

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



**MODELO DE DEFENSA PORTUARIA AUTOCENTRANTE UTILIZANDO DISIPACIÓN
FRICCIONAL, EJEMPLO DE DISEÑO EN EL PUERTO PUNTA CAULLAHUAPI**

CLAUDIO ANDRÉS ARROYO CARRASCO

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía

Sr. Nelson Maureira Carsalade.

Profesor Informante

Sr. Mauricio Villagrán Valenzuela.

Concepción, agosto de 2016

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar, quisiera agradecer a Dios por permitirme tener a mi familia que siempre me incentivo a seguir avanzando en la vida y lograr esta meta que hoy he logrado. Ser un profesional. También por los valores que me inculcaron, como la responsabilidad, el esfuerzo y el empeño.

A mi madre, por insistir de manera incansable en el término de esta tesis, aunque a veces me sintiera agotado.

A mi padre, por hacer desde su pasividad a que me interesara por el camino de la Ingeniería Civil. Papá, reconozco que fuiste un pilar fundamental cuando necesité apoyo y dirección en la vida.

A mis hermanos, que a pesar de tener ideas distintitas y caracteres también diferentes, sabíamos llevar a cabo un consenso y concretar grandes ideas. A mi hermana, que a pesar de discusiones por cosas triviales siempre ha estado en las buenas y en las malas apoyándome en todo.

A Loreto, por ser parte importante en mi vida, y a quién prometí ser un gran profesional.

A mi profesor guía, Sr. Nelson Maureira, por estar siempre guiando esta investigación, y quién apoyo esta idea a pesar de no conocer en profundidad sobre qué trataba el tema. Por ayudarme a formular lo que fueron las bases y cimientos de esta tesis.

A mi profesor informante, Sr. Mauricio Villagrán, por aportarme con su conocimiento en el área portuaria e interesarse en esta investigación que sin duda es nueva en esta área.

A mis amigos y compañeros, quienes siempre creyeron en mí y me apoyaron durante todo el proceso lectivo en la Universidad.

A la vida, simplemente un gracias.

RESUMEN

Las defensas portuarias son el resultado de un diseño cuyo objetivo es proteger un puerto bajo la acción de cargas de impacto debido al atraque de los barcos. El fin de estas estructuras es resistir las cargas de atraque, disipando la energía cinética del buque, mitigando el daño en su casco y en la estructura del puerto.

Las fuerzas que los barcos imponen al muelle en el proceso de atraque, dependen fundamentalmente de la maniobra operativa con que este proceso se realice. Debido a esto, es necesario considerar varios escenarios posibles de la maniobra operativa en el diseño del muelle y las defensas portuarias. A su vez, estas fuerzas dependen de los oleajes predominantes en cada puerto o zona costera. De estos factores dependerá el ángulo en que el barco efectúa el proceso de atraque el cual determina la incidencia, factor que define la capacidad de una defensa portuaria.

El análisis de solicitaciones involucradas en el atraque es un proceso dinámico, por lo que esas fuerzas no pueden ser consideradas como estáticas. Dichas fuerzas deben considerar las condiciones más desfavorables de clima y oleaje, las que definirán el factor de amplificación dinámico. Existe además una correlación directa entre la fuerza aplicada y la velocidad de atraque, por lo que este también es un parámetro de diseño relevante.

Debido a lo anteriormente indicado, es muy difícil definir claramente cuáles deben ser las fuerzas involucradas en el proceso de atraque. Por esto, los procedimientos de diseño se basan principalmente en los niveles de energía que debe ser disipada en el atraque, más que con las fuerzas involucradas. Esto último es conveniente como parámetro de diseño, ya que la energía involucra fuerza, deformación y velocidad en el proceso de atraque.

La defensa que actualmente tiene el puerto "Punta Caullahuapi", consiste de un cono de goma tras una placa soportante, que es la que se encuentra en contacto directo con el buque. En el desarrollo de esta tesis un tipo de defensa portuaria que incorpora disipación de energía por fricción y capacidad autocentrante es propuesto. Un análisis paramétrico de esta defensa es realizado para evaluar su potencial en términos de capacidad de reacción y disipación de energía. La defensa portuaria anterior es incorporada en un modelo de análisis dinámico del citado puerto, para simular el proceso de atraque, proponiendo un procedimiento de diseño basado en fuerza reactiva máxima y energía disipada requeridas. Finalmente, una comparación entre la defensa existente en el mencionado puerto y la defensa portuaria de esta tesis es realizada en términos de desempeño, destacando las ventajas de la última.

ABSTRACT

Port defenses are the result of a design that seeks to protect a port under the action of impact loads due to the berthing of ships. The purpose of these structures is to resist loads due to berthing, dissipating the kinetic energy of the ship, mitigating the damage to its hull and structure of the port.

The forces imposed on the dock by ships in the berthing process, depend mainly on the operational maneuver in which this process is performed. Because of this, it is necessary to consider several possible scenarios of operational maneuver in designing the dock and port defenses. At the same time, these forces depend on the prevailing sea waves at each port or coastal area. Of these factors depend the angle at which the ship perform the berthing process which determines the incidence, factor that define the capacity of a port defense.

The analysis of stresses involved in the berthing is a dynamic process, so those forces can not be considered as static. Such forces should consider the most unfavorable weather conditions and waves, which define the dynamic amplification factor. There is also a direct correlation between the applied force and speed berthing, so this is also an important design parameter.

Because of the above, it is very difficult to define what should be the forces involved in the process of berthing. Therefore, the design procedures are based primarily on levels of energy that must be dissipated in the berthing, rather than the forces involved. The latter is suitable as design parameter, since energy involves force, strain and speed in the process of berthing.

The defense that currently has the port "Punta Caullahuapi" consists of a rubber cone behind a supporting plate, which is located in direct contact with the ship. In developing this thesis a type of port defense that incorporates friction energy dissipation and self-centering capability is proposed. A parametric analysis of this defense is performed to evaluate its potential in terms of resilience and energy dissipation. This port defense is incorporated in a model of dynamic analysis of the abovementioned port to simulate the berthing process, proposing a design procedure based on maximum reactive force and requirement of energy dissipation. Finally, a comparison between the existing defense in the aforementioned port and port defense of this thesis is carried out in terms of performance, highlighting the advantages of the proposed defense.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	10
1.1.- Presentación del tema y motivación	10
1.2.- Objetivos	11
1.3.- Resumen metodológico.....	12
2.- MARCO TEÓRICO.....	13
2.1.- Recopilación de antecedentes.....	13
2.2.- Estructuras complementarias de ataque	15
2.2.1.- Duque de alba.....	15
2.3.- Sistemas de defensas portuarias	16
2.3.1.- Definición de defensa portuaria	16
2.3.2.- Conceptos de diseño	17
2.3.3.- Selección actual del sistema de defensas	17
2.3.4.- Efectos de compresión angular.....	19
2.3.5.- Eficacia de las defensas.....	20
2.3.6.- Velocidad de ataque	21
2.4.- Energía nominal de ataque (E_n)	22
2.4.1.- Ataque lateral.....	22
2.4.2.- Ataque en Duque de Alba.....	23
2.4.3.- Ataque de Popa.....	23
2.5.- Energía Anormal de Ataque (E_a).....	24
2.6.- Coeficientes para el cálculo de energía normal de ataque.....	24
2.6.1.- Coeficiente de masa añadida (c_m)	24
2.6.2.- Coeficiente de excentricidad (c_e)	26
2.6.3.- Coeficiente de configuración del muelle (c_o)	27
2.6.4.- Coeficiente de deformación (c_s).....	28

2.7.- Diagrama de diseño convencional.....	29
2.8.- Tipos de defensas	30
2.8.1- Materiales de las defensas en la actualidad	30
2.8.2.- Estructuras de atraque	31
2.8.3.- Clasificación general.....	31
2.8.4.- Configuración física	31
2.8.5.- Clasificación en función de la tipología estructural	32
2.9.- Sistemas de disipación.....	32
2.9.1.- Introducción	32
2.9.2.- Disipadores metálicos.....	33
2.9.3.- Disipadores viscosos.	34
2.9.4.- Disipadores friccionales.	34
3.- METODOLOGÍA.....	39
3.1.- Breve descripción del estudio.....	39
3.2.- Ecuaciones constitutivas de la defensa en estudio	39
3.3.- Metodología de selección/diseño de la defensa propuesta	43
3.4.- Formulación del equilibrio dinámico en proceso de atraque.....	45
3.5.- Parámetros de diseño del muelle en estudio.....	57
4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	60
4.1.- Análisis Paramétrico de una Defensa Individual	60
4.2.- Análisis del atraque y procedimiento de diseño de las defensas	64
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades físicas de los pilotes.....	14
Tabla 2.2: Propiedades físicas de las vigas.....	14
Tabla 2.3: Comparación de defensas Super Cone y Cilíndrica	20
Tabla 2.4: Categoría de ataque	21
Tabla 2.5: Factores de seguridad para uso en cálculo de Energía Anormal	24
Tabla 2.6: Coeficientes de masa añadida para el cálculo de energía de ataque por PIANC	20
Tabla 2.7: Coeficientes de masa añadida para el cálculo de energía de ataque por Shigera Ueda y Vasco Costa	21
Tabla 2.8: Coeficientes de excentricidad comunes para el cálculo de energía de ataque	26
Tabla 2.9: Coeficientes de configuración para el cálculo de energía de ataque	27
Tabla 3.1: Datos del problema de ataque buque - muelle Punta Caullahuapi.....	48
Tabla 3.2: Propiedades de barco New Panamax.....	58
Tabla 4.1: Fuerza reactiva máxima de la defensa, F_{max} , para distintas combinaciones de parámetros H , K_0 y u/H	63
Tabla 4.2: Máxima energía disipada por la defensa, E_{dis} , para distintas combinaciones de parámetros H , K_0 y u/H	63
Tabla 4.3: Rigidez del resorte y tensión máxima de trabajo	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de planta y perfil tipo del cabezo	13
Figura 2.2: Secciones de vigas modeladas	15
Figura 2.3: Curva característica Carga v/s deformación.....	17
Figura 2.4: Contacto con una sola defensa o múltiples defensas.....	19
Figura 2.5: Ángulos de ataque.....	19
Figura 2.6: Comparación de eficiencia de una defensa rígida y una dúctil	20
Figura 2.7: Gráfica de velocidades v/s peso de nave	21
Figura 2.8: Velocidades según categoría de ataque	22
Figura 2.9: Ataque lateral de una embarcación	22
Figura 2.10: Ataque de una embarcación en duque de alba	23
Figura 2.11: Ataque de popa de una embarcación.....	23
Figura 2.12: Esquema de uso de datos para cálculo de coeficiente de masa añadida	25
Figura 2.13: Esquema de uso de datos para cálculo de coeficiente de excentricidad.....	26
Figura 2.14: Ejemplos de estructura cerrada (1) y estructura abierta (2) para la asignación del coeficiente de configuración c_c	27
Figura 2.15: Diagrama de diseño convencional de defensas	29
Figura 2.16: Ejemplo de disipador metálico ADAS	33
Figura 2.17: Ejemplo de disipador viscoso	34
Figura 2.18: Esquema general de disipadores	38
Figura 3.1: Dispositivo autocentrante con disipación de energía, propuesto como defensa portuaria.....	40
Figura 3.2: Diagrama de cuerpo libre de dispositivo autocentrante con disipación de energía.....	40
Figura 3.3: Relación F vs u o ciclo histerético de la defensa portuaria trabajando para carga de compresión	42
Figura 3.4: Representación física del fenómeno de ataque	46

Figura 3.5: Definición de cinemática del problema	47
Figura 3.6: Casos para definición de u_d	51
Figura 3.7: Perfil de velocidades con atraque con $\theta = 0$	53
Figura 3.8: Perfil de velocidades con atraque con $\theta > 0$	54
Figura 3.9: Representación física de la constante de arrastre en franja unitaria, \hat{c}	55
Figura 4.1: Fuerza máxima versus relación u/H para $H = 1.0$ m.....	60
Figura 4.2: Fuerza máxima versus relación u/H para $H = 2.0$ m.....	61
Figura 4.3: Fuerza máxima versus relación u/H para $H = 3.0$ m.....	61
Figura 4.4: Fuerza máxima versus relación u/H para $H = 4.0$ m.....	62
Figura 4.5: Energía disipada versus H , para $K_0 = 1.0 \times 10^6$ N/m	62
Figura 4.6: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 2$ MN/m y $H = 2$ m	65
Figura 4.7: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 2$ MN/m y $H = 2$ m	65
Figura 4.8: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 3$ MN/m y $H = 2$ m	66
Figura 4.9: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 3$ MN/m y $H = 2$ m	66
Figura 4.10: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 1$ MN/m y $H = 3$ m	67
Figura 4.11: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 1$ MN/m y $H = 3$ m	67
Figura 4.12: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 2$ MN/m y $H = 3$ m	68
Figura 4.13: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 2$ MN/m y $H = 3$ m	68

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Presentación del tema y motivación

El puerto en estudio, denominado “Punta Caullahuapi” se encuentra ubicado en la ciudad de Puerto Montt, Xª Región de los Lagos y es propiedad de empresas marítimas Oxxean. Es el primer puerto internacional de la región, y fue diseñado con el propósito de ser un puerto granelero. Con el paso del tiempo, el proyecto se fue modificando hasta ser definido como un puerto multipropósito.

Durante la visita a las instalaciones del puerto, nace la inquietud de cómo los barcos llegan a atracar sin dañar las estructuras portuarias. La respuesta a esto son las defensas portuarias.

Las defensas actualmente son fabricadas de compuesto de caucho, el cuál con el paso del tiempo se deteriora por efectos del sol, uso y un sinfín de factores que hacen necesaria su mantención y/o reposición en periodos muy cortos de tiempo.

De aquí nace la motivación de hacer estudios de parámetros que definen el comportamiento de una defensa, en especial para el puerto antes mencionado. Dentro de esto, se nota que el factor que más influye en el proceso de selección y diseño de una defensa es el de disipación de energía, pues los barcos a pesar de atracar con bajas velocidades, al tener una gran inercia y masa asociada, también tienen una gran energía de ataque.

En este trabajo se presenta un nuevo tipo de defensa portuaria, la cual es capaz de disipar energía por fricción, recuperando su configuración no deformada una vez retiradas las cargas. Esta defensa es implementada en un modelo numérico del puerto en análisis para obtener sus parámetros óptimos de diseño. Lo anterior tiene por objetivo mostrar el potencial del nuevo tipo de defensa portuaria señalada antes, así como validar su factibilidad práctica por medio del diseño aplicado al puerto en estudio.

1.2.- Objetivos

Objetivo general

Determinar los parámetros óptimos de diseño de un nuevo dispositivo de defensa portuaria con capacidad autocentrante y disipación de energía por fricción, a través de su implementación numérica para el Puerto "Punta Caullahuapi".

Objetivos específicos

Conocer las cargas y niveles de energía involucrados en el proceso de ataque para el barco tipo modelado.

Caracterizar un nuevo modelo de defensa portuaria, utilizando disipación friccional.

Evaluar el desempeño del nuevo dispositivo de defensa portuaria, por medio de un análisis de respuesta parametrizado.

Definir una metodología de diseño para la asignación de parámetros a la defensa propuesta, conocidas las características del puerto, buque de diseño y maniobra de ataque.

Implementar un modelo numérico que describa el proceso dinámico de ataque, incorporando la defensa portuaria del tipo antes mencionado.

Evaluar el desempeño de la nueva defensa portuaria implementada en el puerto en estudio, considerando los parámetros asignados en el proceso de diseño.

Comparar la defensa existente en el puerto en estudio, con la nueva defensa propuesta considerando sus parámetros óptimos de diseño, destacando ventajas y desventajas de esta última.

1.3.- Resumen metodológico

Investigación bibliográfica: Se recopiló toda la información disponible para desarrollo portuario, en particular se buscó información sobre las estructuras existentes en el puerto en estudio.

Estudio del funcionamiento del puerto: Se recopiló información de los datos del puerto, distancias de atraque, velocidades, formas, etc.

Estudio de estructuras portuarias, zonas y formas de atraque: Se estudió en general como se diseñan las estructuras de atraque portuario, los parámetros que se utilizan para elegir una defensa en función de los factores que definen la energía de atraque.

Dispositivos de disipación de energía a través de disipadores friccionales: Se analizó el dispositivo friccional como ente de disipación de energía y se estudió si cumple con las características necesarias para disipar la gran cantidad de energía de atraque, cumpliendo con los estándares de velocidad que se presentan en el atraque de un barco.

Obtención de cargas de impacto: Se obtuvieron a través de los datos recopilados sobre el barco tipo que atraca en el muelle.

Modelos numéricos: Se implementaron métodos numéricos que permitieron modelar y obtener el comportamiento del disipador friccional puesto en el muelle para las condiciones de atraque previamente definidas.

Procesamiento y análisis: Se obtuvieron los resultados para el análisis del disipador para verificar o rechazar la hipótesis de que puede ser utilizado e implementado para el puerto en estudio, y en general como defensa portuaria de construcción factible.

Conclusiones: Se buscó la defensa óptima para el muelle en estudio, a partir de los datos de energía mínima y reacción máxima correspondientes.

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Recopilación de antecedentes

El puerto “Punta Caullahuapi”, emplazado en la península de la Bahía de Chincui, ubicada en la comuna de Puerto Montt, Xª Región de los Lagos, cuenta con un cabezo de 48,0 metros de largo y 25,71 metros de ancho. Este cabezo, está conformado por 7 ceapas transversales, con pilotes verticales e inclinados en relación H/V: 1/3.

En cada ceapa sobre los pilotes, se monta una viga transversal de acero que conformará un marco resistente, en conjunto con los pilotes, los cuales entre sí son arriostrados por vigas longitudinales que soportan losetas de hormigón prefabricado de 25 cm de espesor, y que en sí, conforman un sistema de vigas con losa colaborante.

