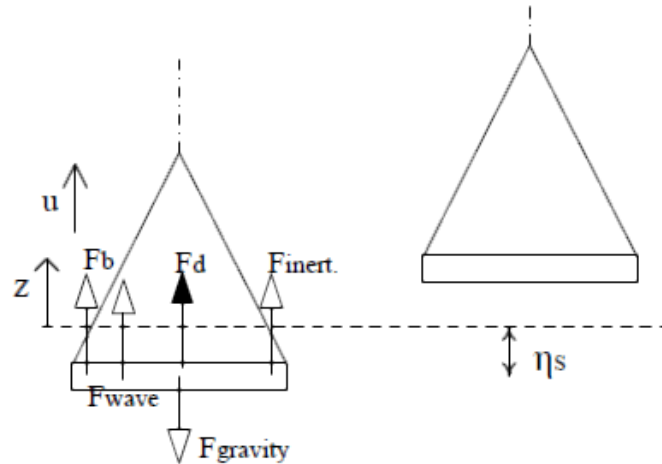


Figura 16. Fuerzas que intervienen en la placa durante un ciclo de movimiento.

(Jiang, Guachamin Acero, Gao, & Li, 2017)

Las principales fuerzas que intervienen son: la fuerza de empuje (F_b), la fuerza de acción de la gravedad ($F_{gravity}$), la fuerza de excitación que producen las olas como una consecuencia del modelo de ola utilizado (F_{wave}), la fuerza inercial (F_{inert}), y la fuerza de arrastre de la placa (F_d), siendo esta a su vez la principal fuente de disipación de energía (Jiang, Guachamin Acero, Gao, & Li, 2017).

La fuerza de empuje F_b es aquella que se ejerce en los cuerpos al ser sumergidos y actúa en la dirección opuesta al movimiento (Munson, Okishi, Huebsch, & Rothmayer, 2013). Esta se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$F_b = V \cdot \rho \cdot g \quad (14)$$

Donde:

V es el volumen del agua que desplaza la placa

ρ es la densidad del agua

g es la aceleración de la gravedad

La fuerza producida por la excitación de las olas F_{wave} viene dada por el espectro de olas utilizado. En este caso puede ser JONSWAP, detallado en la Ecuación (7). Esta fuerza tiene componentes de acción directa de las olas, difracción y radiación. Dichas

fuerzas son calculadas usando el método de paneles a través de la función de Green en el código de ANSYS AQWA.

F_{inert} es la fuerza de un cuerpo que se opone a ser acelerado y depende de su masa, como muestra la Ecuación (15) (Rao, 2005).

$$F_{inert} = a \cdot (M + M_a) \quad (15)$$

Donde:

a es la aceleración en un movimiento de heave de la placa

M es la masa inercial

M_a es la masa añadida a la placa para cada configuración

Para determinar la fuerza de arrastre F_d que ejerce el agua sobre la placa, se aplica la siguiente ecuación:

$$F_d(t) = -\frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot A_{FS} \cdot u(t) \cdot |u(t)| \quad (16)$$

Esta fuerza se ve influenciada por la densidad del agua (ρ), los efectos de las fuerzas viscosas que se cuantifican a través del coeficiente de arrastre (C_D), el área proyectada de la placa (A_{FS}) y la velocidad relativa del fluido (u).

Para calcular el coeficiente de arrastre inducido en la placa producto de sus perfiles afilados se desarrolla un artificio matemático en el cual se coloca un cilindro de Morrison de área equivalente y masa nula a cada placa por debajo de cada una de ellas (ver Figura 17). Este arreglo permite incluir el coeficiente de arrastre sobre el disco acoplado considerando los parámetros de Keulegan-Carpenter (KC) de la Ecuación (17) sin la necesidad de utilizar el número de Reynolds (Re) (Atluri, Magee, & Lambrakos, 2009).

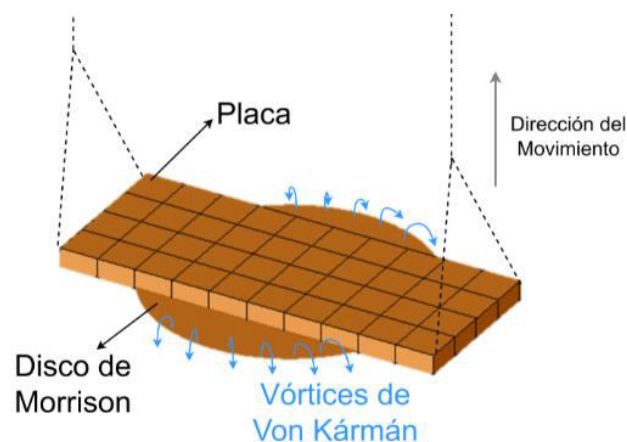


Figura 17. Representación de una placa de compensación y un disco de Morrison.

(Propio)

$$KC = U_m T / L \quad (17)$$

Donde:

U_m es la velocidad relativa durante una oscilación

T es el periodo de oscilación

L es la longitud característica (ancho de la placa)

Si se considera a la respuesta dinámica como una oscilación armónica, se puede simplificar el coeficiente KC como se muestra en la Ecuación (18).

$$KC = 2\pi \cdot A_0 / L \quad (18)$$

Donde:

A_0 es la amplitud de la oscilación

En el estudio desarrollado por Alturi y otros (2009) se comprueba que el análisis desarrollado por Keulegan y Carpenter (1958), en el que dentro de un flujo oscilatorio se hallan una placa plana y un cilindro, el coeficiente de arrastre C_D es dependiente únicamente del coeficiente KC y no de Re , siempre que KC se encuentre entre 2 y 100.

1.7 Análisis y diseño estructural

Los componentes que conforman de manera general las configuraciones mostradas en la Figura 10 y Figura 11 son básicamente: marcos rígidos, hojas planas que permiten el flujo de agua en desplazamientos verticales y puntos de anclaje e izaje. Estos componentes deben rediseñarse para aplicaciones industriales, de manera que aporten una mayor confiabilidad al sistema. El proceso de diseño estructural de los elementos concernientes al sistema de compensación se detalla a continuación.

1.7.1 Diseño de puntos de izaje

Para el dimensionamiento de los puntos de izaje, se utiliza la norma BS 6166 (British Standards, 1991) y las directrices para puntos de izaje y criterios de izaje pesado (Shell U.K. Exploration and Production, 1991). Los principales puntos de izaje para una placa como las mostradas en la Figura 10 son: las orejas de izaje y los grilletes de sujeción con sus argollas y las eslingas (ver Figura 18).

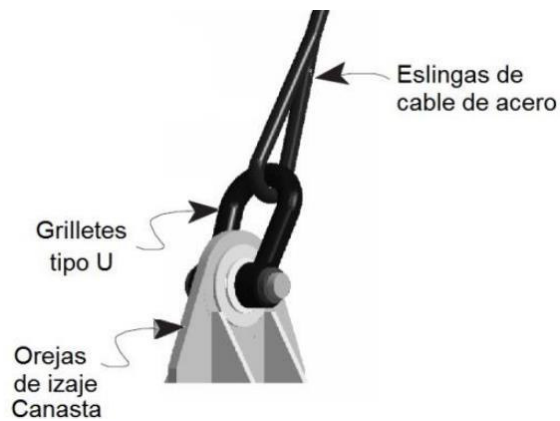


Figura 18. Representación de un punto de izaje.

(Mera Roca, 2015)

Orejas de izaje

En la Figura 19 se muestra la geometría de una oreja de izaje y sus cotas relevantes.

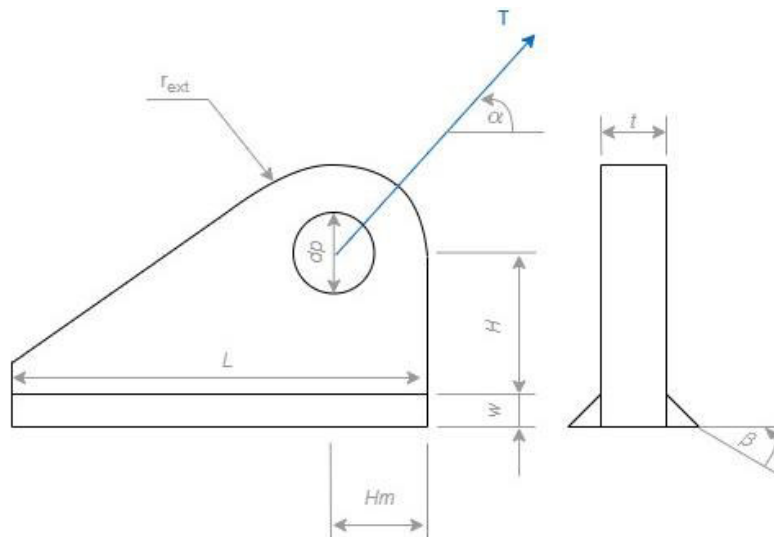


Figura 19. Esquema de oreja de izaje.

(Propio)

Donde:

r_{ext} es el radio exterior de la oreja

d_p es el diámetro del pasador

α es el ángulo de inclinación de la tensión

H es la altura a la que se encuentra el pasador

H_m es la ubicación vertical del pasador

L es la longitud de la base de apoyo de la oreja

w es el pie del cordón de soldadura

β es la inclinación del cordón de soldadura

T es la tensión aplicada en la oreja de izaje

DCL de la oreja de izaje

El comportamiento estático de una oreja de izaje se consigue al considerar las cargas de la Figura 16 y una distribución de 4 orejas ubicadas simétricamente.

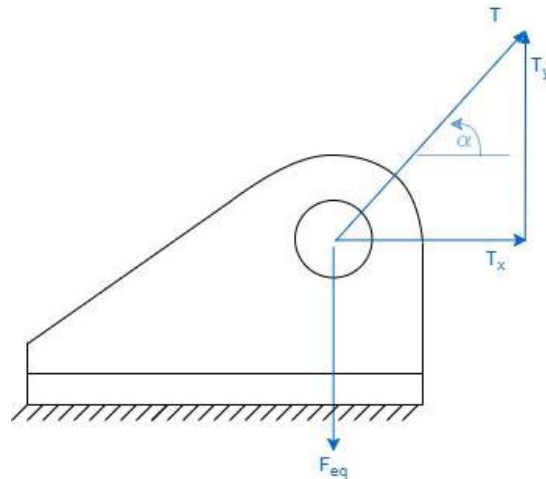


Figura 20. DCL de una oreja de izaje.

(Propio)

La carga total que soportan las orejas se cuantifica a través de la tensión en el cable o eslinga. Esta carga se combina con un factor de tolerancia que integra una carga de seguridad y una ampliación dinámica del 20% (típico valor recomendado por estándares para estas aplicaciones) dentro de la carga soportada por el gancho del sistema de izaje (W_h) como se detalla en la Ecuación (19) tomando en cuenta que cada gancho de izaje soporta la carga de dos orejas.

$$W_T = 2T$$

$$W_a = 0,2T$$

$$W_h = F_h \cdot (W_T + W_a) \quad (19)$$

Donde:

W_T es la carga total soportada por cada par de orejas

W_a es la carga de seguridad

F_h es el factor de ampliación dinámica.

El factor de ampliación dinámica F_h se obtiene de las directrices para puntos de izaje y criterios de izaje pesado (Shell U.K. Exploration and Production, 1991). En este valor se empaquetan factores concernientes a la situación de izaje de la carga, condiciones de mar durante su izaje, entre otros.

Para el dimensionamiento de la oreja de izaje se utiliza una carga de diseño que, acorde a la norma BS 6166, no deberá exceder el 75% del total de la carga vertical de un par de puntos de izaje como se muestra en la Ecuación (20) y Ecuación (21). (British Standards, 1991)

$$W_{pi} = 0,75 \cdot W_h \quad (20)$$

$$W_d = \frac{W_{pi}}{2} \quad (21)$$

Donde:

W_{pi} es la carga vertical de un par de orejas izaje

W_d es la carga vertical por oreja y es equivalente a la carga de diseño

Conjuntamente con la carga de diseño W_d se requieren las propiedades del material para definir la geometría de la oreja de izaje. Información como el esfuerzo de fluencia (σ_y), el esfuerzo cortante (τ_p) y el esfuerzo de aplastamiento (σ_{cp}) es esencial para el dimensionamiento. Estos se detallan en la sección 1.6.2.

Una de las cotas esenciales de la oreja de izaje es el espesor de material utilizado. El espesor deberá ser el suficiente para que el esfuerzo de aplastamiento no deforme de manera significativa la geometría definida en la Figura 19. Por definición, el esfuerzo de aplastamiento y su área de proyección se definen como se muestra en la Ecuación (22) y Ecuación (23) respectivamente:

$$\sigma_{cp} = \frac{W_d}{A_c} \quad (22)$$

$$A_c = \frac{d_p \cdot t_{min}}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

Donde:

t_{min} es el espesor mínimo del material y se define como:

$$t_{min} = \frac{W_d \cdot \sqrt{2}}{d_p \cdot \sigma_c} \quad (24)$$

Otra cota igual de importante es el radio exterior de la oreja (r_{ext}). Esta cota se ve influenciada por el esfuerzo cortante que ejerce la tensión sobre el pasador y es

transmitida a la oreja de izaje. Por definición, el esfuerzo cortante (τ_p) y el área donde se aplica dicho esfuerzo (A_τ) se presentan en la Ecuación (25) y Ecuación (26) respectivamente.

$$\tau_p = \frac{W_d}{A_\tau} \quad (25)$$

$$A_\tau = \left(r_{ext} - \frac{d_p}{2} + i \right) \cdot t \quad (26)$$

Donde:

i es la tolerancia entre el pasador y el orificio

Al conjugar estas ecuaciones, se obtiene la expresión del radio exterior de la oreja r_{ext} mostrada en la Ecuación (27).

$$r_{ext} = \frac{A_\tau}{t} + \frac{d_p}{2} + i \quad (27)$$

Criterios para selección de grilletes

Acorde a la norma ASME B30.9, las directrices para la selección de grilletes utilizados en instalaciones de cables y grúas establecen que la carga de trabajo a la que se encuentra sometida debe incluir un factor de seguridad de 6, como se presenta en la Ecuación (28) (ASME, 2010). En la Figura 21 se presenta un esquema de un grillete convencional.

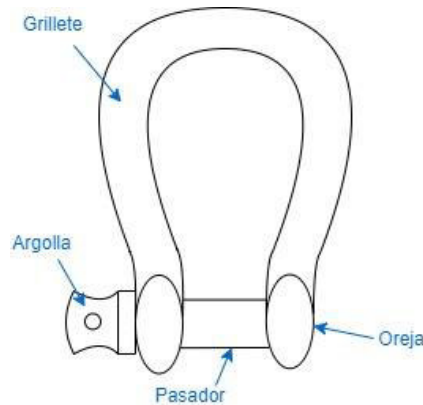


Figura 21. Esquema de grillete.

(Propio)

$$C_{Tg} = C_N \cdot FS \quad (28)$$

Donde:

C_{Tg} es la carga total de los grilletes

C_N es la carga total producto de la tensión

Criterios para selección de eslingas

Las eslingas son las encargadas de soportar la tensión del sistema, estas deberán ser lo suficientemente resistentes para soportar la carga total con un factor de seguridad (FS) de 5, como se muestra en la Ecuación (29), acorde a la normativa ASME B30.9 (ASME, 2010).

$$C_{Te} = C_N \cdot FS \quad (29)$$

Donde:

C_{Te} es la carga total en el cable

1.7.2 Diseño de losas de concreto

Para aportar un mayor peso estructural al sistema y evitar pérdida de tensión en los cables de izaje a lo largo de su ciclo de trabajo se utilizan pesos externos elaborados con materiales de alta densidad y fácil fabricación. Una solución puede ser utilizar losas de concreto las cuales cumplen todas las expectativas para el cumplimiento de estos objetivos.

El dimensionamiento de losas de concreto utiliza el procedimiento de diseño de vigas de concreto simplemente apoyadas tal como se muestra en la sección 4 de Diseño de concreto reforzado (McCormac & Brown , 2011) y el código de construcción del Instituto Americano de Concreto (2015). Este se rige con las siguientes consideraciones: se toma el lado más corto como lado principal de la viga y el dimensionamiento se realiza para una sección establecida (por metro) para luego aplicarse a todo el ancho de la losa. En la Figura 22 se presenta un esquema de losa de concreto con sus partes principales.

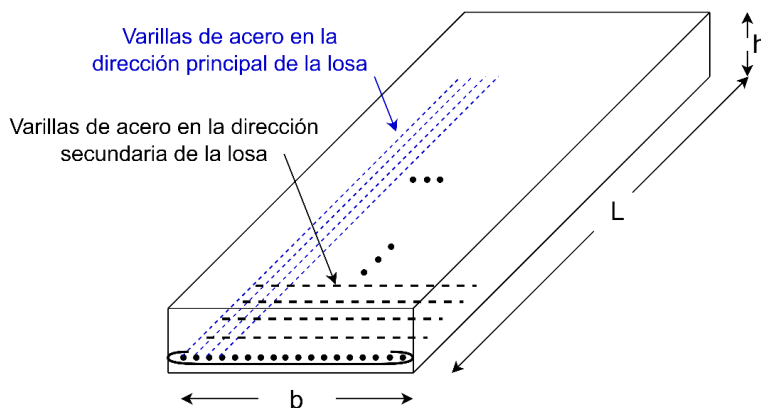


Figura 22. Esquema de una losa de concreto.

(Propio)

Espesor de la placa de concreto

Se determina un espesor de losa, de acuerdo con sus apoyos y dirección de las varillas de acero, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Espesor mínimo de vigas no pre-esforzadas o losas en una dirección.

(McCormac & Brown , 2011)

Espesor mínimo (h)				
	Simplemente apoyado	Un borde continuo	Ambos bordes continuos	Vigas en voladizo
Miembros	Miembros que no son de carga o adjuntados a muros divisorios u otra construcción susceptible de ser dañada por deflexiones grandes			
Losas sólidas en una dirección	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Vigas o losas en una dirección con costilla	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$

Se calcula la profundidad efectiva (d) con la Ecuación (30).

$$d = h - 0.03 \quad (30)$$

Cargas.

Se busca tener todas las cargas linealizadas distribuidas a lo largo del ancho de la losa para poder representarla como una viga. Así, la carga muerta presenta solamente el peso de la losa con la Ecuación (31)

$$W_{SD} = F_y \cdot h \quad (31)$$

Donde:

W_{SD} es la carga muerta de la losa

F_y es el peso específico del concreto

Se le añade el componente de carga viva, que, para efectos prácticos, vienen a ser las cargas externas como el viento, el agua, etc.

Finalmente se toma un factor de carga para obtener la carga última distribuida de la viga (W_U) junto con el momento máximo (M_U) y la fuerza cortante máxima (V_U). presentes en la Ecuación (32). Todo esto considerando a la losa como una viga como se muestra en la Figura 23.

$$W_U = 1,2 \cdot W_{SD} + 1.6 \cdot W_{SL} \quad (32)$$

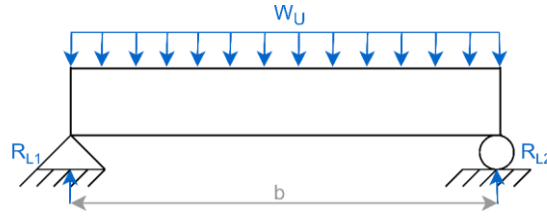


Figura 23. DCL de la losa.

(Propio)

Dimensionamiento de la estructura para una placa de concreto.

El diseño la placa de concreto se basa en calcular la cantidad de acero requerido para soportar el momento máximo sobre la misma. Para esto, se utiliza una cuantía requerida de acero (ρ_{req}) detallada en la Ecuación (35). La cuantía es una relación entre el área del acero estructural respecto al área bruta del concreto tomado de una sección transversal. Esta requiere de 2 coeficientes: el coeficiente K_{req} y el coeficiente m . Como se muestran en la Ecuación (33) y Ecuación (34) respectivamente.

$$K_{req} = \frac{M_u}{b \cdot d^2} \quad (33)$$

$$m = \frac{F_y}{0.85 \cdot f'_c} \quad (34)$$

$$\rho_{req} = \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot K_{req}}{0.9 \cdot F_y}} \right) \quad (35)$$

Con esto, se verifica si la cuantía requerida está dentro del rango establecido por la norma, ver Ecuación (36) y Ecuación (37), o de lo contrario, se toma el mínimo.

$$\rho_{min} = \frac{14}{F_y} \quad (36)$$

$$\rho_{max} = 0.72 \cdot \beta_1 \cdot 0.85 \cdot \frac{f'_c}{F_y} \cdot \frac{0.003}{\epsilon_y + 0.003} \quad (37)$$

Se calcula el área de acero necesaria por metro (A_{st}) con la Ecuación (38)

$$A_{st} = \rho \cdot 100cm \cdot d \quad (38)$$

Finalmente, se define un tipo de varilla y se calcula el número de varillas necesarias en la losa a través de la Ecuación (39) y Ecuación (40).

$$N^{\circ} \text{varillas por metro} = A_{st} / A_{var} \quad (39)$$

$$N^{\circ} \text{total de varillas} = N^{\circ} \text{varillas por metro} \cdot b \quad (40)$$

Donde:

A_{var} es el área de la varilla seleccionada

También se define la cantidad de acero necesario para retracción y fraguado que se ubicará de manera perpendicular a las otras varillas (en la dirección secundaria como se muestra en la Figura 22) utilizando el mismo proceso. La cuantía se obtiene mediante la recomendación de norma de acuerdo con el tipo de concreto utilizado mediante la Ecuación (41).

$$A_{st\ RYF} = \rho_{RYF} \cdot 100cm \cdot d \quad (41)$$

Con esto, se define un tipo de varilla para refracción y fraguado y se calcula el número de varillas necesaria en la losa de manera similar a como se muestra en las ecuaciones (39) y (40). Finalmente se comprueba la resistencia de la losa a corte utilizando la fórmula del sistema internacional para calcular la resistencia del concreto mediante la Ecuación (42).

$$\phi V_c = 0.75 \cdot 0.17 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \quad (42)$$

$$V_U > \phi V_c$$

1.7.3 Selección de vigas

El marco rígido que utilizan las configuraciones mostradas en la Figura 10 y Figura 11 utilizan perfiles convencionales que aportan la rigidez suficiente para aplicaciones en barcos pequeños. Bajo condiciones de trabajo severas o en aplicaciones industriales es necesario utilizar perfiles o vigas que ofrezcan una mayor resistencia y durabilidad. Las vigas son miembros estructurales lineales que trabajan a flexión y se utilizan para conformar la estructura del sistema. Para su selección se han creado manuales con geometrías y dimensiones establecidas como se muestra en la Figura 24.

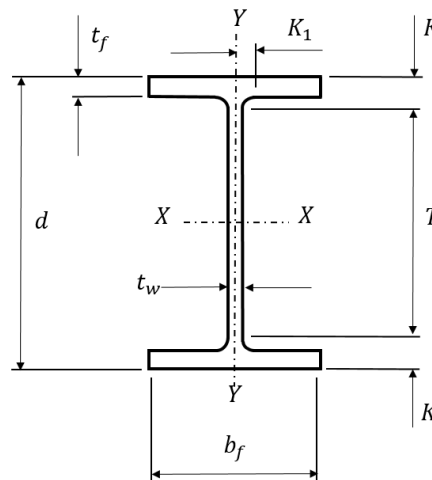


Figura 24. Especificaciones de vigas tipo W.

(American Institute of Steel Construction (AISC), 2011)

Donde:

tf es el espesor del patín

d es el alto total de la viga

tw es el espesor del alma

bf es el ancho del patín

k_1 es la longitud de la curvatura de la unión del alma y el patín

k es la distancia desde la cara exterior del patín hasta el inicio del alma

T es la longitud del alma

Para el procedimiento de selección o diseño de una viga con cargas combinadas se puede tomar la metodología propuesta en (Pisarenko & Yakovlec, 1979) la cual se detalla a continuación.

Se comienza definiendo un perfil de viga, el tipo de apoyos, el material y un factor de seguridad objetivo. Sobre estos, se calculan las recciones en los apoyos y el momento máximo mediante un equilibrio de fuerzas y momentos.

Se desarrolla un estudio de esfuerzos utilizando la Ecuación (43).

$$\sigma = \frac{M_{\max} \cdot C}{I_{xx}} \quad (43)$$

Donde:

M_{\max} es el momento máximo del diagrama de momentos

C es la distancia del eje neutro hasta la fibra más externa de la viga

I_{xx} es el segundo momento de inercia de la viga

La cual puede simplificarse utilizando el módulo de la sección de la viga (S) a través de la Ecuación (44)

$$\sigma = \frac{M_{\max_1}}{S} \quad (44)$$

Se obtiene el factor de seguridad del punto crítico de la viga $F.S$ a través de la Ecuación (45), el cual se compara con el factor de seguridad objetivo definido al inicio del proceso de diseño.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{ad}} = F.S \quad (45)$$

Donde:

σ_{ad} es el esfuerzo admisible de la viga

De no haber congruencia entre el factor de seguridad calculado y el objetivo, se obtiene un nuevo valor de S utilizando el factor de seguridad objetivo y la Ecuación (46) para seleccionar otro perfil e iterar el cálculo.

$$\frac{M_{\max_1}}{S \cdot \sigma_{ad}} = F \cdot S \quad (46)$$

1.7.4 Diseño de resortes planos rectos

Los resortes planos rectos son placas alargadas que trabajan a fatiga produciendo una resistencia controlada al efecto de las cargas ejercidas sobre estas. Un ejemplo es un trampolín de piscina, como se muestra en la Figura 25.

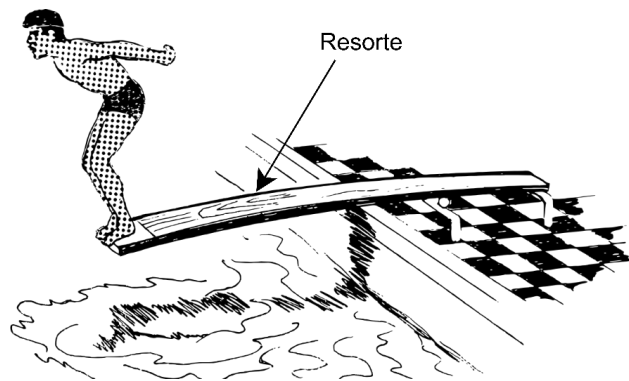


Figura 25. Ejemplo de resorte plano recto (trampolín de piscina)

(Propia)

Un resorte plano se ve influenciado por la carga distribuida aplicada sobre una de sus caras exteriores (Q_R) tal como se muestra en su DCL de la Figura 26.

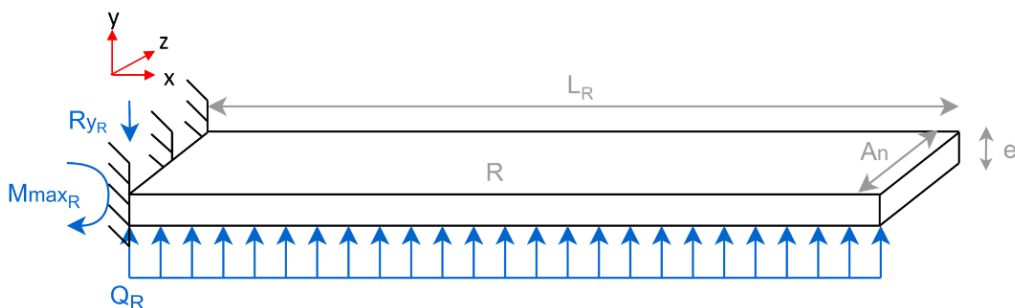


Figura 26. Esquema del DCL de un resorte plano recto.

(Propio)

Donde:

L_R es la longitud del resorte

e es el espesor del resorte

R_{yR} es la reacción en el empotramiento

M_{maxR} es el momento máximo en el apoyo

Q_R es la carga distribuida en el resorte

A_n es el ancho del resorte

El análisis inicia encontrando la carga distribuida (Q_R) en cada resorte a través de la Ecuación (47) y Ecuación (48).

$$P_r = \frac{F}{A_t} \quad (47)$$

$$Q_R = P_r \cdot A_n \quad (48)$$

Donde:

F es fuerza ejercida en toda la placa estabilizadora

A_t es el área de la placa estabilizadora

P_r Es la presión sobre el resorte

Se calcula las reacciones y momentos máximos en los apoyos mediante un equilibrio de fuerzas y momentos presentados en la Ecuación (49) y Ecuación (50) respectivamente.

Reacciones en apoyos

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{yR} = R_R$$

$$R_R = Q_R \cdot L_R \quad (49)$$

Donde:

R_R es la reacción vertical en el empotramiento del resorte

L_R es la longitud del resorte

Momento máximo

$$\sum M_{yA} = 0$$
$$M_{\max_R} = \frac{Q_R \cdot L_R^2}{2} \quad (50)$$

Donde:

M_{\max_R} es el momento máximo del resorte

Se calcula el esfuerzo en el resorte utilizando la Ecuación (51). La cual, si se considera una sección rectangular para el resorte tal como se muestra en la Figura 26 se obtiene la Ecuación (52).

Esfuerzo

$$\sigma_R = \frac{M_{\max_R} \cdot C}{I_x} \quad (51)$$

$$\sigma_R = \frac{Q_R \cdot L_R^2}{2} \cdot \frac{e/2}{A_n \cdot e^3 / 12} \quad (52)$$

Despejando Q_R se obtiene el esfuerzo en función de la fuerza ejercida y parámetros geométricos del resorte, Ecuación (53)

$$\sigma_R = \frac{3F \cdot L_R^2}{A_t \cdot e^2} \quad (53)$$

Finalmente, se obtiene un factor de seguridad ($F.S_R$) con la Ecuación (54).

Factor de seguridad estático

$$F.S_R = \frac{\sigma_{adR}}{\sigma_R}$$
$$F.S_R = \frac{\sigma_{adR} \cdot A_t \cdot e^2}{3F \cdot L_R^2} \quad (54)$$

Donde:

σ_{adR} es el esfuerzo admisible del resorte

1.7.5 Diseño de bisagras

Las bisagras son componentes encargados de unir, de una manera efectiva y simple dos elementos de un sistema que roten a lo largo de un mismo eje como es el caso de los sistemas mostrados en la Figura 10 y Figura 11. Generalmente este tipo de

elementos son seleccionados a través de catálogos en función de su tamaño o capacidad de carga. No obstante, para aplicaciones específicas es necesario de un diseño como el que se detalla a continuación. Se presenta un esquema de bisagra con sus partes en la Figura 27.

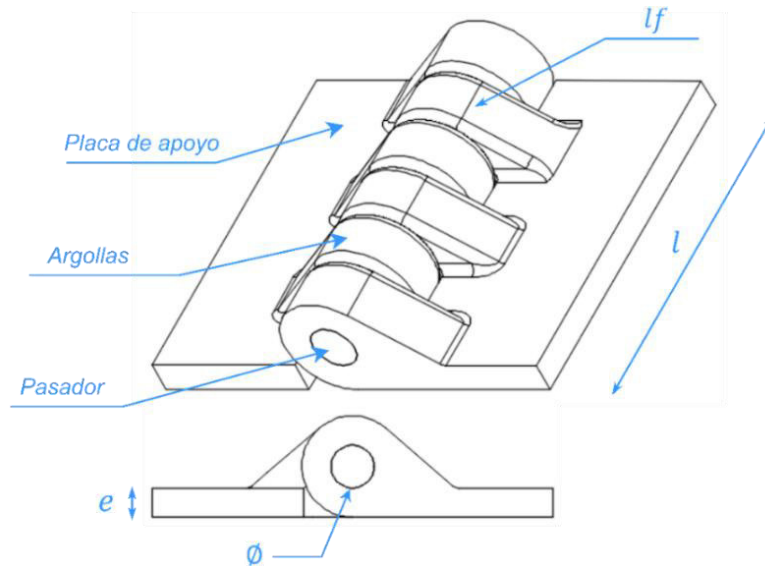


Figura 27. Esquema de bisagra.

(Propio)

La bisagra se conforma por tres elementos, un pasador y dos placas que envuelven al pasador formando argollas de acople. Sobre el pasador se ejercen fuerzas de corte producidas por las argollas de la bisagra, como se muestra en Figura 26. Esto hace que el pasador sea uno de los elementos críticos en el diseño.

DCL del pasador

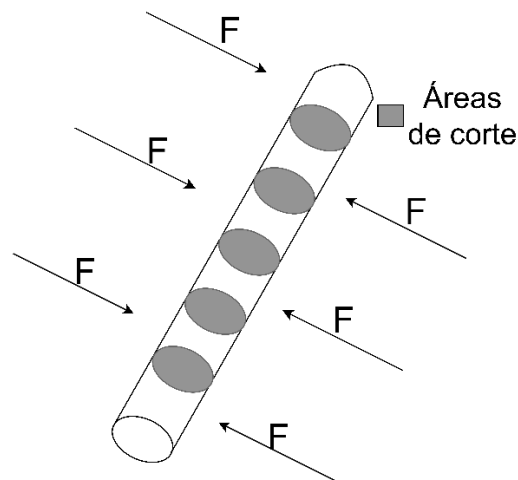


Figura 28. DCL de un pasador con 5 áreas de corte.

(Propio)

Fuerza cortante.

Una fuerza cortante no es más que 2 fuerzas en la misma dirección, pero en sentido contrario tal como se muestra en Figura 28. Cada área de corte implica la implementación de un par de fuerzas cortantes (F_T) que serán usadas durante todo el análisis.

Diámetro del pasador.

La fuerza ejercida sobre el pasador genera un esfuerzo cortante sobre este y se divide por cada segmento de la bisagra como se muestra en la Ecuación (55).

$$\tau = \frac{F_T}{A_p} = \frac{(P/n)}{\left(\frac{\pi \phi^2}{4}\right)} \quad (55)$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante del pasador

P es la fuerza general ejercida sobre toda la bisagra

n es el número de segmentos de la bisagra

A_p es el área de la sección del pasador

ϕ es el diámetro del pasador, ver Figura 28, que, a su vez se puede expresar como se muestra en la Ecuación (56)

$$\phi = \sqrt{\frac{4P}{n\pi\tau}} \quad (56)$$

Longitud de la placa de apoyo de la bisagra.

La longitud de la placa define también el espesor de la argolla de sujeción si se considera el esfuerzo de aplastamiento que se aplica sobre la argolla. Este se calcula usando la Ecuación (57).

$$\sigma_a = \frac{F_T}{A_a} = \frac{(P/n)}{l \cdot e} \quad (57)$$

Donde:

σ_a es el esfuerzo de aplastamiento

A_a es el área proyectada del pasador sobre la argolla

e es el espesor de la placa

l es la longitud de la placa que a su vez se puede calcular con la Ecuación (58)

$$l = \frac{P}{n \cdot \sigma_a \cdot e} \quad (58)$$

1.8 Análisis de componentes a fatiga

Las cargas estocásticas que induce el oleaje marino y demás condiciones oceanográficas generan fatiga en todos los componentes de un sistema de compensación. El análisis del comportamiento de estos elementos se puede realizar a través de la caracterización de esfuerzos y número de ciclos mediante el método de “Rainflow” presentado en la sección 1.8.1 y la suma porcentual del daño de estos esfuerzos a través de la regla de Palmgren-Miner presentado en la sección 1.8.2.