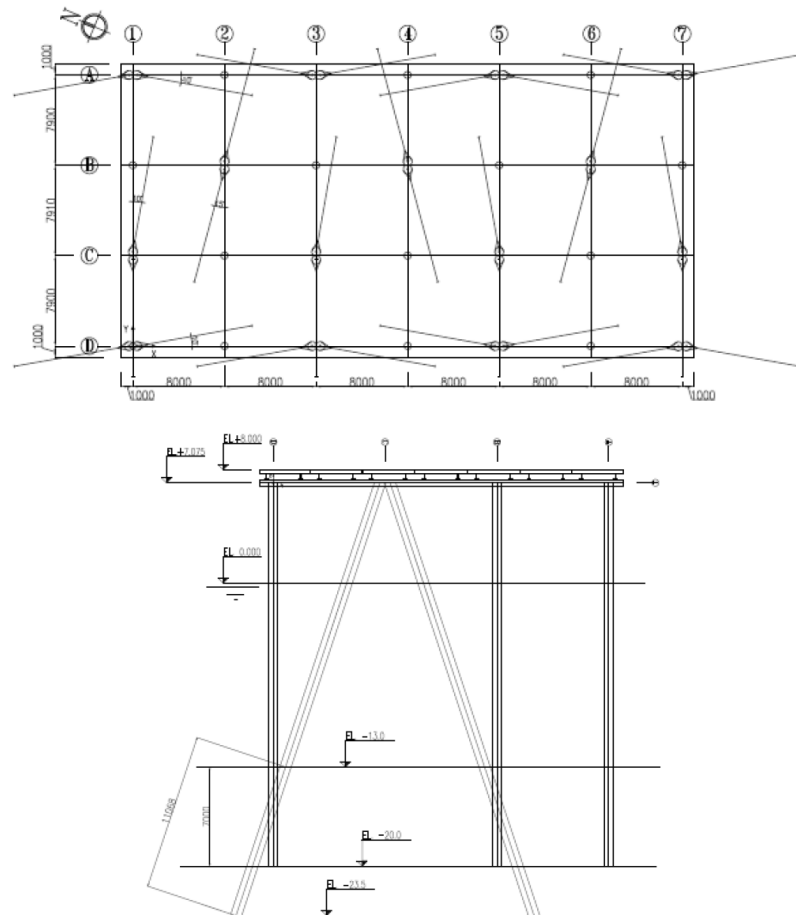


Figura 2.1: Esquema de planta y perfil tipo del cabezo (Planos de Construcción, Calbuco Ingenieros).

La estructuración de los pilotes, se conforma por pilotes de acero verticales de 24", e inclinados de 30", los que en conjunto con la viga travesaño, forman un marco resistente, quedando además, arriostrados con las vigas longitudinales de las losetas.

En tablas 2.1 y 2.2 se indica la geometría de los elementos del cabezo.

Tabla 2.1: Propiedades físicas de los pilotes (Especificaciones técnicas de construcción, Calbuco Ingenieros).

Pilote inclinado: 30 pulg.	Pilote vertical: 24 pulg.
Reducción espesor: 1 mm.	Reducción espesor: 1 mm.
Espesor: 12.7 mm.	Espesor: 12.7 mm.
Diámetro ext: 760 mm.	Diámetro ext: 608 mm.
Diámetro int: 737 mm.	Diámetro int: 584 mm.

Tabla 2.2: Propiedades físicas de las vigas (Especificaciones técnicas de construcción, Calbuco Ingenieros).

Elemento	Viga travesaño	Viga longitudinal
Perfiles	2IN45	IE45x127
Altura	450	450
Ancho ala sup.	250	250
Espesor ala sup.	20	20
Ancho ala inf.	250	250
Espesor ala inf.	20	25
Espesor alma	8	12

La viga travesaño, se rellenó con hormigón H-35 para aumentar su rigidez. La viga longitudinal, corresponde a la viga de la loseta prefabricada.

Para la modelación de las cargas, se usó la viga compuesta transformada que se muestra en la figura 2.2.

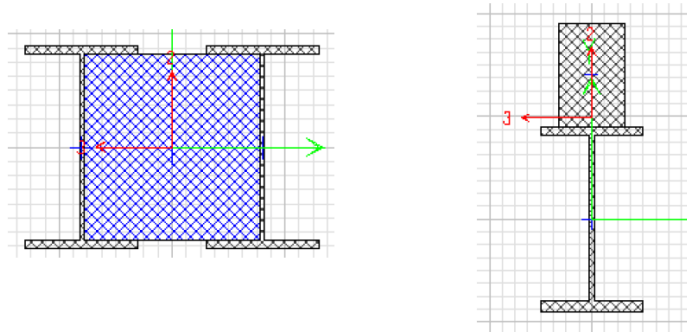


Figura 2.2: Secciones de vigas modeladas. (Memoria de cálculo cabeza, Calbuco Ingenieros).

2.2.- Estructuras complementarias de atraque

2.2.1.- Duque de alba

Como complemento a la estructura del muelle, se considera la construcción de dos Duques de Alba rígidos, para atraque y apoyo de la nave. Éstos, estarán constituidos por un macizo de hormigón armado de 6,0 x 8,0 x 1,5 m., con cota superior + 5,0 m (N.R.S.), por lo que en algunas condiciones de marea quedará sumergido.

El duque de alba está dotado de una defensa de goma troncocónica simple, provista de un panel frontal protector, el que se mantiene en posición mediante cadenas y tensores. En el centro de cada duque de alba existe una bita tipo cabeza de cobra con una capacidad mínima de 100 toneladas a 45° con la horizontal. Esta bita está instalada en una placa metálica a la cota + 8,0 m., apoyada en una estructura tubular sobre el macizo de hormigón armado.

Se dispone además de pilotes tubulares metálicos $\varnothing 30''$, verticales e inclinados, los que están empotrados en el macizo superior de hormigón armado los cuales transmiten los esfuerzos de atraque, apoyo y de amarre de la nave al suelo de fundación. Se considera la disposición de 14 pilotes en total, $\varnothing 30'' \times 12,7$ mm. Para el duque de alba, de acuerdo al siguiente detalle:

Pilotes Verticales, Ficha Estimada 7 m. 5 Un.

Pilotes Inclinados 1:3 Transversales, Ficha Estimada 11 m. 4 Un.

Pilotes Inclinados 1:3 Longitudinales, Ficha Estimada 11 m. 5 Un.

2.3.- Sistemas de defensas portuarias

Cuando un buque llega a un muelle, es prácticamente imposible evitar el choque entre ambos. Surge entonces la necesidad de un sistema de defensas, el cual tiene como función principal, prevenir el contacto directo del buque con el muelle, para evitar daños en ambos durante el proceso de atraque y amarre, además de absorber la energía de impacto (Tsinker, 1986).

A fin de proporcionar seguridad tanto a las embarcaciones como a las estructuras de atraque, es necesario incluir defensas, cuyo principal fin es absorber energía de impacto debido al atraque, evitando así que el casco del buque entre en contacto con la superestructura y reducir los movimientos del buque, mientras éste permanece amarrado. Para embarcaciones modernas, en particular, las defensas son indispensables.

Las defensas de tipo madera y caucho, antiguamente eran comunes en distintos puertos del mundo. Sin embargo, en la actualidad existen otros materiales en la fabricación de defensas, las principales razones son:

Las defensas aumentan la vida útil de la estructura de atraque.

El costo y la demanda de los buques están en aumento.

Las embarcaciones son cada vez de mayor tamaño.

La presión permitida del casco se está reduciendo cada vez más.

2.3.1.- Definición de defensa portuaria

Las defensas son la capa intermedia entre la embarcación y la estructura. Esta capa intermedia absorbe parte de la energía cinética del buque en el momento de su atraque, de hecho, las defensas absorben la mayor parte de esta energía.

La obra de atraque y el casco del buque también absorben parte de la energía, a través de la constante de la elasticidad de sus materiales.

La absorción de energía de las defensas, E_d , se refleja en la curva característica de carga-deformación de ésta. Dicha curva muestra la relación entre la deformación Δ y la fuerza de reacción F . El área bajo la curva representa la absorción de energía E_d .

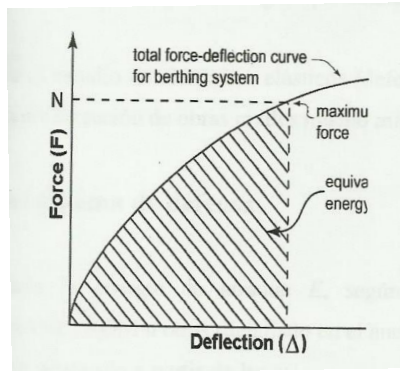


Figura 2.3: Curva característica Carga v/s deformación (Castro, D., 2010).

Las dimensiones y propiedades de las defensas se encuentran en catálogos de diferentes fabricantes. Sin embargo, hay que recordar que la curva se aplica sólo cuando la defensa se comprime horizontalmente o se deforma en una sola dirección o cuando entra en fluencia la carga soportada y se reduce de manera sustancial.

2.3.2.- Conceptos de diseño

Actualmente, existen dos criterios en relación al diseño de sistemas de defensas. El primero supone un comportamiento rígido de la estructura de atraque. Debido a esto, las defensas absorben la totalidad de la energía cinética del buque. Este criterio es compatible con muros de gravedad o muelle sobre pilotes inclinados. El segundo criterio se basa en un estudio más acabado de la capacidad de absorción de energía, la cual estudia la relación suelo-estructura, en la cual la estructura de atraque es parte del sistema de defensa, es decir, las defensas y estructuras de atraque absorben en conjunto la energía cinética de la embarcación. Como ejemplo de estos, los duques de alba, constan generalmente de un mono pilote de acero empotrado a gran profundidad en el lecho marino. En ambos casos el estudio de elementos elásticos, en este caso las defensas actuales, constan de gran capacidad de deformación, permitiendo la construcción de obras civiles aparentemente más livianas y económicas.

2.3.3.- Selección actual del sistema de defensas

Una vez calculada la energía de atraque E_d , según las normas internacionales como PIANC, ROM u otras, se puede comenzar a definir el tipo de defensa adecuado, a partir de las curvas características R v/s D , obtenidas de los catálogos publicados por los fabricantes.

Si bien el valor de energía a disipar es el primer índice de selección y el más importante, la relación entre las reacciones de las defensas y la carga máxima admisible de la estructura portuaria, disminuyen más aún el rango de opciones. En definitiva, restricciones específicas del proyecto y otras como presión máxima admisible sobre el casco, variaciones del nivel del mar, etc., conducen a la selección del sistema de defensas (Castro, D., 2010).

Al seleccionar las defensas, el diseñador debe tener en cuenta cual va a ser la frecuencia de uso y los efectos que esto puede tener en el rendimiento de la defensa a largo plazo. También se deben considerar las restricciones otorgadas por las mareas, la experiencia de los operadores, el tipo de puerto de atraque, el viento, las embarcaciones a las cuales se espera prestar servicio, las estructuras, las condiciones de atraque, etc.

Dependiendo del proyecto, se pueden incluir uno o más de estos factores:

- Contacto con una o más defensas.
- Efectos de la compresión con un cierto ángulo.
- Eficacia de las defensas (E/R).
- Velocidad de atraque.

A continuación se detallarán los factores mencionados anteriormente.

Contacto con una sola defensa

- Toda la energía es absorbida por una sola defensa.
- Es probable que se produzca una deformación completa de la defensa.
- El ángulo de la forma acampanada de la proa (β) es importante. Además, el ángulo entre la defensa y el barco, puede causar pérdida de absorción de energía.

Contacto con dos defensas

- La energía se distribuye entre dos defensas.
- El margen de holgura entre el casco y la estructura puede ser menor, especialmente para radios de proa pequeños.

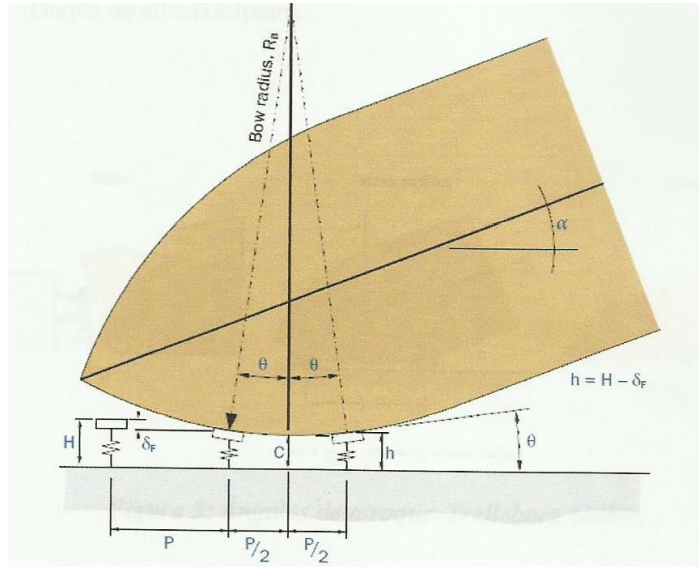


Figura 2.4: Contacto con una sola defensa o múltiples defensas (Trelleborg, 2008).

2.3.4.- Efectos de compresión angular

Es importante reconocer la manera de atracar en una embarcación, y como hace contacto con la estructura. El ángulo de compresión de atraque es el ángulo horizontal y/o vertical que se forma entre el casco del buque y la estructura de atraque en el punto de contacto. Para esto, hay tres condiciones posibles:

- De proa (Flare).
- Lateral (Bow radius).
- Duque de alba (Dolphin).

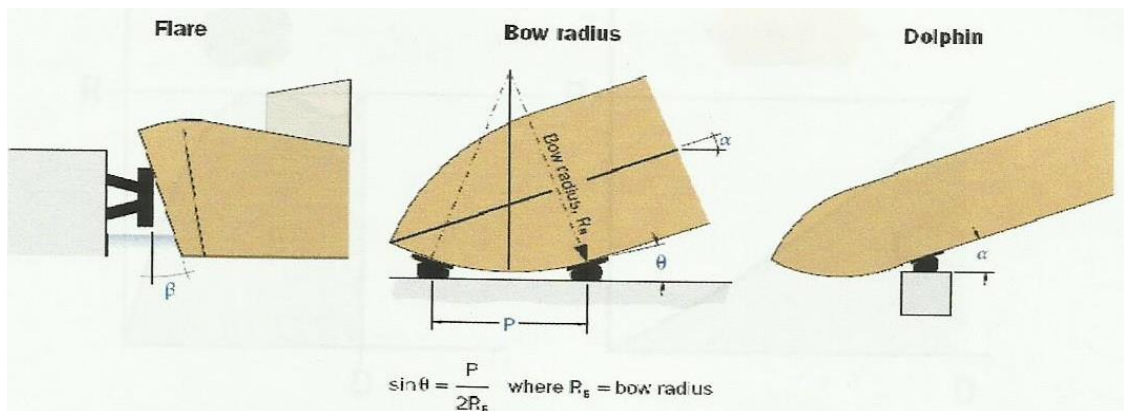


Figura 2.5: Ángulos de atraque (Trelleborg, 2008).

Cuando los buques atracan de proa contra la defensa, el verdadero ángulo de contacto es menor que el ángulo de atraque, debido al radio de proa del casco.

Donde,

P = Distancia entre defensas

R_B = Radio de proa

Θ = Ángulo de contacto

2.3.5.- Eficacia de las defensas

La eficacia de las defensas se define como la relación entre la energía absorbida y la fuerza de reacción generada. Esto permite comparar distintas defensas sin importar el tamaño o tipo.

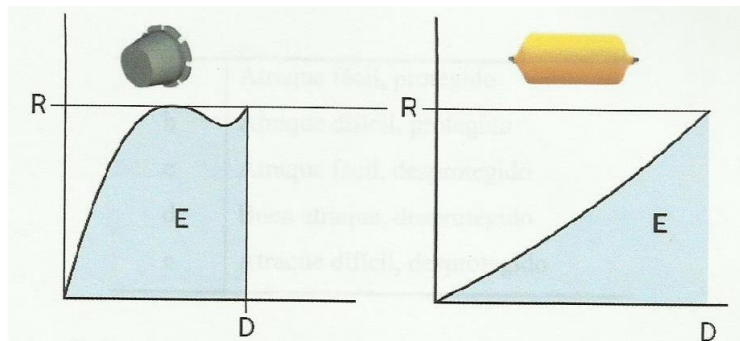


Figura 2.6: Comparación de eficiencia de una defensa rígida y una dúctil (Trelleborg, 2008).

La comparación en la tabla 2.3 muestra una defensa Súper Cono y una defensa Cilíndrica, con energía y reacción similares. En ésta, se puede ver la deformación esperada para cada tipo de defensa.

Tabla 2.3: Comparación de defensas Super Cone y Cilíndrica (Castro, D., 2010).

Super Cone SCN 1050	Cilíndrica OD x ID 2400x1200
E [KN m] = 550	E [KN m] = 647
R [KN] = 1015	R [KN] = 1321
E/R [KN m / KN] = 0,543	E/R [KN m / KN] = 0,489

2.3.6.- Velocidad de atraque

Las velocidades de atraque dependen de la facilidad o dificultad de acercamiento, de lo resguardado que se encuentre el muelle en términos marítimos y del tamaño del buque.

Las dificultades generalmente se dividen en cinco categorías que se indican a continuación.

Tabla 2.4: Categoría de atraque (Trelleborg, 2008).

A	Atraque fácil, protegido
B	Atraque difícil, protegido
C	Atraque fácil, desprotegido
D	Buen atraque, desprotegido
E	Atraque difícil, desprotegido

Las velocidades de diseño más utilizadas se encuentran en la tabla *Brolsma*, adoptada por la ROM, PIANC y otras normas internacionales. Para facilitar su utilización, las velocidades para los principales tamaños de buque están tabuladas.

Para ingresar a la tabla se necesita conocer el peso muerto de los buques (*DWT*) y las condiciones de atraque, obtenidas de la figura 2.8.