1.8.1 Ciclos de flujos de lluvia para trabajo a fatiga

El método de “Rainflow” o conteo de flujo de lluvia permite agrupar ciclos de esfuerzos de un historial estocástico de esfuerzos (Bárcenas Otero, 2011).

El principio de este método se puede explicar físicamente con una analogía a las gotas de lluvia, ver Figura 29.

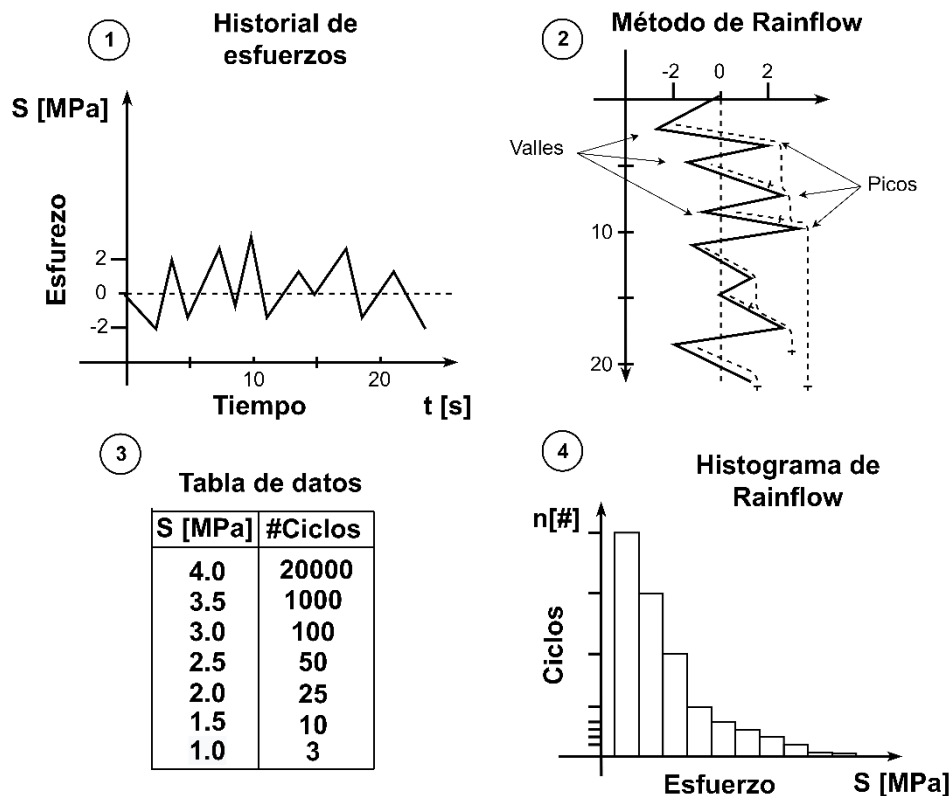


Figura 29. Descripción del método Rainflow.

(Propio)

Si se comienza desde un mínimo (izquierda), las gotas fluyen hasta encontrarse con un mínimo (valle) más negativo al de su origen o hasta encontrarse con el camino de otra gota anterior. Si se comienza desde un máximo (derecha), las gotas fluyen hasta encontrarse con un máximo (pico) más positivo al de su origen o hasta encontrarse con el camino de otra gota anterior. Así, la longitud horizontal de cada recorrido de gota equivale a la mitad de un ciclo de carga y, agrupando la suma de todos los ciclos se obtienen los histogramas de ciclos a diferentes esfuerzos, conocidos como histogramas de Rainflow (WAFO-group, 2000).

1.8.2 Daño acumulado por fatiga

El cálculo del daño acumulado emplea regularmente un criterio de daño acumulativo no lineal, considerando la regla de daño por fatiga de Palmgren-Miner para cargas aleatorias. Esta regla no se basa en ningún estudio estadístico, es decir, es una medida empírica, pero su amplia utilización en campo la han hecho acreedora de un puesto fijo en casi todas las normas de diseño a fatiga a nivel mundial (Sweitzer, 2006) (Aenlle, Brincker, Canteli, & García, 2006).

La regla de Palmgren-Miner define a la suma de daño por fatiga como:

$$D = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{N_{fk}} \quad (59)$$

Donde:

D es la suma del daño a fatiga

n_k son los ciclos de carga para un determinado rango de esfuerzos (ver histograma de ciclos y esfuerzos en la Figura 29)

N_{fk} son los ciclos de carga que resiste el material obtenido de la curva SN para un rango de esfuerzos

La vida a fatiga o el pronóstico de su vida residual (T) no es más que el periodo de operación (T_o) dividido para el daño calculado (D) y se define como se muestra en la Ecuación (60) (Bárcenas Otero, 2011).

$$T = \frac{T_o}{D} \quad (60)$$

1.9 Herramientas computacionales

La evaluación de los modelos y el análisis de datos emplean códigos computacionales del estado del arte como ANSYS AQWA & STRUCTURAL, desarrollados por Century Dynamics-Ansys Inc. (2012), INVENTOR, desarrollado por Autodesk (2020) y MATLAB, desarrollado por The MathWorks, Inc. (2020) respectivamente. Este último con colaboración del trabajo enfocado al método “Rainflow” o conteo de lluvias realizado por Adam Niesony (2009).

1.9.1 Código para el análisis del modelo hidrodinámico

Un análisis hidrodinámico en ANSYS-AQWA utiliza estructuras de programación específicas. Los archivos de datos de extensión .DAT son los mayormente utilizados. Estos emplean códigos ASCII en donde se define el modelo y los parámetros de análisis de todo el entorno AQWA. Los datos obtenidos se almacenan en archivos de extensión .RES y .PLT. Ambos archivos son de datos binarios que contienen los resultados del análisis hidrodinámico con la característica de que el archivo .RES posee los parámetros y la definición del modelo y el archivo .PLT contiene los datos necesarios para evaluar resultados mediante una interfaz gráfica (Century Dynamics-Ansys Inc, 2012).

ANSYS-AQWA utiliza tres tipos distintos de archivos de datos para ejecutarse:

AQWA-LINE: Contiene parámetros necesarios de cada estructura del sistema de una manera individual. Resuelve sistemas lineales, arrojando resultados de fuerzas hidrodinámicas sobre estructuras difractantes, entendiéndose como difractante a toda estructura que mantiene contacto o interactúa con el agua.

AQWA-LIBRIUM: Define los parámetros necesarios para todo el sistema acoplado. Resuelve el sistema lineal encontrando la posición de equilibrio.

AQWA-DRIFT: Detalla los parámetros necesarios para desarrollar un análisis en el dominio del tiempo. Es el archivo más importante, ya que arroja datos como aceleraciones, fuerzas de arrastre, tensiones en los cables, etc.

1.9.2 Software para el análisis del modelo estructural

El análisis estructural estático se puede realizar con ayuda de softwares especializados, como INVENTOR, para el modelado geométrico y ANSYS-STRUCTURAL para la resolución de algoritmos computacionales.

Las herramientas computacionales para el análisis de conteo de lluvias y evaluación de elementos a fatiga son bastante variadas. Los más atractivos, completos y sencillos se encuentran en Matlab. Algoritmos como el ofrecido por WAFO (Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads) condensa una gran cantidad de herramientas utilizadas para un análisis oceanográfico y a fatiga (WAFO-group, 2000).

De la misma manera, existen Algoritmos más específicos como el toolbox “Rainflow for Matlab” desarrollado por Niesony (2010). Este algoritmo incluye scripts y rutinas específicas para el conteo de lluvias. Esta información es la necesaria para determinar la vida a fatiga de un componente.

2 METODOLOGÍA

La metodología propuesta plantea una serie de procesos iterativos que permitirán en una etapa terminal seleccionar y optimizar de manera adecuada el sistema de compensación considerando aspectos técnicos y económicos. La secuencia adoptada para la metodología mostrada en la Figura 30 se basa en una serie de procesos marcados por pasos. Esto indica el orden en el que se desarrollan las actividades considerando que algunas de ellas se llevan a cabo en paralelo. Además, las letras remarcadas en azul representan los datos de entrada y salida de cada módulo. Los apartados referentes al modelo numérico hidrodinámico y estructural del paso 2 y 3 se amplían en la Figura 31 y Figura 32 respectivamente. Se hace énfasis en el paso 6, de la obtención de los estados de mar admisibles y límites operacionales al ser de relevancia en el estudio.

La Figura 30 muestra la metodología del proyecto propuesto desde un punto de vista general. El proceso comienza definiendo un diseño conceptual del sistema de compensación y sus especificaciones, ver paso 1 (sección 2.1.1 & 2.1.2). Sobre este concepto se desarrollan simulaciones del modelo numérico hidrodinámico, ver paso 2 (sección 2.2) y el modelo numérico estructural, ver paso 3 (sección 2.4). Los resultados del estudio hidrodinámico son las respuestas dinámicas del buque en reposo y del sistema de compensación (sección 2.3 & 2.1). Esta información se usa como datos de entrada para el modelo estructural (sección 2.4) donde se define completamente la geometría y las características del sistema. Los resultados conjuntos se evalúan con el objetivo de determinar los estados de mar admisibles, límites operacionales y su factibilidad económica, ver paso 6 (sección 3.1, 3.2 & 3.5). Finalmente se aplica el sistema de compensación en un caso de estudio en el borde costero ecuatoriano, enfatizando su respuesta dinámica ante las condiciones oceanográficas locales, ver paso 7 (sección 3.4)

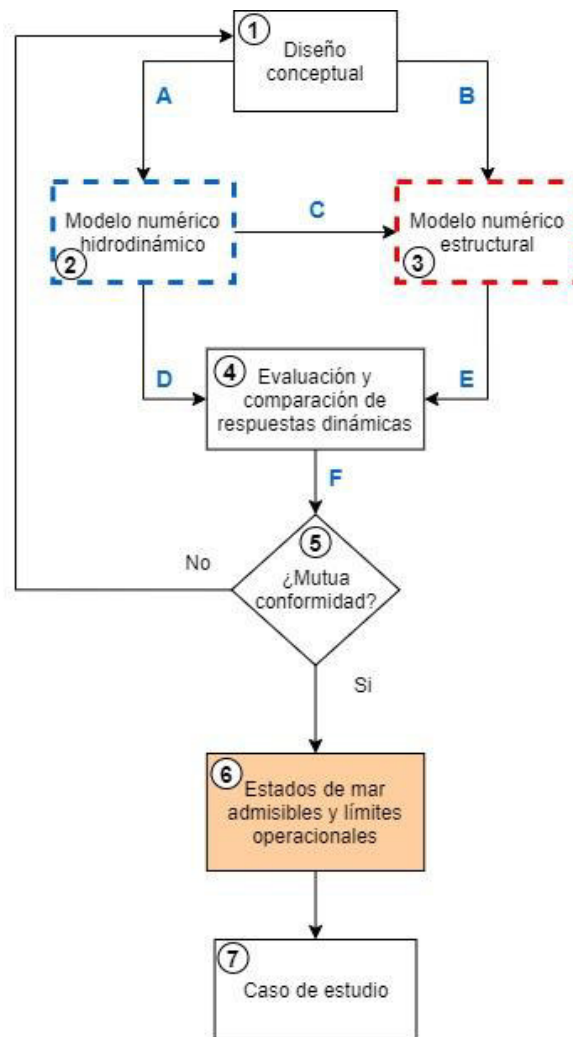


Figura 30. Metodología.

(Propio)

La Figura 31 amplía el paso 2 mostrado en la Figura 30 e indica la metodología del modelo numérico hidrodinámico. El proceso empieza con los parámetros iniciales del diseño conceptual, ver paso 2.1 (sección 2.1.1). Esta información se ingresa al software ANSYS AQWA donde se definen las características del modelo acoplado del buque y el sistema de compensación dentro de un modelo numérico, ver paso 2.2 (sección 2.1.2). A este modelo se introducen los datos concernientes a un estado de mar típico entre los valores correspondientes al diagrama de dispersión de la Tabla 1 y un espectro tipo JONSWAP, formando un sistema dinámico. Sobre este sistema dinámico se aplican simulaciones en el dominio del tiempo (sección 2.2.1) y de la frecuencia, ver paso 2.3 (sección 2.2.2). En el dominio del tiempo se obtiene de manera directa las respuestas dinámicas, mismas que se utilizan en el modelo numérico estructural como cargas de diseño, ver paso 2.5 (sección 2.1). En el dominio de la frecuencia se añade un paso extra al requerir definir primeramente las funciones de transferencia, ver paso 2.4 y

posteriormente obtener la respuesta dinámica en este dominio, ver paso 2.6. Finalmente, se evalúan las respuestas dinámicas para obtener la operabilidad del sistema acoplado, ver paso 2.7 y 2.8 (sección 2.3 & 3.2) y compararlas con los límites admisibles del modelo numérico estructural.

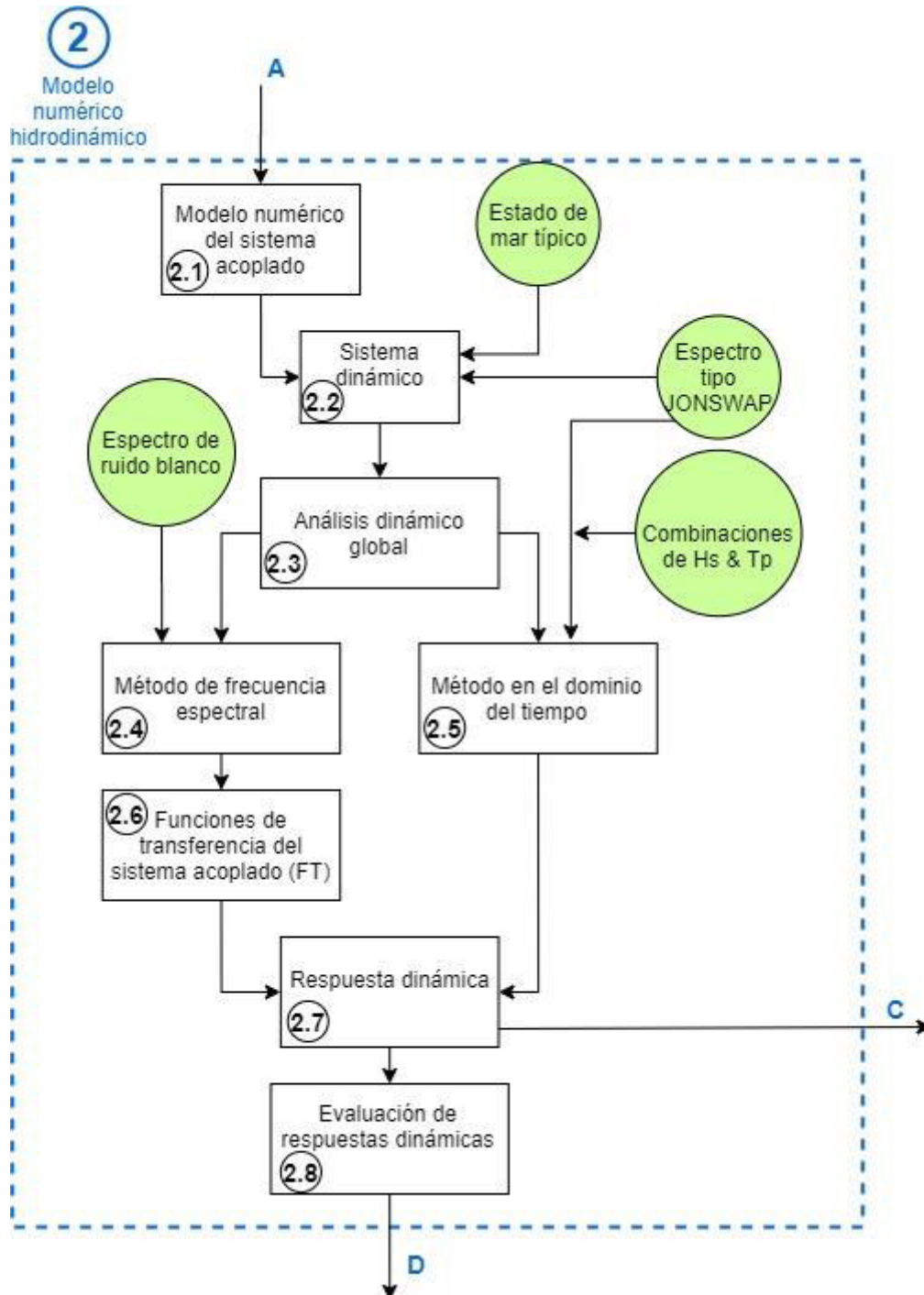


Figura 31. Metodología del modelo numérico hidrodinámico.

(Propio)

La Figura 32 detalla el paso 3 mostrado en la Figura 30. El modelo numérico estructural utiliza la definición del diseño conceptual (sección 2.1.1 & 2.1.2), las respuestas dinámicas del modelo numérico hidrodinámico y los materiales utilizados. Esta información se emplea en el análisis estático, donde se dimensiona inicialmente los componentes del sistema, ver paso 3.1 (sección 2.4.2) para luego simularlos en el software ANSYS STRUCTURAL, ver paso 3.2. Una vez realizado el análisis estático se desarrolla el análisis a fatiga considerando aspectos operativos, ver paso 3.3 (sección 2.4.3). Esta información en conjunto aporta a la determinación del comportamiento del sistema bajo las cargas estocásticas de las respuestas dinámicas y su expectativa de vida, ver paso 3.4 y 3.5.

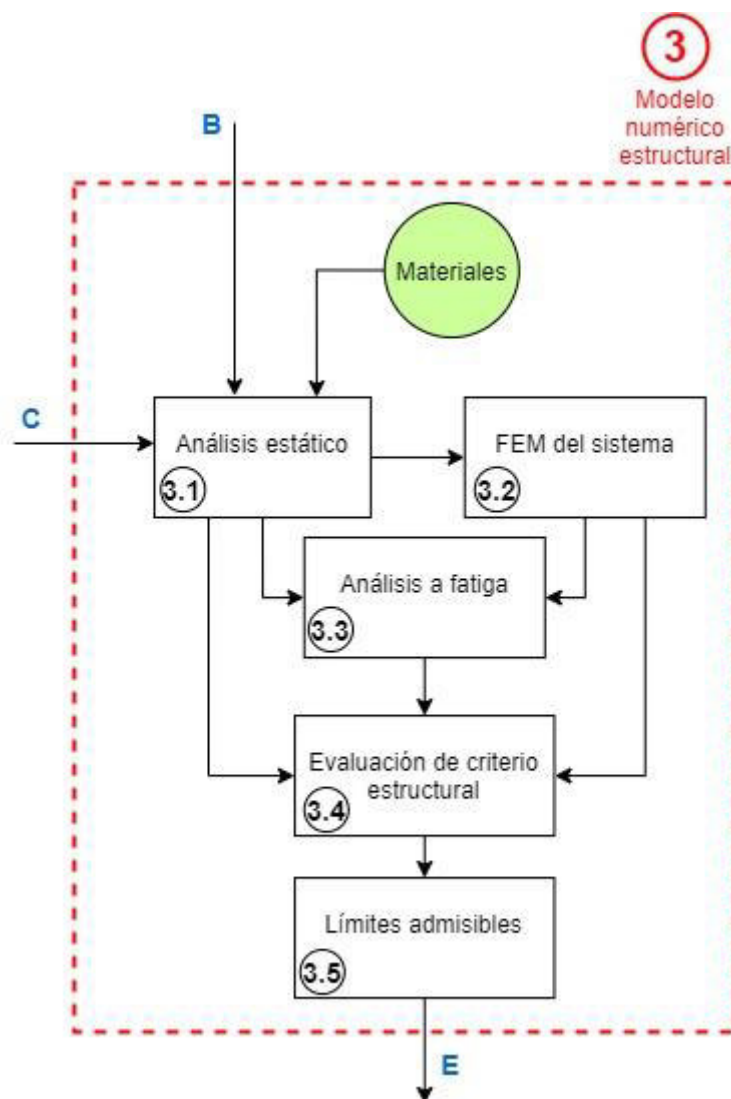


Figura 32. Metodología del modelo numérico estructural.

(Propio)

2.1 Modelado del sistema

En este punto se introducen todos los aspectos geométricos de importancia del buque y de todos los tipos de configuraciones contempladas en el análisis.

2.1.1 Diseño conceptual

Para el diseño conceptual se toman en consideración tres características principales que debe poseer el sistema para brindar la mayor confiabilidad y operabilidad; debe ser plegable, robusto y sencillo. Su principio de funcionamiento se basa en el mecanismo mostrado en la Figura 10 pero acoplándolo a una escala mayor en un buque de altamar. Así, el sistema propuesto está conformado por un conjunto de placas plegables acopladas a un mecanismo de izaje, las cuales trabajan sumergidas a los costados del buque mientras se mantenga estático, ver Figura 33. Con esto, se busca aumentar su operabilidad.

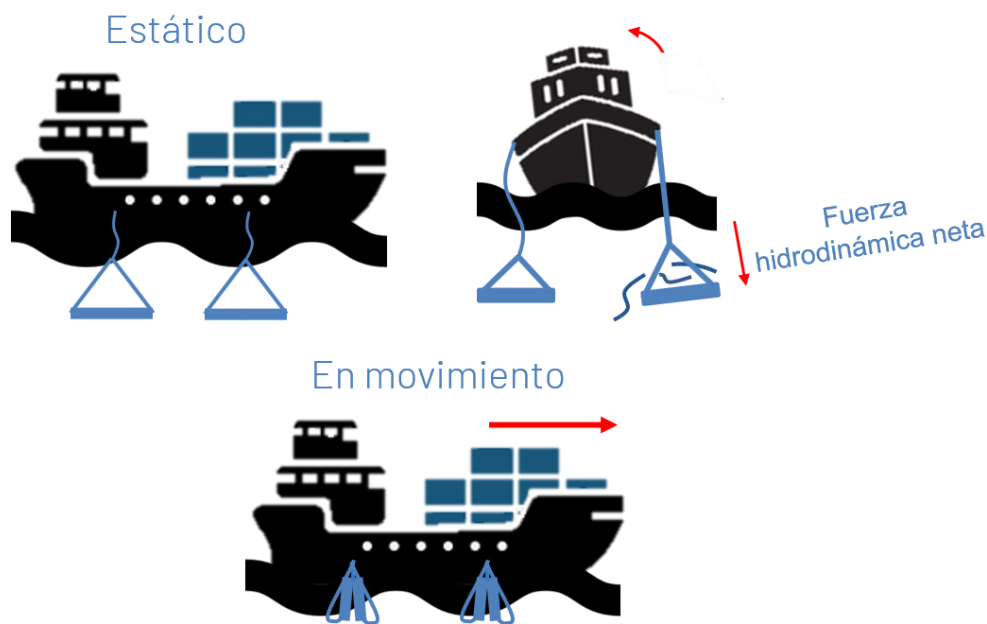


Figura 33. Principio de funcionamiento del sistema de compensación pasivo de rolido

(Propio)

La Figura 34 expone la propuesta de placa compensadora de rolido cumpliendo sus requerimientos funcionales:

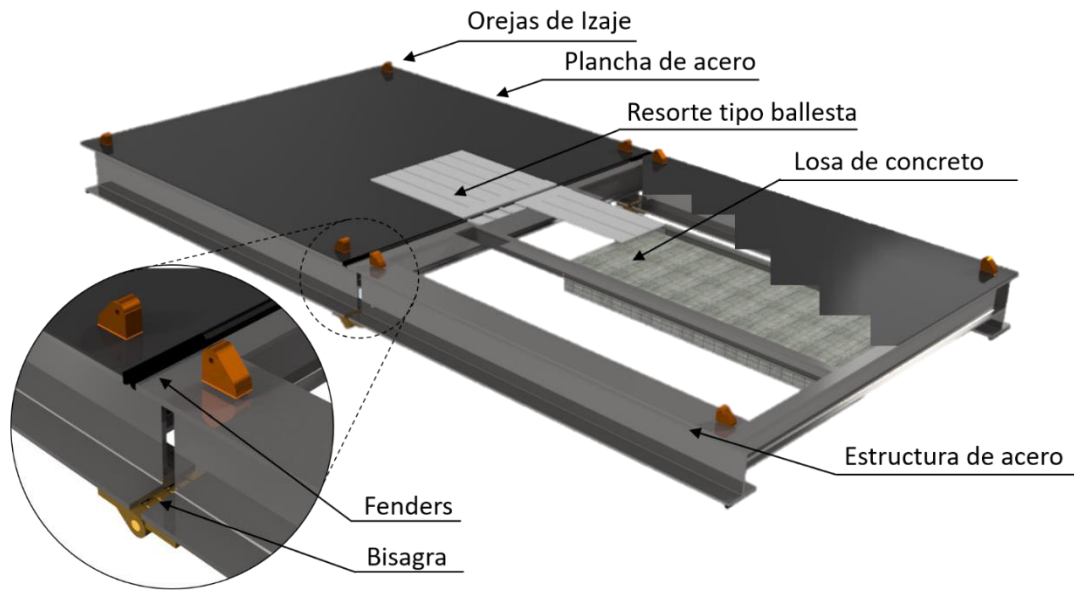


Figura 34. Diseño conceptual de la placa compensadora de rolido.

(Propio)

Se define una estructura de acero para el alma de la placa capaz de soportar las fuerzas dinámicas compensadoras del rolido del buque. El relleno del alma se logra con concreto cubierto con una plancha de acero, esto, como una solución práctica y económica para alcanzar el peso adecuado de la placa. En la parte central, se realiza una apertura la cual tiene como función aumentar la estabilidad de la placa cuando se desplaza longitudinalmente debido al rolido del buque. Sobre dicha apertura se colocan placas planas esbeltas que actúan como resortes tal como se explica en la sección 1.7.4, impidiendo el paso del agua en una dirección tal como se muestra en la Figura 35.

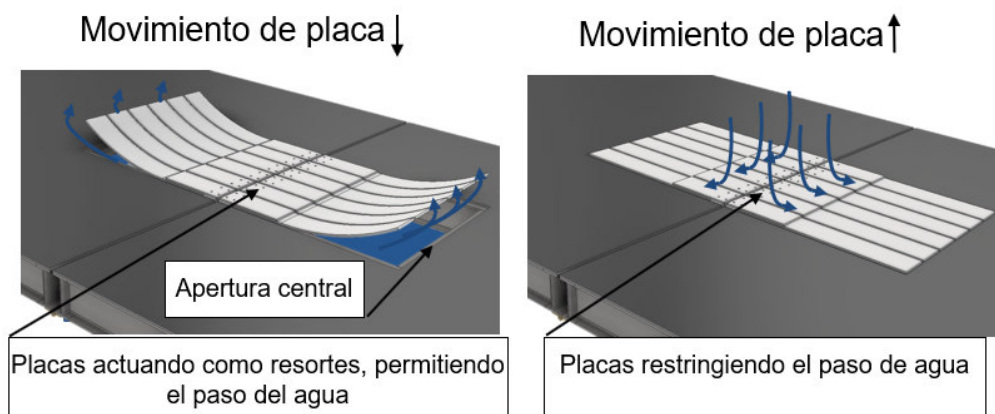


Figura 35. Comportamiento de las placas centrales como resortes durante los diferentes movimientos del sistema.

(Propia)

Este el mismo principio presentado en el ejemplo de la Figura 11 A, B y C. Su función es optimizar el paso de agua a través de la placa y reducir las fuerzas dinámicas del mar en dirección opuesta a la gravedad para garantizar la tensión en los cables de izaje.

Para el mecanismo de izaje foldable se utilizan 2 bisagras en la parte inferior de cada mitad de placa y un juego de 8 orejas que sirven como puntos de izaje. Finalmente, para evitar el contacto brusco entre ambas mitades de la placa, se colocan unos amortiguadores sintéticos en el centro, denominados en la industria marina como “fenders”, ver detalle ampliado en la Figura 34.

2.1.2 Geometría del sistema acoplado

Una vez definidos los componentes del sistema, su diseño debe ser simplificado para poder ser acoplado en el software de apoyo (ANSYS AQWA) y debe estar parametrizado para futuras comparaciones. Así, se representa a las placas estabilizadoras como prismas rectangulares, ver Figura 36 y Figura 37 las cuales se encuentran sumergidas una profundidad de 20 metros para que no sean afectadas por el efecto de las olas. Además, se proponen 7 configuraciones basadas en el tamaño del buque y a cargas referenciales utilizadas en grúas de las mismas especificaciones de la Tabla 4.

Tabla 4. Detalle de placas del sistema de compensación

(Propio)

Configuración	Dimensiones [m]	Peso sumergido [Tonf/placa]	Número de placas
Tipo 1	36x18	1370	4
Tipo 2	36x18	1370	2
Tipo 3	30x15	812	4
Tipo 4	30x15	812	2
Tipo 5	20x10	400	4
Tipo 6	20x10	400	2
Tipo 7	16x8	224	4

Para desarrollar las simulaciones, se utiliza el buque carguero de la Figura 36 cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 5. Este tipo de embarcaciones, debido a que desempeñan actividades de construcción y mantenimiento de infraestructuras en altamar, convencionalmente tienen integrado ya sea compensadores activos o estructuras sumergibles para anclarlo al lecho marino y así reducir su oscilación. Para

este estudio, se considera que el buque no posee ningún otro tipo de compensador de rolo de ningún tipo.

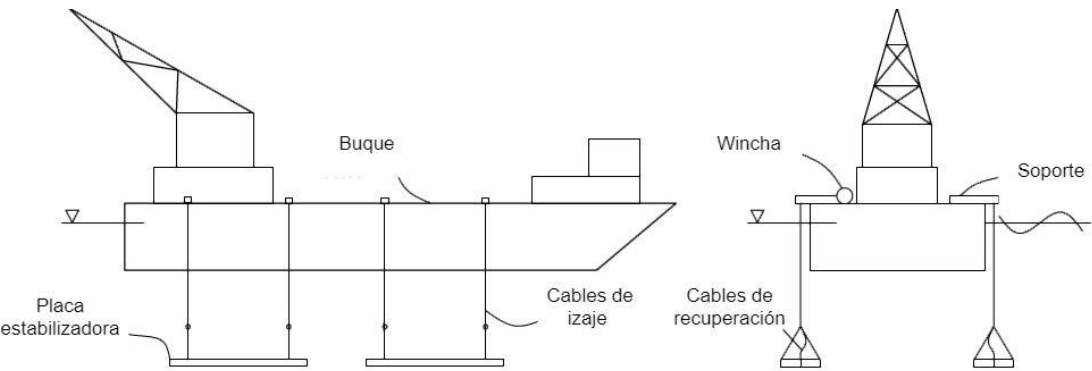


Figura 36. Esquema del buque utilizado
(Propio)

Tabla 5. Parámetros principales del buque de carga.
(Guachamin Acero, Gao, & Moan, 2017)

Parámetro	Notación/Unidad	Magnitud
Desplazamiento	∇/ton	5.09×10^3
Longitud	L/m	69
Envergadura	B/m	18
Calado	T/m	4
Altura del metacentro	GM/m	3.75
Posición del COG sobre la quilla	VCG/m	5

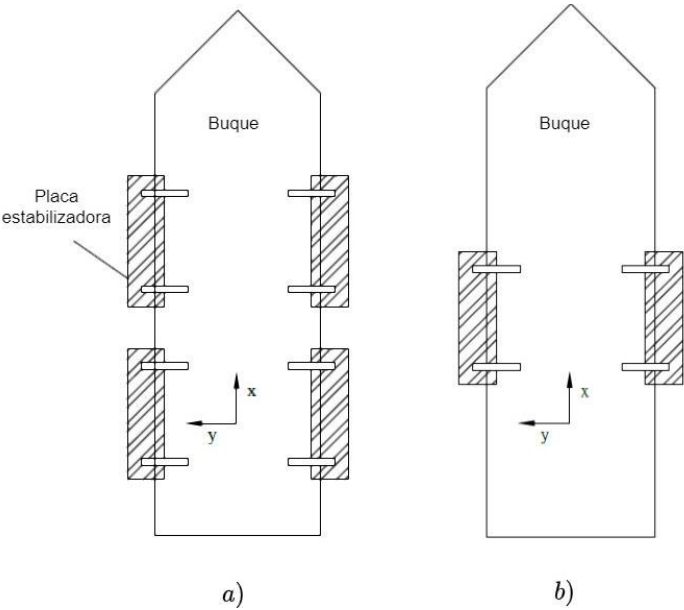


Figura 37. Configuraciones de dos y cuatro placas de la Tabla 4
(Propio)

La Figura 37 muestran un par de ejemplos del sistema simplificado completo con configuraciones de cuatro y dos placas.

2.2 Método numérico para análisis hidrodinámico

Con el sistema definido, se desarrolla el análisis hidrodinámico tanto en dominio del tiempo (sección 2.2.1) como en el dominio de la frecuencia (sección 2.2.2). Para esto, se necesitan estructuras de programación específicas para cada código de ANSYS AQWA. Todos estos datos se colocan de acuerdo con la organización del manual de ANSYS AQWA y se detallan en el Anexo I, II y III.

2.2.1 Análisis en dominio del tiempo

Tomando en cuenta los datos disponibles del diagrama de dispersión de la Tabla 1, se extraen las combinaciones admisibles de H_s y T_p presentes a continuación para desarrollar el análisis en el dominio del tiempo utilizando la Ecuación (8).

$$0,5 < H_s[m] < 3.5 \text{ \& } 4 < T_p[s] < 16.$$

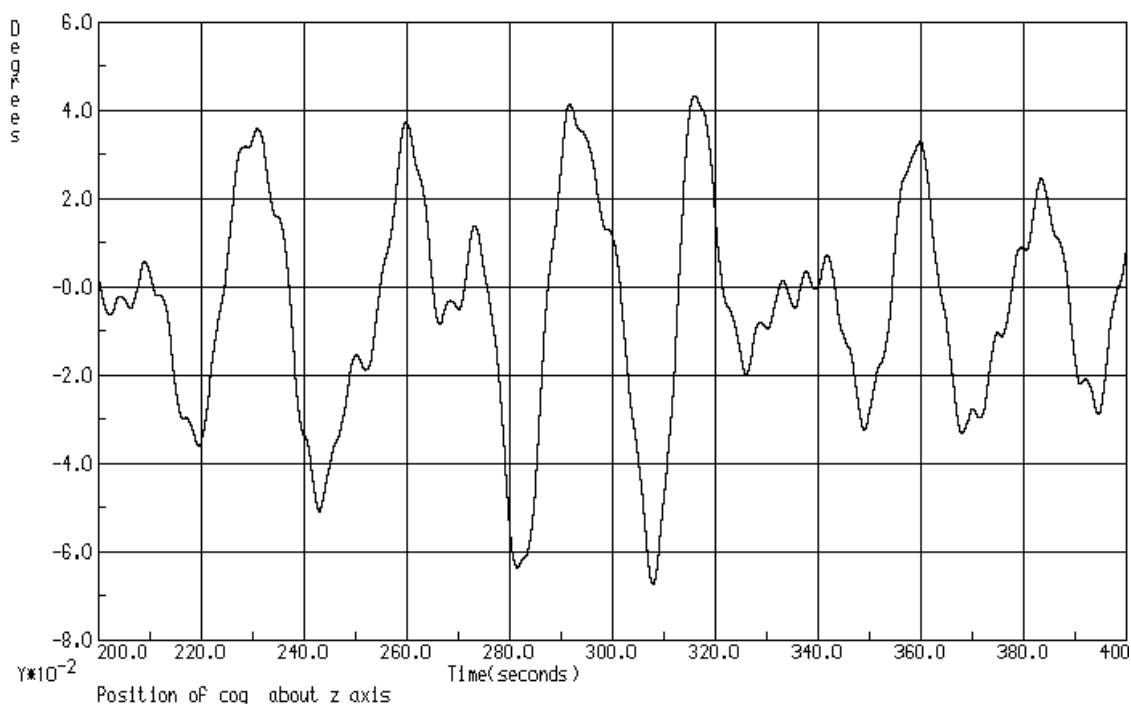


Figura 38. Fracción de la serie de tiempo del rolido del buque para $H_s = 3.5[m]$ y $T_p = 8[s]$.