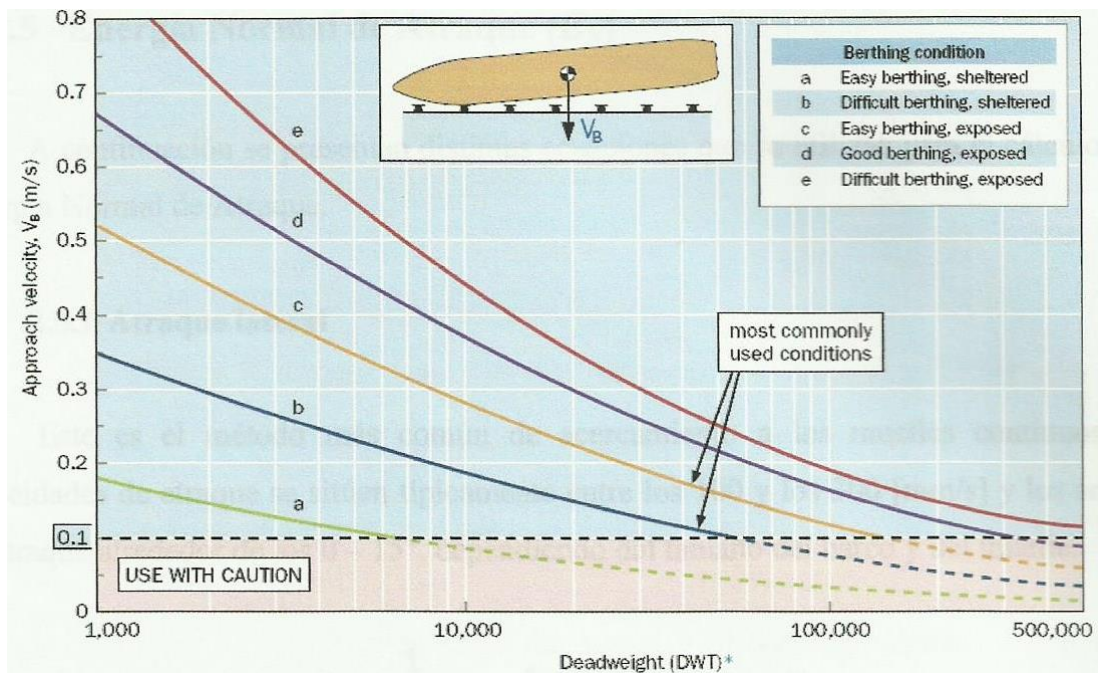


Figura 2.7: Gráfica de velocidades v/s peso de nave (Trelleborg, 2008).

DWT	Velocity, V_B (m/s)				
	a	b	c	d	e
1,000	0.179	0.343	0.517	0.669	0.865
2,000	0.151	0.296	0.445	0.577	0.726
3,000	0.136	0.269	0.404	0.524	0.649
4,000	0.125	0.250	0.374	0.487	0.597
5,000	0.117	0.236	0.352	0.459	0.558
10,000	0.094	0.192	0.287	0.377	0.448
20,000	0.074	0.153	0.228	0.303	0.355
30,000	0.064	0.133	0.198	0.264	0.308
40,000	0.057	0.119	0.178	0.239	0.279
50,000	0.052	0.110	0.164	0.221	0.258
100,000	0.039	0.083	0.126	0.171	0.201
200,000	0.028	0.062	0.095	0.131	0.158
300,000	0.022	0.052	0.080	0.111	0.137
400,000	0.019	0.045	0.071	0.099	0.124
500,000	0.017	0.041	0.064	0.090	0.115

Figura 2.8: Velocidades según categoría de atraque (Trelleborg, 2008).

2.4.- Energía nominal de atraque (E_n)

A continuación, se presentan distintas ecuaciones que se utilizan para el cálculo de la Energía Nominal de Atraque.

2.4.1.- Atraque lateral

Este es el método más común de acercamiento a los muelles continuos. Las velocidades de atraque se sitúan típicamente entre los 100 y los 300 [mm/s] y los ángulos de atraque alrededor de los 0 – 15°, dependiendo del tamaño del barco y del muelle.

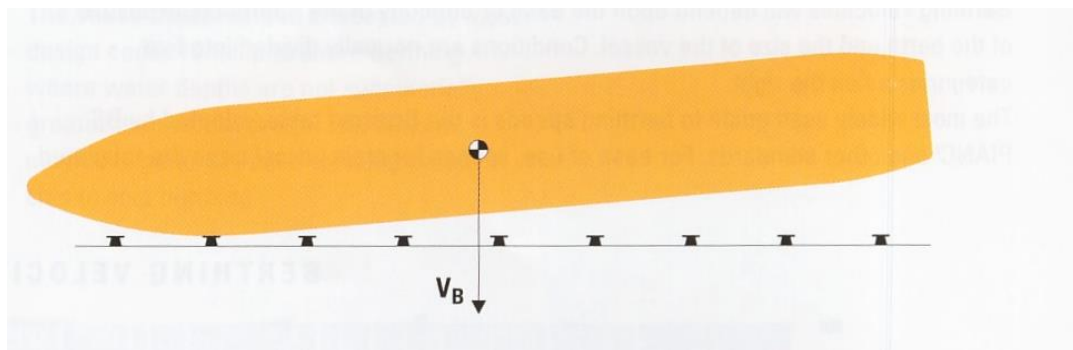


Figura 2.9: Atraque lateral de una embarcación (Trelleborg, 2008).

2.4.2.- Atraque en Duque de Alba

Los duques de alba son comunes en puertos petroleros y graneleros. Los buques generalmente, reciben la asistencia de remolcadores durante su acercamiento. Las velocidades de atraque están bien controladas y normalmente se sitúan entre los 100 y los 200 [mm/s]. Además, los ángulos de atraque se encuentran en el rango de los 0 a los 10°. La energía nominal de atraque, se calcula con la misma expresión para el atraque lateral.

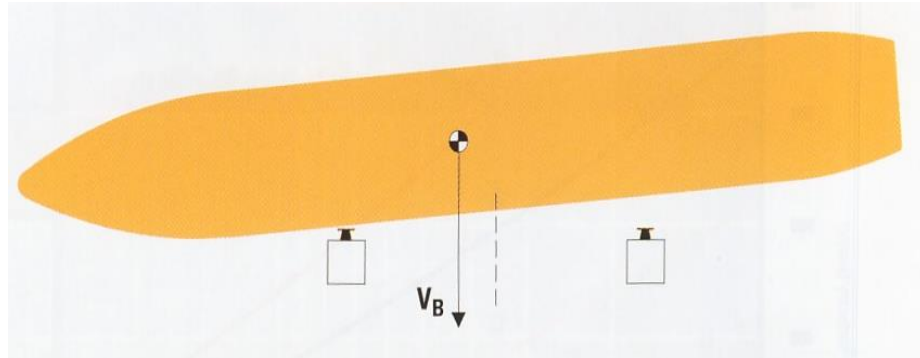


Figura 2.10: Atraque de una embarcación en duque de alba (Trelleborg, 2008)

2.4.3.- Atraque de Popa

El atraque de popa normalmente se limita a los buques para transporte Ro Ro y barcos similares con puertas de proa o popa, que se utilizan para descargar carga móvil. Las defensas de popa se utilizan con poca frecuencia, pero cuando se usan; las velocidades de atraque tienden a ser altas, típicamente entre los 200 y los 500 [mm/s]. La energía normal de atraque se calcula mediante la expresión que sigue.

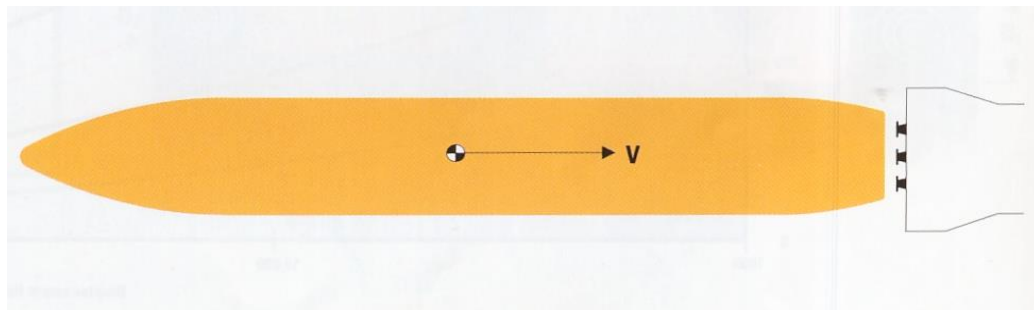


Figura 2.11: Atraque de popa de una embarcación (Trelleborg, 2008).

2.5.- Energía Anormal de Atrache (E_a)

Los impactos anormales surgen cuando la energía normal es superada.

Las causas pueden incluir errores humanos, mal funcionamiento, condiciones meteorológicas excepcionales, o una combinación de estos factores.

La energía anormal de atrache que absorbe la defensa se puede calcular mediante la ecuación que sigue.

$$E_a = F_s \cdot E_n \quad (2.1)$$

Donde,

F_s = Factor de seguridad

E_n = Energía normal de atrache

Tabla 2.5: Factores de seguridad para uso en cálculo de Energía Anormal (Trelleborg, 2008).

Factores de seguridad según PIANC (FS)		
Tipo de buque	Tamaño	Fs
Tanker, Bulk, Cargo	Grandes	1.25
	Pequeños	1.75
Container	Grandes	1.5
	Pequeños	2.0
General Cargo		1.75
Ro Ro, Ferries		> 2.0
Ro Ro, Ferries		2.0

2.6.- Coeficientes para el cálculo de energía normal de atrache

2.6.1.- Coeficiente de masa añadida (c_m)

El coeficiente de masa añadida tiene en cuenta la masa de agua que transporta el buque al desplazarse hacia los lados a través del mar. Como el barco es detenido por la defensa, el impulso del agua desplazada continúa empujando contra el barco, y esto, como consecuencia, aumenta la fuerza total que debe soportar la defensa.

El método de *Vasco Costa* (Castro, D., 2010) ha sido adoptado por la mayoría de los códigos de diseño para atraques de barco en la costa, donde las profundidades del agua no son mayores que los calados de los buques.

El método *Stelson* (Castro, D., 2010) se utiliza generalmente para atraques de barco a barco en aguas profundas.

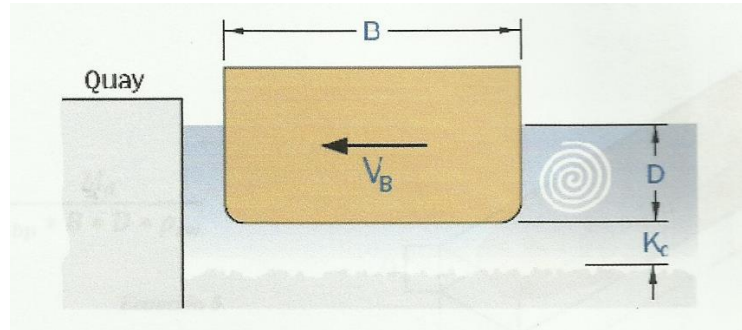


Figura 2.12: Esquema de uso de datos para cálculo de coeficiente de masa añadida (Trelleborg, 2008).

Tabla 2.6: Coeficientes de masa añadida para el cálculo de energía de atraque por PIANC (Castro, D., 2010).

PIANC (2002)		
Para	$Kc/D \leq 0.1$	$C_m = 1.8$
Para	$0.1 < Kc/D \leq 0.5$	$C_m = 1.875 - 0.75 [Kc/D]$
Para	$Kc/D > 0.5$	$C_m = 1.5$

Tabla 2.7: Coeficientes de masa añadida para el cálculo de energía de atraque por Shigera Ueda y Vasco Costa (Castro, D., 2010).

Shigera Ueda (1981)	Vasco Costa (1964) (*)
$C_m = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot B}$	$C_m = 1 + \frac{2D}{B}$

(*) Válido cuando $v \geq 0.08 \frac{m}{s}$ y $Kc \geq 0.1D$

Donde,

B = Manga [m]

Kc = Profundidad bajo la quilla [m]

D = Calado

2.6.2.- Coeficiente de excentricidad (c_e)

El coeficiente de excentricidad tiene en cuenta la energía disipada en la rotación del barco cuando el vector velocidad aplicado al centro de gravedad no pasa por el punto de contacto.

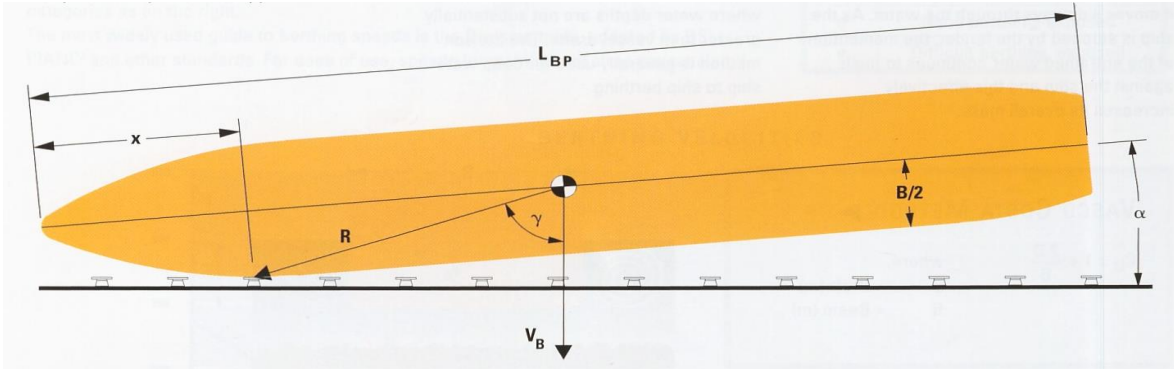


Figura 2.13: Esquema de uso de datos para cálculo de coeficiente de excentricidad (Trelleborg, 2008).

En la práctica, C_e suele variar entre 0.3 y 1.0 para los diferentes casos de atraque.

Los casos más comunes se presentan en la tabla que sigue.

Tabla 2.8: Coeficientes de excentricidad comunes para el cálculo de energía de atraque (Castro, D., 2010).

Casos más comunes		
Atraque a un cuarto de la eslora	$x = \frac{L_{bp}}{4}$	$C_e = 0.4 - 0.6$
Atraque a un tercio de la eslora	$x = \frac{L_{bp}}{3}$	$C_e = 0.6 - 0.8$
Atraque en el medio de la eslora	$x = \frac{L_{bp}}{2}$	$C_e = 1.0$

2.6.3.- Coeficiente de configuración del muelle (c_c)

Cuando los buques atracados forman ángulos pequeños contra una estructura sólida, el agua entre el casco y el muelle actúa como amortiguador y disipa una pequeña parte de la energía. Este coeficiente dependerá de varios factores.

Margen de holgura bajo la quilla.

La velocidad y ángulo de acercamiento.

Forma del casco del buque.

Tabla 2.9: Coeficientes de configuración para el cálculo de energía de atraque (Castro, D., 2010).

PIANC recomienda los siguientes valores	
$C_c = 1.0$	Estructuras abiertas
	Ángulos de ataque $> 5^\circ$
	Muy bajas velocidades de atraque
	Gran margen de holgura
$C_c = 0.9$	Estructuras cerradas
	Ángulos de ataque $< 5^\circ$

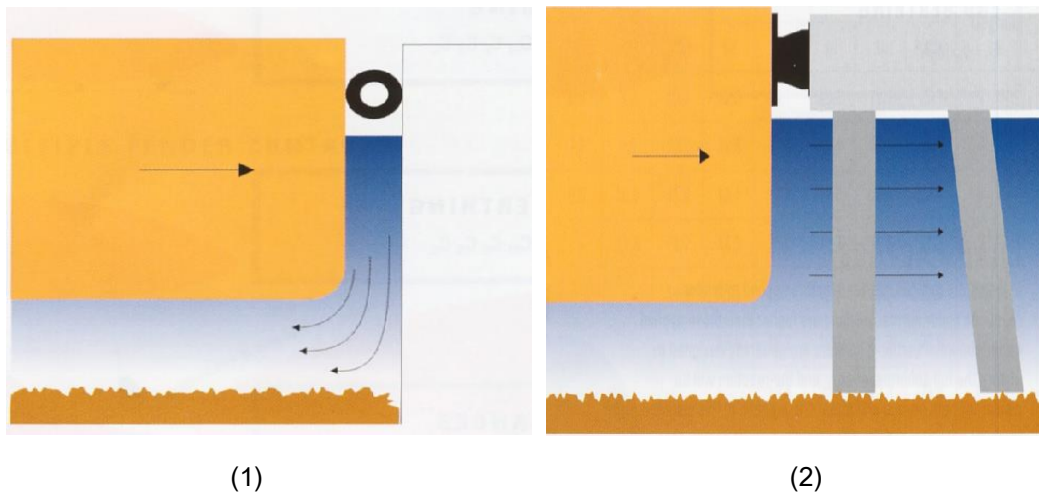


Figura 2.14: Ejemplos de estructura cerrada (1) y estructura abierta (2) para la asignación del coeficiente de configuración c_c (Trelleborg, 2008).

2.6.4.- Coeficiente de deformación (c_s)

Cuando las defensas son duras en comparación a la flexibilidad del casco del buque, parte de la energía es absorbida por la deformación elástica del casco. En la mayoría de los casos esta contribución es limitada y se ignora ($c_s = 1.0$).

2.7.- Diagrama de diseño convencional

A continuación, se detalla en un diagrama de flujo, la forma de diseño de defensas portuarias, según el manual de Trelleborg (2008).

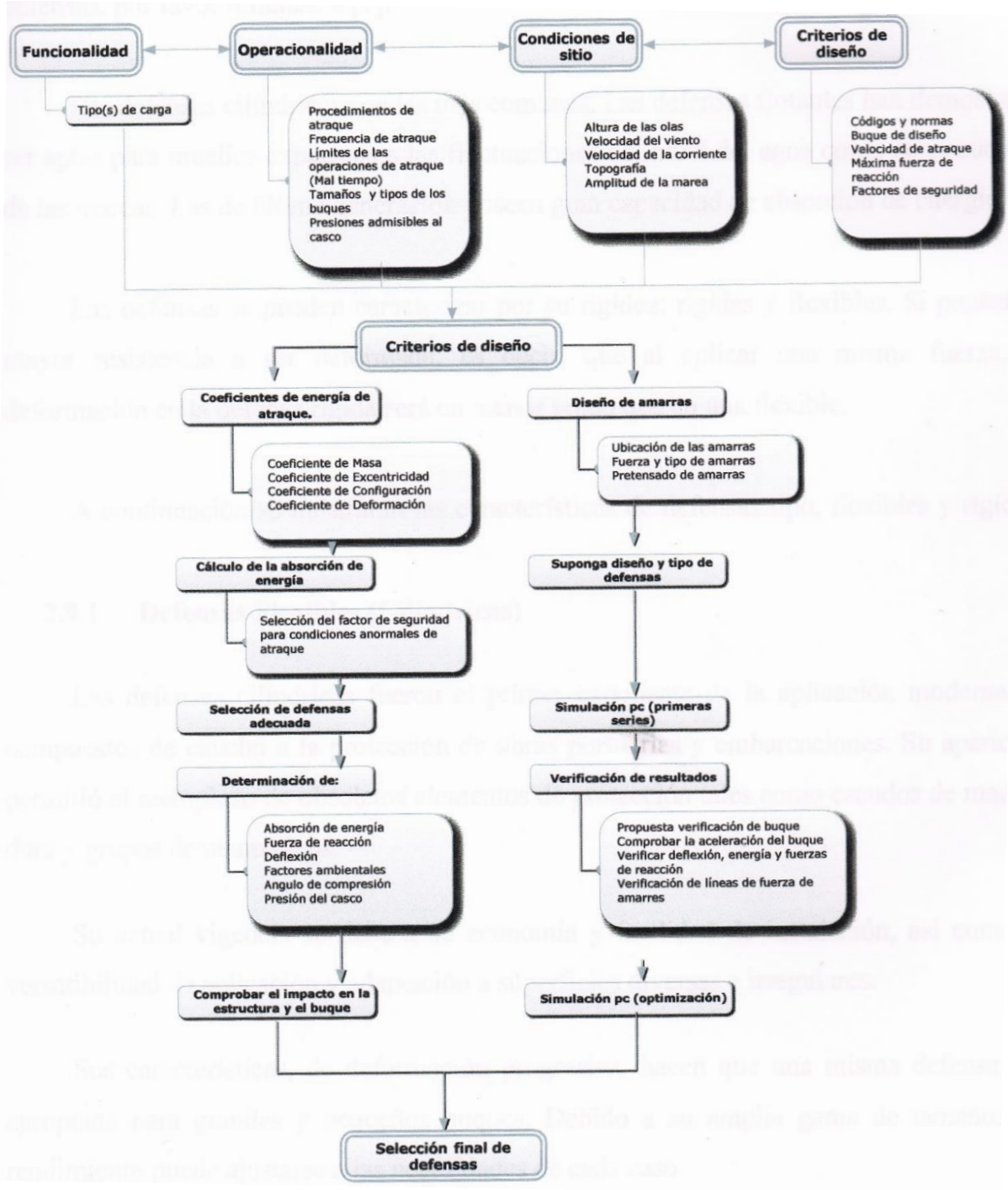


Figura 2.15: Diagrama de diseño convencional de defensas (Castro, D., 2010).

2.8.- Tipos de defensas

En el mercado internacional existen diversos tipos de defensas, las que se pueden ver en los catálogos de los fabricantes. Las defensas más comunes son las de tipo cilíndrica. Aunque las defensas flotantes, también han demostrado ser aptas para muelles expuestos a las fluctuaciones del nivel del mar a causa de las mareas. Las de este tipo, de última generación poseen gran capacidad de absorción de energía.

Las defensas se pueden caracterizar por su rigidez, la que se mide por su resistencia a la deformación. Lo que significa que al aplica una misma fuerza. La defensa flexible se deformará mucho más que una rígida.

A continuación, se muestran algunas características de las defensas flexibles y rígidas. La diferencia entre ambas, es que la primera puede alcanzar un rango de deformación plástica, criterio que no se comparte para la segunda, tratando de lograr deformaciones sólo en el rango elástico.

La sucesiva evolución de las defensas elásticas se ha guiado por la búsqueda de diseños de alta capacidad de absorción de energía, con una reacción transmitida a la estructura proporcionalmente menor.

2.8.1.- Materiales de las defensas en la actualidad

Los materiales para defensas en estos días son exclusivamente de elastómero u otros productos sintéticos. Se utilizan en muchos puertos para defenderse de los impactos de los buques. Además son resistentes al agua de mar, al petróleo, al envejecimiento y no se destruyen por eventuales sobrecargas.

Por esta razón, los tipos de defensas del pasado, por ejemplo, los neumáticos de vehículos o la madera, no pueden ser elegidos como defensas debido a que las propiedades de estos materiales impiden que se incluyan en el cálculo de absorción de energía.

Los compuestos elastoméricos, se utilizan ya sea sólo como material de defensas, contra la cual los barcos atracan directamente, o como amortiguadores diseñados convenientemente detrás de las defensas o paneles.

2.8.2.- Estructuras de atraque

Las obras de atraque y amarre se pueden clasificar desde diferentes formas como:

- Su configuración física: Muelles, pantalanes, duques de alba, etc.
- Su funcionalidad: Según el tipo de mercancía o pasajeros, que se manipula o embarca en ellos.
- Su tipología estructural.

2.8.3.- Clasificación general

El objetivo fundamental de una obra de atraque y amarre es proporcionar a los buques en condiciones adecuadas y seguras para su permanencia en puerto y/o para que puedan desarrollarse las operaciones portuarias necesarias para las actividades de carga, estiba, desestiba, descarga y transbordo de pasajeros, vehículos y mercancías que permitan su transferencia entre buques o entre éstos y tierra u otros medios de transporte. (ROM).

Las obras de atraque y amarre pueden clasificarse en:

- Muelles.
- Pantalanes.
- Duques de alba.
- Boyas, campos de boyas y mono boyas.
- Estaciones de transferencia a flote.

2.8.4.- Configuración física

La configuración física del atraque más conveniente depende principalmente del volumen y de los tipos de tráficos (mercancías o pasajeros) que deberán manipularse en el mismo, así como de los requerimientos operativos exigidos (ROM). Éstos son:

- Tamaño, composición y frecuencias de llegada de los buques.
- Necesidades de superficies, de equipos y de instalaciones de carga y descarga en la línea de atraque.
- Necesidad de áreas de almacenamiento más o menos próximas a la línea de atraque, además de la de equipos e instalaciones para transporte de la carga entre ésta y las explanadas.
- Necesidades de conexión con el transporte terrestre.

2.8.5.- Clasificación en función de la tipología estructural

La tipología estructural se diferencia principalmente por las características de cada una de las partes en las que se dividen las obras de atraque y amarre, y a su vez por la forma de resistir las acciones y de transmitir al terreno los esfuerzos producidos.

En función de la tipología estructural de cada una de las partes y elementos en los que pueden dividirse las obras de atraque y amarre, se clasifican en (ROM):

- Fijas cerradas
 - Obras de gravedad
 - De bloques
 - De hormigón sumergido
 - De cajones
 - Otros tipos de obras de gravedad
 - Obras de pantallas
 - De pantallas sin plataforma superior
 - De pantallas con plataforma superior
 - Obras de tablestacas
- Fijas abiertas
 - De pilotes
 - De pilas
 - Otras
- Flotantes
 - Boyas
 - Pontonas
 - Cajones
 - Estaciones de transferencia

2.9.- Sistemas de disipación

2.9.1.- Introducción

Así como los sistemas de defensas se encargan de disipar la energía de atraque de los barcos, en la actualidad, también existen otros métodos de disipación de energía usados en grandes estructuras como edificios, obras industriales, etc.

Estos elementos, se denominan sistemas de control de vibraciones, que al igual que las defensas, actúan disipando o deflectando la energía impuesta por acción de factores como los fuertes vientos, cargas por acción antrópica, pero principalmente las fuerzas sísmicas que afectan a una estructura durante un terremoto.

En la actualidad, existen muchos tipos de sistemas de control de vibraciones, pero en adelante sólo se hablará de los disipadores de energía, que son una subcategoría de los primeros. Esto por el hecho de su funcionalidad: disipar energía, que es lo que se busca en el proceso de atraque, fenómeno estudiado en esta tesis.

Dentro de los conocidos, se presenta una visión general de los disipadores viscosos, friccionales y metálicos. Esto con el objetivo de utilizar su teoría, y basarnos en su manera de construcción para ser usado como un tipo de defensa portuaria.

2.9.2.- Disipadores metálicos

Son elementos que al ser sometidos a desplazamientos relativos, tienen un gran rango de deformación en que permanecen en la zona plástica, disipando energía en este estado, antes de llegar al colapso.

En la figura 2.16 se muestra uno de los disipadores metálicos más usados en estructuras. Durante un sismo, estos dispositivos se plastifican y cambian las características dinámicas del edificio. Por tanto el periodo fundamental de la estructura será distinto en cada instante de tiempo, y por ello las fuerzas dinámicas no serán constantes. Estos elementos se comportan de igual manera a las rótulas plásticas en los diseños convencionales.



Figura 2.16: Ejemplo de disipador metálico ADAS (Falk, P., 2010).

2.9.3.- Disipadores viscosos.

Cuando se consideran las fuerzas de amortiguación en el análisis dinámico de estructuras, generalmente se presume que éstas son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas a la dirección del movimiento. Este tipo de disipación se conoce como amortiguación viscosa, que es el tipo de fuerza que se produce en un cuerpo restringido en su movimiento por un medio viscoso.

Un amortiguador viscoso fluido se asemeja al amortiguador común, tales como los que se encuentran en los automóviles. El pistón transmite la energía que entra en el sistema al fluido en el regulador, haciendo que se mueva dentro del amortiguador. El movimiento del fluido dentro del fluido amortiguador absorbe esta energía cinética mediante la conversión en calor (Paz, M.,1992).

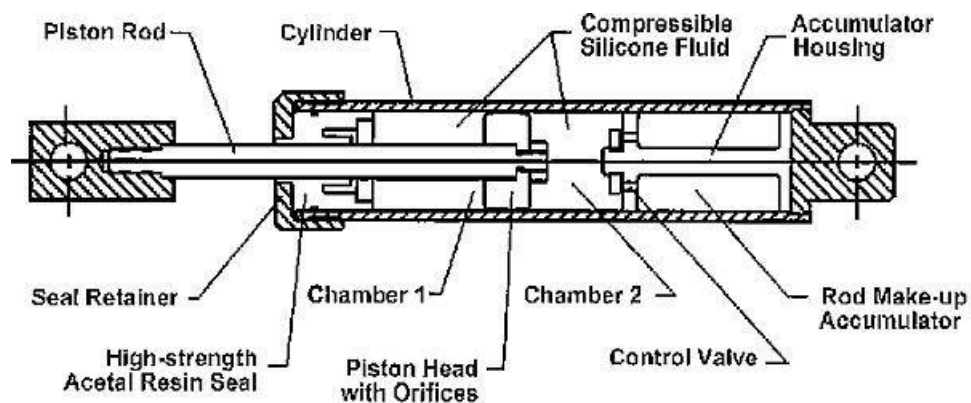


Figura 2.17: Ejemplo de disipador viscoso (Kamrava, A., 2014).

2.9.4.- Disipadores friccionales.

Los dispositivos denominados amortiguadores de fricción se componen de dos o más partes que deslizan en forma relativa estando sometidos a fuerzas normales en las áreas de contacto. La existencia de deslizamiento y fuerza de roce se traduce en energía disipada.

Algunos dispositivos poseen placas de acero que están separadas por dos cuñas de material de almohadilla de fricción, produciendo roce entre placas de acero dentro del dispositivo generándose la disipación en forma de calor.

Cuando una fuerza externa excita una estructura de bastidor, la viga se comienza a desplazar horizontalmente debido a esta fuerza. El amortiguador seguirá el movimiento, al igual

que la placa central, debido a las fuerzas de tracción en los elementos de refuerzo. Cuando las fuerzas aplicadas se invierten, las placas se giran en sentido contrario. La energía se disipa por medio de la fricción y restauración de la fuerza entre las superficies de deslizamiento.

El dispositivo en cuestión, no depende de la velocidad del movimiento, sólo del sentido de esta y de la fuerza actuante sobre éste. El coeficiente de fricción μ entre superficies de acero en contacto se encuentra entre 0.3 y 0.5 (Grigorian, C. E., Popov, E. E. 1993).

En 1931, Den Hartog presentó la solución exacta a las vibraciones en estado estacionario de un sistema amortiguado por fricción. La solución exacta analizada por Hartog es de forma sinusoidal, donde una fuerza $F e^{i\omega t}$ se aplica a una masa soportada por un resorte elástico con una rigidez k , con una componente de fricción que proporciona una fuerza de resistencia P que se opone al movimiento. El parámetro de entrada del modelo, es la aceleración.

La fuerza de fricción se supone constante sobre cada medio ciclo, pero opuesta a la del movimiento en cada medio ciclo. Esto debido a que el sentido de la fuerza de roce es contrario al movimiento relativo entre las partes, esto es, contrario al signo de la velocidad de movimiento relativo. La respuesta se da con la misma frecuencia que la fuerza externa de manera simétrica.

La ecuación que rige el movimiento es la que sigue.

$$M\ddot{x} + Kx + P = F \cos(\omega t + \phi) \quad (2.2)$$

Donde el valor de P toma el signo negativo en caso de ser la velocidad un vector negativo, y viceversa.

El ángulo de fase ϕ , representa el retraso de tiempo entre el peak de la excitación externa y el peak del desplazamiento.

El origen de la escala de tiempo es tomado cuando se alcanza el máximo del movimiento en la dirección positiva. Durante la primera mitad del ciclo, $0 < \omega t < \pi$, la velocidad es negativa, así como el valor de P , esto significa que la ecuación 2.2 se convierte en:

$$M\ddot{x} + Kx - P = F \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

Ahora, haciendo un cambio de variables, donde $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$, $a = \frac{F}{k}$ y $x_t = \frac{P}{k}$, la ecuación queda como sigue.

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 x_t + a \omega_0^2 \cos(\omega t + \phi) \quad (2.4)$$

La solución general para la ecuación (2.4) es

$$x = C_1 \sin \omega_0 t + C_2 \cos \omega_0 t + aV \cos(\omega t + \phi) + x_t \quad (2.5)$$

Donde,

$$V = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (2.6)$$

Las condiciones iniciales al comenzar el ciclo son $t = 0$, $x = x_0$ y $\dot{x} = 0$, donde x_0 es la incógnita del máximo desplazamiento. Resolviendo C_1 y C_2 con las condiciones iniciales, y reemplazando (2.6), da que la ecuación (2.5) se transforma en,

$$x = x_0 \cos \omega_0 t + x_t (1 - \cos \omega_0 t) + aV [\cos \phi (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) + \sin \phi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \sin \omega t\right)] \quad (2.7)$$

Y al final del medio ciclo las condiciones se revierten quedando

$$t = \frac{\pi}{\omega}, \quad x = -x_0, \quad \dot{x} = 0$$

Luego, así se dan dos ecuaciones de la forma

$$A \cos \phi + B \sin \phi + C = 0 \quad (2.8)$$

$$X \cos \phi + Y \sin \phi + Z = 0 \quad (2.9)$$

Donde

$$A = -aV(1 + \cos \frac{\omega_0 t}{\omega}) \quad (2.10)$$

$$B = aV \left(\frac{\omega}{\omega_0} \sin \frac{\omega_0 \pi}{\omega}\right) \quad (2.11)$$

$$C = x_0(1 + \cos \frac{\omega_0 \pi}{\omega}) + x_t(1 - \cos \frac{\omega_0 \pi}{\omega}) \quad (2.12)$$

$$X = aV \omega_0 \sin \frac{\omega_0 \pi}{\omega} \quad (2.13)$$

$$Y = aV \omega (1 + \cos \frac{\omega_0 \pi}{\omega}) \quad (2.14)$$

$$Z = (x_t - x_0) \omega_0 \sin \frac{\omega_0 \pi}{\omega} \quad (2.15)$$

Sin embargo, resolviendo (2.8) y (2.9) en función de (2.10) a (2.15), para $\sin \phi$ y $\cos \phi$, se tiene.

$$\cos \phi = \frac{BZ - CY}{AY - BX} = \frac{x_0}{a} \frac{1}{V} \quad (2.16)$$

$$\sin \phi = \frac{CX - AZ}{AY - BX} = -\frac{x_t}{a} \frac{U}{V} \quad (2.17)$$

Donde

$$U = \frac{\frac{\omega_0}{\omega} \sin \frac{\omega_0 \pi}{\omega}}{1 + \cos \frac{\omega_0 \pi}{\omega}} \quad (2.18)$$

Recordando que $\cos^2 \phi + \sin^2 \phi = 1$, se tiene

$$\left(\frac{x_0}{a}\right)^2 = V^2 - \left(\frac{x_t}{a}\right)^2 U^2 \quad (2.19)$$

Para verificar los límites de esta solución, se puede sustituir de nuevo en la solución general y verificar que $x_0 < 0$ para $0 < t < \pi/\omega$. La magnitud de x_0 , cuando $P = 0$, se da por V . Para cualquier valor de P , el aumento es menor que éste. Sin embargo, un resultado inesperado es que si la razón, P / F es menor que $\pi/4$, la amplitud en resonancia es infinitamente grande. Sin embargo, según lo señalado por Den Hartog (Mechanical Vibrations. Dover, 1985), cuando el sistema entra en resonancia, el mecanismo de conducción de energía a la masa es proporcional a la amplitud del ciclo. En resumen, el amortiguador está disipando energía a una velocidad proporcional a la amplitud de la excitación. Si el factor de fricción, P / F , es de menos que $\pi/4$, la disipación es siempre menor que la energía de entrada, y por lo tanto siempre habrá energía no disipada. Por otro lado, existe histéresis, la energía disipada es proporcional al desplazamiento, por consiguiente, a cualquier nivel de amortiguación, la energía de entrada y la energía disipada serán iguales, por lo que prevalecerá el estado de equilibrio.