(Propio)

El resultado obtenido es una historia de tiempo de rolido del buque como la mostrada en la Figura 38. Considerando el procedimiento mostrado en la sección 1.5.1 se obtiene

el espectro de rolido S_ϕ y el valor rms dentro de la banda de frecuencias $\omega_1 = 0,1 \rightarrow \omega_2 = 1,7$. El valor de rms se multiplica por cuatro y se obtiene el valor máximo de la amplitud del ángulo de rolido del buque ϕ , ver Ecuación (61)

$$\phi = 4 * rms \quad (61)$$

Este resultado de rolido se aplica a las diferentes combinaciones de H_s y T_p con cada uno de los ángulos seleccionados (0° , 45° y 90°) para obtener todos los resultados de rolido del sistema no lineal.

Además del rolido del buque, la simulación en el dominio del tiempo arroja todas las respuestas dinámicas detalladas en el capítulo 27 del “AQWA Reference Manual” para cada elemento que conforma el sistema acoplado. Entre las respuestas dinámicas más relevantes se encuentran las tensiones, fuerzas hidrodinámicas, velocidades y aceleraciones (Century Dynamics-Ansys Inc, 2012).

2.2.2 Análisis en dominio de la frecuencia

Acorde a la sección 1.5.5 y a los lineamientos de la sección 1.5.2, se define la banda de frecuencias del espectro de entrada de ruido blanco (S_ω) como: ($\omega_1 = 0,1 \rightarrow \omega_2 = 1,7$) y un valor arbitrario de $H_s = 2,25[m]$ para conseguir el nivel de energía a del espectro utilizando la Ecuación (6) (ver Figura 39).

$$2.25[m] = 4 * \sqrt{a * (1.7 - 0.1)}$$

$$a = 0.197$$

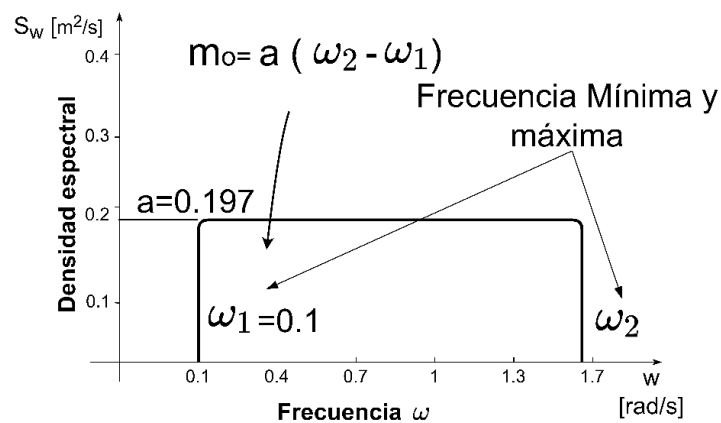


Figura 39. Esquema del espectro de ruido blanco utilizado.

(Propio)

Una vez definido el espectro de rolido, se utiliza como dato de entrada en la Ecuación (9) para obtener el espectro de rolido del buque (S_ϕ) y su respectiva función de transferencia mediante la Ecuación (6) y Ecuación (11).

Esta función de transferencia, en conjunto con espectros direccionales de datos históricos se utiliza para calcular respuestas dinámicas. Esto se realiza para ángulos de incidencia de las olas de 0° , 30° , 60° y 90° para luego interpolar y poder caracterizar sus respuestas dinámicas para todas las direcciones. Tomar en cuenta que no se realiza el análisis para todas las direcciones debido a la simetría del buque con respecto a la incidencia de las olas.

Como se mencionó anteriormente, a esta función de transferencia se le aplica entonces un espectro de ola real utilizando un punto del mar del Atlántico Norte disponible en las bases de datos de la NOAA (2020) para obtener el espectro de rolido S_ϕ . A este se le aplican la Ecuación (61) para obtener el ángulo máximo de rolido del buque.

2.3 Análisis de operabilidad

El análisis de la operabilidad del sistema es el primer paso después de la simulación numérica ya que se utilizan las respuestas dinámicas del rolido del buque para seleccionar una configuración de las mostradas en la Tabla 4, la cual será diseñada estructuralmente. Este estudio de operabilidad se puede realizar usando resultados de simulaciones en dominio de tiempo (sección 2.3.1) y frecuencia (sección 2.3.2).

2.3.1 Operabilidad basada en resultados del dominio de tiempo

Considerando los valores del ángulo de rolido máximo ϕ obtenidos mediante la Ecuación (61) y el diagrama de dispersión de la Tabla 1, el cual muestra el número de registros de olas en condiciones específicas de H_s y T_p (a_{ij} de la Figura 40). Se asume un límite operacional de 2° (mostrado en rojo en la Figura 40) dato tomado por recomendaciones en operaciones marinas de Clauss, G. F., & Riekert, T. (1990) y Guachamin-Acero, W., & Portilla-Yandún, J. (2021) donde se indica que es común encontrarlo entre 2° y 3° para operaciones de levantamiento de carga. Con este criterio se determina un área generada por condiciones de ola en que el buque puede operar con normalidad ya que su respuesta dinámica de rolido es menor al límite establecido de 2° . Esta área operacional se sobrepone en el diagrama de dispersión para obtener la fracción de tiempo total que el buque puede operar dentro de su límite operacional.

Finalmente, utilizando el diagrama de dispersión del mar seleccionado, se suman todos los registros de ola dentro del área de operabilidad y se divide para el valor total de registros (T), hallando así la operabilidad mediante la Ecuación (62).

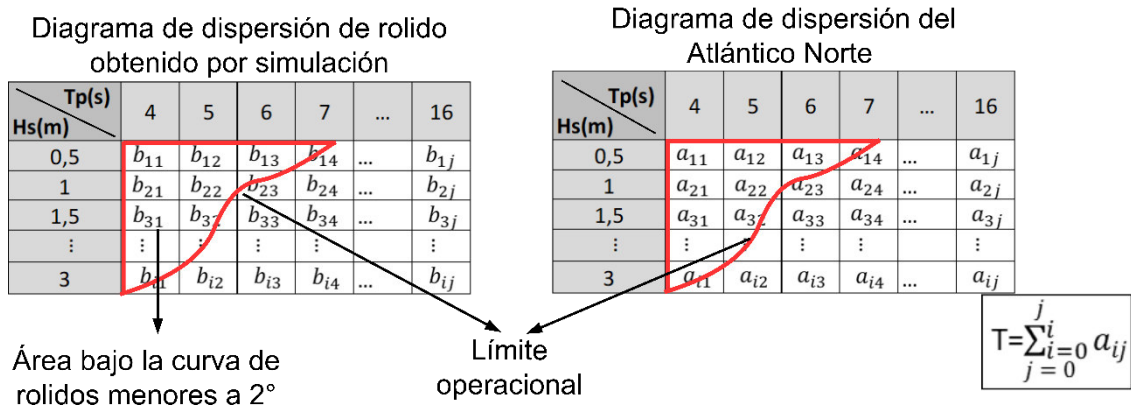


Figura 40. Diagrama explicativo de la operabilidad en el dominio del tiempo.

(Propio)

$$Operabilidad = \frac{\sum_{0 \leq i \leq m} a_{ij} \text{ Bajo la curva}}{T} \quad (62)$$

2.3.2 Operabilidad basada en resultados del dominio de la frecuencia

Para el dominio de la frecuencia se utilizan registros históricos reales de espectros de olas direccionales proporcionado por la NOAA (2020) para calcular el espectro de respuesta de rolido mediante la Ecuación (10). Esta respuesta es comparada con el límite operacional establecido para rolido (2°) y así obtener la operabilidad como se muestra en la Figura 41. Todo el tiempo que los datos se encuentren debajo del límite operacional, el buque puede trabajar y mientras se encuentre sobre este, significa que el rolido del buque es mayor al límite establecido, por lo tanto, no puede trabajar.

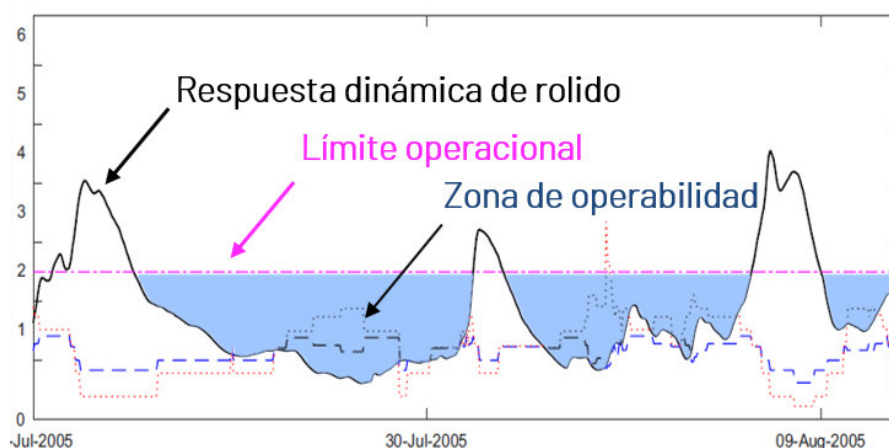


Figura 41. Representación esquemática de una comparación de respuesta de rolido con el límite operacional para hallar la zona de operabilidad

Modificado de (Guachamin Acero W. I., 2016)

2.4 Método numérico estructural

El diseño de los elementos estructurales que conforman el sistema de compensación se desarrolla en cinco fases. Una primera fase encargada de definir las características técnicas y los criterios de diseño del sistema. La segunda fase en donde se detallan los materiales utilizados en el diseño. La tercera fase en la que se caracterizan las cargas relevantes que intervienen en un ciclo de trabajo de la placa de compensación. Una cuarta fase que contempla el análisis estático de los componentes (sección 2.4.2) tomando en cuenta la combinación de H_s y T_p que induce las respuestas dinámicas máximas detalladas en la sección 2.2.1, y finalmente la fase cinco que abarca el análisis a fatiga (sección 2.4.3). Los parámetros de diseño se detallan en la sección 2.1.1.

De aquí en adelante, para el estudio de todos los componentes del sistema de compensación se utiliza como material base al acero ASTM A572 GR 50 por su común aplicación en plataformas marinas, bajo costo y rápida accesibilidad en el mercado tanto local como internacional. Los valores mínimos del límite de fluencia y resistencia a la tracción del material son 345 MPa y 450 MPa respectivamente (Ferrocortes S.A., 2021). En la Figura 42 se presenta la curva SN seleccionada para el material ASTM A572 GR50 de la cual se extraerán los datos para el análisis a fatiga.

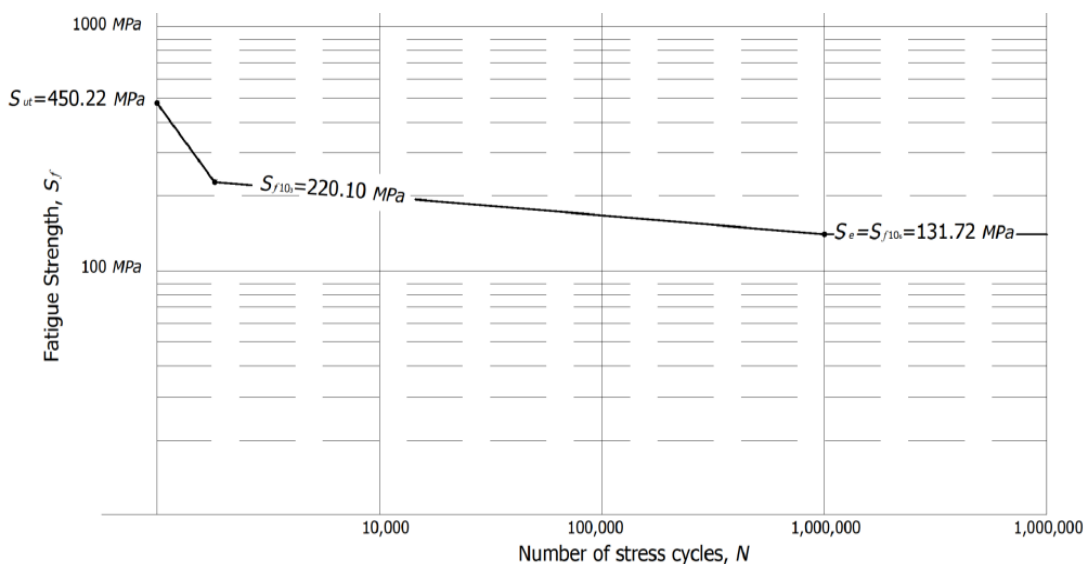


Figura 42. Diagrama S-N para el acero ASTM A572 GR50.

(Molina, Piña-Moñarrez, & Barraza, 2020)

2.4.1 Cargas hidrodinámicas

Las cargas que se aplican al sistema de compensación a lo largo de un ciclo se detallan en la sección 1.6.3. De todas las cargas involucradas, la fuerza de arrastre es de

particular interés al requerir determinar el coeficiente de Keulegan – Carpenter (KC). Las demás cargas se encuentran completamente definidas.

Para determinar el coeficiente KC es necesario ejecutar una simulación del sistema acoplado que contemple un tiempo prolongado de operación donde los efectos transitorios no distorsionen los resultados y los parámetros estadísticos no presenten grandes variaciones (1,1 horas). De esta simulación se extraen los datos de la velocidad en el eje vertical, o la amplitud del desplazamiento de la placa sobre el mismo eje. Si se introduce una amplitud de 2 [m] y la longitud característica de las configuraciones propuestas en la Tabla 4 dentro de la Ecuación (18), se obtiene un rango de valores del coeficiente KC presentado a continuación.

$$0,7 < KC < 1,57$$

Si se comparan los valores calculados de KC con la Figura 43, se observa como todas las curvas empiezan a converger en un punto cercano a 0,75. A partir de este punto no habría diferencias significativas entre los distintos tamaños de las placas de compensación. El valor análogo a la zona de convergencia corresponde de manera aproximada al coeficiente de arrastre (C_D), que con los argumentos propuestos sería el valor correspondiente de C_D de todas las configuraciones utilizadas. De esta manera queda completamente definida la fuerza de arrastre utilizada en la Ecuación (16).

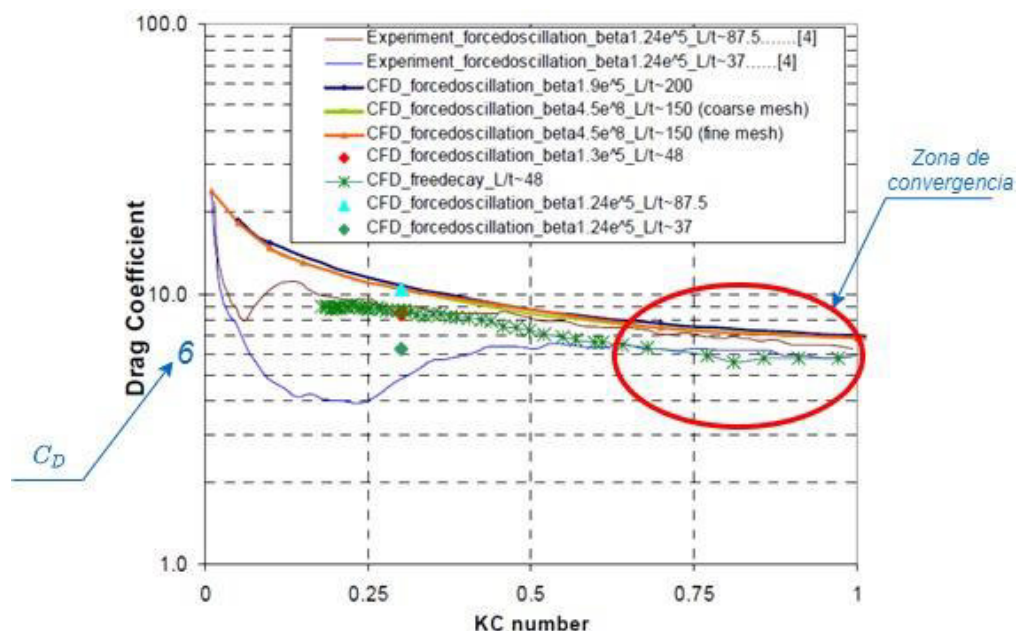


Figura 43. Relación entre C_D y KC para una placa rectangular perforada, sometida a oscilaciones forzadas.

(Atluri, Magee, & Lambrakos, 2009)

2.4.2 Análisis estructural estático

El modelo numérico estructural tiene sus cimientos en un análisis que provee el dimensionamiento de todos sus componentes a carga estática. La Figura 44 muestra la distribución adoptada para el sistema. El procedimiento general del diseño de cada componente se detalla en la sección 1.7. A continuación, se describen ciertas particularidades para el diseño de los componentes:

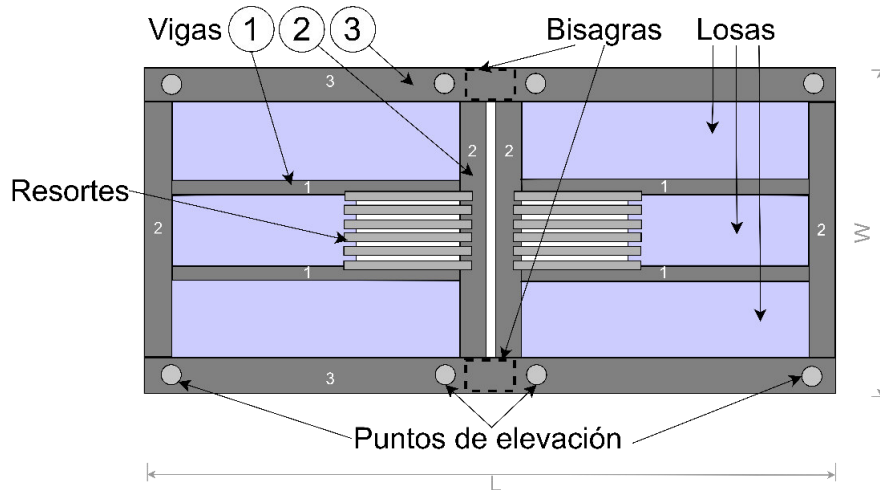


Figura 44. Distribución de elementos críticos de la placa de compensación.

(Propio)

Puntos de izaje

El procedimiento para el cálculo de las orejas de izaje y las eslingas se detalla en la sección 1.7.1.

Losas de Concreto

El procedimiento para su diseño se especifica en la sección 1.7.2 teniendo en cuenta ciertos ajustes; el espesor del concreto (h) mostrado en la Figura 22 es un dato conocido que no necesita estimación, por lo que, lo único que se hace es comprobar que este espesor sea mayor al recomendado por la norma según el caso. Para el caso actual, se toma:

$$h \geq \frac{b}{16} \quad (63)$$

Para la carga viva, se toma la carga inercial variante obtenida por la simulación. Esta se puede expresar mediante la Ecuación (64).

$$W_{SL} = \frac{F_{in}}{A_t} \quad (64)$$

Donde:

F_{in} es la fuerza inercial que actúa sobre toda la placa estabilizadora

A_t es el área de la placa estabilizadora

Además, se considera una plancha de acero de 1 pulgada para recubrir el concreto y toda la placa en sí, tal como se muestra en la Figura 34.

Diseño de la estructura

La estructura completa se basa en una placa articulada por medio de bisagras, conformada por perfiles tipo W. Para simplificar su análisis: se consideran a todas las vigas de la estructura como vigas sueltas de apoyo simple y se consideran a las vigas laterales (Viga 3), como continuas debido a la utilización de bisagras justo debajo de estas como se muestra en la Figura 44. Estos resultados serán comparados con una simulación FEM de la estructura en conjunto.

La estructura, al ser esta el alma del sistema compensador, su análisis a fatiga es un tema de alta importancia en el diseño, para esto, el principal dato de entrada es el esfuerzo sobre las vigas en función del tiempo. Dentro de las respuestas dinámicas de la simulación con ANSYS AQWA no se obtiene el esfuerzo, pero sí las tensiones en los cables de izaje. Así, se busca obtener una ecuación de ensamble encargada de relacionar los efectos de estas tensiones con los esfuerzos en los puntos críticos de las vigas de la estructura, dejando todo en función de factores geométricos de las vigas. Para esto, se necesita primeramente obtener las cargas presentes individualmente en cada viga de la estructura como se presenta a continuación.

DCL viga 1

La viga 1 se ve influenciada solamente por la carga distribuida de la fuerza inercial aplicada sobre su patín más la carga distribuida de su peso. El resultado se representa por Q_1 (ver Figura 45).

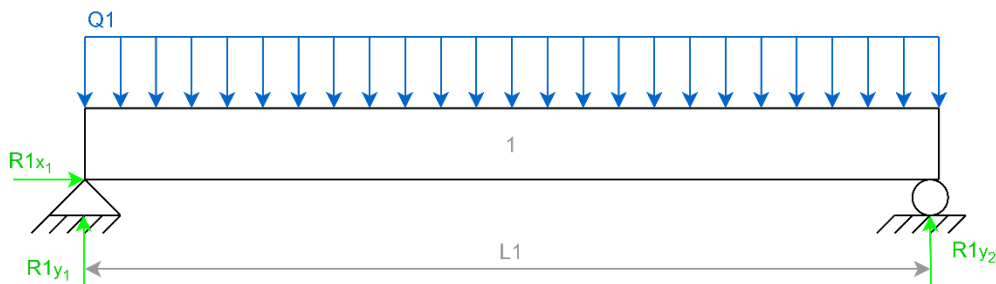


Figura 45. DCL simplificado de la viga 1.

(Propio)

DCL viga 2

La viga 2 se ve influenciada por la carga distribuida de la fuerza inercial aplicada sobre su patín más la carga distribuida de su peso. El resultado se representa por Q_2 y dos cargas puntuales R_1 que son las reacciones de las vigas 1 (ver Figura 46).

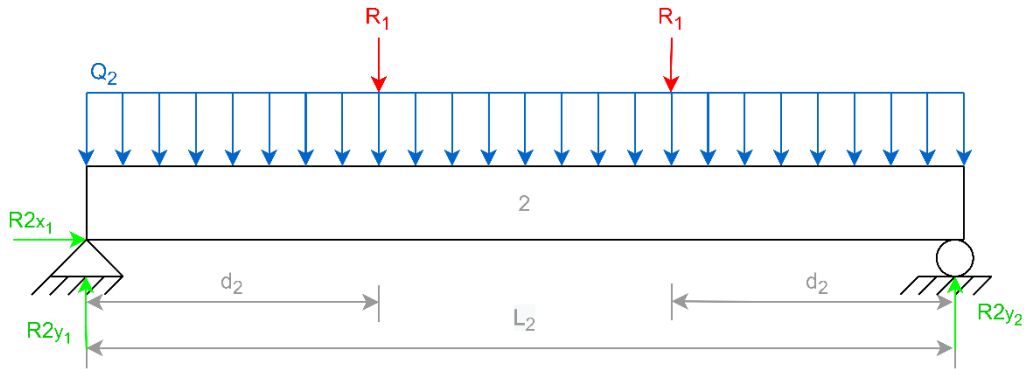


Figura 46. DCL simplificado de la viga 2.

(Propio)

DCL viga 3

La viga 3 se ve influenciada por la carga distribuida de la fuerza inercial aplicada sobre su patín más la carga distribuida de su peso. El resultado se representa por Q_3 y cuatro cargas puntuales R_2 que son las reacciones de las vigas 2 (ver Figura 47).

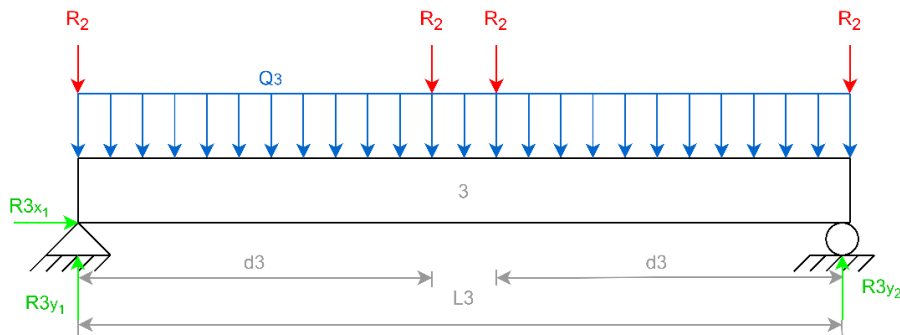


Figura 47. DCL simplificado de la viga 3.

(Propio)

Utilizando el procedimiento detallado en la sección 1.7.3 se obtienen las ecuaciones de las reacciones y momentos máximos de cada viga, los cuales se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de reacciones, momentos y esfuerzos máximos de las vigas 1,2,3 presentadas en las Figura 45, Figura 46 y Figura 47 respectivamente

Estructura		
Viga 1	Viga 2	Viga 3
Reacción (R_1)	Reacción (R_2)	Reacción (R_3)
$R_1 = \frac{Q_1 \cdot L_1}{2}$	$R_2 = \frac{Q_2 \cdot L_2 + \left(\frac{2R_1 \cdot L_1}{L_1}\right)}{2}$	$R_3 = \frac{Q_3 \cdot L_3 + 4R_2}{2}$
Carga distribuida sobre el patín (Q_1)	Carga distribuida sobre el patín (Q_2)	Carga distribuida sobre el patín (Q_3)
$Q_1 = \frac{2R_1}{L_1}$	$Q_2 = \frac{2(R_2 - R_1)}{L_2}$	$Q_3 = \frac{2R_3 - 4R_2}{L_3}$
Momento Máximo (M_{max1})	Momento Máximo (M_{max2})	Momento Máximo (M_{max3})
$M_{max1} = \frac{Q_1 \cdot L_1^2}{8}$	$M_{max2} = R_2 \cdot \frac{L_2}{4} + R_1 \left(d_2 - \frac{L_2}{4}\right)$	$M_{max3} = R_3 \left(\frac{L_3}{4}\right) + R_2 \left(d_3 - \frac{L_3}{2}\right)$
Esfuerzo en el punto crítico (σ_1)	Esfuerzo en el punto crítico (σ_2)	Esfuerzo en el punto crítico (σ_3)
$\sigma_1 = \frac{R_1 \cdot L_1}{4S_1}$	$\sigma_2 = \frac{R_2}{S_2} \cdot \left(\frac{L_2}{4}\right) + \frac{R_1}{S_2} \left(d_2 - \frac{L_2}{4}\right)$	$\sigma_3 = \frac{R_3}{S_3} \cdot \left(\frac{L_3}{4}\right) + \frac{R_2}{S_3} \left(d_3 - \frac{L_3}{2}\right)$
(L) es la longitud de viga, (d) es la distancia desde un extremo de la viga a su carga puntual (S) es el módulo de sección de viga		

Una vez que se definen las ecuaciones de todas las vigas, se puede encontrar las ecuaciones de ensamble que relacionan los esfuerzos de las vigas con las tensiones en los cables de izaje.

Se toma a la viga 3 como principal, ya que actúa de soporte para toda la estructura siendo esta la más larga y la que resiste más carga. Por esto, se detalla la metodología utilizada para la obtención de la fórmula ensambladora solamente para la viga tipo 3.

Se inicia redefiniendo la carga distribuida Q de las vigas considerando la presión distribuida constante (P_r) y el ancho del patín de cada viga (bf) como se muestra en la Ecuación (65).

$$Q = P_r \cdot bf \quad (65)$$

Se reemplaza el valor de la nueva carga distribuida en las reacciones de las vigas 1,2 y 3, definidas en la Tabla 6.

$$R_1 = \frac{Q_1 \cdot L_1}{2} \rightarrow R_1 = \frac{P_r \cdot bf_1 \cdot L_1}{2}$$

$$R_2 = \frac{Q_2 \cdot L_2 + 2R_1}{2} \rightarrow R_2 = \frac{P_r \cdot bf_2 \cdot L_2 + P_r \cdot bf_1 \cdot L_1}{2}$$

$$R_3 = \frac{Q_3 \cdot L_3 + 4R_2}{2} \rightarrow R_3 = \frac{P_r \cdot bf_3 \cdot L_3 + 2(P_r \cdot bf_2 \cdot L_2 + P_r \cdot bf_1 \cdot L_1)}{2}$$

Para facilitar el proceso de cálculo, se condensa la relación entre las reacciones R_3 y R_2 en una constante geométrica z , como se muestra en la Ecuación (65)

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{bf_3 \cdot L_3 + 2(bf_2 \cdot L_2 + bf_1 \cdot L_1)}{bf_2 \cdot L_2 + bf_1 \cdot L_1} = z \quad (66)$$

$$R_2 = \frac{R_3}{z}$$

Finalmente se reemplaza esta variable en la fórmula del esfuerzo de la viga 3 (σ_3), para dejarla en función de R_3 como se muestra en la Ecuación (67).

$$\sigma_3 = \frac{R_3}{S_3} \cdot \left(\frac{L_3}{4} + \frac{d_3}{z} - \frac{L_3}{2z} \right) \quad (67)$$

Si se dice que la componente en “Y” de la tensión en los cables de izaje son las reacciones de la viga 3, se obtiene la Ecuación (68) que relaciona las tensiones con los esfuerzos en la viga principal como se muestra en la Figura 48.

$$\sigma_3 = \frac{T_y}{S_3} \cdot \left(\frac{L_3}{4} + \frac{d_3}{z} - \frac{L_3}{2z} \right) \quad (68)$$

Donde:

T_y es la componente sobre el eje “Y” de la tensión del cable de izaje

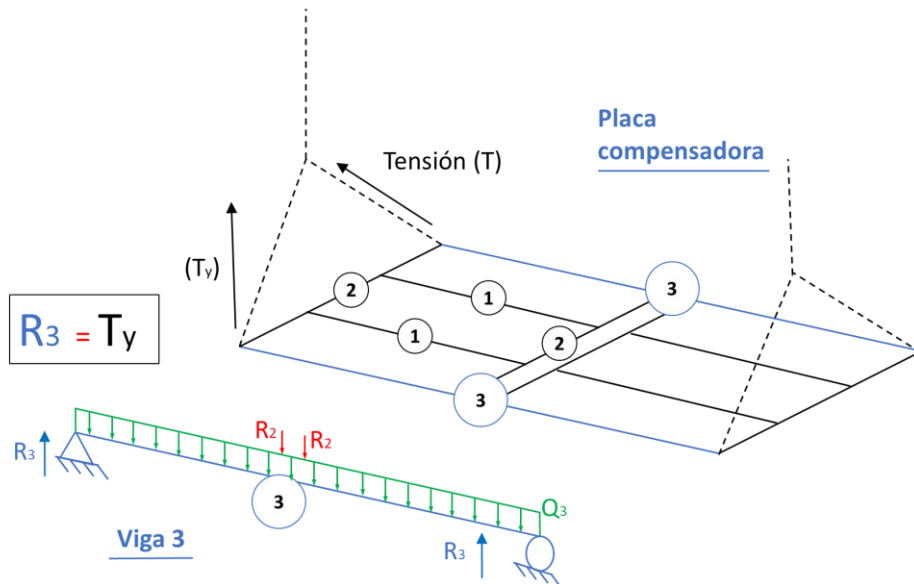


Figura 48. Relación de T_y con R_3

(Propia)

Resortes planos rectos

Para el diseño de los resortes se optó por un acople tipo cola de milano en uno de sus extremos y el procedimiento para el cálculo se utiliza el mismo presentado en la sección 1.7.4. El DCL del resorte es el mismo mostrado en la Figura 25, siendo Q_R la carga distribuida ejercida por la fuerza de arrastre de la placa.

Bisagra

El diseño de la bisagra simétrica de 3 segmentos como se indica en la Figura 49 y su dimensionamiento siguen los pasos presentados en la sección 1.7.5. con algunas singularidades. El esfuerzo admisible de corte se toma 0.4 veces el esfuerzo de fluencia admisible del material, como se muestra en la Ecuación (69).

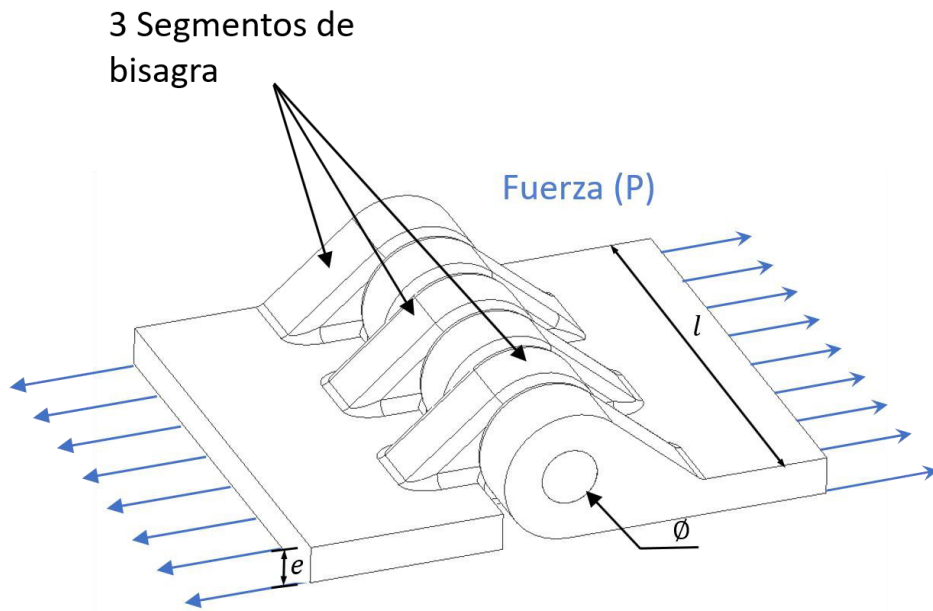


Figura 49. Bisagra utilizada.