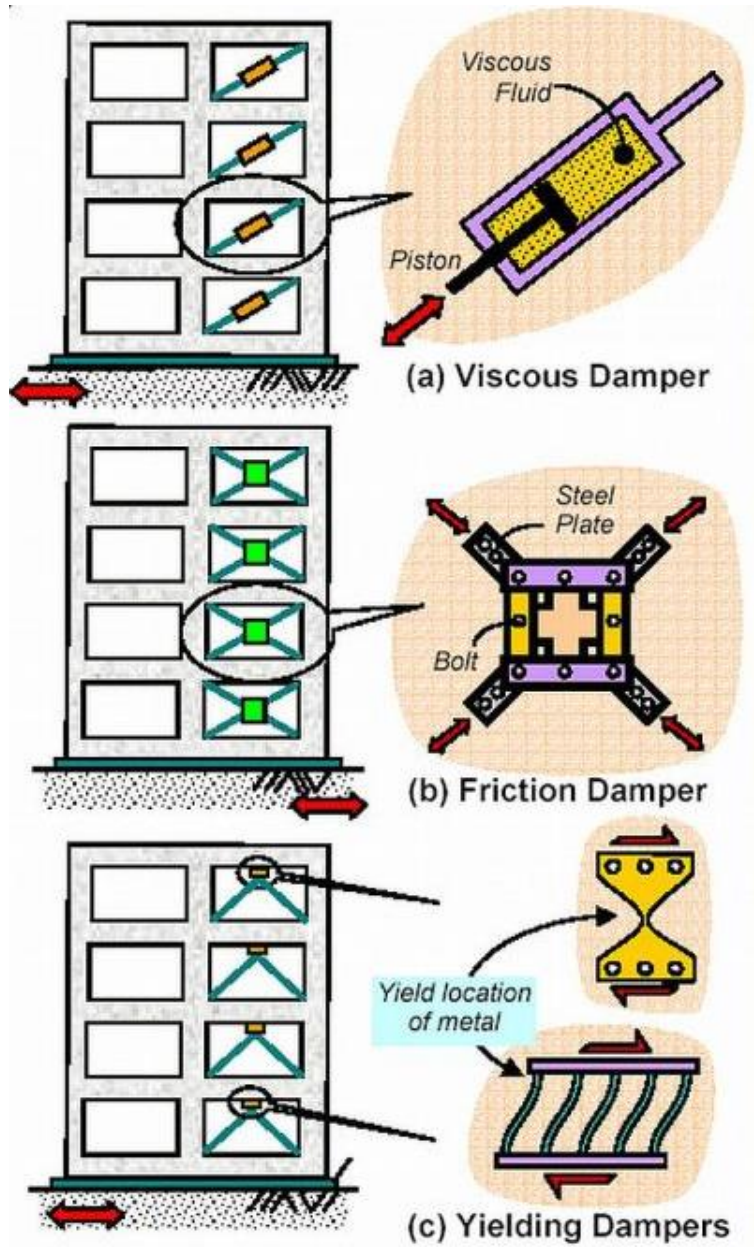


Figura 2.18: Esquema general de disipadores (Falk, 2010).

3.- METODOLOGÍA

3.1.- Breve descripción del estudio

Para empleo y elección de un dispositivo de disipación, se debió considerar diversos factores como lo son las velocidades de ataque, los desplazamientos esperados y los tiempos en los cuales estaría sometida la defensa. Las características detectadas para el problema sobre estos parámetros son:

- Velocidades muy bajas de ataque.
- Grandes desplazamientos de la defensa.
- Tiempos prolongados de deformación.

Con estas características, el objetivo es seleccionar una defensa que reúna todo lo requerido para una defensa: baja reacción en el casco del buque, resistencia en el tiempo y gran disipación de energía con bajas velocidades de ataque. Es por esto que luego de estudiar los disipadores nombrados en el apartado anterior, se eligió el disipador friccional como la base de este estudio.

A esta defensa, se le estudia por sí sola y en la condición de muelle, con el propósito de determinar los parámetros óptimos de diseño para una cierta carga, rigidez, coeficiente de roce, además de una de sus propiedades geométricas. Para la condición de muelle, se estudió la condición de ataque, donde primeramente, se toca una sola defensa (solicitud máxima), y luego se van activando las demás en el transcurso del tiempo.

Los resultados esperados, y el análisis a realizar tienen como fin comparar defensa actual en el puerto con la nueva defensa seleccionada y diseñada.

3.2.- Ecuaciones constitutivas de la defensa en estudio

La defensa elegida para el análisis es un dispositivo de disipación friccional con capacidad autocentrante. Este dispositivo se muestra en un isométrico a continuación.

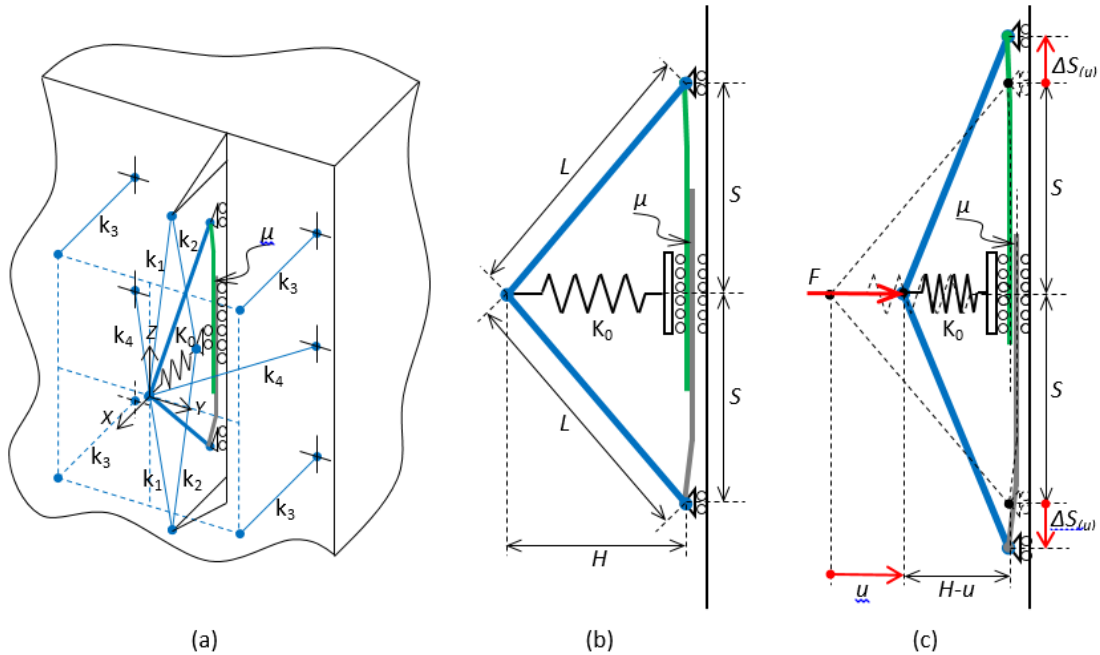


Figura 3.1: Dispositivo autocentrante con disipación de energía, propuesto como defensa portuaria. (a) Vista general en isométrico, $K_0 \gg k_i$, $i=1, 2, 3, 4$. (b) Vista lateral del dispositivo no deformado, en plano vertical. (c) Vista lateral del dispositivo deformado por carga de ataque (Maureira, N., 2016).

Para la cinemática, y para todo lo que conlleva entender el problema de cómo funcionará el disipador friccional, la figura 3.2 muestra un diagrama de cuerpo libre de la defensa.

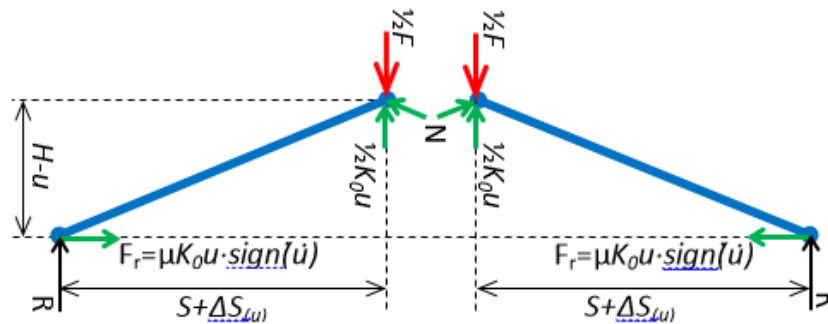


Figura 3.2: Diagrama de cuerpo libre de dispositivo autocentrante con disipación de energía (Maureira, N., 2016).

De la figura 3.2, se pueden plantear las siguientes relaciones cinemáticas.

$$(H - u)^2 + (S + \Delta S(u))^2 = L^2 \quad (3.1)$$

$$\Delta S(u) = \sqrt{L^2 - (H - u)^2} - S \quad (3.2)$$

Donde,

K : Altura no deformada de la defensa

u : Desplazamiento relativo de la defensa

S : Longitud del punto medio de la defensa al punto de apoyo móvil en posición no deformada

$\Delta S(u)$: Desplazamiento del apoyo móvil en posición deformada

L : Longitud de la barra

Sin embargo, al ser la fuerza aplicada en el centro, se divide de igual manera en ambas barras, lo que implica que se aplica la misma ley constitutiva, lo que se resume en sólo analizar el equilibrio de una de las dos barras. Así, aplicando la condición de equilibrio, se tiene que,

$$\sum F_h = 0 \Rightarrow \frac{1}{2}F - \frac{1}{2}K_0u - N\left(\frac{H-u}{L}\right) - R = 0 \quad (3.3)$$

$$\sum F_v = 0 \Rightarrow N\left(\frac{S+\Delta S(u)}{L}\right) - \mu K_0u \cdot \text{sign}(\dot{u}) = 0 \quad (3.4)$$

$$\sum M(O) = 0 \Rightarrow \mu K_0u \cdot \text{sign}(\dot{u}) \cdot (H - u) - R \cdot (S + \Delta S(u)) = 0 \quad (3.5)$$

De estas ecuaciones, se pueden despejar la fuerza normal, la reacción que sostiene a la barra en su base y el valor de la fuerza externa aplicada.

De esta manera, estas expresiones quedan en función de valores conocidos, como lo son la geometría de la defensa, el aplastamiento medido, el coeficiente de roce y el valor de la rigidez del resorte. Así, estas fuerzas quedan como sigue.

$$N = \left(\frac{L\mu K_0u}{S+\Delta S(u)}\right) \text{sign}(\dot{u}) = \left(\frac{L\mu K_0u}{\sqrt{L^2 - (H-u)^2}}\right) \text{sign}(\dot{u}) \quad (3.6)$$

$$R = \left(\frac{\mu K_0u(H-u)}{S+\Delta S(u)}\right) \text{sign}(\dot{u}) = \left(\frac{\mu K_0u(H-u)}{\sqrt{L^2 - (H-u)^2}}\right) \text{sign}(\dot{u}) \quad (3.7)$$

$$F = K_0u + 2N\left(\frac{H-u}{L}\right) + 2R \quad (3.8)$$

En la figura 3.1(a), los resortes de rigidez k_1 permiten restituir en su posición en el eje vertical al origen del sistema de referencia (punto de aplicación de la carga), resistiendo además el peso propio de la defensa. De manera análoga, los resortes de rigidez k_4 , permiten mantener la posición en horizontal en dirección del eje "X" del mismo punto, es así como los resortes de rigidez k_2 , permiten mantener y restituir la posición en la vertical al patín en el extremo del resorte de rigidez K_0 . Finalmente, los resortes de rigidez k_3 , permiten mantener y restituir la posición vertical en el plano YZ de la placa de carga que interactúa con el barco, facilitando el acomodo de la superficie del casco al momento del ataque.

Considerando la relación fuerza versus desplazamiento definida anteriormente, el ciclo histerético del dispositivo de defensa portuaria sería el que sigue.

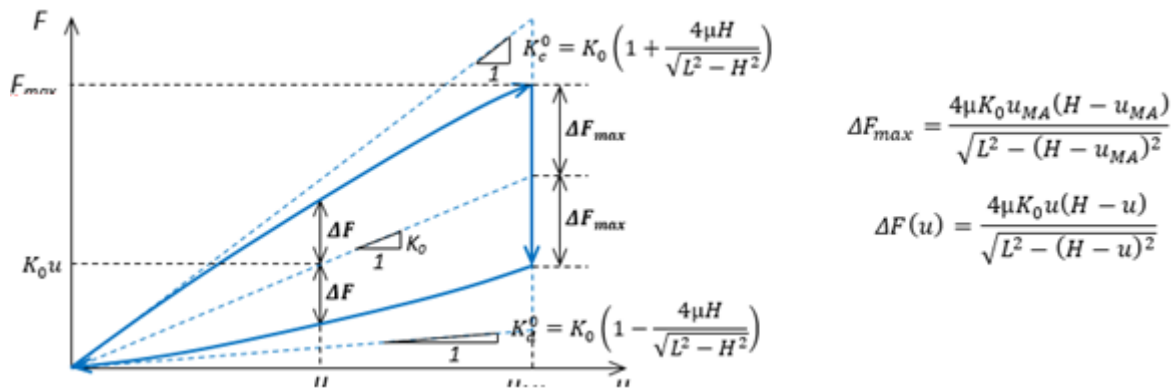


Figura 3.3: Relación F vs u o ciclo histerético de la defensa portuaria trabajando para carga de compresión (Maureira, N., 2016).

Las pendientes K_c^0 y K_d^0 corresponden a las rigideces tangentes en el origen, de la curva de carga y descarga respectivamente. La pendiente de la curva de carga decrece con el aumento del desplazamiento u y, por el contrario, la pendiente de la curva de descarga crece con el aumento de u . Para que el dispositivo sea autocentrante, es necesario que $K_d^0 > 0$.

Por otra parte, para que la energía disipada sea mayor, se requiere que $\Delta F(u)$ sea mayor, pero siempre cumpliendo con la condición anterior, $K_d^0 > 0$, de lo contrario el problema no tendría sentido físico.

3.3.- Metodología de selección/diseño de la defensa propuesta

Considerando todo lo anterior, el diseño óptimo del dispositivo de disipación, debe considerar una adecuada elección de los parámetros: L, H, μ , K_0 y u_{MA} , cumpliendo con la condición de detención del buque de masa M que impacta contra la defensa con velocidad v_0 , ocurra en una distancia menor o igual al desplazamiento máximo admisible de la defensa, u_{MA} .

Para un diseño óptimo de la defensa, desde el punto de vista de la capacidad de fuerza en carga y de la energía disipada en un ciclo, se debe cumplir que la rigidez K_c^0 sea máxima y la rigidez K_d^0 tienda a cero. Esto satisface la condición de máxima disipación de energía, condición que ocurre cuando se satisface la restricción siguiente:

$$1 - \frac{4\mu H}{\sqrt{L^2 - H^2}} \geq 0, \quad \rightarrow \quad \sqrt{L^2 - H^2} \geq 4\mu H, \quad \rightarrow \quad H \leq \frac{L}{\sqrt{1 + 16\mu^2}} = \alpha L, \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + 16\mu^2}}$$

Considerando lo anterior, los parámetros geométricos H y L quedan vinculados por medio del coeficiente de roce μ , de modo que se reduce en 1 el número de variables. Así, el dispositivo cuya disipación de energía está optimizada, se caracteriza por una única variable geométrica, L, más el coeficiente de roce, μ , y la rigidez del resorte, K_0 .

En cuanto a la rigidez del resorte, K_0 , esta debe cumplir con restricciones necesarias para lograr compatibilidad con la condición anterior que relaciona L y H mediante μ . Esto tiene que ver con la relación entre la fuerza disipativa desviadora máxima, ΔF_{max} , y la fuerza elástica máxima aportada por el resorte, $K_0 u_{max}$, ya que la primera debe ser siempre menor que la segunda. Lo cual se puede apreciar en la figura anterior. Esto último impone la siguiente restricción:

$$\Delta F_{max} = \frac{4\mu K_0 u_{max}(H - u_{max})}{\sqrt{L^2 - (H - u_{max})^2}} < K_0 u_{max} \quad \rightarrow \quad \frac{4\mu(H - u_{max})}{\sqrt{L^2 - (H - u_{max})^2}} < 1 \quad \rightarrow \quad (1 + 16\mu^2)(H - u_{max})^2 < L^2$$

Considerando la condición de optimización de la energía disipada, $H \approx \alpha L$, y dado que el desplazamiento no puede superar la altura H de la defensa, $u_{max} = \beta H \approx \alpha \beta L$, con $\beta < 1$ (se usará $\beta=0.80$), se tiene que:

$$(1 + 16\mu^2)(\alpha L - \alpha \beta L)^2 < L^2 \quad \rightarrow \quad (1 + 16\mu^2)(1 - \beta)^2 \alpha^2 < 1 \quad \rightarrow \quad \frac{(1 + 16\mu^2)(1 - \beta)^2}{1 + 16\mu^2} < 1 \quad \rightarrow \quad (1 - \beta)^2 < 1$$

Lo anterior se cumple para cualquier valor de $\beta < 1$.

En resumen, el dispositivo de defensa portuaria más eficiente desde el punto de vista de la disipación de energía se define por los parámetros H, μ y K_0 , siendo $L = H/\alpha$, con $1/\alpha = \sqrt{1 + 16\mu^2}$. El parámetro μ se dejará como fijo e igual al coeficiente de roce entre dos superficies

de acero no pulidas, asumiendo un valor $\mu=0,4$. Con lo anterior, el dispositivo queda definido sólo por dos parámetros que deben ser determinados de forma adecuada al uso o demanda, estos son H y K_0 . Ambos parámetros están relacionados con la resistencia y capacidad de disipación del dispositivo. Sin embargo, sólo H se relaciona con la capacidad de deformación del mismo. Por lo anterior, se propone una estrategia de diseño en la cual H sea determinado de modo que el desplazamiento máximo de diseño, u_{MD} , no supere al desplazamiento máximo admisible, $u_{MA} = \beta H$, esto es:

$$H \geq \frac{1}{\beta} u_{MD} \quad (3.9)$$

Una vez definida la altura H del dispositivo de acuerdo a la demanda de desplazamiento obtenida del análisis, la rigidez K_0 del resorte resulta ser el único parámetro que define la capacidad resistente de la defensa. Por lo anterior, dicha rigidez debe ser determinada, para que la demanda de fuerza o fuerza máxima de diseño, F_{MD} , no supere a la fuerza máxima admisible en carga del dispositivo, F_{MA} , calculada para un desplazamiento $u = u_{MA} = \beta H$. Lo anterior se traduce en la siguiente restricción de diseño:

$$F_{MA} = K_0 u_{MA} \left(1 + \frac{4\mu(H - u_{MA})}{\sqrt{L^2 - (H - u_{MA})^2}} \right) = K_0 \beta H \left(\frac{\sqrt{L^2 - H^2(1 - \beta)^2} + 4\mu H^2(1 - \beta)^2}{\sqrt{L^2 - H^2(1 - \beta)^2}} \right) \geq F_{MD}$$

Luego, la rigidez del resorte debe cumplir con:

$$K_0 \geq \frac{\sqrt{L^2 - H^2(1 - \beta)^2}}{\beta H (\sqrt{L^2 - H^2(1 - \beta)^2} + 4\mu H^2(1 - \beta)^2)} F_{MD} \quad (3.10)$$

Así, conocido el valor de μ y β , las dos ecuaciones anteriores permiten diseñar la defensa portuaria para que satisfaga las demandas de desplazamiento y carga.

3.4.- Formulación del equilibrio dinámico en proceso de atraque

El dispositivo friccional, al igual que todos los elementos, se rige por la ecuación dinámica, donde:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u + L^T \cdot F_d(u, \dot{u}) = R_r \cdot F_r(t) \quad (3.11)$$

Donde,

\ddot{u} : Vector de aceleraciones

\dot{u} : Vector de velocidades

u : Vector de desplazamientos

M : Matriz de masa

C : Matriz de amortiguamientos

K : Matriz de rigideces

L : Matriz cinemática que permite vincular los g.d.l. con masa de muelle, duques de alba y buque, con los g.d.l. no lineales de las defensas.

F_d : Vector de fuerzas disipativas.

R_r : Vector de posicionamiento de las fuerzas de empuje de los dos remolques sobre los grados de libertad del C.M del buque y de los puntos de apoyo de las defensas, presentes en el muelle y duques de alba.

$F_r(t)$: Vector de fuerzas externas de remolques.

En la figura 3.4, se planteará la manera de abordar el problema. El buque será modelado como un prisma rectangular de dimensiones mostradas en el siguiente apartado. Estas dimensiones son las particulares del puerto en estudio, y en general, los barcos al ser modelados se hacen de la manera en que se presenta en esta tesis, siendo sólo relevante la distancia entre paralelas.

Por otra parte, a partir de la cinemática presente en la figura, se irá entendiendo poco a poco la formulación de las matrices, condiciones iniciales y parámetros de entrada que requiere el problema para conocer su solución.

Dentro de los parámetros de variabilidad en el atraque del buque, se definirán dos grados de libertad maestros. Estos grados serán el desplazamiento horizontal y el giro del centro de masa de la embarcación, medidos en cada instante, desde que el buque empieza el proceso de acercamiento. El eje de referencia para el problema se basa en la línea de atraque del muelle.

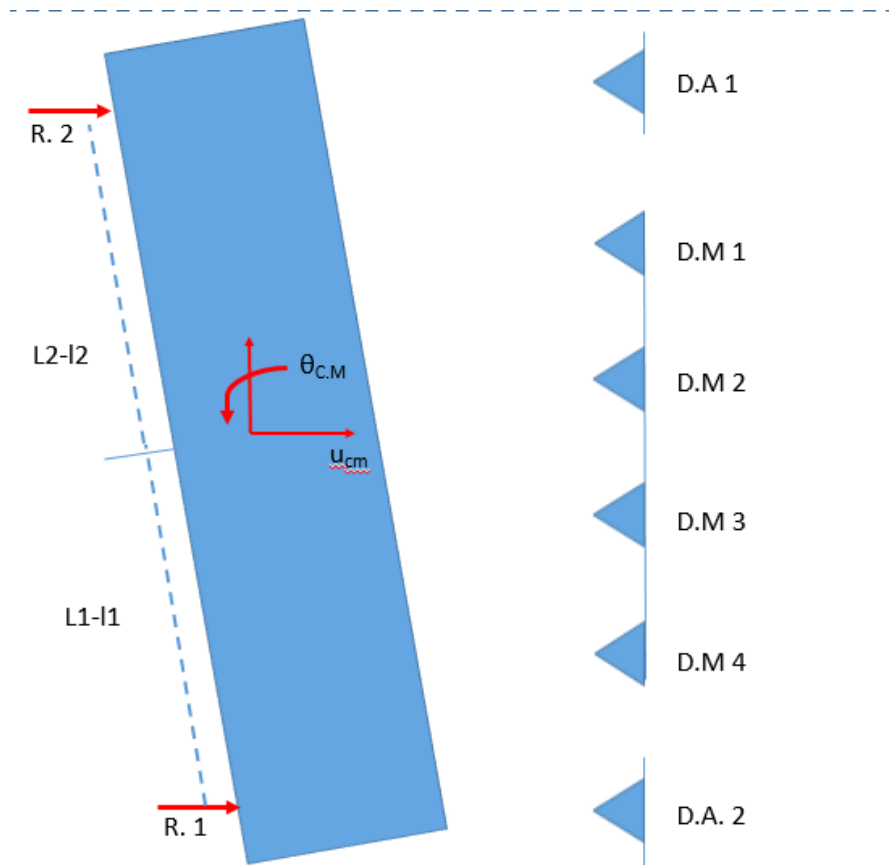


Figura 3.4: Representación física del fenómeno de atraque (Arroyo, C., 2016).

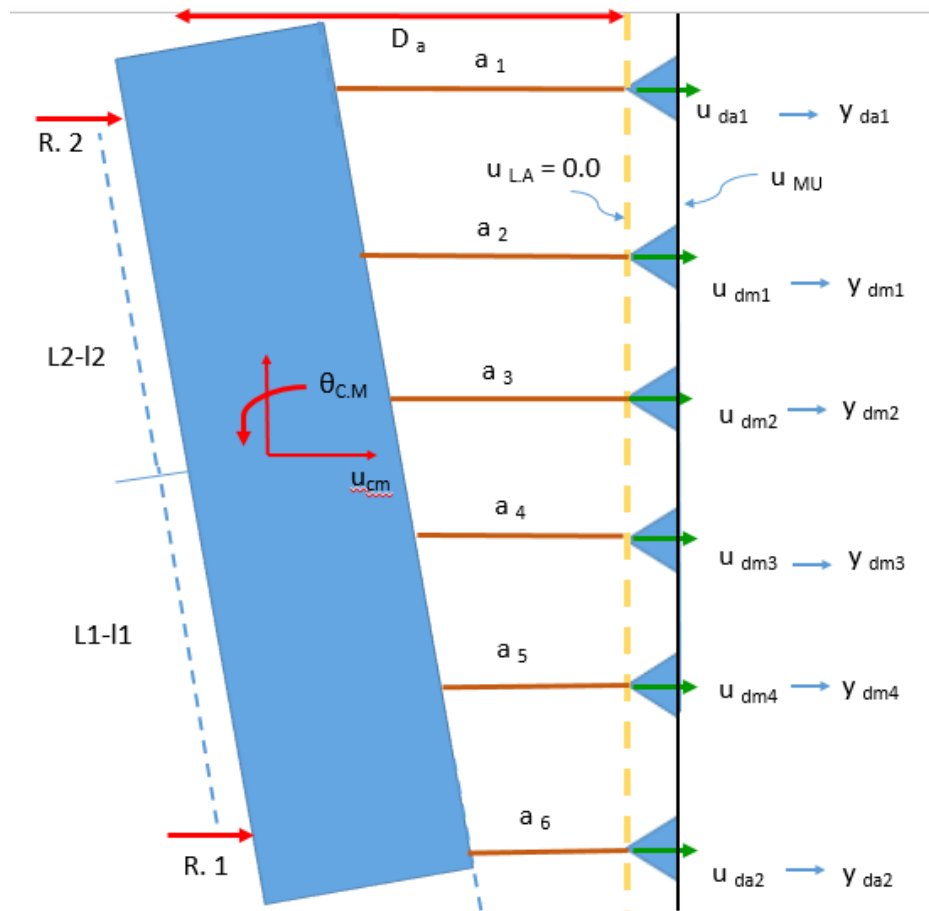


Figura 3.5: Definición de cinemática del problema (Arroyo, C., 2016).

Como se muestra en las figuras 3.4 y 3.5, ésta es la condición y configuración de las estructuras de atraque del puerto en estudio, donde se presentan cuatro defensas de muelle y dos duques de alba, que cumplen la función de ayudar a restringir el giro de la embarcación durante el proceso de atraque.

Los datos conocidos del problema se muestran en la tabla que sigue.

Tabla 3.1: Datos del problema de atraque buque - muelle Punta Caullahuapi (Elaboración propia).

Buque	
M_b	Masa del buque
L, B, D	Longitudes del prisma rectangular, forma de modelamiento del buque.
H_s, D_a	Profundidad sumergida y Distancia de la línea de atraque al C.M del buque, respectivamente.
d_a, d_1	Distancia desde la cual los remolques pasan de fuerza cero a máxima, y distancia en que los remolques reducen su carga de máxima a cero, respectivamente. Estos son valores dados.
Muelle y duques	
y_{md}	Vector con coordenadas “y”, relativas al C.M del buque, de los puntos de apoyo de las defensas. Se asume que C.M del buque no se desplaza en dirección del eje y.
K_{md}	Matriz de rigidez del muelle y duques de alba, referida a g.d.l. u_{md} .
Defensas	
L, S, H	Parámetros geométricos (longitudes).
K_0, μ_e	Rigidez del roce y coeficiente de roce cinemático.
Cargas	
l_1, l_2	Distancia de los puntos de remolque a los bordes del barco.
R_1, R_2	Magnitud máxima de las cargas aplicadas por los remolques. Estas cargas se incrementan de cero a máxima, y se reducen de máxima a cero en una distancia D_a , conforme a la posición del C.M del buque, y de los puntos A y B respecto a la línea de atraque. Si A y B se acercan más que d_1 a la línea de atraque, entonces los remolques comienzan a detenerse.
Ejes de referencia y condiciones iniciales	
X	Pasará por el C.M del buque y coincidirá con la mitad del ancho del muelle
Y	Pasará por la línea de atraque, y se ubicará a una distancia D_a del C.M del buque.
u_{cm}^0, θ_{cm}^0	Desplazamiento y giro inicial del C.M del buque, respecto de los ejes X, Y con $u_{cm}^0 > 0$ hacia la derecha $\theta_{cm}^0 > 0$ anti-horario.

Para el presente estudio, se analizó el caso más crítico, que es el mostrado en la figura 3.4, donde el buque choca en posición no paralela al muelle. Además, se da la condición de que el buque choca en una defensa aplastándola por completo antes de interactuar con las demás, lo que permite analizar la capacidad individual de sólo uno de los dispositivos como procedimiento de diseño.

De aquí, y usando los parámetros descritos en la tabla 3.1, pudieron ser obtenidas las matrices que forman parte de la ecuación dinámica, a partir de la aplicación del álgebra y conceptos de la cinemática.

El problema final a analizar tiene ocho grados de libertad maestros, correspondientes a aquellos desplazamientos y giros con fuerzas inerciales asociadas. Dos de estos grados de libertad son del C.M del buque, dos más de los duques de alba y cuatro de los puntos de apoyo de las defensas en el muelle. Los grados de libertad relativos entre los extremos apoyado y libre de las defensas, u_d (6x1), están cinemáticamente vinculados con los anteriores. Esta cinemática es no-lineal y cambia según el estado (posición – velocidad) de los grados de libertad maestros.

Sea δ_a un vector un vector de 6x1 que contiene las distancias entre los puntos a_1, a_2, \dots, a_6 que representan la posición de las defensas, proyectadas al barco hasta la línea de ataque, definida cuando las defensas no están comprimidas. Mientras $\delta_a(i) + u_{md}(i) > 0$; $i=1, \dots, 6$; la i -ésima defensa no estará trabajando, y por tanto $u_d(i) = u_{md}(i)$. Esto implica que el desplazamiento relativo de dicha defensa es nulo. Cuando alguno de los puntos a_i sobrepasa la línea de ataque, ocurre que $\delta_a(i) < 0$. Si $\delta_a(i) + u_{md}(i) < 0$, entonces la i -ésima defensa se comprimirá en una cantidad $u_{md}(i) - u_d(i) = \delta_a(i) + u_{md}(i)$.

Con todo lo anterior, se tiene que.

$$u_d(i) = u_{md}(i) \quad \text{si } \delta_a(i) + u_{md}(i) > 0$$

$$u_d(i) = \delta_a(i) \quad \text{si } \delta_a(i) + u_{md}(i) < 0$$

De aquí, se define

$$\delta_a(u) = (D_a - u_{md}) \cdot \text{ones}(6,1) - \tan(\theta_{cm}) \cdot Y_{md} = (D_a - L_{md} * u) \cdot \text{ones}(6,1) - \tan(L_\theta * u) \cdot Y_{md} \quad (3.12)$$

$$u_{md} = L_{md} \cdot u \quad (3.13)$$

$$\theta_{cm} = L_\theta \cdot u \quad (3.14)$$

$$L_{md} = \begin{bmatrix} L_{cm}^T \\ I_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

$$L_{cm} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ Y_{d1} & Y_{d2} & Y_{d3} & Y_{d4} & Y_{da1} & Y_{da2} \end{bmatrix}$$

$$L_u = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$L_\theta = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$u = \begin{bmatrix} u_{cm} \\ \theta_{cm} \\ u_{md} \end{bmatrix}$$

Luego,

$$u_d(u) = \frac{1}{2}(L_{md} \cdot u) \cdot (1 + \text{sign}(\delta_a(u) + L_{md} \cdot u)) + \frac{1}{2}\delta_a(u)(1 - \text{sign}(\delta_a(u) + L_{md} \cdot u)) \quad (3.15)$$

$$\dot{u}_d = \frac{1}{2}(L_{md} \cdot \dot{u}) \cdot (1 + \text{sign}(\delta_a(u) + L_{md} \cdot u)) + \frac{1}{2}\dot{\delta}_a(u) \cdot (1 - \text{sign}(\delta_a(u) + L_{md} \cdot u)) - L_{md} \cdot \dot{u} \quad (3.16)$$

Además,

$$\dot{\delta}_a(u) = -u_{cm} \cdot \text{ones}(6,1) - \left((1 + \tan^2(\theta_{cm})) \cdot \dot{\theta}_{cm} \right) \cdot Y_{md} - L_u \cdot \dot{u} - \left((1 + \tan^2(L_\theta \cdot u)) \cdot (L_\theta \cdot \dot{u}) \right) \cdot Y_{md} \quad (3.17)$$

Todas las ecuaciones planteadas anteriormente, rigen para un caso sin desplazamiento de la línea de muelle, esto es, estructura de muelle infinitamente rígida. Sin embargo, esto no ocurre en la realidad, es por esto que al tener las propiedades del muelle en estudio, se pueden generar las ecuaciones que representan el comportamiento de éste durante el proceso de atraque, en específico, cuánto se deformaría al recibir el atraque de un barco. Esta deformación, puede ser descrita en función de los desplazamientos de las defensas, referidos al centro de masa del buque, esto a través de una cinemática lineal.

$$u_d = u_{mu} - u_{md} = L_{mu} \cdot u - u_{md}(u) \quad (3.18)$$

$$L_{mu} = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 2} \\ I_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

Siendo u_{mu} y u_{md} , lineal y no lineal respectivamente. Lo formulado se muestra en forma esquemática en figura 3.6. De esta manera, según sea el caso, se calculan las fuerzas disipativas de las defensas.

$$F_d = (K_0 \cdot u_d) \cdot \left(1 + \left(4\mu_e \cdot (H - u_d) \frac{\text{sign}(\dot{u}_d)}{\sqrt{(L^2 - (H - u_d)^2)}} \right) \right) \quad (3.19)$$

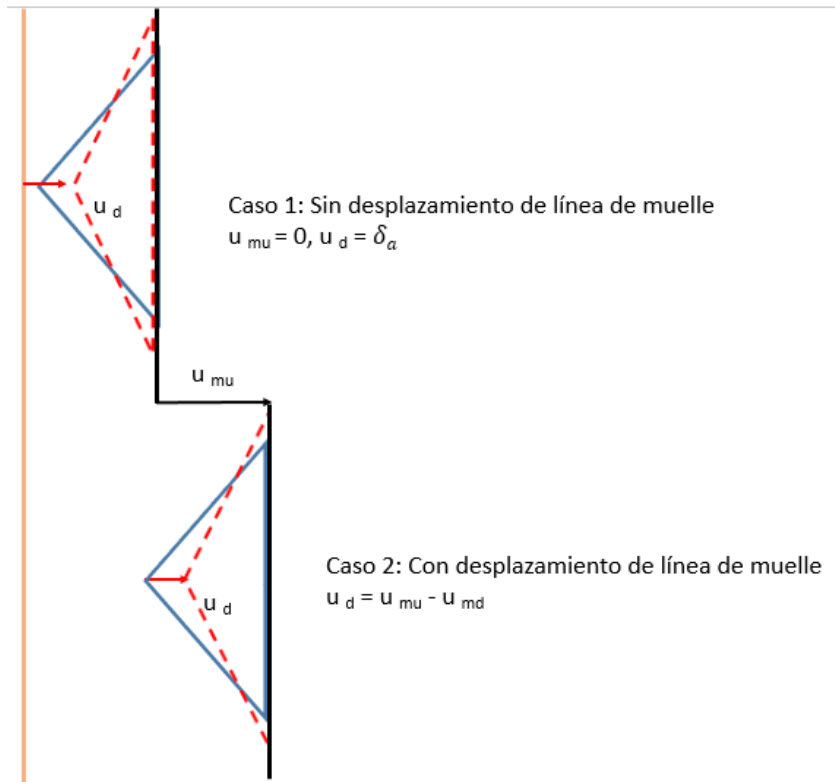


Figura 3.6: Casos para definición de u_d (Arroyo, C., 2016).