(Propio)

$$\sigma_c = 0.4\sigma_f \quad (69)$$

Como las bisagras se encuentran debajo de las vigas (3) se reemplaza la ecuación del momento máximo presente en la tercera columna de la Tabla 6 con la Ecuación (66) de la constante geométrica (z) para dejarla solo en función de R_3 y parámetros geométricos. Como se muestra en la Ecuación (70)

$$M_{\max 3} = R_3 \cdot \left(\frac{L_3}{4} + \frac{d_3}{z} + \frac{L_3}{2z} \right) \quad (70)$$

Si se extraen los valores correspondientes al momento máximo de la Ecuación (70) y los valores geométricos correspondientes al patín bf_3 y el peralte δ_3 de la viga 3, se consigue la fuerza ejercida sobre la bisagra P , como se presenta en la Ecuación (71).

$$P = \frac{M_{max_2}}{\delta_3} \quad (71)$$

Con esto se despeja P en la Ecuación (55) y la reacción R_3 por el componente en “Y” de la tensión T_y para obtener el esfuerzo cortante del pin, en función de la tensión, tal como se muestra en la Ecuación (72).

$$\tau = T_y \cdot \frac{4 \cdot \left(\frac{L_3}{4} + \frac{d_3}{z} + \frac{L_3}{2z} \right)}{n \cdot \pi \cdot \phi^2 \cdot \delta_3} \quad (72)$$

2.4.3 Análisis estructural a fatiga

El análisis a fatiga se desarrolla para todos los elementos metálicos del sistema de compensación (orejas de izaje, resortes planos, estructura y bisagras), su metodología se presenta en la Figura 50.

Primero, se utilizan las respuestas dinámicas de la placa obtenidas en la simulación a través del software ANSYS AQWA (la fuerza de arrastre, la fuerza inercial, la tensión en los cables, etc) como entrada en la ecuación que relaciona la fuerza con el esfuerzo de cada elemento, ver paso 1. Esta ecuación es obtenida en el diseño estático de cada elemento; para las orejas de izaje, la estructura, los resortes planos, y las bisagras se tienen las Ecuaciones (22),(68),(53) y (57) respectivamente. Una vez obtenido el historial de esfuerzos críticos, ver paso 2, se utiliza el método de Rainflow detallado en la sección 1.8.1 para dividir estos esfuerzos en ciclos, ver paso 3, y calcular el daño por fatiga con la regla de Palmgren-Miner detallada en la sección 1.8.2, ver paso 4. Este proceso se repite para todas las respuestas dinámicas obtenidas de las combinaciones de H_s y T_p delimitadas en la sección 2.2.1 para elaborar una tabla de daños, ver paso 5. Luego, con ayuda del diagrama de dispersión presentado en la Tabla 1, se obtiene el daño porcentual a fatiga en base al número de registros en este a través de la Ecuación (73), ver paso 6.

$$\frac{D_{ij} \cdot a_{ij}}{\sum_{i,j=1}^{ij} a_{ij}} \quad (73)$$

Donde:

D_{ij} Son los datos de la tabla del conjunto de daños para todas las combinaciones de H_s y T_p presente en el paso 5

a_{ij} Son los datos de los registros presentes en el diagrama de dispersión

Como siguiente paso, se suman todos los daños porcentuales para obtener el daño total de la simulación (D_s), con esto, se puede calcular el daño total (D_t) para un periodo específico de tiempo utilizando la Ecuación (74), ver paso 7.

$$D_t = \frac{D_s \cdot T_t}{T_s} \quad (74)$$

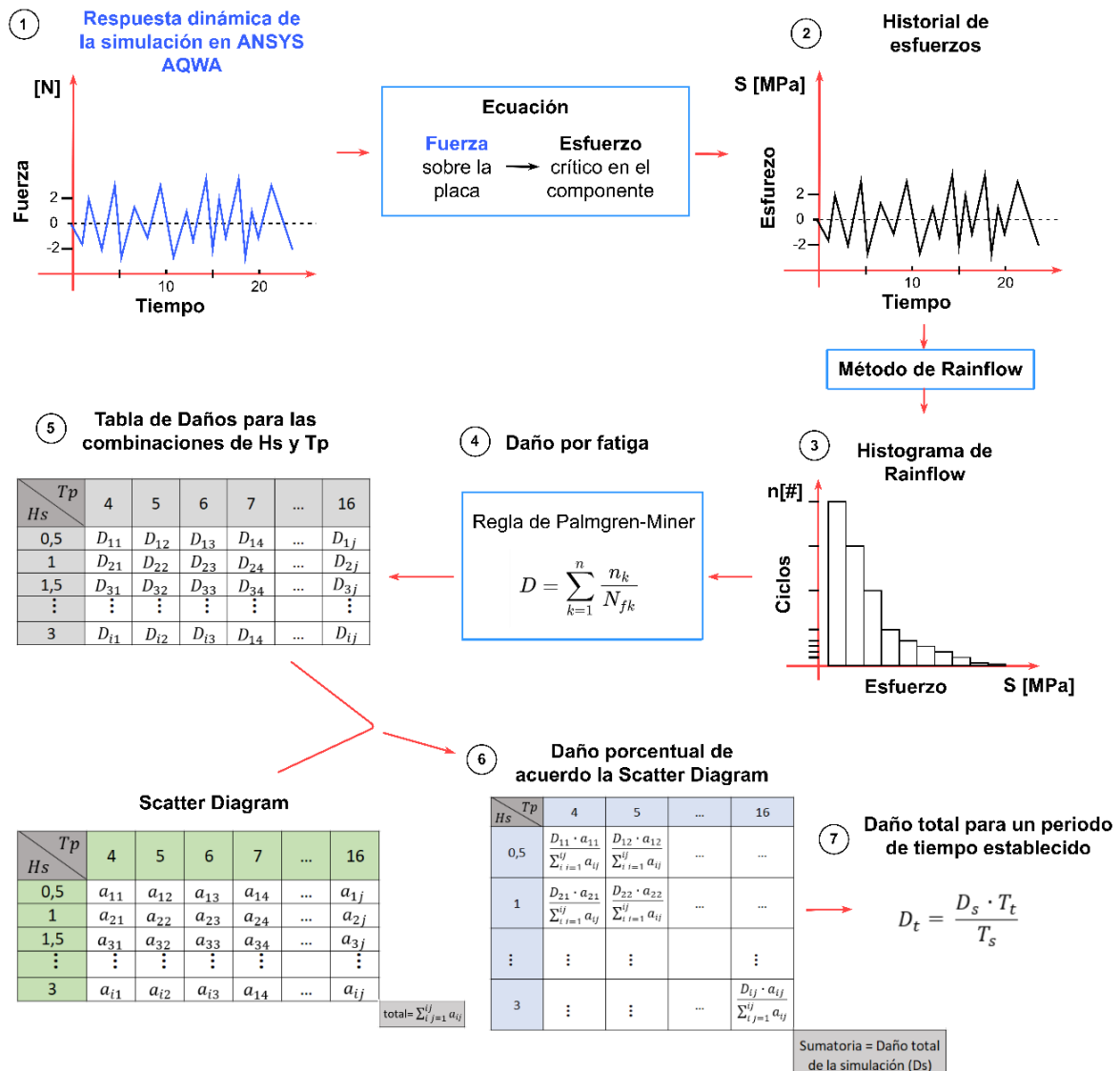


Figura 50. Metodología para el cálculo del daño por fatiga

(Propia)

3 Resultados y discusión

Este capítulo presenta los resultados de la simulación hidrodinámica. Seguido de ello, se muestra la operabilidad del sistema acoplado bajo diversas circunstancias. Posteriormente, utilizando la información previa, se desarrolla el dimensionamiento de los componentes principales de las placas de compensación apoyados en criterios de diseño estructural. Después, se presenta un análisis de factibilidad económica del sistema. Finalmente, se plantea una aplicación potencial del sistema en las costas ecuatorianas.

3.1 Simulación hidrodinámica

El principal propósito de la simulación hidrodinámica es la obtención de parámetros de respuesta dinámica para todos los cuerpos que conforman el sistema acoplado tomando en cuenta el proceso planteado en la sección 2.2. En el buque, es de principal interés el rolido alrededor del eje longitudinal tomando como referencia la línea horizontal de la superficie marina como se mostró en la Figura 2. En la simulación, se consideran varios ángulos de incidencia de las olas y en las placas de compensación las historias de tiempo correspondientes a la tensión de los cables, además de la velocidad y aceleración de su centro de gravedad. Con toda esta información se obtiene la operabilidad en los diferentes dominios, y las historias de tiempo de los esfuerzos en los componentes principales.

3.1.1 Evaluación de límites operacionales en función de H_s y T_p

El objetivo del sistema de compensación es reducir de manera significativa el rolido de un buque bajo diversas condiciones oceanográficas. Empleando el método y los parámetros de entrada detallados de la sección 2.2.1 se obtiene el rolido del buque con y sin sistema de compensación. Los datos presentados en la Tabla 7 muestran el ángulo de rolido del buque sin que se le acople una de las configuraciones del sistema de compensación de la Tabla 4 y con un ángulo de incidencia de las olas de 45° . Sobre la Tabla 7 se sobrepone la curva del límite de rolido de 2° , resaltando con rojo las combinaciones admisibles de trabajo.

Tabla 7. Curvas de Hs y Tp admisibles para un ángulo máximo de rolido del buque de 2° sin sistema de compensación con un ángulo de incidencia de las olas de 45°.

(Propio)

	Tp [s] / fp [rad/s]														
Hs [m]	1,7	1,57	1,26	1,05	0,9	0,79	0,7	0,63	0,57	0,52	0,48	0,45	0,42	0,39	
	3,7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0,5	0,34	0,34	0,34	0,34	0,39	0,63	0,95	1,44	1,59	1,35	1,19	1,11	0,99	0,90	
1	0,34	0,34	0,34	0,34	0,55	1,09	1,81	2,83	3,11	2,64	2,30	2,13	1,91	1,75	
1,5	0,34	0,34	0,35	0,35	0,76	1,58	2,69	4,22	4,64	3,95	3,42	3,16	2,83	2,61	
2	0,34	0,35	0,37	0,38	0,99	2,08	3,57	5,61	6,16	5,24	4,57	4,19	3,76	3,47	
2,5	0,35	0,36	0,40	0,42	1,22	2,58	4,44	6,99	7,67	6,53	5,65	5,21	4,68	4,33	
3	0,36	0,39	0,45	0,47	1,46	3,07	5,31	8,34	9,15	7,81	6,74	6,23	5,59	5,19	
3,5	0,37	0,42	0,51	0,53	1,71	3,56	6,16	9,68	10,61	9,07	7,83	7,24	6,48	6,04	

La forma de la curva marcada en la Tabla 7 varía en función de la incidencia de las olas y del sistema de compensación acoplado. Cuando las olas chocan con el casco del buque en una dirección de 0° respecto al eje longitudinal no debería inducirse un rolido significativo, siendo esta es la razón por la cual no se consideran estos resultados en el análisis posterior. Los límites operacionales Hs y Tp representan los límites de trabajo para el cual el buque es operable y pueden variar en función de las necesidades requeridas a un ángulo de rolido mayor o menor al de 2°. Estos límites se obtienen para el buque acoplando todas las configuraciones del sistema de compensación de la Tabla 4 con ángulos de incidencia de las olas de 45° y 90° respecto al eje longitudinal (ver Figura 51 y Figura 52).

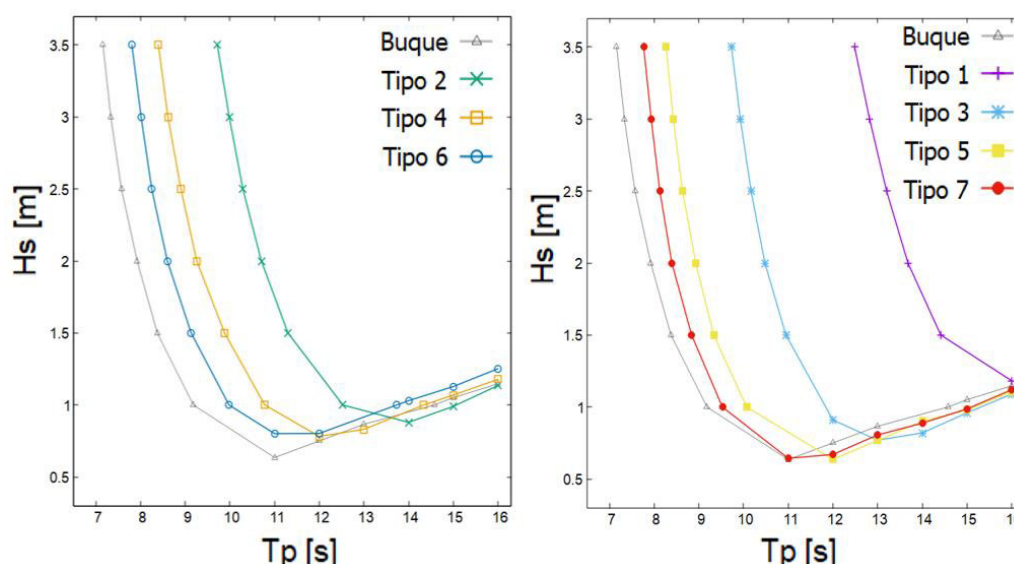


Figura 51. Límites operacionales Hs, Tp para configuraciones de 2 placas (izquierda) y 4 placas (derecha) con un ángulo de incidencia de las olas de 45°.

(Propio)

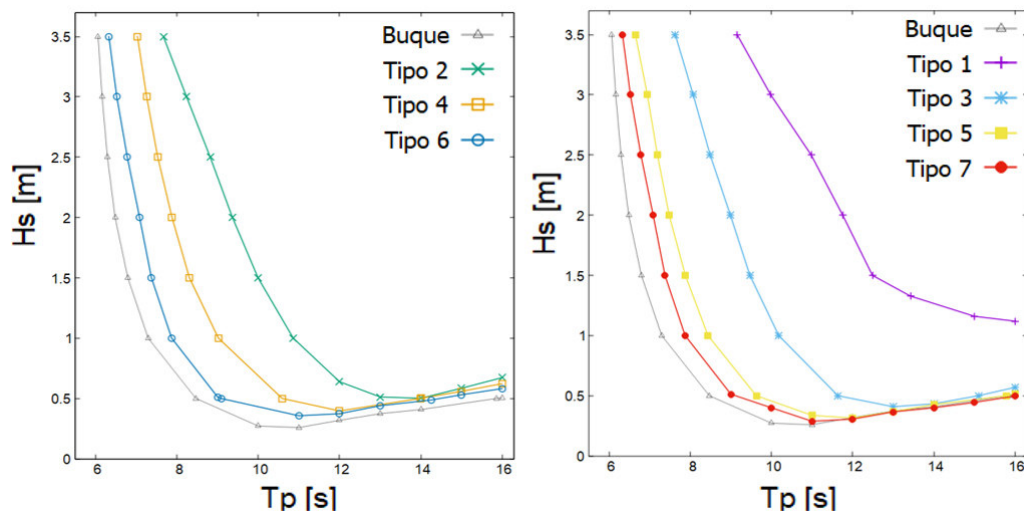


Figura 52. Límites operacionales H_s , T_p para configuraciones de 2 placas (izquierda) y 4 placas (derecha) con un ángulo de incidencia de las olas de 90° .

(Propio)

Las Figura 51 y Figura 52 muestran como independientemente de la incidencia de las olas, existe una tendencia a aumentar de manera significativa el área bajo la curva de rolido como una consecuencia de aumentar la masa estructural que a su vez incrementa el rango de periodos donde se encuentra el límite operacional. Esto se traduce en una mayor cantidad de combinaciones oceanográficas admisibles en las que el rolido es menor a 2° , siendo proporcional a la dimensión y peso del sistema de compensación. Mientras más grande el tamaño de la placa, mayor rango de combinaciones de H_s y T_p presentes menores a 2° y por lo tanto, mayor operabilidad.

Para las configuraciones de 2 placas se aprecia como a partir de un periodo de 11[s] y 10[s] para una incidencia de las olas de 45° y 90° respectivamente, llegan a converger los límites de operabilidad de 2° . Esto se traduce en un comportamiento similar al del buque y todas las configuraciones con olas de menor tamaño y alta frecuencia donde no habría una ganancia significativa de operabilidad con la aplicación del sistema. La única configuración que se excluye de este comportamiento es la Tipo 1 ya que abarca la gran mayoría de condiciones oceanográficas, sin llegar a aplanarse a partir de un periodo fijo en la Figura 51 y con una ligera tendencia a converger a partir de los 12[s] en la Figura 52. Al ser las curvas de 90° las que incluyen una menor cantidad de combinaciones admisibles (las más agresivas), estas son las utilizadas para el desarrollo de fases posteriores del estudio. Además, el sistema debería estar preparado para operar en condiciones en las cuales se exija un rolido mayor a los límites operacionales establecidos en caso de ser requerido.

3.1.2 Evaluación de funciones de transferencia

Las funciones de transferencia o “Response Amplitud Operators” (RAO) presentadas en la Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56 caracterizan al rolido del buque con 0°, 30°, 60° y 90° de incidencia de las olas utilizando todas las configuraciones del sistema de compensación de la Tabla 4 y las especificaciones de la sección 2.2.2.

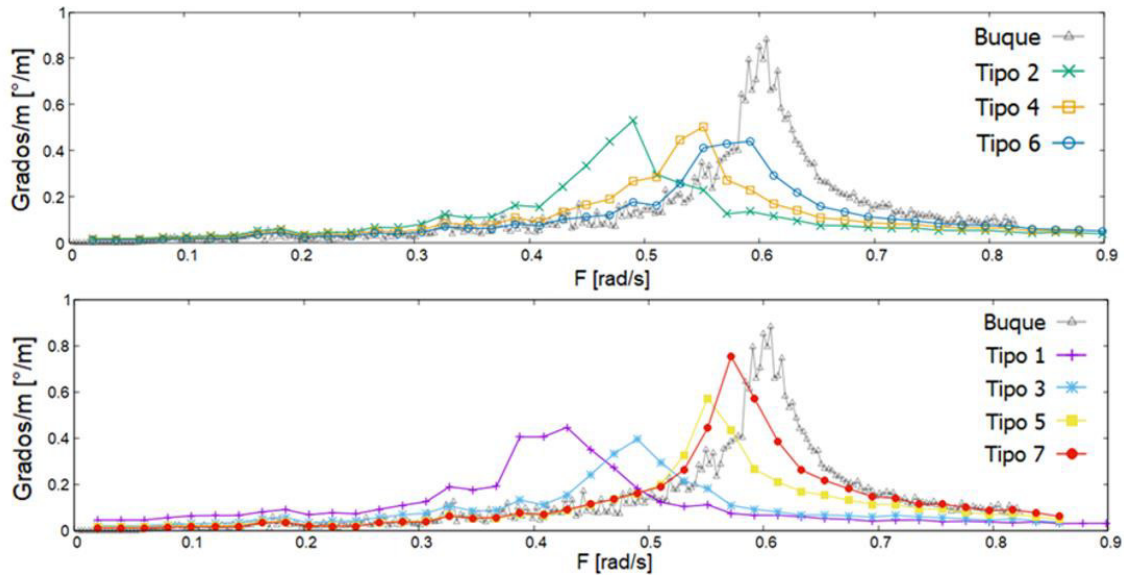


Figura 53. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 0°.

(Propio)

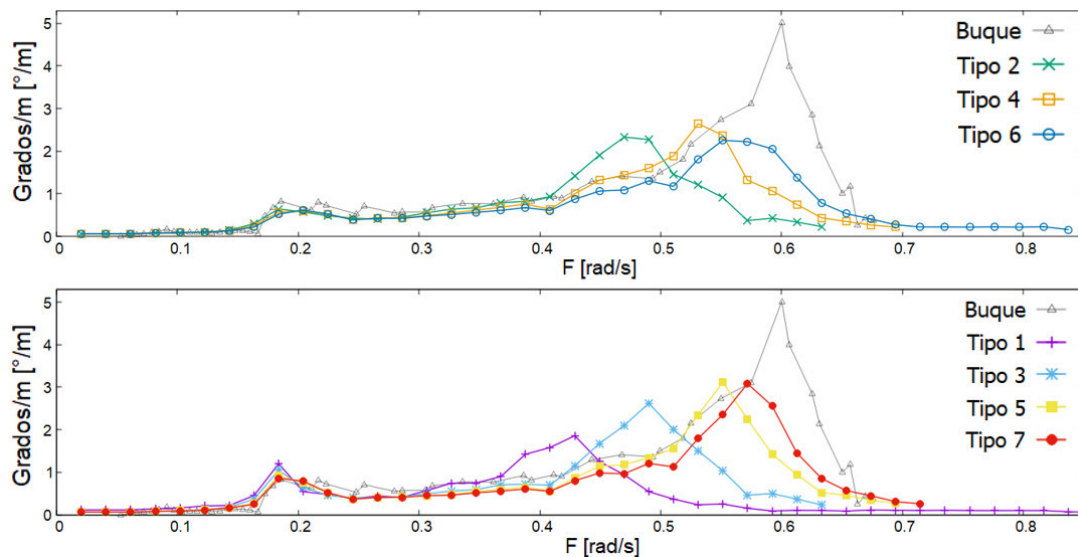


Figura 54. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 30°.

(Propio)

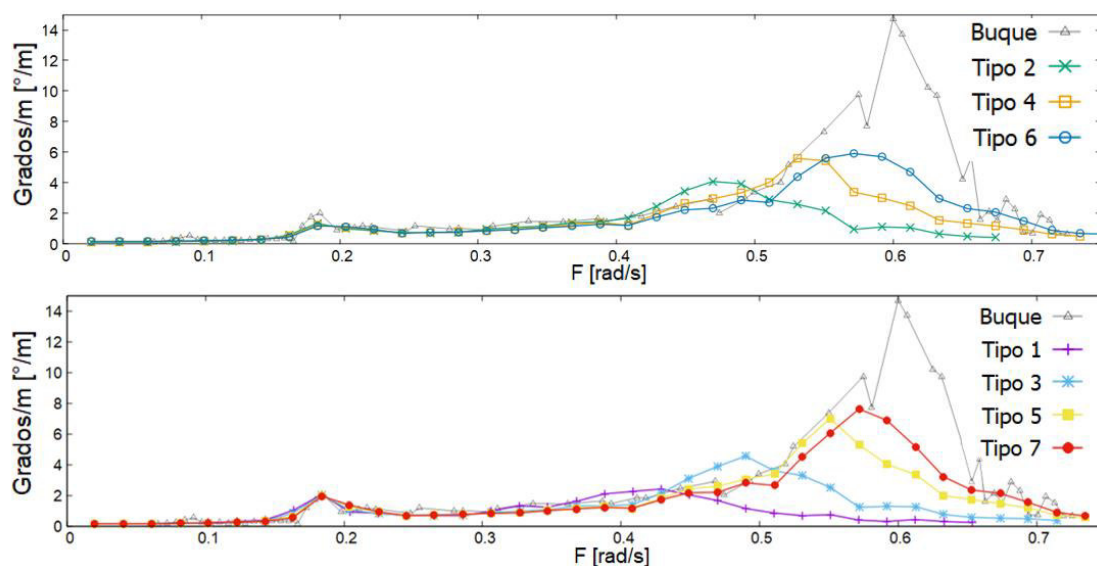


Figura 55. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 60°.

(Propio)

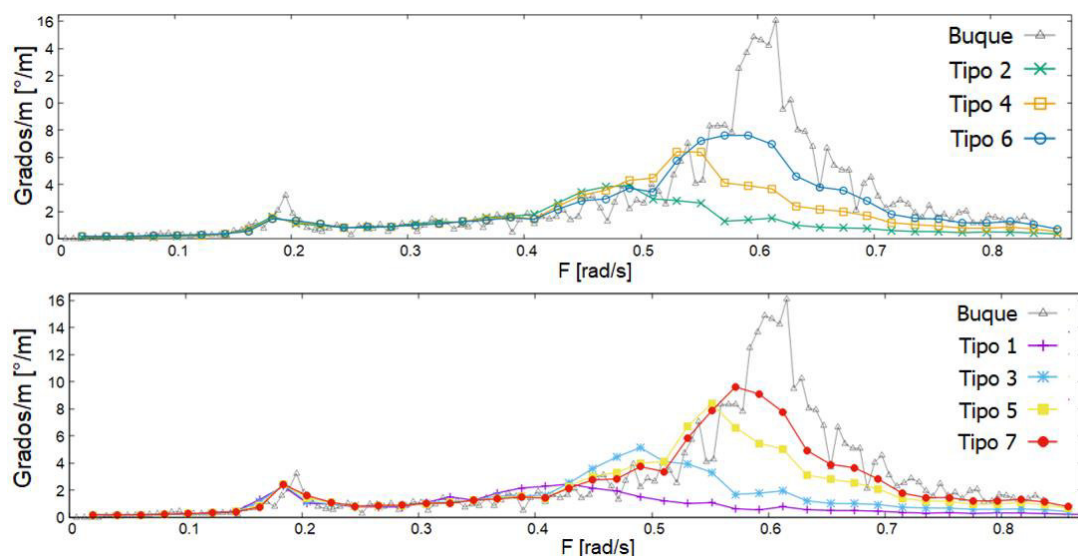


Figura 56. Función de transferencia para configuraciones de 2 placas (superior) y 4 placas (inferior) con un ángulo de incidencia de las olas de 90°.

(Propio)

El comportamiento general muestra como mientras se aumenta el ángulo de incidencia de las olas, se tiende a aumentar el rolido máximo provocado a una determinada frecuencia de excitación. Cuando la incidencia de las olas es de 0°, el rango de rolido de todas las configuraciones no supera 1° por cada metro de altura de ola, como se muestra en la Figura 53. En cambio, el rolido máximo de la Figura 56 donde la incidencia de las olas es de 90° respecto al eje longitudinal roza los 16 [°/m].

En todos los casos se llega a observar dos picos por configuración. El primero se encuentra en una frecuencia cercana a los 0,2 [rad/s] y representa la frecuencia pendular como producto de la interferencia de los grados de libertad ajenos al rolido del buque (ver Figura 1). El segundo es específico para cada configuración, es el máximo pico registrado y representa a la frecuencia natural de oscilación del sistema. Cabe mencionar que, para todas las incidencias de olas, la frecuencia natural de cada configuración se mantiene aproximadamente en un valor establecido.

Al añadir masa estructural mediante placas de compensación se aumenta el momento de inercia de masa. Además del aumento de masa, las cotas del sistema se incrementan de manera proporcional y específicamente su área. Una mayor área provoca un aumento en la separación de flujo que a su vez aumenta la fuerza de arrastre y como consecuencia se produce un mayor amortiguamiento. Todo esto desemboca en una reducción de la frecuencia natural y de los efectos del choque de las olas en las diferentes direcciones sobre el rolido del buque, provocando un comportamiento más suave y controlado que desplaza las funciones de transferencia hacia el costado izquierdo. Tomando como ejemplo a la Figura 56, donde, si se compara el Buque con la configuración Tipo 3 se observa una reducción del rolido esperado y la frecuencia natural desde un valor aproximado de 16 [°/m] a los 0,6 [rad/s] hasta los 5 [°/m] a 0,5 [rad/s].

Si se conjugan los resultados de todas las curvas mostradas en la Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56, se obtiene la superficie de la Figura 57. Esta representa la función de transferencia tridimensional del sistema acoplado y muestra el comportamiento del sistema considerando la simetría de las olas que inciden sobre el casco del buque como se especifica en la sección 2.2.2.

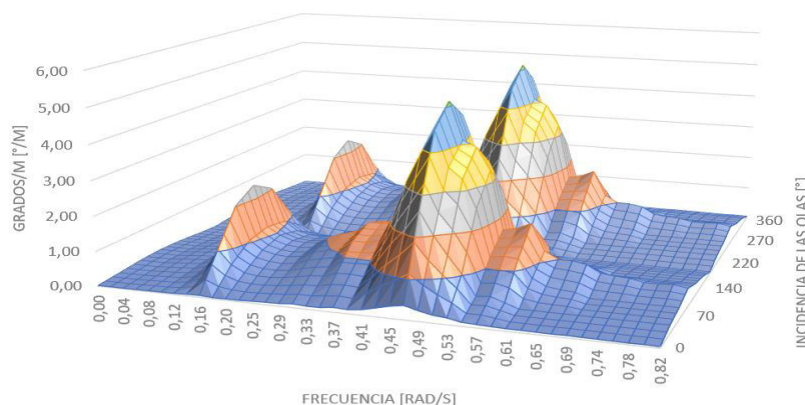


Figura 57. Relación entre los 360° de incidencia de las olas y la función de transferencia de la configuración Tipo 3.

3.1.3 Respuestas dinámicas

La simulación hidrodinámica en el dominio del tiempo (ver sección 2.2.1) arroja las historias de tiempo de las respuestas dinámicas. Entre estas respuestas se encuentra el rolido del buque, la tensión de los cables, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del centro de gravedad de las placas de compensación. Ver, por ejemplo, la Figura 38.

Primero, se calibra el modelo numérico ajustando el peso sumergido de las placas con el objetivo de determinar en qué condiciones existe pérdida de tensión en los cables de izaje. La Tabla 8 muestran las tensiones máximas y mínimas de todo el historial de tensiones de acuerdo con el peso impuesto para las placas de la configuración Tipo 3. Se desea la placa más ligera que no provoque pérdida de tensión en los cables de izaje, la cual se representa con una tensión mínima de 0 tal y como se muestra en la Tabla 8 para los pesos más bajos. Así, se selecciona el peso en el cual la tensión mínima no sea 0 y que represente, al menos, aproximadamente el 3.5% de la tensión máxima.

Tabla 8. Relación entre la tensión máxima y mínima al variar el peso sumergido de la configuración Tipo 3.

(Propio)

Peso [Ton]	Tensión [N]	
	Max	min
200	4,82E+06	0
250	4,87E+06	0
420	4,99E+06	5,16E+04
812	5,37E+06	1,87E+05

Además de la tensión de los cables, un parámetro importante en la simulación del sistema es el paso de tiempo en el que el código computacional calcula las respuestas dinámicas, ya que pasos muy largos no capturan modos de vibración de alta frecuencia o estructurales y en el peor de los casos la solución no converge, mientras que pasos muy cortos requieren de un gran trabajo computacional. La Tabla 9 muestra la respuesta de rolido máximo, calculado con su equivalente a la Ecuación (6), variando la rigidez de los cables (utilizando valores prácticos y reales) y el paso del tiempo de simulación para un estado de mar $H_s=1.5$ y $T_p=7$. De todas las combinaciones, las de menor tensión presentan la mayor estabilidad y concordancia en los valores de rolido. Además, para aproximar adecuadamente un estado de mar en el cual se puedan encontrar la mayoría de las condiciones oceanográficas se establece un paso de 0.002 segundos y un tiempo

de simulación de 3999 segundos. Esto considerando las limitaciones en poder computacional y la cantidad de información a procesar para cada uno de los métodos contemplados.

Tabla 9. Variación del rolido en función de la rigidez en los cables del sistema de izaje y el paso del tiempo en las simulaciones.

(Propio)

		Rigidez de los cables (N)		
		5,00E+06	1,50E+07	3,00E+07
Paso de	0,01	0,2576°	0,1798°	0,174°
	0,005	0,2618	0,1886°	0,1674°
	0,002	0,2674°	0,2488°	0,2714°
	0,001			0,2722°

Una vez definido por completo la tensión de los cables y el paso de tiempo para las simulaciones hidrodinámicas, se obtiene las historias de tiempo de las respuestas dinámicas más relevantes para todas las configuraciones del sistema de compensación de la Tabla 4 y para todas las combinaciones de H_s y T_p que se encuentran bajo los límites operacionales de la Figura 52. De las historias de tiempo se extraen los valores máximos en el final de recorrido de cada ciclo (ver Tabla 10) que serán utilizados para el diseño mecánico de los elementos estructurales.

Tabla 10. Valores máximos de la tensión y mínimos de la fuerza inercial para todas las combinaciones de H_s y T_p con un rolido límite de 2°.

(Propio)

Config	H_s [m]	T_p [s]	V [m/s]	a [m/s ²]	Tensión [N]	$F_{inercial}$ [N]	$F_{arrastre}$ [N]
Tipo 1	3,5	9	0,77	1,829	7,59E+06	5,03E+06	5,91E+05
Tipo 2	3,5	8	0,458	2,525	9,37E+06	6,94E+06	2,09E+05
Tipo 3	3,5	8	0,36	2,713	5,37E+06	4,22E+06	7,81E+04
Tipo 4	3,5	7	0,4798	2,017	3,99E+06	3,14E+06	1,39E+05
Tipo 5	3,5	7	0,02317	2,129	1,88E+06	1,45E+06	1,65E+02
Tipo 6	3,5	6	0,5128	1,51	1,37E+06	1,03E+06	8,09E+04
Tipo 7	3,5	7	0,1672	2,174	1,13E+06	8,61E+05	5,50E+03

Comparando los datos mostrados en la Tabla 10, se deduce que, al tener una mayor magnitud, la tensión se ve gobernada por la fuerza inercial, más no por la fuerza de arrastre ya que al encontrarse en los extremos o puntos máximos del recorrido de las placas, no hay un arrastre considerable.

3.2 Operabilidad

La capacidad de operar todas las configuraciones planteadas bajo los lineamientos de la sección 2.3 se detalla a continuación.

3.2.1 Resultados de la operabilidad para análisis en el dominio del tiempo

La determinación de la operabilidad se desarrolla en base a los lineamientos de la sección 2.3.1.

Debido a la elevada carga computacional de las simulaciones en el dominio de tiempo, se restringe la cantidad de ángulos en la incidencia de las olas a solamente 0° , 45° y 90° . La Figura 58 y la Figura 59 son elaboradas en base a la información de límites operacionales detallada en la Figura 51, Figura 52 y el diagrama de dispersión del Océano Atlántico Norte mostrado en la Tabla 1. El comportamiento dinámico de los distintos sistemas de compensación se ve afectado por la restricción de los límites operacionales de 0.5° , 1° y 2° de rolido máximo. La Figura 58 y la Figura 59 muestran una tendencia a la baja en cada configuración mientras se va reduciendo las dimensiones de la configuración del sistema de compensación acoplado y el rolido máximo tolerado.