Para seguir con el análisis, para el caso de la matriz de masas, al tener ocho grados de libertad que contienen componente de masa, ésta será separada en dos partes. La matriz de masas del barco (M_b) y la matriz de masas de los puntos de apoyo del muelle y duques de alba (M_{md}), las que constituirán una matriz de ocho filas y ocho columnas, la cual se compondrá como sigue.

$$M = \begin{bmatrix} M_b & 0 \\ 0 & M_{md} \end{bmatrix}$$

Donde M_b y M_{md} son las matrices de masas del barco, y del muelle y duques concentradas en los puntos de apoyo de las defensas, respectivamente. Éstas se componen como sigue.

$$M_b = \begin{bmatrix} M_{bar} & 0 \\ 0 & I_{bar} \end{bmatrix}$$

$$M_{md} = \begin{bmatrix} M_{da1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{d2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{d3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{d4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{da2} \end{bmatrix}$$

Para continuar con el procedimiento, se define la matriz de amortiguamientos, dada por el amortiguamiento que ejerce el agua sobre la embarcación al momento del atraque (C_b), y a su vez el amortiguamiento ejercido por el muelle y duques (C_{md}). Esta última matriz de amortiguamiento fue obtenida a partir de un análisis de las frecuencias naturales y los modos de vibrar de la estructura portuaria, considerando una razón de amortiguamiento crítico constante para cada modo. La matriz de amortiguamientos queda definida como sigue.

$$C = \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ 0 & C_{md} \end{bmatrix}$$

Para la definición de C_b , se asume que la fuerza de arrastre es proporcional a la velocidad relativa. Para definir la matriz de amortiguamiento C_b , se requiere considerar dos casos: Reacción del agua contra el buque cuando este se desplaza sin velocidad angular y cuando no se desplaza girando con velocidad angular respecto de su centro de masa. Con esto, se puede definir el amortiguamiento dividido en tres casos: 1) velocidad lineal pura, 2) momento ejercido por la velocidad lineal pura, 3) momento dado velocidad angular pura. Así, Para la figura 3.7 se tiene el caso 1 y 2.

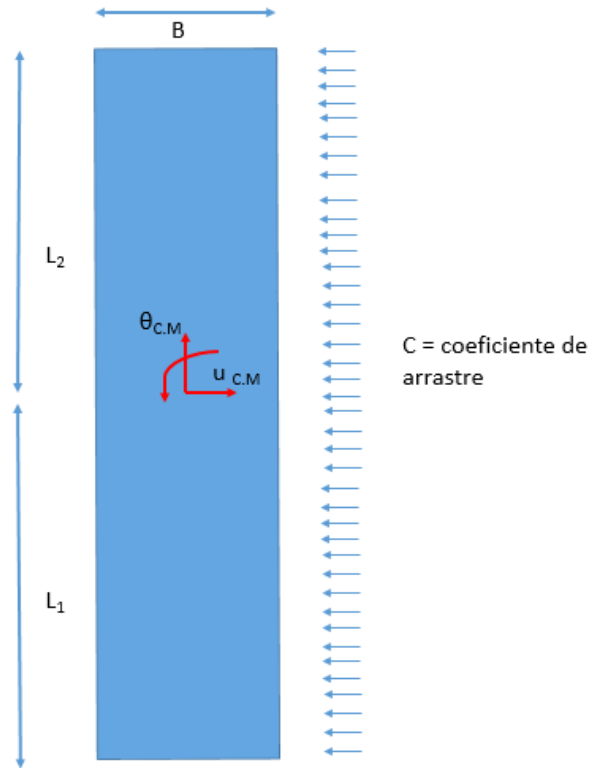


Figura 3.7: Perfil de velocidades con atraque con $\theta = 0$ (Arroyo, C., 2016).

$$F_{uu} = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{u} \cdot dy = c \cdot \dot{u} \cdot (L_1 + L_2) = c \cdot \dot{u} \cdot L \quad (3.20)$$

Y,

$$F_{\theta u} = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{u} \cdot y \cdot dy = \frac{c \cdot \dot{u}}{2} \cdot (L_2^2 - L_1^2) \quad (3.21)$$

En figura 3.8, se muestra esquemáticamente como definir el amortiguamiento entre buque y agua, específicamente el caso 2 y 3.

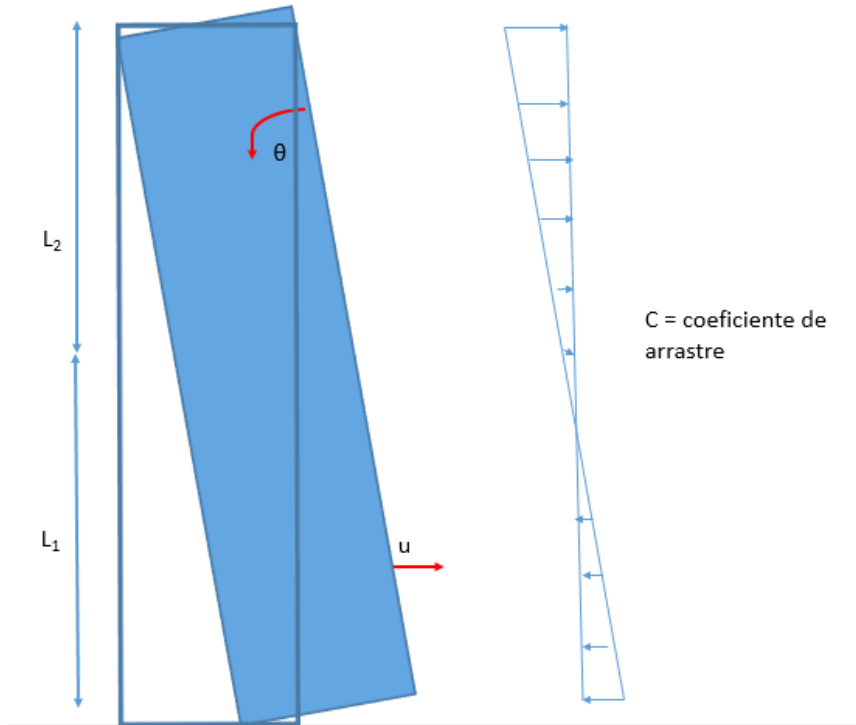


Figura 3.8: Perfil de velocidades con ataque con $\theta > 0$ (Arroyo, C., 2016).

Para este caso, se define una distribución lineal del perfil de velocidades en función de cada punto de ataque, donde,

$$\dot{u}(y) = \dot{\theta} \cdot y \quad (3.22)$$

Así,

$$F_{\theta\theta} = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{u}(y) \cdot dy = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{\theta} \cdot y \cdot dy = \frac{c \cdot \dot{\theta}}{2} \cdot (L_2^2 - L_1^2) \quad (3.23)$$

Y,

$$F_{u\theta} = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{u}(y) \cdot y \cdot dy = \int_{-L_1}^{+L_2} c \cdot \dot{\theta} \cdot y \cdot y \cdot dy = \frac{c \cdot \dot{\theta}}{3} \cdot (L_2^3 + L_1^3) \quad (3.24)$$

Luego, la matriz de amortiguamiento del agua sobre la embarcación (C_b), queda definida como sigue,

$$C_b = \begin{bmatrix} \hat{c} \cdot L & 0.5 \cdot \hat{c} \cdot (L_2^2 - L_1^2) \\ 0.5 \cdot \hat{c} \cdot (L_2^2 - L_1^2) & 0.33 \cdot \hat{c} \cdot (L_2^3 + L_1^3) \end{bmatrix} = \hat{c} \begin{bmatrix} L & 0.5 \cdot (L_2^2 - L_1^2) \\ 0.5 \cdot (L_2^2 - L_1^2) & 0.33 \cdot (L_2^3 + L_1^3) \end{bmatrix}$$

Donde \hat{c} es una constante de la fuerza de arrastre ejercida por el mar sobre una franja del buque de ancho unitario en toda la distancia sumergida, asumida constante, cuando la velocidad relativa es unitaria. En este caso el valor de la constante es de 128 (Pérez, A., Barboza, R., Ramos, J., 2013).

La representación del caso anterior, se observa en la figura 3.9.

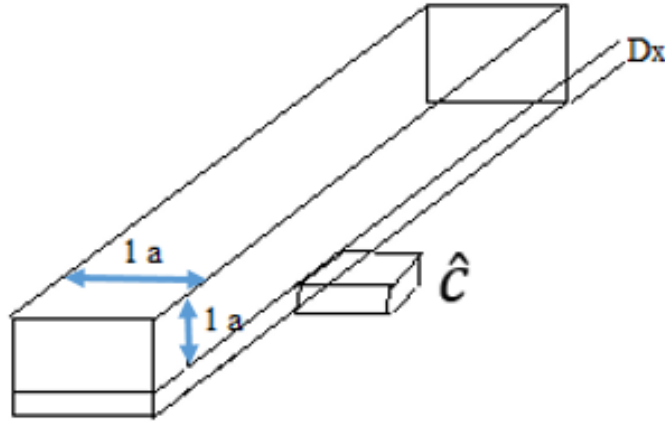


Figura 3.9: Representación física de la constante de arrastre en franja unitaria, \hat{c} (Arroyo, C., 2016).

Adicionalmente, se debe definir C_{md} , que pasaría a tener dimensiones de 6x6, pues se deben obtener los coeficientes para cada una de las defensas. El procedimiento para obtener esto, se basa en la resolución del problema de valores y vectores propios, realizado por el programa MATLAB, del cual se obtendrán los modos de vibrar y las frecuencias asociadas a cada uno de los modos, asumiendo de antemano, un amortiguamiento ξ_{md} de un 5%, usado comúnmente en las estructuras.

Así, la matriz C_{md} , queda definida igualmente como en cualquier estructura como

$$C_{md} = 2 \cdot \xi_{md} \cdot \omega_{md} \quad (3.25)$$

Donde:

$\underline{\omega}^2$: Vector de frecuencias naturales asociadas a cada uno de los modos de vibrar del muelle.

Sin embargo, tal como enseña la dinámica de estructuras y con el fin de normalizar el vector, y despejar C_{md} se hace la siguiente pre y post multiplicación de la anterior expresión por los modos de vibrar, como se muestra a continuación.

$$C_{md} = (\Phi_{md}^T)^{-1} \cdot (2 \cdot \xi_{md} \cdot \omega_{md} \cdot \Phi_{md}^{-1}) \quad (3.26)$$

Como última de las matrices a definir, está la matriz de rigidez del sistema, que con la salvedad de los procesos anteriores, ésta es de 6x6, y se define como sigue.

$$K_{md} = \begin{bmatrix} K_{da1} & 0 & 0 \\ 0 & K_m & 0 \\ 0 & 0 & K_{da2} \end{bmatrix}$$

Donde K_m es la matriz de rigidez asociada al muelle, K_{da1} y K_{da2} es la rigidez lateral asociada a los duques de alba. Estas rigideces son adquiridas del modelo numérico realizado en el programa RAM ADVANSE, y se obtienen cargando cada defensa con una carga unitaria y midiendo sus desplazamientos. Sin embargo cabe notar que existen componentes ceros en K_{md} , cuestión que ocurre porque las defensas de los duques de alba no están estructuralmente vinculados entre sí.

La matriz de posicionamiento del input R_r , permite proyectar el par de fuerzas $F_r(t)$, sobre los grados de libertad u . Como R_r sólo tiene influencia sobre el buque, sólo las dos primeras filas de R_r no son nulas, es decir que se define como un vector de 8x2, con las dos primeras filas y columnas con valores, y lo demás sólo ceros.

$$R_r = \begin{bmatrix} 1 & -(L_1 - l_1) \\ 1 & (L_2 - l_2) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Y además,

$$F_r(u) = \begin{bmatrix} R_1(u) \\ R_2(u) \end{bmatrix}$$

Dentro del procedimiento, se calculan además, las fuerzas de los remolques para cada instante de tiempo. En este procedimiento se presentan dos casos: cuando un remolque se acerca a más de una determinada distancia de la línea de atraque, este deja de empujar, cuando está más lejos que esa distancia se vuelve a activar. De esta manera, cuando el buque rebota contra el muelle, los remolques se reactivan para volver a acercarse al buque al muelle.

La proyección de las fuerzas de reacción de las defensas, F_d , sobre los grados de libertad del sistema, F_u , se define por medio de la siguiente relación cinemática.

$$F_u = L_{md}^T \cdot F_d \tag{3.27}$$

Para resolver el problema de atraque, se debe buscar la solución de la Ec. (3.11), considerando las condiciones de borde: $u(0) = u_0 = [u_{cm}^0 \ \theta_{cm}^0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ y $\dot{u}(0) = \dot{u}_0 = [\dot{u}_{cm}^0 \ \dot{\theta}_{cm}^0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

Con todo esto listo, se puede resolver el problema. Sin embargo, MATLAB no posee integradores para resolver una EDO de segundo grado, por lo que se hace necesario hacer un cambio de variables como se presenta a continuación.

$$\dot{z} = A \cdot z + B \cdot f(t) + C_{NL}(z) \quad (3.28)$$

Donde,

$$z = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M \setminus K & -M \setminus C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M \setminus R_r(t) \end{bmatrix}$$

$$C_{NL} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M \setminus L^T F_a(z) \end{bmatrix}$$

3.5.- Parámetros de diseño del muelle en estudio.

Existen muchos barcos en la actualidad para el mercado marítimo portuario. Las necesidades del rubro hacen que día a día la tecnología se haga cada vez más obsoleta, y obliga a los ingenieros a crear nuevos tipos de barcos, y todo lo que ello conlleva. Sin embargo, en este trabajo se consideró como buque de diseño al post-panamax. El motivo de uso de este buque para la modelación, es que para el puerto en estudio, la mayoría de los barcos que atracan son de este tipo.

El modelo específico considerado en el análisis fue el new panamax y sus propiedades se muestran a continuación.

Tabla 3.2: Propiedades de barco New Panamax. (Fender Team 2014).

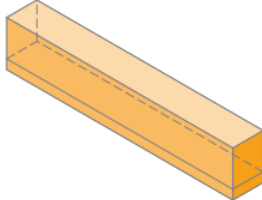


Diagrama de un barco New Panamax, mostrando su estructura rectangular y sus dimensiones principales.

L_{OA}	≤ 366 m
B	≤ 49 m
D_L	≤ 15.2 m
D_A	≤ 57.91 m

Además, ya conocidos los datos del puerto en estudio, se pueden formular las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema.

Sobre los duques de alba, éstos son iguales, y constan de catorce pilotes de 24" y 30" para rectos e inclinados respectivamente. Además, para aumentar la rigidez de estas estructuras, estos pilotes tienen la particularidad de ser rellenos en hormigón. La losa es de hormigón armado, para lo cual se consideró un peso específico de 2500 kg/m^3 . Las dimensiones son de 5.60 x 11.00 metros y un espesor de 1.5 metros. Con todos estos datos, se tiene que la masa de cada uno de los duques de alba es de 528.468 kg.

En el muelle, las losetas tienen dimensiones de 2.50 x 8.00 metros, con espesor de 15 cm, y se ubican dos corridas de diez losetas cada una. Para calcular la masa de las vigas longitudinales, se determinó su área transversal y se multiplicó por el peso específico del acero en este caso es de 7800 kg/m^3 . Para las vigas travesaño, se hizo lo mismo, pero adicionalmente se agregó el peso de hormigón simple de relleno.

Para efectos de cálculo de la matriz de masas concentradas en el cabezo del muelle, estas se determinaron considerando áreas tributarias separadas por la línea media entre posiciones de apoyo de las defensas. Estas masas se asumieron concentradas en la posición del apoyo de cada una de estas defensas en el cabezo.

Así, la matriz de masas de muelle y duques de alba queda definida por

$$M_{md} = \begin{bmatrix} 528.468 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 264.234 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 528.468 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 528.468 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 264.234 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 528.468 \end{bmatrix} (kg)$$

Sobre el barco, la masa y la inercia de éste serán determinadas por los datos que entrega la tabla 3.2. De aquí, se tiene que la matriz de masas general del sistema, está dada por.

$$M = \begin{bmatrix} 2.79 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25 \cdot 10^8 m^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.28 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.64 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.28 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.64 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.64 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.28 \end{bmatrix} \cdot 10^5 (kg)$$

Para determinar la matriz de rigidez asociada al sistema, se utilizó el método de la fuerza unitaria. Esto consiste en aplicar una fuerza de una tonelada en cada una de las defensas, y a su vez, para las demás defensas no cargadas, se restringe el movimiento con un apoyo fijo y se determina la fuerza en el sentido de la fuerza aplicada.

Este procedimiento se hace para las defensas de los muelles y duques de alba. Así la matriz de rigidez del sistema compuesto por buque, muelle y duques de alba resulta ser

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.4643 & -0.9519 & 0.0387 & 0.0725 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.9519 & 2.803 & -1.0161 & 0.0387 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0387 & -1.0161 & 2.803 & -0.9519 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0725 & 0.0387 & -0.9519 & 1.4643 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.22 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^8 (N/m)$$

Para la matriz de amortiguamiento del muelle, se calcularon los modos de vibrar y sus frecuencias naturales asociadas.

Para el caso del amortiguamiento ejercido por el agua sobre el buque y sus fuerzas inerciales, el procedimiento es el descrito en el apartado anterior.

Así, la matriz de amortiguamiento general del sistema, está dada por.

$$C = \begin{bmatrix} 7.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.95 \cdot 10^4 m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.62 & -1.28 & -0.06 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.28 & 6.93 & -1.42 & -0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.06 & -1.42 & 6.93 & -1.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.08 & -0.06 & -1.28 & 3.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.83 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \frac{kg}{s}$$

4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1.- Análisis Paramétrico de una Defensa Individual

Se realizó un análisis paramétrico de una defensa individual para determinar cómo se modifica su respuesta en términos de fuerza reactiva y energía disipada, cuando se varían sus parámetros de diseño.

Se estudió la respuesta de la defensa con un valor de rigidez constante del resorte del K_0 . Este valor de rigidez desvía un 50% del promedio de la rigidez para defensas de puertos graneleros de envergadura media. Además, se adoptan diversos valores de H, con el fin de determinar las compresiones o acortamientos máximos, junto con la fuerza reactiva máxima ejercida por la defensa y la energía disipada en un ciclo de carga. El valor del parámetro H (longitud en dirección de la carga) permite variar el valor del parámetro L (Largo de las barras).