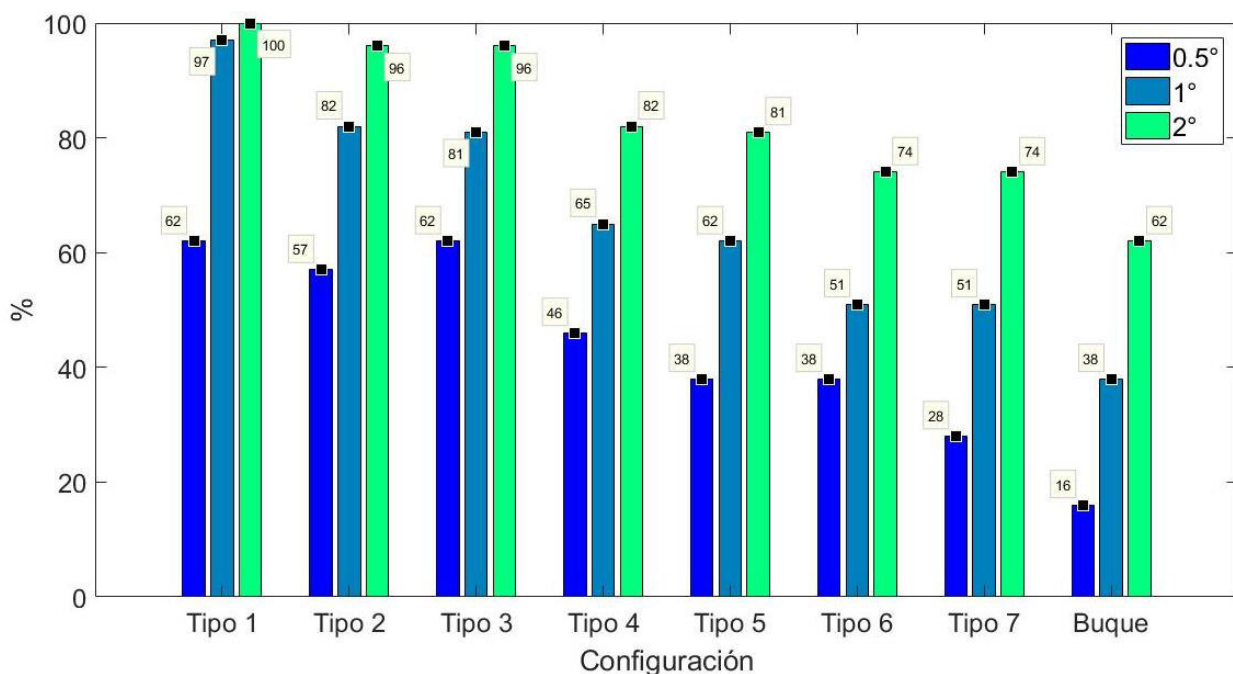


Figura 58. Operabilidad en el dominio del tiempo considerando un ángulo de incidencia de las olas de 45° y un rolido máximo de 0.5° , 1° y 2° .

(Propio)

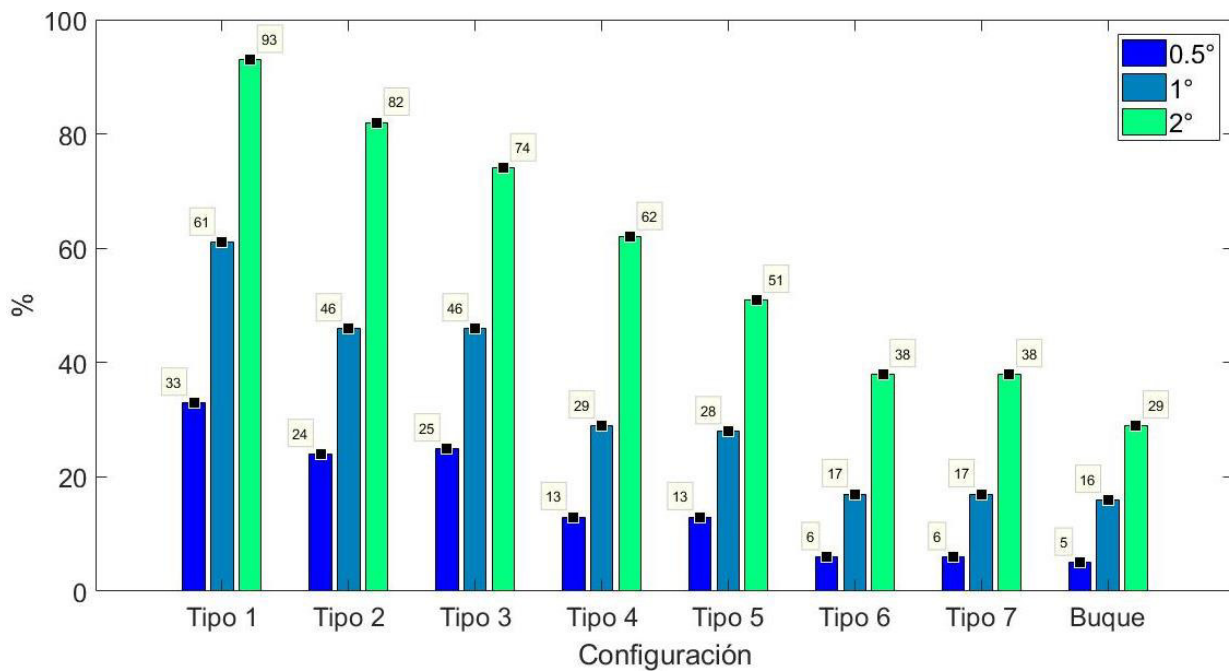


Figura 59. Operabilidad en el dominio del tiempo considerando un ángulo de incidencia de las olas de 90° y un rolo máximo de 0.5°, 1° y 2°.

(Propio)

Se aprecia como con una incidencia de olas de 45° (ver Figura 58) no produce una diferencia significativa entre dos configuraciones adyacentes (2 y 3, 4 y 5) con un mismo límite operacional, llegando a ser menor al 5% o incluso llegando a ser muy semejantes. En cambio, con una incidencia de 90° (ver Figura 59) ocurre un cambio más marcado entre la operabilidad de las dos configuraciones adyacentes con un mismo límite operacional.

3.2.2 Resultados de la operabilidad para análisis en el dominio de la frecuencia

La determinación de la operabilidad se desarrolla en base a los lineamientos de la sección 2.3.2. La Figura 60 muestra el promedio del porcentaje de la operabilidad mensual acumulada de cada configuración. Se observa la misma tendencia de la operabilidad que en el dominio de tiempo en el cual, a mayores dimensiones del sistema de compensación, mayor es la operabilidad del sistema, con la influencia del mes en que se desarrolla la operación marina. La información de los registros históricos mensuales de espectros de olas direccionales (2D) son filtrados para obtener el valor

promedio considerando la incidencia de las olas más agresivas para el sistema acoplado.

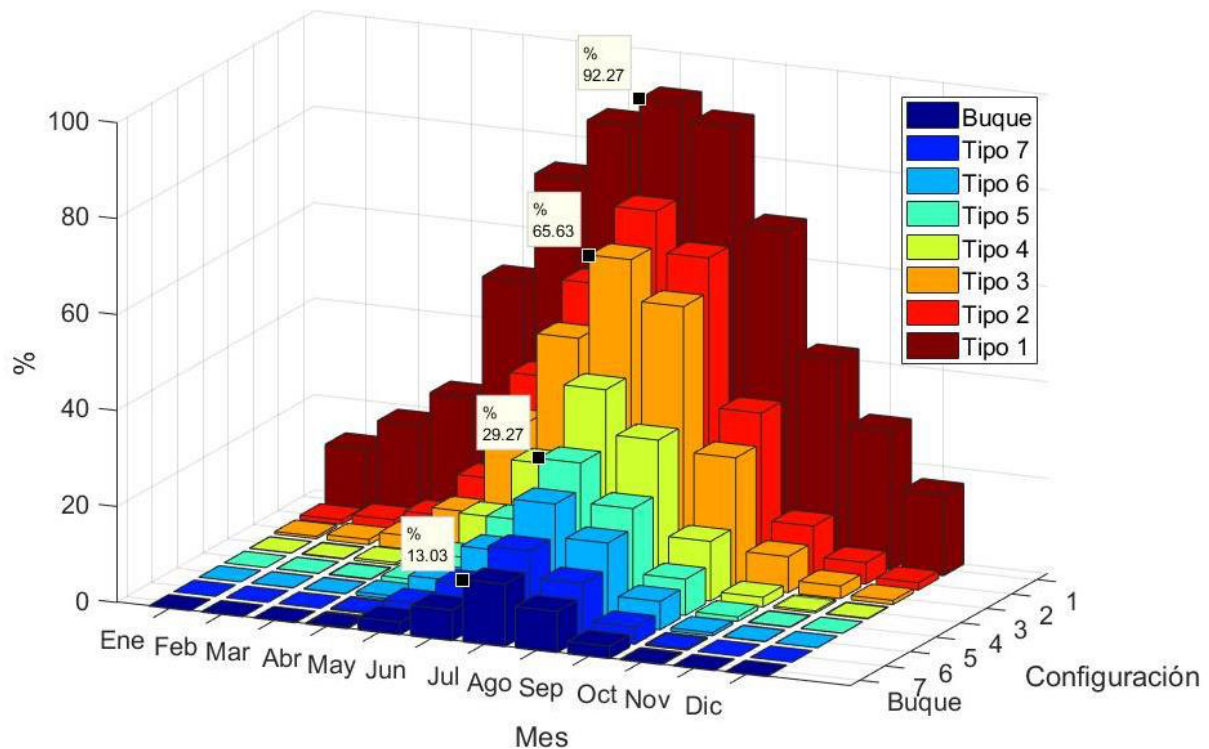


Figura 60. Operabilidad mensual acumulada.

(Propio)

El aporte más significativo que se extrae de la Figura 60 recae en poder determinar en qué meses e incluso estaciones el sistema adoptado es más efectivo. En los meses de mitad de año correspondiente a la temporada entre abril y agosto es donde la operabilidad en todos los casos es máxima. Esto concuerda con las estaciones de primavera y verano en el hemisferio norte. En cambio, la operabilidad es mínima en el resto del año, correspondiente a los periodos de otoño e invierno. Cabe mencionar que esto solo se relaciona para los datos del Atlántico Norte y por ende de manera aproximada al hemisferio norte.

En la Figura 60 se puede apreciar una ganancia significativa en el mes de mayor operabilidad. En este caso, el buque propuesto (sin ninguna clase de dispositivo de compensación) llega a tener una operabilidad de aproximadamente el 13%, mientras que al utilizar la configuración Tipo 5 llega a tener una operabilidad de 29.3%, lo que significaría una ganancia de aproximadamente el 225%. Si se lo compara con la configuración Tipo 3 que tiene una operabilidad del 65.6%, se obtiene una ganancia del

504.6%. Esto significa que para la configuración Tipo 5 puede operar el doble de tiempo y cuatro veces más para la Tipo 3.

3.2.3 Comparación de los resultados de operabilidad en dominio de tiempo y dominio de la frecuencia

La correspondencia en la tendencia de operabilidad en el dominio del tiempo y la frecuencia se comparan por medio de la superposición de operabilidades bajo criterios específicos. En la sección 3.2.1 se observa como olas que inciden a 90° sobre el eje longitudinal del buque son las de mayor influencia, además, se hace hincapié en las recomendaciones habituales de rolo detallados en la sección 2.3.1 para seleccionar los resultados de operabilidad utilizando el dominio del tiempo con olas de 90° y 2° máximos de rolo. A esto se añade el factor estacional donde acorde a la Figura 60, el mes de julio proporciona las condiciones ideales para operar con la mayor confiabilidad posible, justificando así, la comparación entre los resultados de operabilidad del mes de Julio con los obtenidos a través de la incidencia de ola de 90° utilizando métodos completamente diferentes.

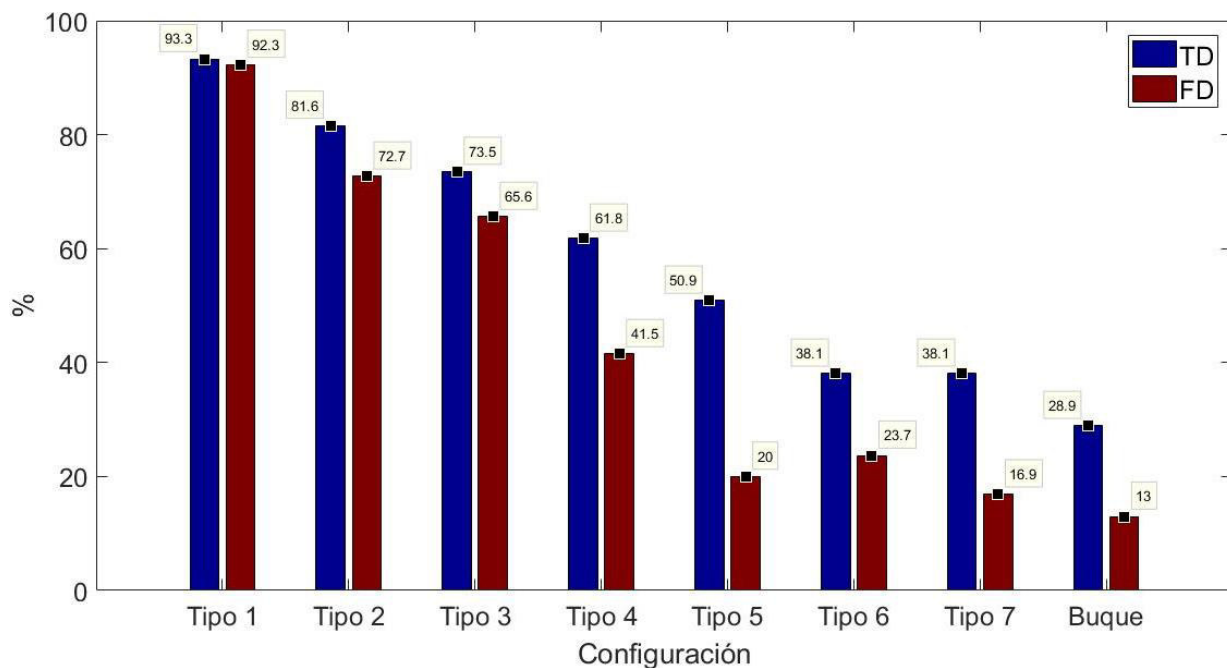


Figura 61. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolo de 2° y el promedio de operabilidad del mes de Julio respectivamente.

(Propio)

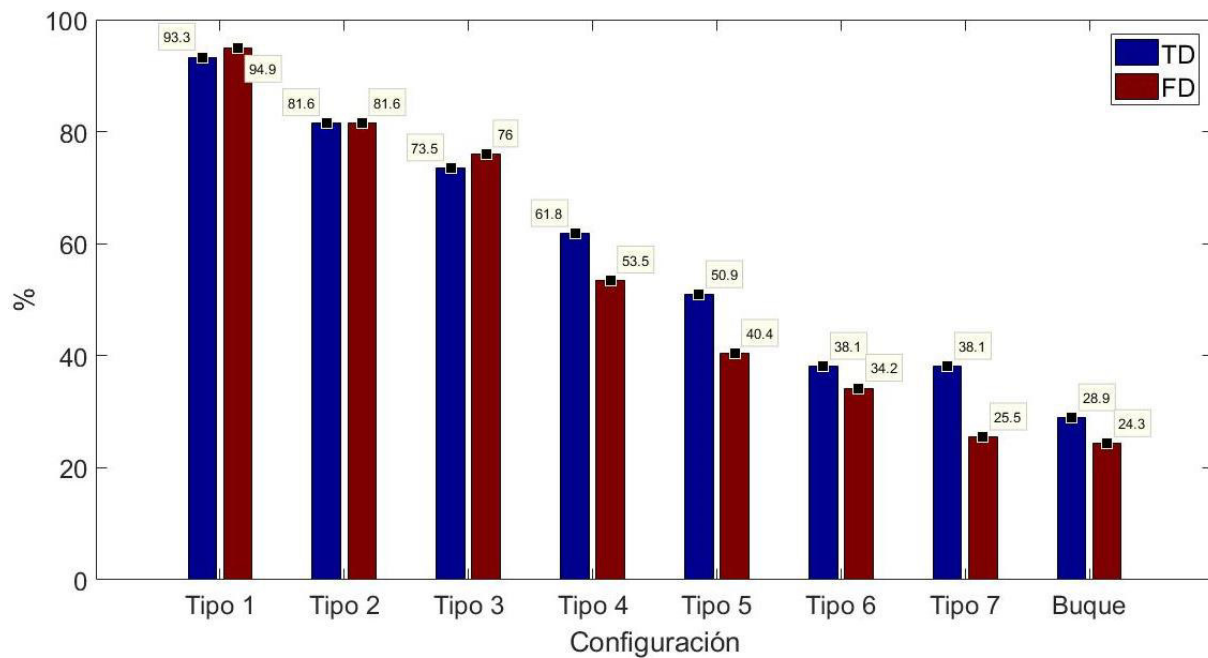


Figura 62. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolo de 2° y la máxima operabilidad del mes de Julio respectivamente.

(Propio)

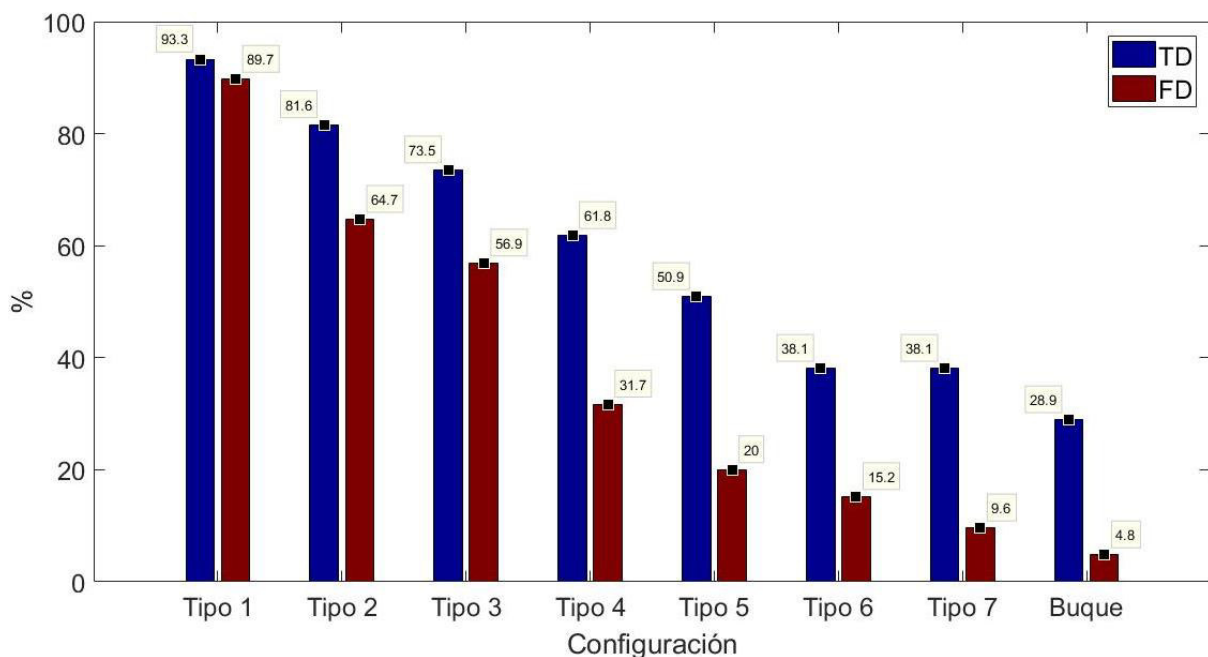


Figura 63. Relación entre la operabilidad de los resultados en el dominio de tiempo (TD) y la frecuencia (FT) para una incidencia de las olas de 90°, un rolo de 2° y la menor operabilidad del mes de Julio respectivamente.

(Propio)

La Figura 61, Figura 62 y Figura 63 relacionan el comportamiento del sistema acoplado bajo diversas circunstancias en el dominio del tiempo y la frecuencia. La Figura 61 relaciona la operabilidad en el dominio de tiempo para una incidencia de las olas de 90°, un rolido de 2° y en el dominio de la frecuencia, el PROMEDIO de operabilidad del mes de Julio. Aquí se observa como las configuraciones de mayores dimensiones (configuración Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Tipo 4) mantienen una mayor concordancia entre sí, con diferencias menores al 10%. En cambio, todas las configuraciones con una masa menor difieren casi por completo con los resultados esperados.

La Figura 62 indica la relación entre la operabilidad en el dominio de tiempo para una incidencia de las olas de 90°, un rolido de 2° y en el dominio de la frecuencia con la MÁXIMA operabilidad del mes de Julio. Los resultados de esta comparación son los más consistentes en todas las configuraciones y no presentan desviaciones significativas. Estas características vuelven a estos ideales para la selección de la configuración sobre la cual se desarrolla el diseño estructural.

La Figura 63 muestra la relación entre la operabilidad en el dominio de tiempo para una incidencia de las olas de 90° y un rolido de 2° con el dominio de la frecuencia con la MÍNIMA operabilidad del mes de Julio. En esta figura se muestra resultados semejantes al de la Figura 61 con la diferencia de que existen cambios relevantes cuando se utiliza una configuración más pequeña (Tipo 5, tipo 6 y tipo 7).

Seleccionar una configuración óptima para las fases posteriores enfocadas en el diseño mecánico requiere determinar cuál posee la mayor coherencia entre factores como el peso sumergido y la operabilidad. Además, se incluyen las cargas máximas que afectan al sistema y limitan a su diseño estructural mostradas en la Tabla 10.

Estas premisas vuelven ideal a la configuración Tipo 3 ya que es la que presenta mayor consistencia entre los resultados de operabilidad como se muestra en la Figura 62, además brinda la mayor relación entre peso/operabilidad y las cargas de diseño que se aplican sobre este sistema no son excesivas acorde a lo mostrado en la Tabla 10.

3.3 Diseño estructural

El dimensionamiento y las características ingenieriles de los componentes que forman el sistema de compensación se desarrollan en base a lo especificado en las secciones 1.6, 1.7 y 1.8. Es de particular interés aspectos como la cantidad de material, ya que son indispensables para estimar los costos que implica la construcción de este tipo de

estructura marina. El plano de conjunto del diseño preliminar del sistema de compensación se presenta en el Anexo VI.

3.3.1 Dimensionamiento estático y simulación FEM la oreja de izaje

El dimensionamiento de las orejas de izaje se realiza utilizando el procedimiento sin alteraciones de la sección 1.7.1 tomando la tensión máxima en los cables de izaje y el material ASTM A572 GR50 presentado en la sección 2.4. El factor de seguridad mínimo calculado es de 1,7 y al compararlo con la simulación FEM se obtiene correlación en sus resultados tal como se muestra en la Figura 64.

Tabla 11. Dimensionamiento de la oreja

(Propio)

Sistema de izaje			
Geometría	Valor	Unidad	Ecuación
Diámetro del pasador (ϕ)	0,152	m	-
Espesor de la oreja (t)	0,2	m	(24)
Radio interior (r_{int})	0,07	m	-
Radio exterior (r_{ext})	0,18	m	(27)
Longitud (L)	0,5	m	-
Carga de diseño (W_d)	5261561,1	N	(21)

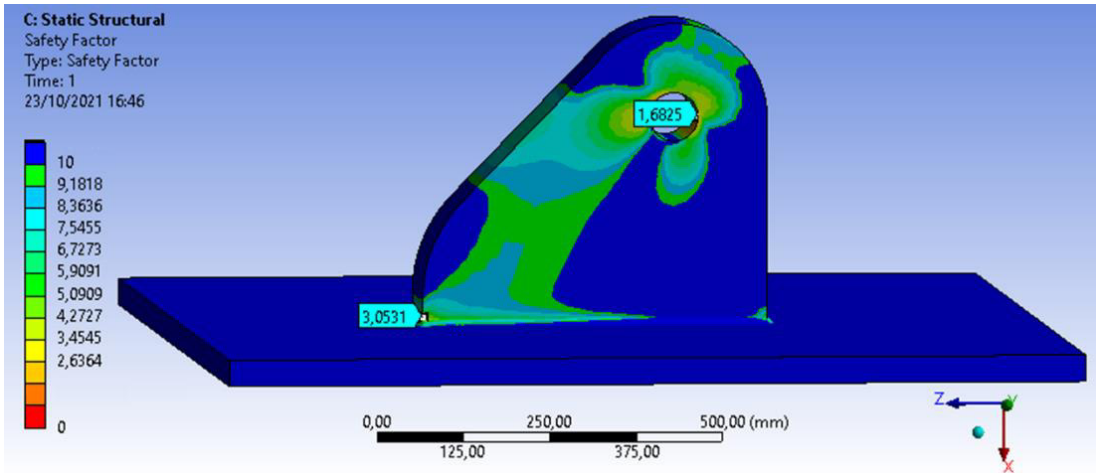


Figura 64. Factor de seguridad de la oreja.

(Propio)

3.3.2 Selección de cadenas y grilletes

Acorde a los lineamientos de la sección 1.7.1, las eslingas deben garantizar soportar 5 veces la carga máxima registrada. A efectos prácticos y considerando que esta carga

es puntual en la historia de tiempo, se toma un factor de seguridad de 2. Bajo estas premisas, se escoge una eslinga sintética de polietileno de alto módulo (HMPE) ULTRALINE DYNEEMA SK78, suministrado por el fabricante BEXCO. Este tipo de eslinga es ampliamente utilizada en aplicaciones marinas debido a sus excelentes propiedades de resistencia a la tracción, resistencia a la abrasión, resistencia a rayos UV, facilidad de manejo y mantenimientos casi inexistentes.

La Tabla 12 muestra las cargas totales con el factor de seguridad sugerido. La eslinga de apoyo es la encargada de conectar la placa con la cadena principal y se encuentra inclinada 60°. La eslinga principal es la que conecta al buque con la eslinga de apoyo y sus características geométricas se muestran en la Figura 65. Y el esquema de conexión se muestra en la Figura 48.

Tabla 12. Carga máxima de las eslingas.

(Propio)

Eslinga de apoyo			
Cargas	Valor	Unidad	Referencia
C_n	5369000	N	Tabla 10
C_{te}	10738000	N	Eq.(29)
	10738	KN	Eq. (29)
Eslinga principal			
Cargas	Valor	Unidad	Ecuación
C_{te}	18598,76	KN	Eq. (29)

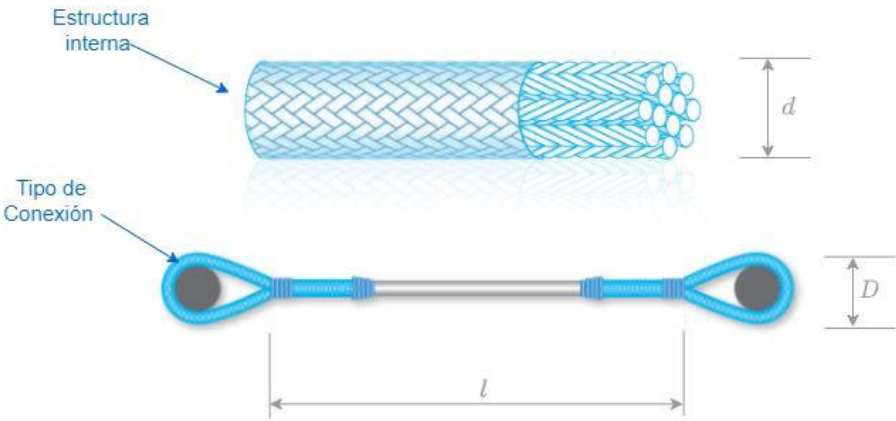


Figura 65. Geometría de la eslinga.

(BEXCO, 2021)

Acorde a los datos seleccionados de la Tabla 13, se utilizan una eslinga de apoyo por cada oreja y una eslinga principal desde el buque hacia el punto de bifurcación de las eslingas de apoyo. Con respecto a los grilletes, actualmente no hay fabricante que garantice los requerimientos de un grillete para la configuración seleccionada. De todas

maneras, muchos son accesibles a fabricarlo bajo criterios del cliente. Las cargas en los grilletes son las mismas mostradas en la Tabla 12 y se adopta la misma configuración de dos grilletes por oreja y el mismo factor de seguridad.

Tabla 13. Datos técnicos de las cadenas seleccionadas

(BEXCO, 2021)

	Diámetro	Peso	Carga de rotura	
Eslinga	mm	Kg/m	T	kN
Principal	180	16,7	2100	20601
De apoyo	136	9,99	1160	11378

3.3.3 Diseño de losas de concreto

El proceso para el dimensionamiento de la placa de concreto se presenta en la sección 1.7.2. Además, en la sección 2.4.2 se detallan algunas consideraciones específicas no presentadas en el procedimiento estándar. En la Tabla 14 se presenta un resumen de los cálculos realizados junto con el dimensionamiento final de la losa en la Figura 66.

Tabla 14. Dimensionamiento de las losas de concreto

(Propio)

Placa de concreto			
Geometría	Valor	Unidad	Referencia
Espesor (h)	1	m	Figura 22
Cargas y parámetros	Valor	Unidad	Ecuación
Profundidad efectiva (d)	0,97	m	(30)
Carga muerta total (W_{SD})	24,00	kN/m ²	(31)
Carga viva (W_{sl})	6,60	kN/m ²	-
Carga última distribuida (W_u)	39,36	kN/m	(32)
Momento máximo (M_u)	106,83	kN.m	-
K_{req}	113,54	kN/m ²	(33)
Cálculo de acero a flexión	Valor	Unidad	Ecuación
Cuantía requerida (P_{min})	0,01		(36)
N° barras x metro	5,62	u	(39)
Separación de las barras (S)	17,80	cm	-
N° total de barras	81,87	u	(40)
Cálculo de acero para retracción y fraguado	Valor	Unidad	Ecuación
Cuantía requerida (P_{min})	0,00		(36)
N° barras x metro	4,79	u	(39)
Separación de las barras (S)	20,88	cm	-
N° total de barras	22,32	u	(40)

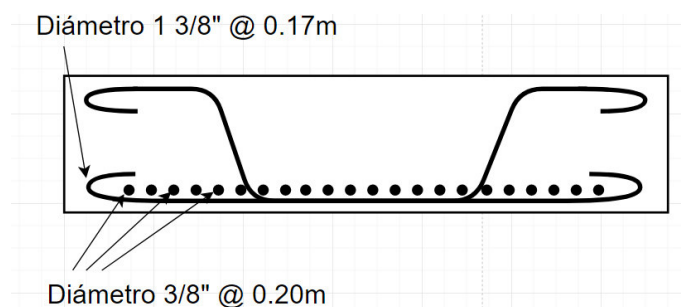


Figura 66. Representación de la estructura interna de las losas de concreto.

(Propio)

3.3.4 Dimensionamiento estático y simulación FEM de la estructura principal

La estructura compuesta por 3 tipos de vigas se puede apreciar en la Figura 44. Su proceso de selección y diseño se detalla en la sección 1.7.3 y la metodología de cálculo explicada en la sección 2.4.2. Así, tomando en cuenta el material ASTM A572 GR50 presentado en la sección 2.4, en la Tabla 15 se presentan los resultados de:

La geometría de cada una de las vigas, las cargas distribuidas (Q) presentes en los DCL de la Figura 45, Figura 46 y Figura 47 correspondientes a las vigas 1, 2 y 3 respectivamente.

Las reacciones (R), momentos máximos (M_{max}) y esfuerzos (σ) para cada viga como resultados de las ecuaciones presentes en la Tabla 6.

Los factores de seguridad (F.S) para cada viga.

Y finalmente, el factor geométrico (Z), el cual es utilizado en la Ecuación ensambladora (68) encargada de relacionar el esfuerzo del punto crítico de la viga 3 con las tensiones en los cables de izaje.

Tabla 15. Análisis y diseño de la estructura principal.

(Propio)

Estructura								
Viga 1			Viga 2			Viga 3		
Geometría			Geometría			Geometría		
Tipo	Comercial W18x234		Tipo	Comercial W40x593		Tipo	Fabricada	
Ixx_1	0,00371	m4	Ixx_2	0,0210	m4	Ixx_3	0,0756	m4
S_1	0,00764	m3	S_2	0,0383	m3	S_3	0,1008	m3
L_1	14,330	m	L_2	13,9230	m	L_3	30,0000	m
bf_1	0,297	m	bf_2	0,4242	m	bf_3	1,2000	m

Fuerzas			Fuerzas			Fuerzas		
Q_1	29476,31	N/m	Q_2	42073,01703	N/m	Q_3	119024,047	N/m
Reacciones y esfuerzo			d_2	4,667	m	d_3	14,757	m
R_1	211197,73	N	Reacciones y esfuerzo			Reacciones y esfuerzo		
M_{max1}	756615,86	Nm	R_2	504089,04	N	R_3	2793538,78	N
σ_1	99,08	MPa	M_{max2}	2005141,22	Nm	M_{max3}	20834790,54	Nm
Factor de seguridad			σ_2	99,06	MPa	σ_3	206,65	MPa
$F.S_1$	3,48		Factor de seguridad			Factor de seguridad		
			$F.S_2$	3,48		$F.S_3$	1,67	
						Factor Geométrico		Eq.
						Z	5,54	(60)

En la Figura 67 se muestra el resultado de la simulación FEM. Notar que el factor de seguridad simulado de la viga tipo 3 es el más alejado del análisis manual. Esto se debe a la rigidez extra que le añaden las vigas tipo 2 colocadas en el centro de la viga que, por simplicidad, no es considerado.

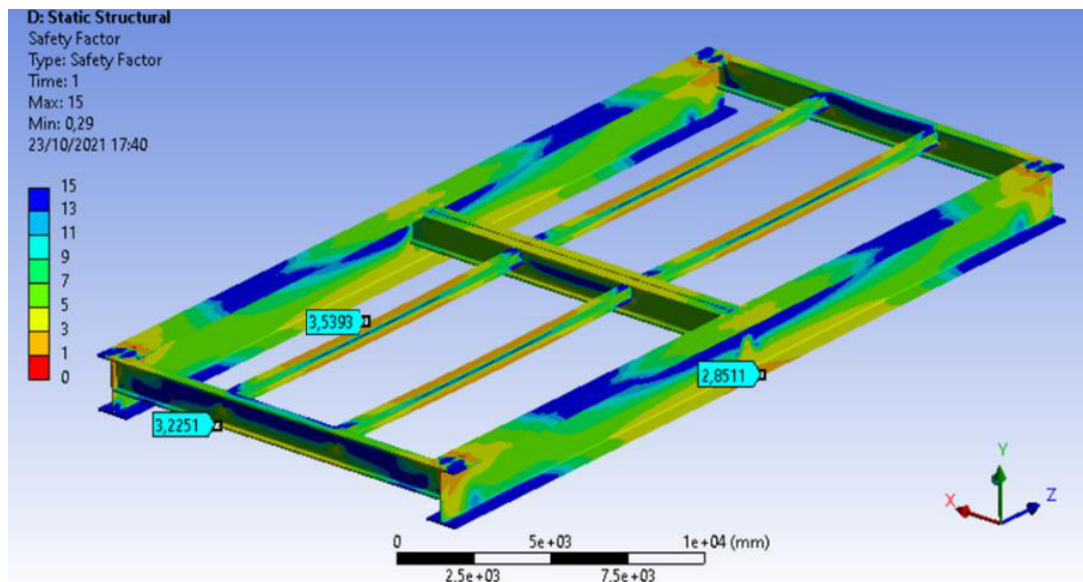


Figura 67. Factor de seguridad de la estructura principal.

(Propio)

3.3.5 Dimensionamiento estático y simulación FEM del resorte

El proceso para el dimensionamiento del resorte se detalla en la sección 1.7.4 y se presenta el resumen de sus resultados en la Tabla 16 utilizando el material ASTM A572 GR50 presentado en la sección 2.4. En la Figura 69 y Figura 70 se presentan los resultados de la simulación FEM los cuales coinciden con los cálculos realizados presentando un F.S de 1,5 y una apertura máxima de 55 cm.

Tabla 16. Dimensionamiento del resorte.

(Propio)

Resortes			
Geometría	Valor	Unidad	Referencia
Longitud (L)	4,300	m	Figura 26
Ancho (A_n)	0,700	m	
Espesor (e)	0,043	m	
Fuerzas y reacciones	Valor	Unidad	Ecuación
Carga máxima total (F)	4554697,07	N	-
Presión sobre resorte (P_r)	10121,549	N/m ²	(47)
Carga distribuida (Q_r)	7085,084	N/m	(48)
Reacción vertical del empotramiento (R_R)	30465,863	N	(49)
Momento máximo ($M_{\max R}$)	65501,605	Nm	(50)
Esfuerzo de carga (σ_R)	300000000	N/m ²	(53)
Factor de seguridad			Ecuación
F.S	1,5		(54)

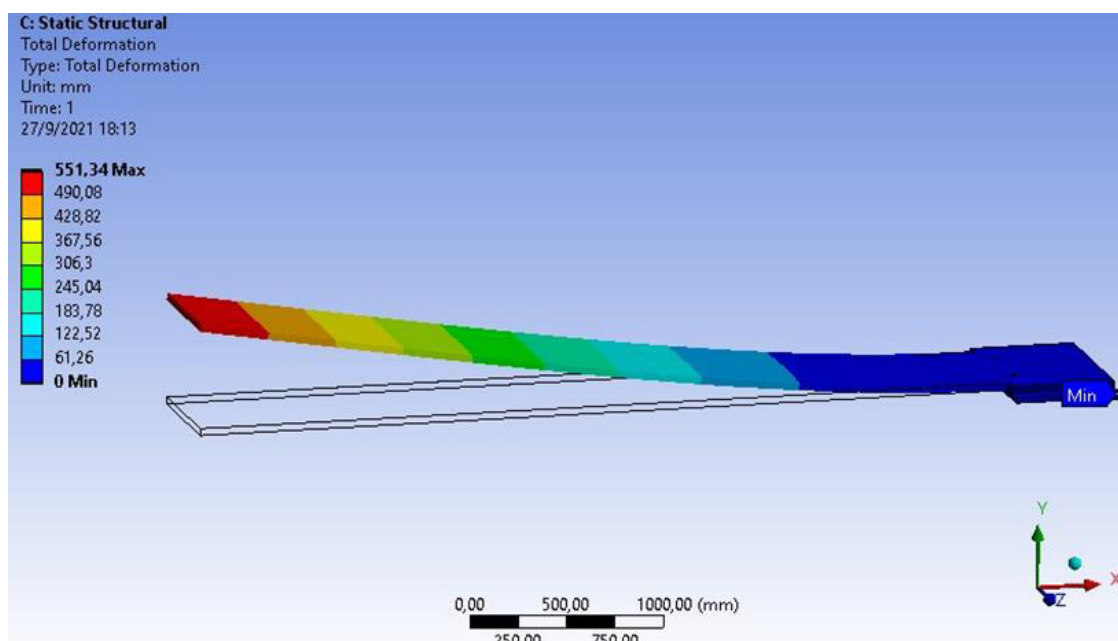


Figura 68. Deformación máxima del resorte.

(Propio)

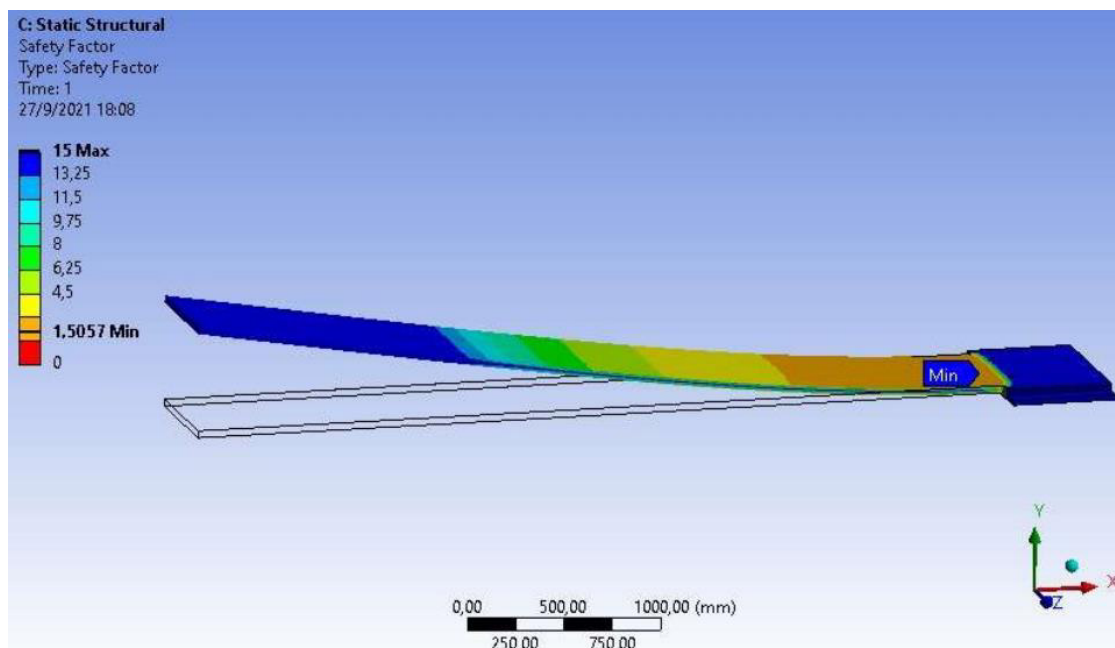


Figura 69. Factor de seguridad del resorte.

(Propio)

3.3.6 Dimensionamiento estático y simulación FEM de la bisagra

El dimensionamiento de las bisagras se realiza utilizando el procedimiento de la sección 1.7.5 tomando como fuerza cortante aquel que generan las vigas tipo 3 como se muestra en Figura 49. En la Tabla 17 se presentan los resultados del dimensionamiento de la bisagra utilizando el acero ASTM A572 GR50 presentado en la sección 2.4. El factor de seguridad mínimo calculado es de 1,7 y al compararlo con la simulación FEM se obtiene correlación en sus resultados tal como se muestra en la Figura 70.

Tabla 17. Dimensionamiento de la bisagra.

(Propio)

Bisagra			
Datos necesarios de la Viga tipo 3			Referencia
Alto total de la viga (d)	1,50	m	-
Ancho del patín (bf)	1,20	m	Tabla 15
Momento Máximo (M_{max3})	20834,79	kN*m	Eq. (70)
Geometría de la bisagra	Valor	Unidad	Referencia
Número de secciones	3	u	Figura 27
Espesor de placa (e)	0,15	m	
Longitud de sección a fluencia (L_f)	0,20	m	
Número de áreas de corte	5,00	u	Figura 28
Pasador	Valor	Unidad	Ecuación
Esfuerzo admisible a cortante (σ_c)	252,00	MPa	(69)
Par de torsión (P)	13889,86	kN	(71)
Esfuerzo cortante del pasador (τ)	112,50	MPa	(55)

Diámetro del pasador (ϕ)	0,18	m	(56)
F.S del pasador	1,60		
Aplastamiento en la argolla	Valor	Unidad	Ecuación
Esfuerzo de aplastamiento(σ_a)	150,00	MPa	(57)
F.S de la placa	3,00		

En la Figura 70 se presenta la simulación FEM de la bisagra y, para mayor compresión, en la Figura 71 y Figura 72 se presentan las diferentes partes de la bisagra en gráficos separados con sus respectivos factores de seguridad.

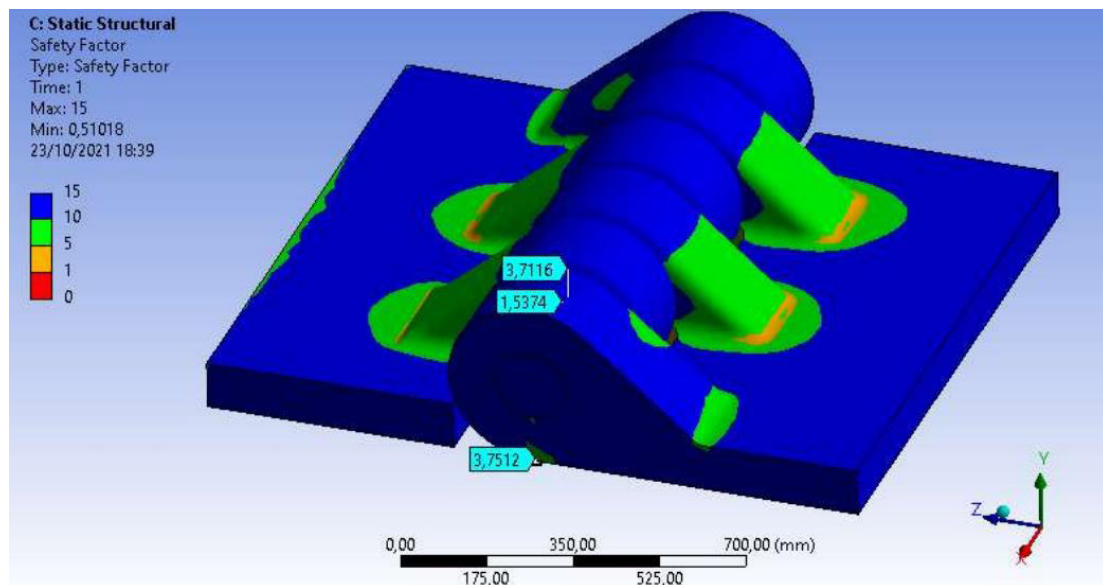


Figura 70. Factor de seguridad del ensamble de la bisagra completa.

(Propio)

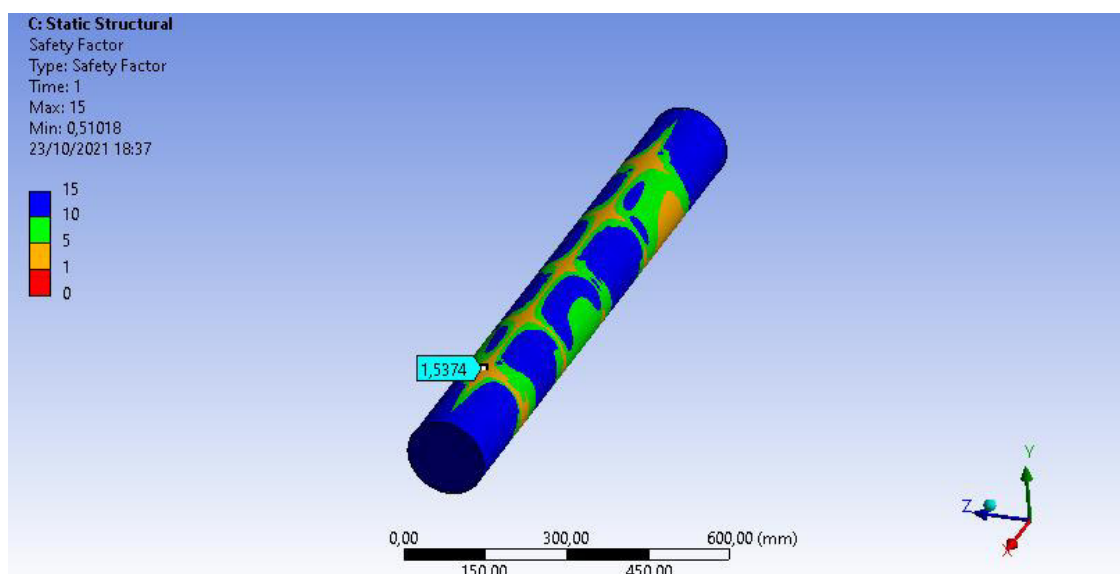


Figura 71. Factor de seguridad del pasador.

(Propio)

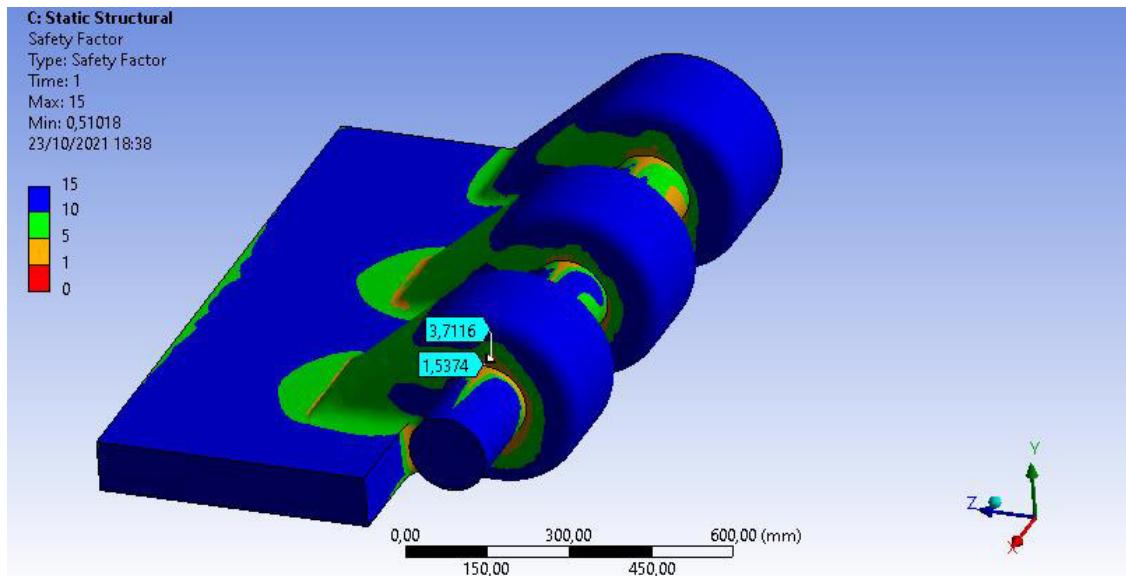


Figura 72. Factor de seguridad del ensamble del pasador, la argolla y la placa de sujeción.

(Propio)

3.3.7 Diseño para trabajo a fatiga

Para el cálculo del daño acumulado por fatiga de los diferentes elementos del sistema de compensación se utiliza la metodología de la sección 2.2.4. El material seleccionado es el Acero ASTM A572 GR50 presentado en la sección 2.4 y el tiempo de trabajo (T_s) utilizado en la Ecuación (74) para obtener el daño total (D_t) se considera 20 años operando los 365 días, 24 horas al día. Esto no significa que el buque trabaja toda esa cantidad de tiempo, si no, que trabaja todo el tiempo que sea posible de acuerdo con los límites señalados de operabilidad en el diagrama de dispersión del Océano Atlántico Norte. Los resultados del daño acumulado para los elementos seleccionados se resumen en la Tabla 18. Estos datos representan el daño que tendrían los puntos críticos de los elementos seleccionados después de 20 años de trabajo, es decir, para la viga crítica de la estructura (Viga 3) el daño por fatiga es del 15.6 %.

Tabla 18. Resumen de resultados del análisis a fatiga.

(Propio)

Elemento	Daño por fatiga en 20 años de uso
Elemento crítico de la estructura (Viga tipo3)	0,156
Resortes	0,645
Orejas de izaje	0,670
Bisagras	0,623

En la Tabla 19 se presenta el porcentaje de registros en el diagrama de dispersión del Atlántico Norte utilizado. Todos los valores resaltados en la tabla representan los registros menores al límite operacional de 2° y son los únicos utilizados para el cálculo de daño por fatiga. Se puede observar que en total suman un 13% del total de registros utilizados.

Tabla 19. Porcentaje de daño considerando el registro del diagrama de dispersión del Atlántico Norte.

(Propio)

	Tp(s)												
HS	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0,5	0,01%	0,11%	0,53%	0,99%	1,23%	0,88%	0,50%	0,19%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	
1,5	0,00%	0,02%	0,54%	1,95%	4,97%	7,15%	7,37%	5,66%	3,24%	1,63%	0,62%	0,21%	
2,5	0,00%	0,00%	0,11%	0,65%	2,14%	5,06%	7,06%	7,69%	5,73%	3,67%	1,87%	0,79%	
3,5	0,00%	0,00%	0,02%	0,19%	0,69%	2,46%	4,34%	5,97%	5,53%	4,20%	2,61%	1,31%	
												87%	13%

Al relacionar los resultados bajo carga estática y a fatiga, se encuentra que el sistema de compensación es gobernado por la carga estática máxima y más no por el trabajo a fatiga. Esto se evidencia en las historias de tiempo de las respuestas dinámicas de tensión y fuerza inercial en donde se encuentra un pico máximo de carga de diseño.

3.4 Análisis de Factibilidad y costos

El análisis de factibilidad económica se fundamenta en rubros que, de manera aproximada, muestran los costos estimados para construir una sola placa de la configuración tipo 3 seleccionada de la Tabla 4 del sistema de compensación. Los rubros se detallan en el Anexo VI.

Cada uno de los rubros de fabricación mostrados en la Tabla 20 contienen costos asociados a soldaduras considerando los metros lineales de soldadura, y una cantidad de material de aporte por metro de 0,5 Kg/m.

Tabla 20. Resumen de costos del sistema de compensación.

(Propio)

Proyecto: Sistema de compensación pasivo de rolido						
Tiempo [meses]: 5,5						
Presupuesto inicial.						
COD	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total	Tiempo (semanas)
ES01	Suministro de acero estructural ASTM A572 GR50 y eslingas	Kg	235698	\$6,72	\$1.583.839,58	6
ES02	Fabricación de estructura metálica	Kg	220452	\$0,63	\$139.135,50	8
ES03	Fabricación de orejas de izaje	Kg	2484,11	\$3,45	\$8.566,85	3
ES04	Fabricación de resortes	Kg	8224,04	\$0,76	\$6.282,07	1
ES05	Fundición de losas de concreto	m ³	346,27	\$40,48	\$14.018,22	2
ES06	Fabricación de Bisagras	Kg	4191,88	\$1,01	\$4.240,87	1
ES07	Montaje del sistema	Kg	581623	\$0,04	\$21.840,00	1
Total					\$1.777.923,08	22

La implementación del sistema se compara en una actividad de instalación de turbinas eólicas en el Mar del Norte presentada por (Thomsen, 2012). Este estudio no considera aspectos legislativos locales que puedan llegar a aumentar los costos de operación. Además, se considera despreciable un posible incremento de combustible por el peso añadido del sistema de compensación ya que se asume que el buque posee “Tanques de lastre” encargados de controlar el nivel del buque sumergido. Su función es regular el peso del buque, llenando sus tanques de agua cuando éste no posee carga y descargando los mismos, según el nivel de carga a bordo. En este estudio, el buque grúa utilizado puede ser autopropulsado o remolcado y cada uno de ellos considera costos y misceláneos propios de cada opción.

En la Tabla 21 se muestra como la implementación de la configuración Tipo 3 puede llegar a reducir los costos operativos en un aproximado del 11% para un buque autopropulsado y en un 25% en un buque remolcado. El costo del sistema se difiere para el total de días que requiere la operación considerando una reducción coherente con el aumento de la operabilidad mostrada en la Figura 60.

Tabla 21. Comparación de los costos asociados a la implementación del sistema.

Modificado de (Thomsen, 2012)

Rubros	Unidad	Autopropulsado			Remolcado		
			Cantidad	Costo/día/Unidad		Cantidad	Costo/día/Unidad
Buques de operación	U		1	145.000		1	92.800
Remolcadores	U		0	0		3	9.280
Alimentadores	U		0	0		2	87.000
Sin sistema de compensación							
Actividad	Unidad	Cantidad	Costo/día	Costo total	Cantidad	Costo/día	Costo total
Número de cargas por viaje	U	8			2		
Carga	U	10	\$ 145.000,00	\$ 1.450.000,00	40	\$ 87.000,00	\$ 3.480.000,00
Tiempo de tránsito	Días	0,5	\$ 145.000,00	\$ 72.500,00	0,75	\$ 96.280,00	\$ 72.210,00
Número de tránsitos	U	10	\$ 72.500,00	\$ 725.000,00	40	\$ 79.170,00	\$ 3.166.800,00
Desarrollo de la operación	Días	80	\$ 145.000,00	\$ 11.600.000,00	80	\$ 219.240,00	\$ 17.539.200,00
Costo total				\$ 13.847.500,00			\$ 24.258.210,00
Con sistema de compensación							
Actividad	Unidad	Cantidad	Costo/día	Costo total	Cantidad	Costo/día	Costo total
Número de cargas por viaje	U	8			2		
Carga	U	10	\$ 145.000,00	\$ 1.450.000,00	40	\$ 87.000,00	\$ 3.480.000,00
Tiempo de tránsito	Días	0,5	\$ 145.000,00	\$ 72.500,00	0,75	\$ 96.280,00	\$ 72.210,00
Número de tránsitos	U	10	\$ 72.500,00	\$ 725.000,00	40	\$ 79.170,00	\$ 3.166.800,00
Sistema de compensación	U	4	\$ 88.896,15	\$ 7.111.692,31	4	\$ 88.896,15	\$ 7.111.692,31
Desarrollo de la operación	Días	20	\$ 145.000,00	\$ 2.900.000,00	20	\$ 219.240,00	\$ 4.384.800,00
Costo total				\$ 12.259.192,31			\$ 18.215.502,31
Ahorro				\$ 1.588.307,69			\$ 6.042.707,69
				11%			25%

3.5 Caso de estudio para las costas ecuatorianas

En el borde costero ecuatoriano se emplazan estructuras offshore dedicadas a la extracción de hidrocarburos y otras plataformas satélites utilizadas para exploración e investigación. Estas plataformas forman parte del campo amistad, ubicadas en la zona norte y sur del golfo de Guayaquil. Durante el periodo 2008 -2014, la producción de las plataformas de exploración del campo Amistad ha visto un incremento significativo de su producción, llegando a sobrepasar los 56 millones de pies cúbicos por día (MMPCPD) de gas natural (Petroamazonas EP, 2015).

Este tipo de estructuras ha llegado a tener una importancia relevante en el desarrollo económico del país, razón por la cual su mantenimiento y repotenciación deben desarrollarse de manera recurrente. El llevar a cabo estas actividades requiere de una inversión significativa y un desarrollo tecnológico que permita ejecutar estas tareas con la mayor seguridad y prontitud posible. El sistema propuesto puede llegar a satisfacer esta demanda considerando las condiciones de trabajo de las costas ecuatorianas.

Las condiciones oceanográficas de la zona marítima ecuatoriana son variadas, pero sin alteraciones significativas que comprometan la operabilidad. Las condiciones oceanográficas históricas registradas en el borde costero ecuatoriano se detallan en la Tabla 22 y las condiciones oceanográficas de mitad del año 2021 se indican en la

Tabla 23. Los niveles de alerta y amenaza de los estados de mar que acompañan a las condiciones de mar de las costas ecuatorianas se muestran en la Tabla 24.

Tabla 22. Promedio mensual de H_s en las costas ecuatorianas, durante el periodo de observación 1991-2015

(Vera San Martín & Marín Villalba, 2015)

Mes	2°N - 0° 80° - 82° W (Norte)	0° - 2°S 80° - 82° W (Centro)	2 - 4° S 80 - 82° W (Sur)	0° - 2°S 90 - 92 ° W (Galápagos)
Enero	1,24	1,27	1,24	1,3
Febrero	1,21	1,29	1,28	1,39
Marzo	1,27	1,39	1,42	1,49
Abril	1,3	1,44	1,47	1,61
Mayo	1,4	1,52	1,52	1,59
Junio	1,51	1,57	1,54	1,62
Julio	1,43	1,46	1,51	1,61
Agosto	1,41	1,46	1,5	1,61
Septiembre	1,42	1,49	1,51	1,61
Octubre	1,43	1,47	1,51	1,48
Noviembre	1,34	1,34	1,38	1,34
Diciembre	1,28	1,29	1,29	1,32

Tabla 23. Condiciones de ola frente al borde costero continental.

(INOCAR, 2021)

Mes	Altura de las olas [m]		Periodo [s]	Estado del mar (basado en el índice de amenaza)
	Mínimo	Máximo		
Mayo	0,25	1 - 1,2	10 -14	Ligero - Moderado
Junio	0,25	0,9 - 1,1	12 - 14	Moderado - Ligeramente agitado
Agosto	0,3	1 -1,8	6 -13	Moderado
Septiembre	0,3	1 -1,4	12 -16	Ligero - Moderado
Octubre	0,3	1,3 - 1,6	14 -18	Moderado - Ligeramente agitado
Noviembre	0,3	1,3 -1,5	11 -17	Moderado
Diciembre	0,25	0,8 - 1,1	11 - 17	Moderado

Tabla 24. Descripción de los estados de mar.

(INOCAR, 2021)

Estado del mar por zona costera	Descripción	Observaciones
Agitado	Máximo nivel de amenaza	Peligro por la conjunción de olas altas, presencia de resacas en zona de rompientes, aumento y ascenso del nivel del mar asociado al oleaje
Ligeramente agitado	Nivel alto de amenaza	Presencia de olas medias y altas con mayor energía, posible presencia de corrientes de resaca en la zona de rompientes.
Moderado	Nivel medio de amenaza	Presencia de oleaje mayor de lo normal
Ligero	Sin amenaza	Mar tranquilo

Conociendo las condiciones oceanográficas de las costas ecuatorianas mostradas en la Tabla 22 y Tabla 23 y el rolido esperado del buque con la configuración Tipo 3 como se indica en la Figura 52, se puede determinar si este cumple con los parámetros de operación adecuados establecidos entre 2° y 3° de rolido máximo.

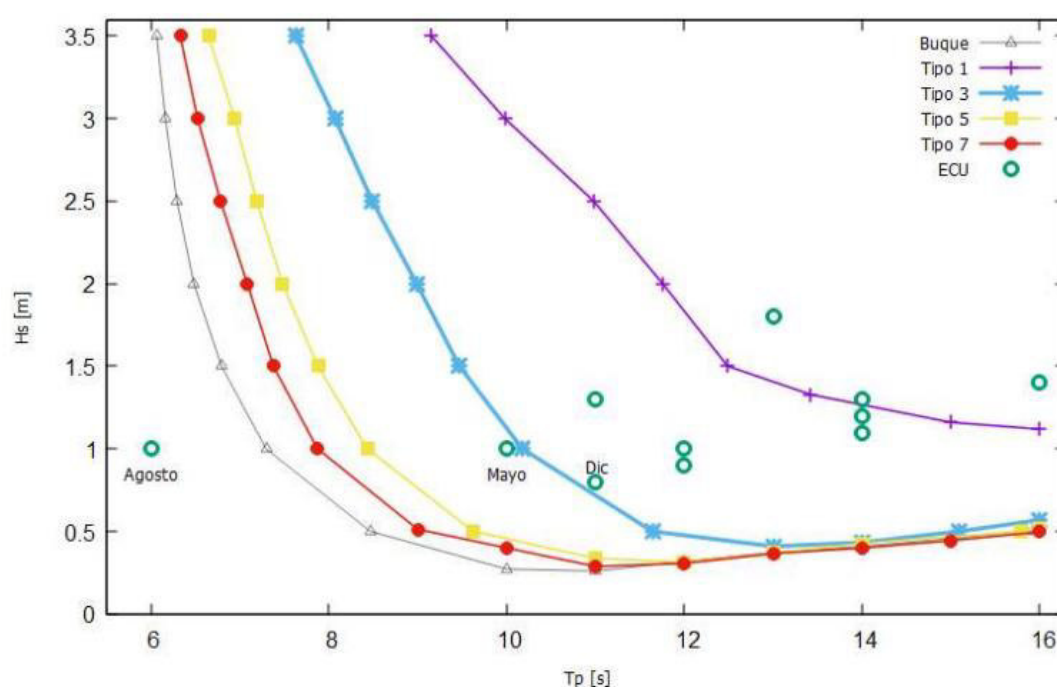


Figura 73. Relación entre el rolido de las configuraciones de 4 placas con una incidencia de las olas de 90° y las condiciones oceanográficas del Ecuador.

(Propio)

La Figura 73 y Figura 74 nos muestra como algunas de las configuraciones planteadas pueden llegar a mantener la configuración de rolido $\leq 2^\circ$. Principalmente, las configuraciones Tipo 1 y Tipo 3 al ser las más grandes son las que tienen un mayor

rendimiento. De todas maneras, esto sigue sin volver atractivas a las configuraciones Tipo 1 y Tipo 2 debido a su peso sumergido excesivo.

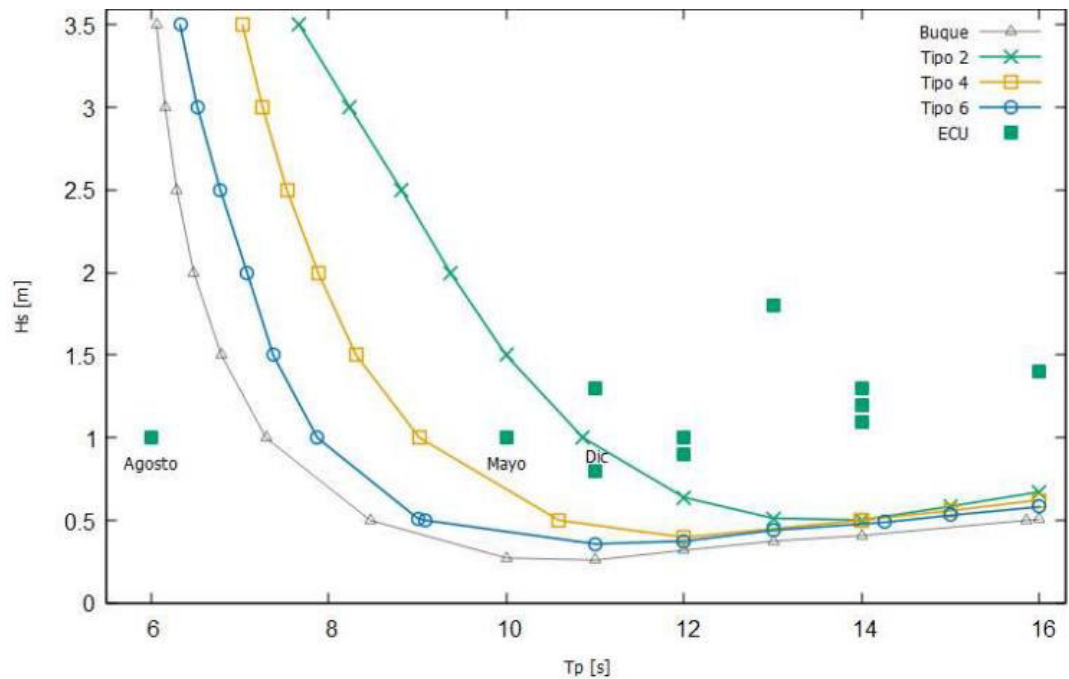


Figura 74. Relación entre el rolo de las configuraciones de 2 placas con una incidencia de las olas de 90° y las condiciones oceanográficas del Ecuador.

(Propio)

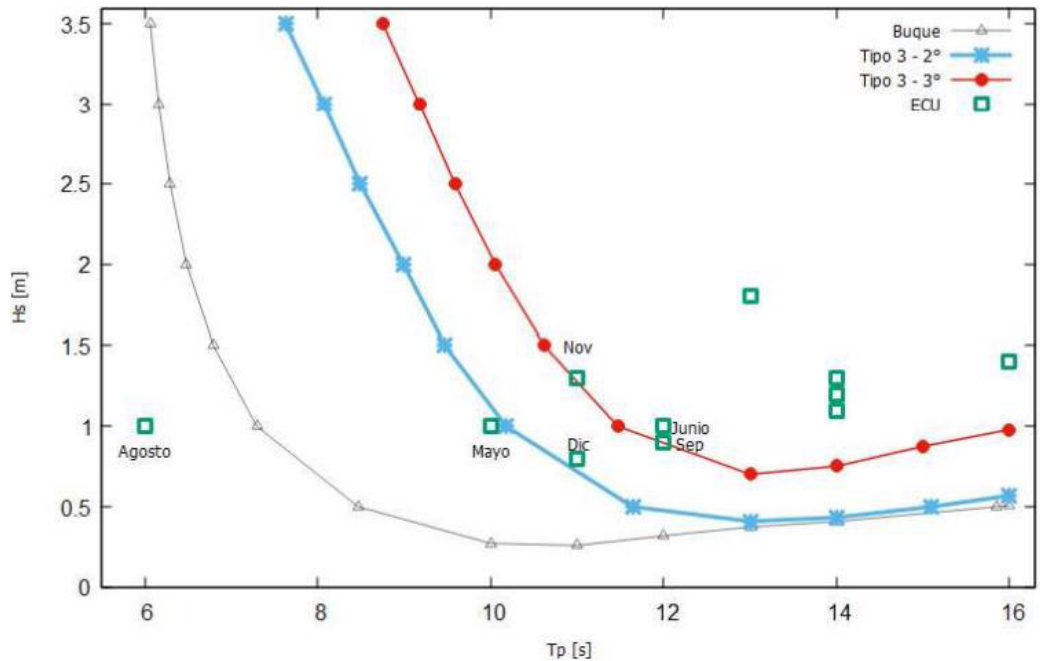


Figura 75. Relación entre el límite de rolo de 2° y 3° con la configuración Tipo 3 y un ángulo de incidencia de las olas de 90° .

(Propio)

4 CONCLUSIONES

En este proyecto, se realizó un análisis hidrodinámico para determinar las respuestas dinámicas de rolido en un buque de altamar en reposo con diferentes configuraciones de sistemas de compensación pasivo. El modelo completo consta de un buque y un arreglo de placas que varía en cantidad, tamaño y peso.

Las respuestas dinámicas de rolido, en conjunto con límites operacionales establecidos fueron utilizados para determinar la operabilidad del modelo para distintas configuraciones de placas compensadoras obteniendo el mejor desempeño en las configuraciones tipo 1, 2 y 3 de la Tabla 4. Este proceso se llevó a cabo tanto en el dominio del tiempo con modelos de espectro de ola tipo JONSWAP como en el dominio de la frecuencia con registros reales de olas del Océano Atlántico Norte.

En base a criterios de desempeño operativo y factibilidad se seleccionó a la configuración tipo 3 para realizar el diseño de sus componentes más representativos que comprende: una estructura con vigas de acero tipo W, losas de concreto, resortes planos, bisagras y orejas de izaje. Todos los componentes son escalables y su proceso de diseño puede aplicarse a dimensiones y pesos específicos.

Todo el procedimiento de diseño estático se realizó utilizando la configuración de ola que arrojaba las respuestas dinámicas más críticas para el modelo dentro del rango seleccionado siendo estos $H_s = 3.5[m]$ y $T_p = 8[s]$. Las fuerzas utilizadas en el diseño de la configuración tipo 3 fueron: Tensión en los cables de izaje = $5,37E+06$ N, Fuerza inercial = $4,22E+06$ N.

Para el dimensionamiento de la estructura del sistema de compensación, se utilizaron las respuestas de tensiones en los cables de izaje para obtener el esfuerzo crítico en cada una de las vigas a través de parámetros geométricos de los perfiles seleccionados. Se establecieron factores de seguridad estáticos relativamente bajos como: $F.S = 1,6$ para la viga tipo 3 debido a la baja periodicidad de sus cargas máximas de diseño (La tensión).

Se realizó un estudio de daño por fatiga estocástica considerando simulaciones de 1,1 horas para un conjunto de 48 configuraciones distintas de H_s y T_p en donde se tomaron los datos del diagrama de dispersión del Atlántico Norte y un límite operacional de rolido de 2° para simular un comportamiento real de operabilidad para el modelo. Los daños de todos los elementos metálicos del sistema de compensación; Estructura, resortes,

orejas de izaje y bisagras para 20 años de trabajo continuo son de 0.156, 0.645, 0.670 y 0.623 respectivamente.

En el análisis de factibilidad económica se tomaron en consideración dos partes. La primera abarca una estimación del costo de la construcción de la placa compensadora tipo 3 a través de valores unitarios considerando precios internacionales de transporte, elaboración y materia prima. La segunda es una comparación de rentabilidad para el buque detallado en este caso de estudio con y sin sistema compensador de rolido considerando sus mejoras operacionales y los costos de operación para la instalación de turbinas eólicas que duró 80 días usando un buque convencional. La mejora operacional del modelo con el sistema de compensación pasivo considerando el límite de rolido de 2° es del 75%. El ahorro en el tiempo operacional, considerando el costo de alquiler de un barco autopropulsado de \$ 145 000 USD diarios compensa fácilmente el costo de \$7 111 692 USD correspondiente a la construcción de sistema de compensación obteniendo incluso un ahorro del 11% en el costo final del proyecto.

Considerando las condiciones marinas del borde costero ecuatoriano, la posible implementación del sistema compensador de rolido en buques de la zona es altamente factible en los meses de Mayo, Agosto y Diciembre ya que la mayoría de los estados de mar registrados se encuentran dentro de los límites operacionales del sistema.

5 RECOMENDACIONES

La programación del modelo numérico hidrodinámico y estructural es escalable a diferentes dimensiones y pesos de placas de compensación. En caso de utilizarse configuraciones menores se recomienda verificar que no exista pérdida de tensión para evitar efectos adversos en el sistema como latigazos que puedan llegar a romper los cables de izaje y demás componentes de la placa de compensación. Cabe mencionar que de utilizarse pesos demasiado pequeños (< 96 Ton) en configuraciones de dos placas, existe la posibilidad de producirse errores en la simulación y que no llegue a converger.

Debe prestarse especial atención a la concordancia de los códigos de programación del modelo hidrodinámico. Esto debido a la rigurosidad que exige su sintaxis, la estructura de programación y el orden de compilación. Cualquier error cometido puede desembocar en un modelo defectuoso que arroje resultados poco o nada fiables, mismos que pueden ser utilizados en un diseño posterior.

Se recomienda realizar una validación de los resultados obtenidos utilizando un modelo real a escala que se incorpora inicialmente a una maqueta de laboratorio y posteriormente a un barco pequeño. Esto permitirá obtener valores fiables de los errores del modelo y brindar retroalimentación al diseño inicial.

6 TRABAJO FUTURO.

La escalabilidad del modelo numérico planteado le permite ser utilizado en una variedad de estructuras marinas que requieran apalear los efectos adversos del rolido. Esto no se limita únicamente a actividades industriales. Sectores como el turismo pueden verse beneficiados de este sistema al reducir el mareo de sus ocupantes cuando el barco se encuentra estático. Además de brindar una mayor seguridad en estas situaciones. De ser necesario, la metodología de diseño puede utilizarse a una escala reducida, para optimizar de mejor manera su uso en barcos pequeños.

El diseño del sistema puede optimizarse en una gran variedad de aspectos. Empezando por su principio fundamental de funcionamiento y de ser requerido, el eje de plegado puede rotarse 90° para conseguir una reducción en los esfuerzos de las bisagras con la condición de aumentar los puntos de izaje cuando este se encuentre plegado. La optimización de materiales, geometría de los perfiles, acople de placas de respaldo en zonas focalizadas donde haya un aumento de esfuerzos, optimización de orejas de izaje, variaciones en el sistema de resortes de ballestas para mejorar el flujo de agua que atraviesa la placa, etc. Son algunas de las mejoras que podrían aplicarse al diseño, cada una de ellas aumentaría de manera significativa el rendimiento general.

Como complemento en la metodología, se podría incrementar un análisis paramétrico que relacione el tamaño y la masa del buque con el tamaño y la masa óptima de la placas a utilizarse, brindando así, un valor de referencia para la geometría de las placas respecto a otros tipos de embarcaciones.

Un aspecto importante que considerar es el hecho de que no se estudia el comportamiento del flujo que atraviesa la placa, ya que se aproxima por medio de la ecuación de Morrison; apoyándose en coeficientes de arrastre de estudios similares. Estas razones motivan a realizar un estudio específico del comportamiento de este flujo bajo las condiciones que atraviesa el sistema.

Es necesario un estudio dinámico enfocado en el desplazamiento del buque con el sistema de compensación propuesto recogido en sus extremos. Estos resultados son importantes para un posible análisis de implementación futura.

Finalmente, el sistema de compensación en si no debe atarse a una geometría basada en placas rectangulares rígidas. Cabe la posibilidad de diseñar conceptos de estabilizadores con geometrías flexibles y ligeras que aprovechen de mejor manera el acumulamiento de agua en el sistema y que tengan la capacidad de expulsarlo en cada ciclo de trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Aenlle, M. L., Brincker, R., Canteli, A. F., & García, L. V. (2006). Mejora de la fiabilidad en el dimensionamiento a fatiga utilizando análisis modal. Albarracín: XXIII Encuentro del grupo español de fractura.
- American Concrete Institute (ACI). (2015). *Requisitos de reglamento para concreto estructural ACI 318SUS-14*.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2011). *Steel Construction Manual*.
- American Welding Society (AWS). (2010). *Steel Code*.
- ASME. (2010). *Norma de seguridad para instalaciones de cables, grúas, Torres, montacargas, ganchos, conexiones, y eslingas*.
- Atluri, S., Magee, A., & Lambrakos, K. (2009). CFD as a design tool for hydrodynamic loading on offshore structures. *In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 43451, págs. 499-507.
- Autodesk. (2020). *Inventor*.
- Bárcenas Otero, V. M. (2011). *Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis estadístico de cargas de vehículos en movimiento y sus efectos de fatiga en puentes de acero*. Tesis de Maestría en la Universidad Autónoma de Querétaro.
- BEXCO. (2021). *OFFSHORE HEAVY LIFTING*.
- Boats-From. (15 de abril de 2021). *Sailing Yacht / Boat Stabiliser Flopper Stopper*. Obtenido de <https://boats-from.co.uk/not-specified/sailing-yacht-boat-stabiliser-flopper-stopper-326108>
- British Standards. (1991). *BS6166 Lifting slings, rating and marking*.
- Brodtkorb, P. A. (2004). *The probability of occurrence of dangerous wave situations at sea*. Trondheim, Norway: Doctoral thesis at NTNU (Norwegian University of Science and Technology).
- Brodtkorb, P. A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydén, J., & Sö, E. (2000). *WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads*. Seattle, USA: 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials science and engineering: an introduction*. New York: Wiley.

- Century Dynamics-Ansys Inc. (2012). *AQWA Reference manual Version 14.5*.
- Clauss, G. F., & Riekert, T. (1990). *Operational limitations of offshore crane vessels*. Offshore Technology Conference. OnePetro.
- COMEX. (2013). *COMITÉ DE COMERCIO EXTERIOR*.
- Dashew S, & Dashew L. (2001). *Practical Seamanship: Essential Skills for the Modern Sailor*. Beowulf Pub Co.
- Delgado Toala, C. J. (2007). *APLICACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD EN BUQUES PETROLEROS DURANTE LAS MANIOBRAS EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA, PUERTOS Y TERMINALES*.
- Det Norske Veritas. (2011). *Offshore Standard DNV-OS-H101 Marine Operations*.
- Det Norske Veritas. (2014). *Environmental conditions and environmental loads*. Høvik, Norway.
- Det Norske Veritas. (2014). *Fatigue assessment of ship structures*.
- Doerry, A. W. (2008). *Ship dynamics for maritime ISAR imaging*. Sandia National Laboratories.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ferrocortes S.A. (2021). Obtenido de Lámina de alta resistencia ASTM 572 - GR50: <https://www.ferrocortes.com.co/download/FT-12-001-ASTM-A572-GR50.pdf>
- García, R. (2021). *Estabilizadores del buque*. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de Ingeniero Marino: <https://ingenieromarino.com/estabilizadores-del-buque/>
- Gordon, J. F. (2021). *Simulación numérica de un sistema mecánico pasivo de reducción de rolido para un barco utilizado en actividades de turismo y pesca*.
- Granta. (2018). *CES EduPack - Material Engineering Tool*.
- Guachamin Acero, W. I. (2016). *Assessment of marine operations for offshore wind turbine installation with emphasis on response-based operational limits*. Doctoral theses at NTNU.
- Guachamin Acero, W., Gao, Z., & Moan, T. (2017). *Numerical study of a novel procedure for installing the tower and rotor nacelle assembly of offshore wind turbines based on the inverted pendulum principle*. Journal of Marine Science and Application.

- Guachamin-Acero, W., & Portilla-Yandún, J. (2021). *A study on vessel fatigue damage as a criterion for heading selection by application of 2D actual bimodal and JONSWAP wave spectra*. Ocean Engineering.
- Howard, R. M. (2015). White noise: A time domain basis. *International Conference on Noise and Fluctuations* (págs. 1-4). IEEE.
- INOCAR. (2021). *Instituto oceanográfico y antártico de la Armada del Ecuador*. Recuperado el 20 de 07 de 2021, de BOLETÍN OCÉANO-ATMOSFÉRICO: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/boletines/boletin-oceano-atmosferico>
- ISO. (2020). *Ships and marine technology—Offshore wind energy—Port and marine operations*. ISO 29400.
- Jiang, Z., Guachamin Acero, W., Gao, Z., & Li, L. (2017). A numerical study on a flopper stopper for leg positioning of a jack-up barge. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. doi:DOI: 10.1115/OMAE2017-62034
- Keulegan, G. H., & Carpenter, L. H. (1958). Forces on Cylinder and Plates in an Oscillating Fluid. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 60, 423-440.
- Kula, K. S. (2015). An overview of roll stabilizers and systems for their control. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(3).
- LAYVA S.A. (10 de 10 de 2021). *ELECTRODOS DE TUNGSTENO - TIG*. Obtenido de https://www.layva.com.uy/downloads/download.php?69fcd624c107fd63105e819bc47c09d6_productos
- Li, L., Guachamín Acero, W., Gao, Z., & Moan, T. (2016). Assessment of Allowable Sea States during Installation of OWT Monopiles with Shallow Penetration in the Seabed. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. doi:10.1115/1.4033562.
- Magma Products. (15 de Abril de 2021). *Rock N Roll Boat Stabilizer*. Obtenido de <https://magmaproducts.com/products/35-in-rock-n-roll-boat-stabilizer>
- Marquis, G., & Solin, J. (1997). Fatigue design of components. *Elsevier*.
- McCormac, J. C., & Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. Alfaomega.

- Mera Roca, M. (2015). *Diseño estructural de una canasta helitransportable de 2 toneladas de capacidad*. Guayaquil.
- Molina, A., Piña-Moñarrez, M., & Barraza, J. (2020). Weibull S-N Fatigue Strength Curve Analysis for A572 Gr. 50 Steel, Based on the True Stress—True Strain Approach. *MDPI Journal*.
- Munson, B. R., Okishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). *Fluid mechanics*. Wiley.
- Niesony, A. (2009). *Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components*. Mechanical Systems and Signal Processing.
- Niesony, A. (03 de 04 de 2010). *RAINFLOW FOR MATLAB*. Recuperado el 20 de 07 de 2021, de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/3026/versions/3/previews/index.html>
- NOAA. (2020). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- NOAA. (2020). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- Noble Denton, G. L. (2015). *General Guidelines for Marine Projects*.
- Pérez, T., & Blanke, M. (2002). *Mathematical ship modelling for control applications*. Ørsted-DTU: Automation.
- Petroamazonas EP. (2015). *Nuestras Tecnologías*.
- Pisarenko, G. S., & Yakovlec, A. P. (1979). *Manual de resistencia de materiales*. Moscú: MIR.
- Pishri-Nik, H. (2016). *Introduction to probability, statistics, and random processes*.
- Rao, S. (2005). *Mechanical Vibrations*. New York: Addison-Wesley Publishing Company.
- Servicio Ecuatoriano de Acreditación. (2020). *Inspección en la transferencia de hidrocarburos*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de <https://www.acreditacion.gob.ec/como-se-inspecciona-la-transferencia-de-hidrocarburos-a-un-buque-el-proceso/>
- Shell U.K. Exploration and Production. (1991). *Guidelines for Lifting Points and*.

- Singiresu, R. (2011). *Mechanical vibrations*. Addison Wesley.
- Steve Neal. (15 de abril de 2021). *Bucket Flopper Stopper*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=9IyMlewZtUU>
- SUINBA. (2021). *Superintendencia del terminal petrolero de Balao*. Recuperado el 20 de 09 de 2021, de <https://www.suinba.com/>
- Sweitzer, K. (2006). *Random vibration response statistics for fatigue analysis of nonlinear structures*. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.
- The everlasting FlopStopper. (15 de abril de 2021). *FlopStopper by Flat Calm*. Obtenido de <https://flopstopper.com/FlopStopper/Home.html>
- The MathWorks Inc. (2020). Natick, Massachusetts, United States.
- Thomsen, K. (2012). *Offshore Wind*. ELSEVIER Inc - Academic Print.
- Trillo. (2019). *Chain Anchors Fibre Ropes*. Recuperado el 28 de 09 de 2021, de <https://rtrillo.com/wp-content/uploads/2019/09/Trillo-Catalogo-Anclas-Cadenas-2018.pdf>
- Vera San Martín, L., & Marín Villalba, S. (2015). Clima de olas en la zona ecuatorial con información satelital. *Acta oceanográfica del pacífico.*, 20(1).
- WAFO-group. (2000). *WAFO - A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads - A Tutorial*. (Math. Stat., Center for Math. Sci., Lund Univ., Ed.) Lund, Sweden. Obtenido de <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo>

Anexos

Anexo I. Código AQWA-LINE.

Anexo II. Código AQWA-LIBRIUM.

Anexo III. Código AQWA-DRIFT.

Anexo IV. Código de modelo numérico a fatiga en Matlab.

Anexo V. Análisis de costos.

Anexo VI. Planos.

ANEXO I.

Código AQWA-LINE.

Este código introduce y define características como nodos y caras geométricas, peso y densidad de la estructura, momentos de inercia y centro de masa de todos los elementos del sistema acoplado, detallados en la sección 2.1.2. Todos estos datos se realizan de manera individual para cada configuración de placa y para el barco. Es decir, cada uno tiene su propio archivo de AQWA-LINE.

Para obtener las fuerzas hidrodinámicas necesarias, se define la profundidad y densidad del agua; 200[m] y 1025[Kg/m³] respectivamente. Datos que se toman considerando estándares comunes en mar abierto.

```

JOB BARG LINE
TITLE          HLV + BARGE + TP + MP (over monopile) for LANDING PHASE NON-STATIONARY
OPTIONS REST GOON CRNM SFBM LDOP END
RESTART 1 3
  01 COOR
  01NOD5
* 01STRC      1
** HLV (BARGE)
* UPPER PANEL
  01 1 15 1 000 0 -20 2.0 0 0
T 01 1 7 100 0 2.000 0
* LOWER PANEL
  012001 15 1 000 0 -21.0 2.0 0 0
T 012001 7 100 0 2.000 0
  01 999 14.0 6.00 -21.00
* equivalent lifting point for moved structure
END
  02 ELM1
  02ZLWL ( 0.0000)
* TOP PLATE
  02QPPL DIFF 1(14)(1,1)(2,1)(102,1)(101,1)
  02QPPL DIFF 1(14)(101,1)(102,1)(202,1)(201,1)
  02QPPL DIFF 1(14)(201,1)(202,1)(302,1)(301,1)
  02QPPL DIFF 1(14)(301,1)(302,1)(402,1)(401,1)

```

```

02QPPL DIFF  1(14)(401,1)(402,1)(502,1)(501,1)
02QPPL DIFF  1(14)(501,1)(502,1)(602,1)(601,1)
* BOTTOM PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(2001,1)(2101,1)(2102,1)(2002,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2101,1)(2201,1)(2202,1)(2102,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2201,1)(2301,1)(2302,1)(2202,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2301,1)(2401,1)(2402,1)(2302,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2401,1)(2501,1)(2502,1)(2402,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2501,1)(2601,1)(2602,1)(2502,1)
* FRONT PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2001,1)(2002,1)(2,1)
* BACK PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(601,1)(602,1)(2602,1)(2601,1)
* right PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(2015,100)(2115,100)(115,100)(15,100)
* left PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(101,100)(2101,100)(2001,100)(1,100)
02PMAS      0(1)(999)(1)(1)
END
03  MATE
03      1  812E3  0.000000  0.000000
END
04  GEOM
04PMAS    1  6.86E06  0.000000  0.000000  2.7E07  0.000000  3.4E07
END
05  GLOB
05DPTH    200.3
05DENS    1025.0
END
06  FDR1
06FREQ    0  43  0.1  1.85
END06DIRN  0  37  -180  180
07  NONE
08  NONE

```

ANEXO II.

Código AQWA-LIBRIUM.

Debido al principio de funcionamiento de ANSYS, este no almacena datos anteriores de geometría, por lo que, se vuelve a definir nodos y caras geométricas, peso y densidad de la estructura, momentos de inercia y centro de masa de todos los elementos del sistema acoplado. Además, de los datos de profundidad y densidad del agua.

Se define una nueva estructura: “Los discos de Morrison” los cuales son utilizados para calcular las cargas marinas en elementos estructurales de altamar cuando se desea incluir fuerzas viscosas en el estudio (Faltinsen, 1990). Estos discos de Morrison se colocan debajo de las placas estabilizadoras. El disco debe tener la misma área que el área superficial de las placas estabilizadoras mostradas en la Tabla 4.

A continuación, se definen las “Líneas de amarre” que son los soportes del barco para evitar su movilidad de acuerdo con el “AQWA Reference Manual” (Century Dynamics-Ansys Inc, 2012).

Seguido, se definen los cables de izaje para las placas con una rigidez definida tomado de referencia el peso de la placa más grande de la Tabla 4.

Se adjuntan los resultados hidrodinámicos del código AQWA-LINE

Se define un estado de mar aleatorio. En teoría, este dato no define aún el comportamiento del barco ya que tendrá que reinscribirse nuevamente en el archivo tipo DRIFT.

```
JOB BARG  LIBR
TITLE      HLV + VSS
OPTIONS REST GOON CRNM END
RESTART  1  5
  01  COOR
  01NOD5
  01STRC    1
** HLV (BARGE)
* UPPER PANEL
  01  1  70  1    0    0    04    2.0    0    0
T  01  1  7 100          0 -2.142    0
* LOWER PANEL
  012001  70  1    0    0   -6.0    2.0    0    0
```

T	012001	7	100			0	-2.142	0
* FRONT PANEL								
	014001	6	1	0	0	-4.80	0	0 1.20
T	014001	7	10			0	-2.142	0
* BACK PANEL								
	014501	6	1	138	0	-4.80	0	0 1.20
T	014501	7	10			0	-2.142	0
* SIDE PANEL								
	015001	6	1	2	-15.0	-4.80	0	0 1.20
T	015001	68	10			2	0	0
*								
	01 999			69.0	0.20	2.00		
**MOORING LINES								
* catenary mooring								
	0114001			072.340	14.78	04.000		
	0114002			072.340	-16.78	04.000		
	0114003			072.970	16.55	04.000		
	0114004			072.970	-18.55	04.000		
	0114005			-69.650	18.60	04.000		
	0114006			-69.650	-20.60	04.000		
	0114007			-69.650	16.50	04.000		
	0114008			-69.650	-18.55	04.000		
	0115001			576.722	500.165	-23.000		
	0115002			576.722	-502.165	-23.000		
	0115003			347.042	660.665	-23.000		
	0115004			347.042	-662.665	-23.000		
	0115005			-343.722	662.715	-23.000		
	0115006			-343.722	-664.715	-23.000		
	0115007			-574.032	501.885	-23.000		
	0115008			-574.032	-503.885	-23.000		
** hinge								
	01 9001			69.0	15.0	3		
	01 9002			70.0	15.0	3		
* frame								
	01 7001			74.0	15	3		
	01 7002			74.0	16	3		
	01 7003			74.0	18	3		

01 7004	64.0	15	3
01 7005	64.0	16	3
01 7006	64.0	18	3
* boxes			
01 7101	110.0	10	4.0
01 7102	110.0	-10	4.0
01 7103	125.0	-10	4.0
01 7104	125.0	10	4.0
01 7105	110.0	10	9.0
01 7106	110.0	-10	9.0
01 7107	125.0	-10	9.0
01 7108	125.0	10	9.0
* boxes 2			
01 7201	125.0	12	4.0
01 7202	125.0	-2	4.0
01 7203	135.0	-2	4.0
01 7204	135.0	12	4.0
01 7205	125.0	12	12.0
01 7206	125.0	-2	12.0
01 7207	135.0	-2	12.0
01 7208	135.0	12	12.0
* boxes 3			
01 7301	000.0	15	4.0
01 7302	000.0	-15	4.0
01 7303	110.0	-15	4.0
01 7304	110.0	15	4.0
01 7305	000.0	15	04.5
01 7306	000.0	-15	04.5
01 7307	110.0	-15	04.5
01 7308	110.0	15	04.5
* crane tub			
01 7309	08.0	00	4.5
01 7310	08.0	00	8.5
** boom			
01 7311	08.0	00	8.5
01 7312	08.0	00	30.0
01 7313	08.0	00	12.5

** lifting point for moved structure

01 7314	7.0	-16.0	40.0
01 7315	7.0	16.0	40.0
01 7316	7.0	-16.0	02.0
01 7317	35.0	-16.0	02.0
01 7318	7.0	16.0	02.0
01 7319	35.0	16.0	02.0
01 7320	-45.0	-16.0	40.0
01 7321	-45.0	16.0	40.0
01 7322	-45.0	-16.0	02.0
01 7323	-17.0	-16.0	02.0
01 7324	-45.0	16.0	02.0
01 7325	-17.0	16.0	02.0

01STRC 2

01NOD5

** HLV (BARGE)

* UPPER PANEL

01 1 15 1	007	0	-20	2.0	0	0
T 01 1 7 100				0	2.000	0

* LOWER PANEL

012001 15 1	007	0	-21.0	2.0	0	0
T 012001 7 100				0	2.000	0

*

01 999	21.0	6.00	-21.00
--------	------	------	--------

* analysis points

019996	7	-22	-20.1
019997	7	-10	-20.1
019998	35	-22	-20.1
019999	35	-10	-20.1

* Disco

019991	21.0	6.00	-21.00
019992	21.0	6.00	-20.00
01STRC	3		

** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **

01 999	7.000	-16.000	-10.00
01STRC	4		


```

** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **
  01 999      35.000 -16.000 -10.00
*****

  01STRC    5
  01NOD5
** HLV (BARGE)
* UPPER PANEL
  01 1 15 1 007 0 -20 2.0 0 0
T 01 1 7 100      0 2.000 0
* LOWER PANEL
  012001 15 1 007 0 -21.0 2.0 0 0
T 012001 7 100      0 2.000 0
*
  01 999      21.0 6.00 -21.00
* analysis points
  019996      7 22 -20.1
  019997      7 10 -20.1
  019998     35 22 -20.1
  019999     35 10 -20.1
* Disco
  019991     21.0 6.00 -21.00
  019992     21.0 6.00 -20.00
  01STRC    6
** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **
  01 999      7.000 16.000 -10.00
  01STRC    7
** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **
  01 999      35.000 16.000 -10.00
*****

  01STRC    8
  01NOD5
** HLV (BARGE)
* UPPER PANEL
  01 1 15 1 -45 0 -20 2.0 0 0
T 01 1 7 100      0 2.000 0
* LOWER PANEL
  012001 15 1 -45 0 -21.0 2.0 0 0

```

T 012001 7 100 0 2.000 0

*

01 999 -31.0 6.00 -21.00

* analysis points

019996 -45 -22 -20.1

019997 -45 -10 -20.1

019998 -17 -22 -20.1

019999 -17 -10 -20.1

* Disco

019991 -31.0 6.00 -21.00

019992 -31.0 6.00 -20.00

01STRC 9

** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **

01 999 -45.000 -16.000 -10.00

01STRC 10

** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **

01 999 -17.000 -16.000 -10.00

01STRC 11

01NOD5

** HLV (BARGE)

* UPPER PANEL

01 1 15 1 -45 0 -20 2.0 0 0

T 01 1 7 100 0 2.000 0

* LOWER PANEL

012001 15 1 -45 0 -21.0 2.0 0 0

T 012001 7 100 0 2.000 0

*

01 999 -31.0 6.00 -21.00

* analysis points

019996 -45 22 -20.1

019997 -45 10 -20.1

019998 -17 22 -20.1

019999 -17 10 -20.1

* Disco

019991 -31.0 6.00 -21.00

019992 -31.0 6.00 -20.00

```

01STRC      12
** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **
01 999      -45.000  16.000  -10.00
01STRC      13
** NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK **
01 999      -17.000  16.000  -10.00
*****
END
02  ELM1
02SYMXX
02ZLWL      (    0.0000)
* TOP PLATE
02QPPL      1(69)(1,1)(101,1)(102,1)(2,1)
02QPPL      1(69)(101,1)(201,1)(202,1)(102,1)
02QPPL      1(69)(201,1)(301,1)(302,1)(202,1)
02QPPL      1(69)(301,1)(401,1)(402,1)(302,1)
02QPPL      1(69)(401,1)(501,1)(502,1)(402,1)
02QPPL      1(69)(501,1)(601,1)(602,1)(502,1)
02QPPL      1(69)(601,1)(701,1)(702,1)(602,1)
* BOTTOM PLATE
02QPPL DIFF 1(69)(2001,1)(2002,1)(2102,1)(2101,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2101,1)(2102,1)(2202,1)(2201,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2201,1)(2202,1)(2302,1)(2301,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2301,1)(2302,1)(2402,1)(2401,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2401,1)(2402,1)(2502,1)(2501,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2501,1)(2502,1)(2602,1)(2601,1)
02QPPL DIFF 1(69)(2601,1)(2602,1)(2702,1)(2701,1)
* FRONT SIDE
02QPPL DIFF 1(7)(4001,10)(4011,10)(4012,10)(4002,10)
02QPPL DIFF 1(7)(4002,10)(4012,10)(4013,10)(4003,10)
02QPPL DIFF 1(7)(4003,10)(4013,10)(4014,10)(4004,10)
02QPPL DIFF 1(7)(4004,10)(4014,10)(4015,10)(4005,10)
02QPPL      1(7)(4005,10)(4015,10)(4016,10)(4006,10)
** bottom and top panels
02QPPL DIFF 1(7)(2001,100)(2101,100)(4011,10)(4001,10)
02QPPL      1(7)(4006,10)(4016,10)(101,100)(1,100)
* BACK SIDE

```

02QPPL DIFF 1(7)(4501,10)(4502,10)(4512,10)(4511,10)
 02QPPL DIFF 1(7)(4502,10)(4503,10)(4513,10)(4512,10)
 02QPPL DIFF 1(7)(4503,10)(4504,10)(4514,10)(4513,10)
 02QPPL DIFF 1(7)(4504,10)(4505,10)(4515,10)(4514,10)
 02QPPL 1(7)(4505,10)(4506,10)(4516,10)(4515,10)

* bottom and top panels

02QPPL DIFF 1(7)(4501,10)(4511,10)(2170,100)(2070,100)
 02QPPL 1(7)(4506,10)(70,100)(170,100)(4516,10)

* SIDE PANELS

02QPPL DIFF 1(67)(5002,10)(5001,10)(5011,10)(5012,10)
 02QPPL DIFF 1(67)(5003,10)(5002,10)(5012,10)(5013,10)
 02QPPL DIFF 1(67)(5004,10)(5003,10)(5013,10)(5014,10)
 02QPPL DIFF 1(67)(5005,10)(5004,10)(5014,10)(5015,10)
 02QPPL 1(67)(5006,10)(5005,10)(5015,10)(5016,10)

* top

02QPPL 1(67)(5006,10)(5016,10)(703,1)(702,1)

* bottom

02QPPL DIFF 1(67)(2702,1)(2703,1)(5011,10)(5001,10)

* left

02QPPL DIFF 1(4)(4072,1)(4071,1)(5001,1)(5002,1)
 02QPPL 1(1)(4076,1)(4075,1)(5005,1)(5006,1)

* right

02QPPL DIFF 1(4)(5672,1)(5671,1)(4571,1)(4572,1)
 02QPPL 1(1)(5676,1)(5675,1)(4575,1)(4576,1)

* corners

02QPPL DIFF 1(1)(4071,1)(2701,1)(2702,1)(5001,1)
 02QPPL DIFF 1(1)(5671,1)(2769,1)(2770,1)(4571,1)
 02QPPL 1(1)(4076,1)(5006,1)(702,1)(701,1)
 02QPPL 1(1)(5676,1)(4576,1)(770,1)(769,1)
 02PMAS 0(1)(999)(1)(1)
 02RMXS

* hanging frame

02TUBE 1 (1)(7001)(7002)(10)(10)
 02TUBE 1 (1)(7002)(7003)(10)(10)
 02TUBE 1 (1)(7004)(7005)(10)(10)
 02TUBE 1 (1)(7005)(7006)(10)(10)
 02TUBE 1 (1)(7003)(7006)(10)(10)

```

* crane tub
  02TUBE      1 (1)(7309)(7310)( 10)( 11)

* crane frame
  02TUBE      1 (1)(7311)(7312)( 10)( 12)
  02TUBE      1 (1)(7313)(7314)( 10)( 13)
  02TUBE      1 (1)(7312)(7314)( 10)( 14)

* boxes
  02QPPL      2(1)(7101,1)(7102,1)(7106,1)(7105,1)
  02QPPL      2(1)(7104,1)(7108,1)(7107,1)(7103,1)
  02QPPL      2(1)(7101,1)(7105,1)(7108,1)(7104,1)
  02QPPL      2(1)(7107,1)(7106,1)(7102,1)(7103,1)
  02QPPL      2(1)(7105,1)(7106,1)(7107,1)(7108,1)
  02QPPL      2(1)(7101,1)(7104,1)(7103,1)(7102,1)

* boxes 2
  02QPPL      2(1)(7201,1)(7202,1)(7206,1)(7205,1)
  02QPPL      2(1)(7204,1)(7208,1)(7207,1)(7203,1)
  02QPPL      2(1)(7201,1)(7205,1)(7208,1)(7204,1)
  02QPPL      2(1)(7207,1)(7206,1)(7202,1)(7203,1)
  02QPPL      2(1)(7205,1)(7206,1)(7207,1)(7208,1)
  02QPPL      2(1)(7201,1)(7204,1)(7203,1)(7202,1)

* boxes 3
  02QPPL      3(1)(7301,1)(7302,1)(7306,1)(7305,1)
  02QPPL      3(1)(7304,1)(7308,1)(7307,1)(7303,1)
  02QPPL      3(1)(7301,1)(7305,1)(7308,1)(7304,1)
  02QPPL      3(1)(7307,1)(7306,1)(7302,1)(7303,1)
  02QPPL      3(1)(7305,1)(7306,1)(7307,1)(7308,1)
  02QPPL      3(1)(7301,1)(7304,1)(7303,1)(7302,1)
  02MSTR      (999)(0,0,0)

END

*****

02  ELM2
02ZLWL      (    0.0000)

* TOP PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2,1)(102,1)(101,1)
02QPPL DIFF  1(14)(101,1)(102,1)(202,1)(201,1)
02QPPL DIFF  1(14)(201,1)(202,1)(302,1)(301,1)
02QPPL DIFF  1(14)(301,1)(302,1)(402,1)(401,1)

```

```

02QPPL DIFF  1(14)(401,1)(402,1)(502,1)(501,1)
02QPPL DIFF  1(14)(501,1)(502,1)(602,1)(601,1)
* BOTTOM PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(2001,1)(2101,1)(2102,1)(2002,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2101,1)(2201,1)(2202,1)(2102,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2201,1)(2301,1)(2302,1)(2202,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2301,1)(2401,1)(2402,1)(2302,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2401,1)(2501,1)(2502,1)(2402,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2501,1)(2601,1)(2602,1)(2502,1)
* FRONT PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2001,1)(2002,1)(2,1)
* BACK PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(601,1)(602,1)(2602,1)(2601,1)
* right PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(2015,100)(2115,100)(115,100)(15,100)
* left PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(101,100)(2101,100)(2001,100)(1,100)
02PMAS      0(1)(999)(1)(1)
02DISC      0(1)(9991)(9992)(5)
02MSTR      (999)(21,-16,0)
END
*****
02  ELM3
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
END02MSTR   (999)(7,-16,0)
02  ELM4
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
02MSTR      (999)(35,-16,0)
END
*****
02  ELM5
02ZLWL      (  0.0000)
* TOP PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2,1)(102,1)(101,1)
02QPPL DIFF  1(14)(101,1)(102,1)(202,1)(201,1)

```

```

02QPPL DIFF  1(14)(201,1)(202,1)(302,1)(301,1)
02QPPL DIFF  1(14)(301,1)(302,1)(402,1)(401,1)
02QPPL DIFF  1(14)(401,1)(402,1)(502,1)(501,1)
02QPPL DIFF  1(14)(501,1)(502,1)(602,1)(601,1)
* BOTTOM PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(2001,1)(2101,1)(2102,1)(2002,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2101,1)(2201,1)(2202,1)(2102,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2201,1)(2301,1)(2302,1)(2202,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2301,1)(2401,1)(2402,1)(2302,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2401,1)(2501,1)(2502,1)(2402,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2501,1)(2601,1)(2602,1)(2502,1)
* FRONT PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2001,1)(2002,1)(2,1)
* BACK PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(601,1)(602,1)(2602,1)(2601,1)
* right PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(2015,100)(2115,100)(115,100)(15,100)
* left PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(101,100)(2101,100)(2001,100)(1,100)
02PMAS      0(1)(999)(1)(1)
02DISC      0(1)(9991)(9992)(5)
02MSTR      (999)(21,16,0)
END
02  ELM6
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
END02MSTR   (999)(7,16,0)
02  ELM7
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
02MSTR      (999)(35,16,0)
END
*****
02  ELM8
02ZLWL      (    0.0000)
* TOP PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2,1)(102,1)(101,1)

```

```

02QPPL DIFF  1(14)(101,1)(102,1)(202,1)(201,1)
02QPPL DIFF  1(14)(201,1)(202,1)(302,1)(301,1)
02QPPL DIFF  1(14)(301,1)(302,1)(402,1)(401,1)
02QPPL DIFF  1(14)(401,1)(402,1)(502,1)(501,1)
02QPPL DIFF  1(14)(501,1)(502,1)(602,1)(601,1)
* BOTTOM PLATE
02QPPL DIFF  1(14)(2001,1)(2101,1)(2102,1)(2002,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2101,1)(2201,1)(2202,1)(2102,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2201,1)(2301,1)(2302,1)(2202,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2301,1)(2401,1)(2402,1)(2302,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2401,1)(2501,1)(2502,1)(2402,1)
02QPPL DIFF  1(14)(2501,1)(2601,1)(2602,1)(2502,1)
* FRONT PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(1,1)(2001,1)(2002,1)(2,1)
* BACK PANEL
02QPPL DIFF  1(14)(601,1)(602,1)(2602,1)(2601,1)
* right PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(2015,100)(2115,100)(115,100)(15,100)
* left PANEL
02QPPL DIFF  1(6)(101,100)(2101,100)(2001,100)(1,100)
02PMAS      0(1)(999)(1)(1)
02DISC      0(1)(9991)(9992)(5)
02MSTR      (999)(-31,-16,0)
END
*****
02  ELM9
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
END02MSTR   (999)(-45,-16,0)
02  EL10
02ZLWL      (0.0)
02PMAS      (1)(999)(1)(1)
02MSTR      (999)(-17,-16,0)
END
*****
02  EL11
02ZLWL      (    0.0000)

```


* TOP PLATE

02QPPL DIFF 1(14)(1,1)(2,1)(102,1)(101,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(101,1)(102,1)(202,1)(201,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(201,1)(202,1)(302,1)(301,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(301,1)(302,1)(402,1)(401,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(401,1)(402,1)(502,1)(501,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(501,1)(502,1)(602,1)(601,1)

* BOTTOM PLATE

02QPPL DIFF 1(14)(2001,1)(2101,1)(2102,1)(2002,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(2101,1)(2201,1)(2202,1)(2102,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(2201,1)(2301,1)(2302,1)(2202,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(2301,1)(2401,1)(2402,1)(2302,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(2401,1)(2501,1)(2502,1)(2402,1)
 02QPPL DIFF 1(14)(2501,1)(2601,1)(2602,1)(2502,1)

* FRONT PANEL

02QPPL DIFF 1(14)(1,1)(2001,1)(2002,1)(2,1)

* BACK PANEL

02QPPL DIFF 1(14)(601,1)(602,1)(2602,1)(2601,1)

* right PANEL

02QPPL DIFF 1(6)(2015,100)(2115,100)(115,100)(15,100)

* left PANEL

02QPPL DIFF 1(6)(101,100)(2101,100)(2001,100)(1,100)
 02PMAS 0(1)(999)(1)(1)
 02DISC 0(1)(9991)(9992)(5)
 02MSTR (999)(-31,16,0)

END

02 EL12

02ZLWL (0.0)

02PMAS (1)(999)(1)(1)

END02MSTR (999)(-45,16,0)

02 EL13

02ZLWL (0.0)

02PMAS (1)(999)(1)(1)

02MSTR (999)(-17,16,0)

END

```

03  MATE
03STRC    1
03      1  2.550E7  0.000000  0.000000
03      10  7850.
03STRC    2
03      1  812E3  0.000000  0.000000
03STRC    3
03      1  3.000E4
03STRC    4
03      1  7850
03      10  3.000E4
03STRC    5
03      1  812E3  0.000000  0.000000
03STRC    6
03      1  3.000E4
03STRC    7
03      1  7850
03      10  3.000E4
03STRC    8
03      1  812E3  0.000000  0.000000
03STRC    9
03      1  3.000E4
03STRC   10
03      1  7850
03      10  3.000E4
03STRC   11
03      1  812E3  0.000000  0.000000
03STRC   12
03      1  3.000E4
03STRC   13
03      1  7850
03      10  3.000E4
END

04  GEOM
04STRC    1
04PMAS    1  3.67E09  0.000000  0.000000  4.4E10  0.000000  4.4E10
04TUBE   10  0.5000  0.0530  1.0000  0.0000  0.0000

```

04CONT	10	1.6000	0.9600				
04TUBE	11	10.000	0.0050	1.0000	0.0000	0.0000	
04CONT	11	1.6000	0.9600				
04TUBE	12	06.000	0.0050	1.0000	0.0000	0.0000	
04CONT	12	1.6000	0.9600				
04TUBE	13	03.000	0.0050	1.0000	0.0000	0.0000	
04CONT	13	1.6000	0.9600				
04TUBE	14	00.500	0.0050	1.0000	0.0000	0.0000	
04CONT	14	1.6000	0.9600				
04STRC	2						
04PMAS	1	6.86E06	0.000000	0.000000	2.7E07	0.000000	3.4E07
04DISC	5	20.680					
04CONT	5	10.000	0.000				
04STRC	3						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	4						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	5						
04PMAS	1	6.86E06	0.000000	0.000000	2.7E07	0.000000	3.4E07
04DISC	5	20.680					
04CONT	5	10.000	0.000				
04STRC	6						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	7						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	8						
04PMAS	1	6.86E06	0.000000	0.000000	2.7E07	0.000000	3.4E07
04DISC	5	20.680					
04CONT	5	10.000	0.000				
04STRC	9						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	10						
04PMAS	1	3.4E03	0.0	0.0	3.4E03	0.0	3.4E03
04STRC	11						
04PMAS	1	6.86E06	0.000000	0.000000	2.7E07	0.000000	3.4E07
04DISC	5	20.680					
04CONT	5	10.000	0.000				

```

04STRC      12
04PMAS      1  3.4E03    0.0    0.0  3.4E03    0.0  3.4E03
04STRC      13
04PMAS      1  3.4E03    0.0    0.0  3.4E03    0.0  3.4E03
END
05  GLOB
05DPTH      33.3
05DENS      1025.0
END05ACCG   9.810
06  FDR1
06FILE      ALHLV3.HYD
06CSTR1
END06CPDB
06  FDR2
06FILE      ALplate_mid.HYD
06CSTR1
END06CPDB
06  FDR5
06FILE      ALplate_mid.HYD
06CSTR1
END06CPDB
06  FDR8
06FILE      ALplate_mid.HYD
06CSTR1
END06CPDB
06  FD11
06FILE      ALplate_mid.HYD
06CSTR1
END06CPDB
06  FINI
07  NONE
08  NONE
09  NONE
10  NONE
11  NONE
12  CONS
12DACF3     4

```

```

12DACF3  5
12DACF4  4
12DACF4  5
END
13  SPEC
13SEED  2
13SPDN   0180
13NSPL   200
*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062
13JONH   0.1   1.7   3.0   1.50   1.047
END
*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274767880
14  MOOR
* catenary mooring HLV
14COMP  20 30   3  28.0  37.0  0.00
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN  114001 015001
14COMP  20 30   3  28.0  37.0  0.00
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN  114002 015002
14COMP  20 30   3  28.0  37.0  0.00
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN  114003 015003
14COMP  20 30   3  28.0  37.0  0.00
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN  114004 015004
14COMP  20 30   3  28.0  37.0  0.00
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT           15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0

```

```

14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN 114005 015005
14COMP 20 30    3  28.0  37.0  0.00
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN 114006 015006
14COMP 20 30    3  28.0  37.0  0.00
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN 114007 015007
14COMP 20 30    3  28.0  37.0  0.00
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT          15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN 114008 015008
*** lifting lines from vss to blocks ****
14LINE 3 999 2 9996 5E+6 014.580
14LINE 3 999 2 9997 5E+6 014.580
14LINE 4 999 2 9998 5E+6 014.580
14LINE 4 999 2 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 3 999 1 7316 5E+6 010.000
14LINE 4 999 1 7317 5E+6 010.000
*** lifting lines from vss to blocks ****
14LINE 6 999 5 9996 5E+6 014.580
14LINE 6 999 5 9997 5E+6 014.580
14LINE 7 999 5 9998 5E+6 014.580
14LINE 7 999 5 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 6 999 1 7318 5E+6 010.000
14LINE 7 999 1 7319 5E+6 010.000
***+++++++
*** lifting lines from vss to blocks ****
14LINE 9 999 8 9996 5E+6 014.580
14LINE 9 999 8 9997 5E+6 014.580

```

```

14LINE 10 999 8 9998 5E+6 014.580
14LINE 10 999 8 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 9 999 1 7322 5E+6 010.000
14LINE 10 999 1 7323 5E+6 010.000
*** lifting lines from vss to blocks ****
14LINE 12 999 11 9996 5E+6 014.580
14LINE 12 999 11 9997 5E+6 014.580
14LINE 13 999 11 9998 5E+6 014.580
14LINE 13 999 11 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 12 999 1 7324 5E+6 010.000
14LINE 13 999 1 7325 5E+6 010.000
END
* 15 NONE
15 STRT
15POS1 -00.11 00.229 1.958 -0.55 -0.053 0.000
15POS2 21.05 -16.00 -25.50 -0.000 -0.000 0
15POS3 7.00 -16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0.000
15POS4 35.00 -16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0
15POS5 21.05 16.00 -25.50 -0.000 -0.000 0
15POS6 7.00 16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0.000
15POS7 35.00 16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0
15POS8 -31.05 -16.00 -25.50 -0.000 -0.000 0
15POS9 -45.00 -16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0.000
15PO10 -17.00 -16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0
15PO11 -31.05 16.00 -25.50 -0.000 -0.000 0
15PO12 -45.00 16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0.000
15PO13 -17.00 16.00 -8.500 -0.000 -0.000 0
END
16 LMTS
16MXNI 10
END
17 NONE
18 NONE
19 NONE
20 NONE

```

ANEXO III.

Código AQWA-DRIFT.

Inicialmente, se insertan los parámetros de amortiguamiento de movimientos no lineales para calcular los movimientos de frecuencia en el dominio del tiempo, estos parámetros de amortiguamiento representan un porcentaje del amortiguamiento crítico y es específico para cada eje.

A continuación, se desactivan los grados de libertad innecesarios (los 3 movimientos de rotación) de todos los elementos no estructurales, es decir: cables de izaje y puntos de unión.

Luego, se ingresa la dirección de olas de acuerdo con el método utilizado. Se ingresa un espectro de olas de acuerdo con el método utilizado. Se vuelven a definir líneas de amare y de izaje.

Se define el tiempo de la simulación tomando en cuenta la zona inicial de transición y la capacidad computacional del equipo. En base a pruebas rápidas, se define que el tiempo de transición se encuentra antes de los 200 primeros segundos. Además, se establece un periodo de simulación de 1h por recomendación de Guachamin (2017). En total se definió un tiempo de simulación de 1.1h

Finalmente, se especifican los resultados a imprimirse: Para el barco; solo posiciones. Para los elementos restantes; posiciones, velocidades, aceleraciones, fuerzas de arrastre, tensiones y masas añadidas.

El resultado de posición en el barco, en específico, su rotación alrededor del eje longitudinal es el más importante. Esto, permite comparar los movimientos del barco en rolo con y sin placas de acuerdo con todas las combinaciones en la tabla 1 a través de un estudio en dominio de tiempo junto con su respectivo espectro de ola. Además, se utiliza un estudio en dominio de la frecuencia, para obtener las funciones de transferencia de todo el sistema acoplado y comparar así sus resultados.

```
JOB BARG DRIFT WFRQ
TITLE          HLV FOR TP COLLISION APPROACH
*OPTIONS REST RDEP CONV END
OPTIONS REST CONV END
RESTART 4 5    ABHLV-4plates_mid
```



```

09  DRM1
*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274767880
09FIDD      2.0000E5 5.7300E5 1.0000E7 1.6300E8 4.2700E9 4.2000E9
END
09  DRM2
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM3
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM4
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM5
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM6
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM7
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM8
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM9
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM10
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM11
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END
09  DRM12
09FIDD      5.0000E4 5.7300E4 5.0000E4 5.6300E5 3.2700E5 5.2000E5
END

```

```

09  DRM13
09FIDD      5.0000E4  5.7300E4  5.0000E4  5.6300E5  3.2700E5  5.2000E5
END
10  NONE
11  NONE
12  CONS
12DACF3  4
12DACF3  5
12DACF3  6
12DACF4  4
12DACF4  5
12DACF4  6
12DACF6  4
12DACF6  5
12DACF6  6
12DACF7  4
12DACF7  5
12DACF7  6
**
12DACF9  4
12DACF9  5
12DACF9  6
12DACF10  4
12DACF10  5
12DACF10  6
12DACF12  4
12DACF12  5
12DACF12  6
12DACF13  4
12DACF13  5
12DACF13  6
END
13  SPEC
13SEED  1
13SPDN      0090
13NSPL      200
13JONH      0.1    1.7    3.0    1.50    0.785

```

END

14 MOOR

* catenary mooring HLV

14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114001		015001					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114002		015002					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114003		015003					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114004		015004					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114005		015005					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0
14NLIN	114006		015006					
14COMP	20	30	3	28.0	37.0	0.00		
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	300.0
14ECAT				15.500	2.8732E-3	3.0168E8	1.051E6	100.0

```

14NLIN 114007 015007
14COMP 20 30 3 28.0 37.0 0.00
14ECAT 15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT 15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 300.0
14ECAT 15.500 2.8732E-3 3.0168E8 1.051E6 100.0
14NLIN 114008 015008
*** lifting lines from vss to blocks ***
14LINE 3 999 2 9996 5E+6 014.580
14LINE 3 999 2 9997 5E+6 014.580
14LINE 4 999 2 9998 5E+6 014.580
14LINE 4 999 2 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 3 999 1 7316 5E+6 010.000
14LINE 4 999 1 7317 5E+6 010.000
*** lifting lines from vss to blocks ***
14LINE 6 999 5 9996 5E+6 014.580
14LINE 6 999 5 9997 5E+6 014.580
14LINE 7 999 5 9998 5E+6 014.580
14LINE 7 999 5 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 6 999 1 7318 5E+6 010.000
14LINE 7 999 1 7319 5E+6 010.000
*** lifting lines from vss to blocks ***
14LINE 9 999 8 9996 5E+6 014.580
14LINE 9 999 8 9997 5E+6 014.580
14LINE 10 999 8 9998 5E+6 014.580
14LINE 10 999 8 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 9 999 1 7322 5E+6 010.000
14LINE 10 999 1 7323 5E+6 010.000
*** lifting lines from vss to blocks ***
14LINE 12 999 11 9996 5E+6 014.580
14LINE 12 999 11 9997 5E+6 014.580
14LINE 13 999 11 9998 5E+6 014.580
14LINE 13 999 11 9999 5E+6 014.580
*** lifting lines from block to vessel
14LINE 12 999 1 7324 5E+6 010.000

```

```
14LINE 13 999 1 7325 5E+6 010.000
END
15 NONE
16 TINT
16TIME 99999 0.020
16TIME 99999 0.020
END
17 NONE
18 PROP
18PTEN2
18PTEN3
18PTEN4
* NO PRINTING OPTIONS
* STRUCTURE 1
18NOPR1 2
18NOPR1 3
18NOPR1 4
END
19 NONE
20 NONE
```

ANEXO IV.

Código del modelo numérico a fatiga en Matlab.

```
clear all
clc

load('MID_data.mat');
My=MID_data(:,1);
S=MID_data(:,53)./1E6;
dt=0.4; % sampling time

rf = rainflow(S,dt);
% plot histograms
figure (1)
rfhist(rf,100,'ampl')

%S-N curve

% S-N curve parameters curve type III
Se=100; % endurance limit
m=3; % slope of the curve
Nk=1e6; % number of cycle for knee point

% length in seconds of the time history
To=length(My)*dt; % seconds
tp=sig2ext(S); % turning points
rf=rainflow(tp); % rainflow
CycleRate=rf(3,:); % number of cycles
siga=rf(1,:); % cycle amplitudes/ranges

% calculation of the damage
damage=sum((CycleRate/Nk).*((siga./Se).^m))

% expected time to failure in seconds
T=To/damage

% expected time to failure in days
disp(['Calculated fatigue life in days: ' num2str(T/1800/24)])
disp(['Calculated fatigue life in years: ' num2str(T/1800/24/365)])
%plot time histories of turning points
figure (2)
t1=linspace(0,1800,length(My));
t2=linspace(0,1800,length(tp));
plot(t1,S,'b')
hold on
plot(t2,tp,'r')
legend('stress','tp')
```

ANEXO V.

Análisis de costos.

El análisis de costos unitarios (APU) de cada rubro del sistema de compensación se detalla a continuación. Estos rubros consideran los parámetros de diseño detallados en la sección 3.3.

Tabla 25. Cantidad de soldadura por componente del sistema de compensación.

(Propio)

Longitud de soldadura		
Estructura	887,22	m
Orejas	12	m
bisagra	10,4	m

Tabla 26. Rubro 1.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:		Sistema de compensación pasiva de rolido				
RUBRO 1:		Suministro de acero estructural ASTM A572 GR50 y eslingas				
RENDIMIENTO:		982,08				
DETALLE EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Montacargas 2T	2,00	7,00	\$14,00	982,08	\$ 0,01
E2	Herramienta menor	1,00	0,50	\$0,50	982,08	\$ 0,00
SUBTOTAL M						\$ 0,01
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Operador montacargas	2,00	5,00	\$10,00	982,08	\$ 0,01
MO2	Estibadores	6,00	3,00	\$18,00	982,08	\$ 0,02
SUBTOTAL N						\$ 0,03
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Acero estructural ASTM A216	Kg	1,02	\$2,33	\$2,37	
MT2	Eslingas principales	Kg	1,50	\$1,10	\$1,65	
MT3	Eslingas de apoyo	Kg	1,25	\$0,90	\$1,13	
MT5	Varillas de acero	Kg	1,02	\$0,40	\$0,41	
SUBTOTAL O						\$5,56
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$5,60
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00 \$0,45
UTILIDAD [%]						12,00 \$0,67
PRECIO UNITARIO						\$6,72

Rendimiento		Unidad
Cantidad	235698,171	Kg
Tiempo	240	Horas
R	982,076	Kg/Horas

Tabla 27. Rubro 2.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:		Sistema de compensación pasiva de rolido				
RUBRO 2:		Fabricación de estructura metálica				
RENDIMIENTO:		688,91				
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Grúa 5T	2,00	7,00	\$14,00	688,91	\$0,02
E2	Máquina soldadora TIG	4,00	5,00	\$20,00	688,91	\$0,03
E3	Compresor 2HP	2,00	1,00	\$2,00	688,91	\$0,00
E4	Equipo de oxicorte	2,00	3,00	\$6,00	688,91	\$0,01
E5	Equipo de ensayos no destructivos	1,00	10,00	\$10,00	688,91	\$0,01
E6	Amoladoras	4,00	1,00	\$4,00	688,91	\$0,01
E7	Herramienta menor	1,00	0,50	\$0,50	688,91	\$0,00
					SUBTOTAL M	\$0,08
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Peón	4,00	3,00	\$12,00	688,91	\$0,02
MO2	Operador grúa	1,00	5,00	\$5,00	688,91	\$0,01
MO3	Soldador ASME	1,00	6,00	\$6,00	688,91	\$0,01
MO4	Ayudante de soldadura	2,00	3,00	\$6,00	688,91	\$0,01
MO5	Pintor	1,00	4,00	\$4,00	688,91	\$0,01
MO6	Inspector de ensayos	1,00	10,00	\$10,00	688,91	\$0,01
MO7	Armador	1,00	5,00	\$5,00	688,91	\$0,01
					SUBTOTAL N	\$0,07
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Electrodo WC20	Kg	0,00201	\$12,00	\$0,02	
MT2	Gas de protección de soldadura	Lt	0,00221	\$10,00	\$0,02	
MT3	Gas para oxicorte	Lt	0,00181	\$7,00	\$0,01	
MT4	Discos de desbaste	U	0,01020	\$1,50	\$0,02	
MT5	Pintura anti corrosiva	Lt	0,10000	\$3,00	\$0,30	
					SUBTOTAL O	\$0,37
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$0,53
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00 \$0,04
UTILIDAD [%]						12,00 \$0,06
PRECIO UNITARIO						\$0,63

Rendimiento		Unidad
Cantidad	220451,87	Kg
Tiempo	320,00	Horas
R	688,91	m³/3/Horas

Tabla 28. Rubro 3.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:	Sistema de compensación pasiva de rolido					
RUBRO 3:	Fabricación de orejas de izaje					
RENDIMIENTO:	20,70					
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Máquina soldadora TIG	1,00	5,00	\$5,00	20,70	\$0,24
E2	Compresor 2HP	1,00	1,00	\$1,00	20,70	\$0,05
E3	Equipo de oxicorte	1,00	3,00	\$3,00	20,70	\$0,14
E4	Equipo de ensayos no destructivos	1,00	10,00	\$10,00	20,70	\$0,48
E5	Amoladoras	1,00	1,00	\$1,00	20,70	\$0,05
E6	Herramienta menor	1,00	0,50	\$0,50	20,70	\$0,02
					SUBTOTAL M	\$0,99
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Peón	1,00	3,00	\$3,00	20,70	\$0,14
MO2	Soldador ASME	1,00	6,00	\$6,00	20,70	\$0,29
MO3	Ayudante de soldadura	1,00	3,00	\$3,00	20,70	\$0,14
MO4	Pintor	1,00	4,00	\$4,00	20,70	\$0,19
MO5	Inspector de ensayos	1,00	10,00	\$10,00	20,70	\$0,48
MO6	Armador	1,00	5,00	\$5,00	20,70	\$0,24
					SUBTOTAL N	\$1,50
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Electrodo WC20	Kg	0,00242	\$12,00	\$0,03	
MT2	Gas de protección de soldadura	Lt	0,00266	\$10,00	\$0,03	
MT3	Gas para oxicorte	Lt	0,00217	\$7,00	\$0,02	
MT4	Discos de desbaste	U	0,01020	\$1,50	\$0,02	
MT5	Pintura anti corrosiva	Lt	0,10000	\$3,00	\$0,30	
					SUBTOTAL O	\$0,39
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$2,87
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00 \$0,23
UTILIDAD [%]						12,00 \$0,34
PRECIO UNITARIO						\$3,45

Rendimiento		Unidad
Cantidad	2484,11	Kg
Tiempo	120,00	Horas
R	20,70	m³3/Horas

Tabla 29. Rubro 4.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:		Sistema de compensación pasiva de rolido				
RUBRO 4:		Fabricación de resortes				
RENDIMIENTO:		205,60				
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Máquina soldadora TIG	1,00	5,00	\$5,00	205,601	\$0,02
E2	Compresor 2HP	1,00	1,00	\$1,00	205,601	\$0,00
E3	Equipo de oxicorte	1,00	3,00	\$3,00	205,601	\$0,01
E4	Equipo de ensayos no destructivos	1,00	10,00	\$10,00	205,601	\$0,05
E5	Amoladoras	1,00	1,00	\$1,00	205,601	\$0,00
E6	Herramienta menor	1,00	0,50	\$0,50	205,601	\$0,00
					SUBTOTAL M	\$0,10
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Peón	1,00	3,00	\$3,00	205,601	\$0,01
MO2	Soldador ASME	1,00	6,00	\$6,00	205,601	\$0,03
MO3	Ayudante de soldadura	1,00	3,00	\$3,00	205,601	\$0,01
MO4	Pintor	1,00	4,00	\$4,00	205,601	\$0,02
MO5	Inspector de ensayos	1,00	10,00	\$10,00	205,601	\$0,05
MO6	Armador	1,00	5,00	\$5,00	205,601	\$0,02
					SUBTOTAL N	\$0,15
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Electrodo WC20	Kg	0,00242	\$12,00	\$0,03	
MT2	Gas de protección de soldadura	Lt	0,00266	\$10,00	\$0,03	
MT3	Gas para oxicorte	Lt	0,00217	\$7,00	\$0,02	
MT4	Discos de desbaste	U	0,01020	\$1,50	\$0,02	
MT5	Pintura anti corrosiva	Lt	0,10000	\$3,00	\$0,30	
					SUBTOTAL O	\$0,39
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$0,64
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00
UTILIDAD [%]						12,00
PRECIO UNITARIO						\$0,76

Rendimiento		Unidad
Cantidad	8224,04	Kg
Tiempo	40,00	Horas
R	205,60	m³3/Horas

Tabla 30. Rubro 5.

Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:		Sistema de compensación pasiva de rolido				
RUBRO 5:		Fundición de placas de concreto				
RENDIMIENTO:		4,33				
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Concretera	1,00	2,50	\$2,50	4,33	\$0,58
E2	Vibrador	1,00	2,00	\$2,00	4,33	\$0,46
E3	Herramienta menor	2,00	0,50	\$1,00	4,33	\$0,23
					SUBTOTAL M	\$1,27
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Maestro Mayor	1,00	5,00	\$5,00	4,33	\$1,16
MO2	Albañil	1,00	4,00	\$4,00	4,33	\$0,92
MO3	Peón	2,00	3,00	\$6,00	4,33	\$1,39
					SUBTOTAL N	\$3,47
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Cemento Portland	saco	2,00000	\$8,00	\$16,00	
MT2	Arena (0,5mm)	m³	0,50000	\$8,00	\$4,00	
MT3	Ripio (1in)	m³	0,50000	\$7,00	\$3,50	
MT4	Piedra	m³	0,50000	\$9,00	\$4,50	
MT4	Agua	m³	2,00000	\$0,50	\$1,00	
				SUBTOTAL O	\$29,00	
		COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)				\$33,74
		COSTOS INDIRECTOS [%]				8,00 \$2,70
		UTILIDAD [%]				12,00 \$4,05
		PRECIO UNITARIO				\$40,48

Rendimiento		Unidad
Cantidad	346,27	m³
Tiempo	80,00	Horas
R	4,33	m³/Horas

Tabla 31. Rubro 6.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO:		Sistema de compensación pasiva de rolido				
RUBRO 6:		Fabricación de Bisagras				
RENDIMIENTO:		104,80				
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Máquina soldadora TIG	1,00	5,00	\$5,00	104,797	\$0,05
E2	Compresor 2HP	1,00	1,00	\$1,00	104,797	\$0,01
E3	Equipo de oxicorte	1,00	3,00	\$3,00	104,797	\$0,03
E4	Equipo de ensayos no destructivos	1,00	10,00	\$10,00	104,797	\$0,10
E5	Amoladoras	1,00	1,00	\$1,00	104,797	\$0,01
E6	Herramienta menor	1,00	0,50	\$0,50	104,797	\$0,00
					SUBTOTAL M	\$0,20
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Peón	1,00	3,00	\$3,00	104,797	\$0,03
MO2	Soldador ASME	1,00	6,00	\$6,00	104,797	\$0,06
MO3	Ayudante de soldadura	1,00	3,00	\$3,00	104,797	\$0,03
MO4	Pintor	1,00	4,00	\$4,00	104,797	\$0,04
MO5	Inspector de ensayos	1,00	10,00	\$10,00	104,797	\$0,10
MO6	Armador	1,00	5,00	\$5,00	104,797	\$0,05
					SUBTOTAL N	\$0,30
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
MT1	Electrodo WC20	Kg	0,00124	\$12,00	\$0,01	
MT2	Gas de protección de soldadura	Lt	0,00136	\$10,00	\$0,01	
MT3	Gas para oxicorte	Lt	0,00112	\$7,00	\$0,01	
MT4	Discos de desbaste	U	0,01020	\$1,50	\$0,02	
MT5	Pintura anti corrosiva	Lt	0,10000	\$3,00	\$0,30	
					SUBTOTAL O	\$0,35
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$0,84
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00 \$0,07
UTILIDAD [%]						12,00 \$0,10
PRECIO UNITARIO						\$1,01

Rendimiento		Unidad
Cantidad	4191,876	Kg
Tiempo	40	Horas
R	104,7969	m²/Horas

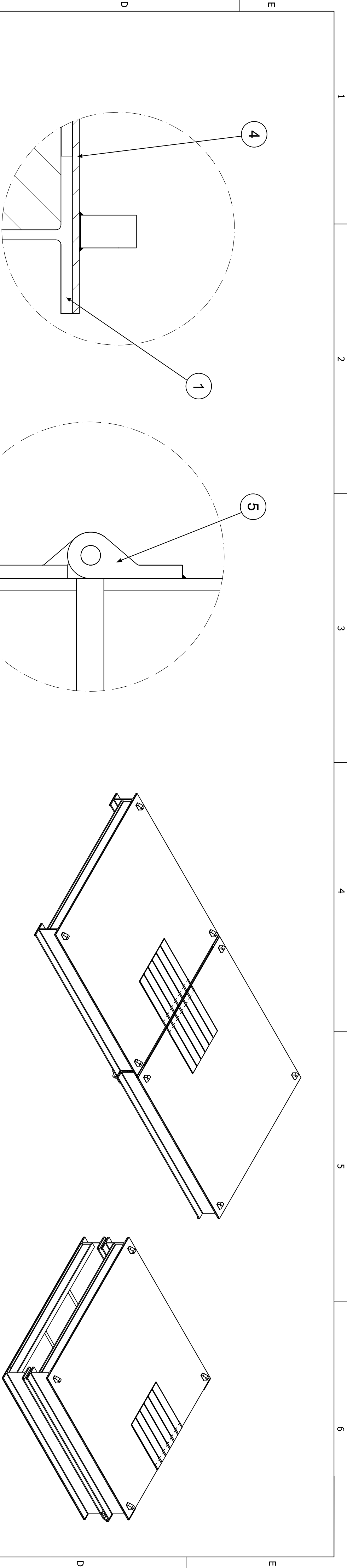
Tabla 32. Rubro 7.

(Propio)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CONTRATO: Sistema de compensación pasiva de rolido						
RUBRO 7: Montaje del sistema						
RENDIMIENTO: 14540,56						
DETALLE						
EQUIPOS						
COD	DESCRIPCION / ESPECIFICACION DEL EQUIPO	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO UNITARIO C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO TOTAL D=C/R
E1	Grua grove todo terreno 550 T	4,00	100,00	\$400,00	14540,56	\$0,03
E2	Herramienta menor	2,00	0,50	\$1,00	14540,56	\$0,00
SUBTOTAL M						\$0,03
MANO DE OBRA						
COD	DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD (A)	JORNAL (B)	C. HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R
MO1	Operador de grua	4,00	5,00	\$20,00	14540,56	\$0,00
MO2	Armador	2,00	5,00	\$10,00	14540,56	\$0,00
MO3	Estibadores	8,00	3,00	\$24,00	14540,56	\$0,00
SUBTOTAL N						\$0,00
MATERIALES						
COD	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD (A)	UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
					SUBTOTAL O	
						\$0,00
COSTOS DIRECTOS X=(M+N+O)						\$0,03
COSTOS INDIRECTOS [%]						8,00
UTILIDAD [%]						12,00
PRECIO UNITARIO						\$0,04

Rendimiento		Unidad
Cantidad	581622,5204	Kg
Tiempo	40	Horas
R	14540,56301	KGR/Horas

ANEXO VI.
Planos.

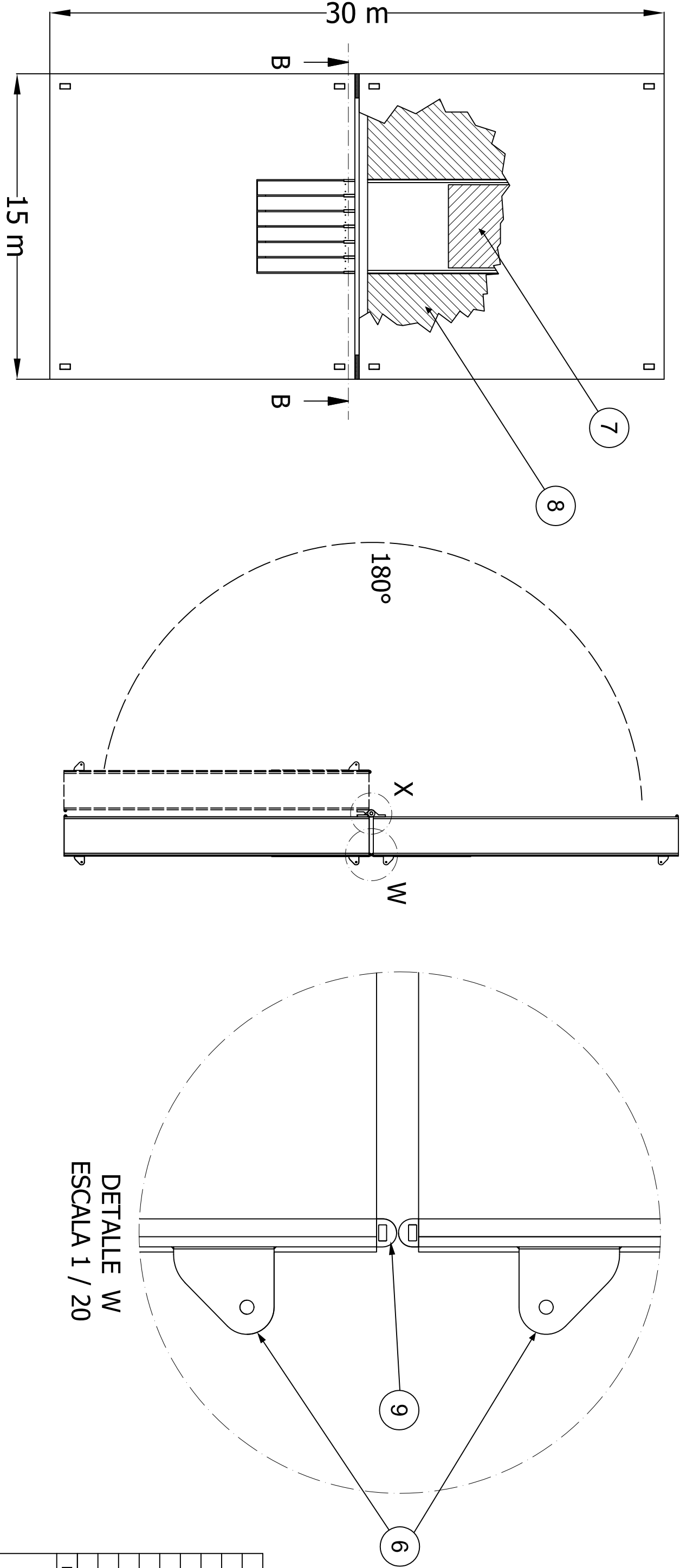


DETALLE Y
ESCALA 1 / 20

DETALLE X
ESCALA 1 / 20

DETALLE Z
ESCALA 1 / 20

CORTE B-B



LA ARTICULACIÓN DE LA PLACA TIENE
UNA MOVILIDAD DE 180° Y LOS
FENDERS SON LOS QUE AMORTIGUAN
DE LOS GOLPES BRUSCOS

9	B-4	FENDER	8	CAUCHO		
8	B-2	LOSA DE CONCRETO 2	4	CONCRETO		14.3x4.65 m
7	B-2	LOSA DE CONCRETO 1	2	CONCRETO		10.3x4.65 m
6	B-5	OREJA DE IZAJE	4	ACERO ASTM A 572GR50		
5	D-3	BISAGRA	2	ACERO ASTM A 572GR50		
4	E-1	PLANCHA	2	ACERO ASTM A 572GR50		
3	D-4	PLACA APOYO PARA RESORTES	2	ACERO ASTM A 572GR50		
2	D-4	RESORTE PLANO	12	ACERO ASTM A 572GR50		
1	D-2	ESTRUCTURA METÁLICA	1	ACERO ASTM A 572GR50		
Nº	ZONA	DENOMINACIÓN	Cant.	MATERIAL	Nº DE PLANO O NORMA	NOTAS

EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA			ESCALA
	DIB.	RIBADENEIRA, BENALCAZAR		
	DIS.	RIBADENEIRA, BENALCAZAR		
	REV.	ING. WILSON GUACHAMIN		1 : 200

COMPENSADOR DE ROLIDO	001	FECHA 29/12/2021
-----------------------	-----	---------------------