A continuación, se presentan los resultados del análisis paramétrico para H = 1, 2, 3 y 4 metros, con K = 1.0, 2.0 y 3.0 MN/m. Estos resultados se muestran en las figuras a continuación.

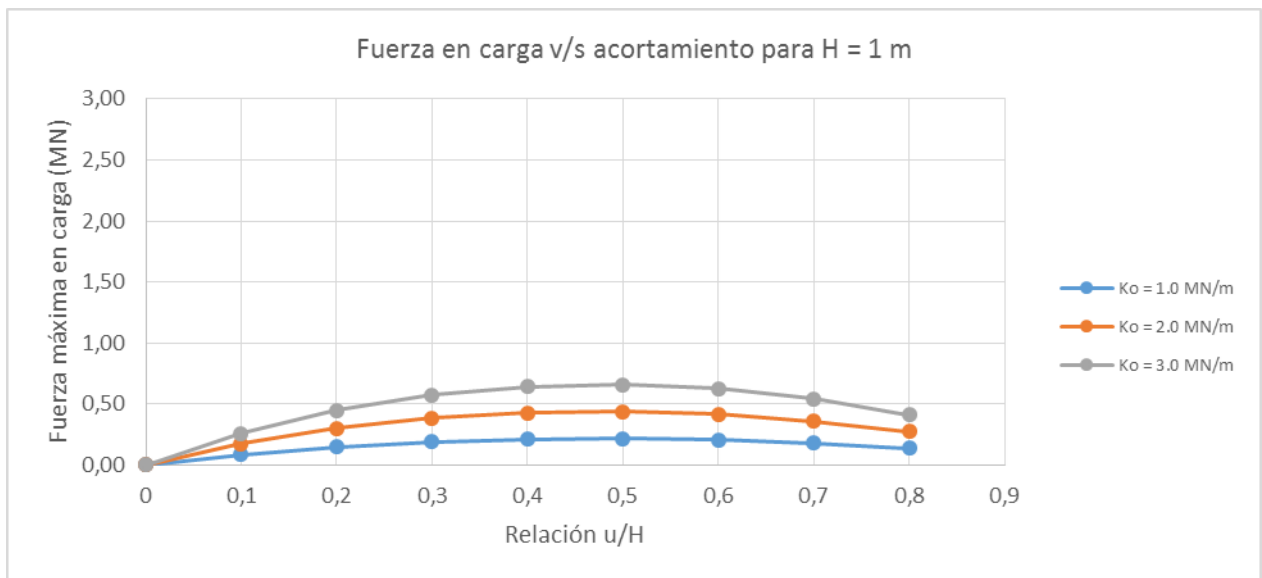


Figura 4.1: Fuerza máxima versus relación u/H para H = 1.0 m (Arroyo, C., 2016).

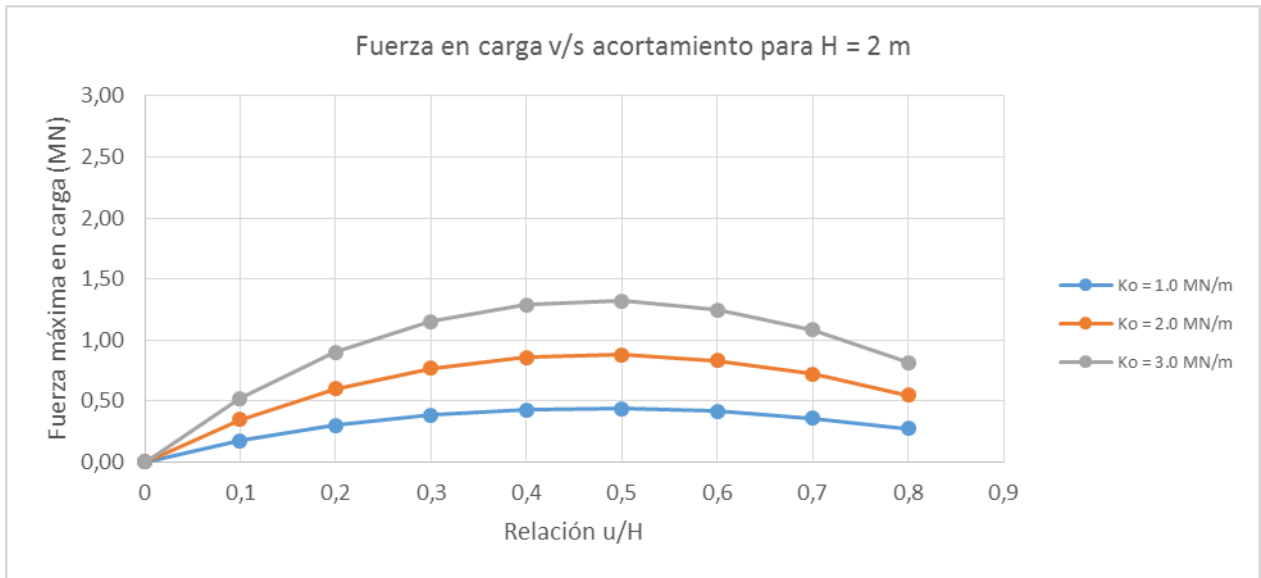


Figura 4.2: Fuerza máxima versus relación u/H para H = 2.0 m (Arroyo, C., 2016).

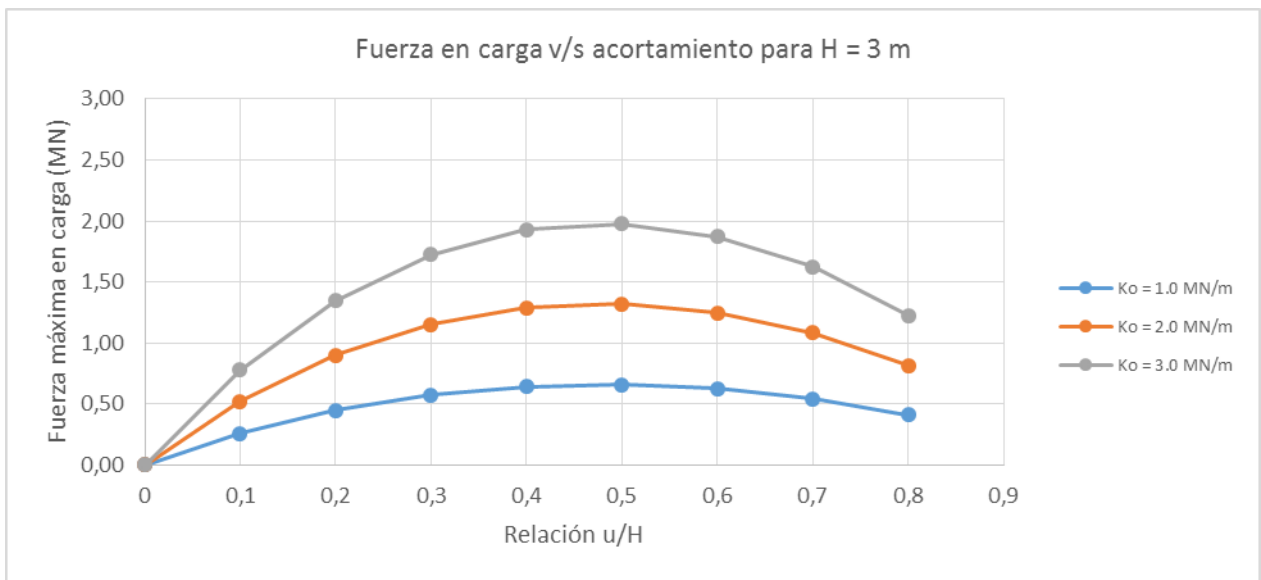


Figura 4.3: Fuerza máxima versus relación u/H para H = 3.0 m (Arroyo, C., 2016).

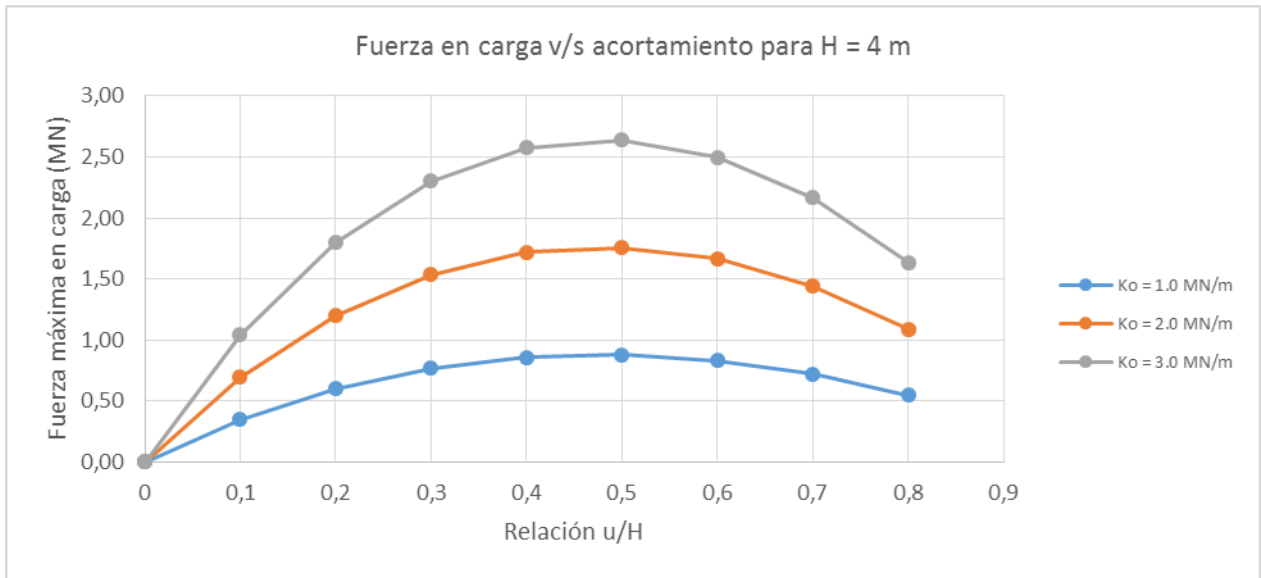


Figura 4.4: Fuerza máxima versus relación u/H para H = 4.0 m (Arroyo, C., 2016).

De estos gráficos, se puede obtener el área bajo la curva de carga, lo que representa parte de la energía disipada por la defensa para cada condición de H y rigidez dada. El punto de máxima fuerza y máximo desplazamiento, representa el óptimo del funcionamiento como disipador. A continuación, se presentan los gráficos de energía máxima disipada para distintas alturas de defensas, dada una rigidez constante.

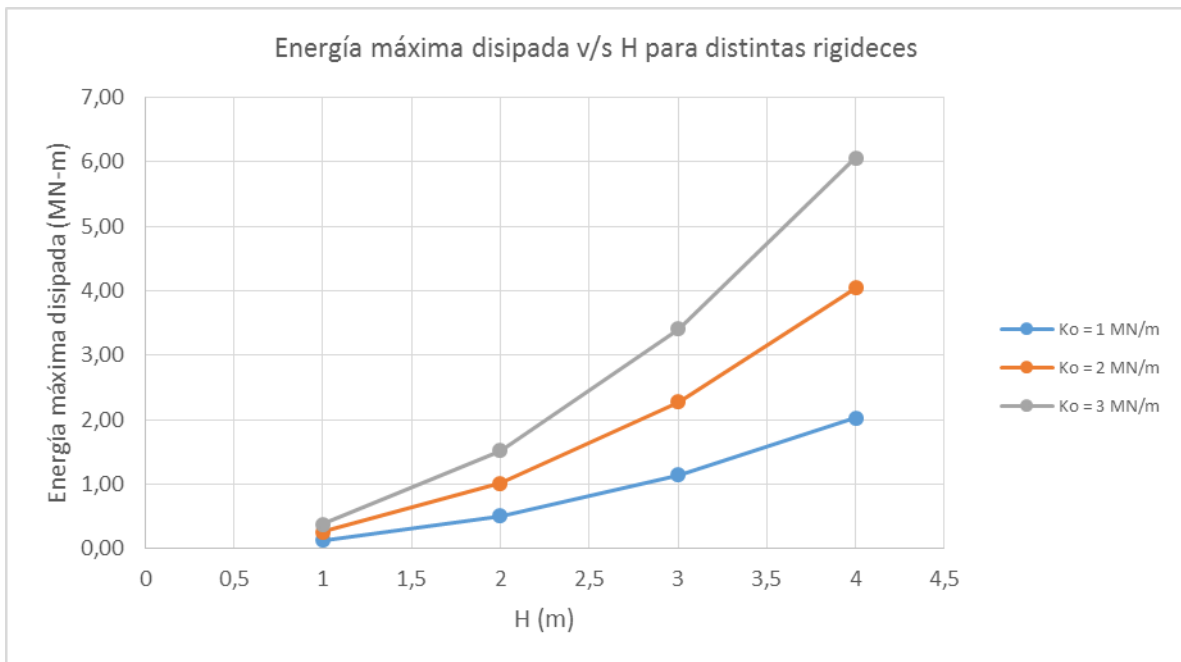


Figura 4.5: Energía disipada versus H, para $K_0 = 1.0 \times 10^6$ N/m (Arroyo, C., 2016).

Tabla 4.1: Fuerza reactiva máxima de la defensa, F_{max} , para distintas combinaciones de parámetros H, K_0 y u/H .

H (m)	1			2			3			4		
Ko (MN/m)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
u/H	Fmax (MN)											
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,09	0,17	0,26	0,17	0,35	0,52	0,26	0,52	0,78	0,35	0,69	1,04
0,2	0,15	0,30	0,45	0,30	0,60	0,90	0,45	0,90	1,35	0,60	1,20	1,80
0,3	0,19	0,38	0,58	0,38	0,77	1,15	0,58	1,15	1,73	0,77	1,53	2,30
0,4	0,21	0,43	0,64	0,43	0,86	1,29	0,64	1,29	1,93	0,86	1,72	2,58
0,5	0,22	0,44	0,66	0,44	0,88	1,32	0,66	1,32	1,98	0,88	1,76	2,64
0,6	0,21	0,42	0,62	0,42	0,83	1,25	0,62	1,25	1,87	0,83	1,67	2,50
0,7	0,18	0,36	0,54	0,36	0,72	1,08	0,54	1,08	1,62	0,72	1,44	2,16
0,8	0,14	0,27	0,41	0,27	0,55	0,82	0,41	0,82	1,23	0,55	1,09	1,64

Tabla 4.2: Máxima energía disipada por la defensa, E_{dis} , para distintas combinaciones de parámetros H, K_0 y u/H .

H (m)	1			2			3			4		
Ko (MN/m)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
u/H	Edis (MN-m)											
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,01	0,02	0,03	0,03	0,07	0,10	0,08	0,16	0,23	0,14	0,28	0,42
0,2	0,03	0,06	0,09	0,12	0,24	0,36	0,27	0,54	0,81	0,48	0,96	1,44
0,3	0,06	0,12	0,17	0,23	0,46	0,69	0,52	1,04	1,55	0,92	1,84	2,76
0,4	0,09	0,17	0,26	0,34	0,69	1,03	0,77	1,55	2,32	1,37	2,75	4,12
0,5	0,11	0,22	0,33	0,44	0,88	1,32	0,99	1,98	2,97	1,76	3,52	5,28
0,6	0,12	0,25	0,37	0,50	1,00	1,50	1,12	2,25	3,37	2,00	4,00	6,00
0,7	0,13	0,25	0,38	0,51	1,01	1,52	1,14	2,27	3,41	2,02	4,04	6,06
0,8	0,11	0,22	0,33	0,44	0,87	1,31	0,98	1,96	2,95	1,75	3,49	5,24
Máximos	0,13	0,25	0,38	0,51	1,01	1,52	1,14	2,27	3,41	2,02	4,04	6,06

De la figura 4.5, se puede extraer que para mayores valores de H, mayor es la energía disipada. Este crecimiento se ve de manera exponencial y cuadrática para cada H. Si el criterio para elegir una defensa óptima fuera la de mayor disipación de energía, la defensa apropiada sería $L = 4$ metros y $K_0 = 3.0 \times 10^6$ N/m.

4.2.- Análisis del ataque y procedimiento de diseño de las defensas

Para esta parte de los resultados, se realizó un análisis de la respuesta con un análisis tiempo - historia variando los valores de H, L y K_0 , manteniéndose el valor de μ constante en 0.4. Los valores de H a usar estarán basados en el análisis anterior, puesto que se sabe de antemano que para el puerto en estudio, el diseño de la defensa estará condicionado por la energía mínima a disipar que es de 0.66 MN-m, y la reacción máxima que debe ser de 1.18 MN (Memoria de Cálculo para Defensas Puerto Punta Caullahuapi, Calbuco Ingenieros). El objetivo de este análisis es encontrar una defensa apta a cumplir con estos requerimientos y ver su comportamiento puesta en el muelle.

Otro antecedente preliminar, además de los datos de energía y reacción, es que geoméricamente, la defensa tiene un H aproximado mayor a 2.0 metros.

De aquí, teniendo parámetros de H, la energía mínima a disipar y la reacción máxima se puede ir a la tabla 4.2 y buscar alguna combinación que satisfaga las condiciones reales del puerto en estudio.

Al ser la energía a disipar el parámetro más importante, y el que restringe el diseño como el parámetro mínimo requerido, se buscan los valores más cercanos a 0.66 MN-m en la tabla 15, dando como posibles resultados las siguientes defensas:

- $K_0 = 2$ MN/m y $H = 2$ m.
- $K_0 = 3$ MN/m y $H = 2$ m.
- $K_0 = 1$ MN/m y $H = 3$ m.
- $K_0 = 2$ MN/m y $H = 3$ m.

Con estos dos diseños, se realiza el análisis tiempo - historia, para determinar cuál de las dos defensas se comporta de mejor manera para el puerto en estudio.

La condición de ataque considerada, es un ataque lateral que logra que las defensas se activen de una en vez, logrando visualizar su comportamiento de manera individual. Con el tiempo, las demás se van activando logrando actuar de manera conjunta.

El primer caso a analizar, es el de $K_0 = 2 \text{ MN/m}$ y $H = 2 \text{ m}$ y así sucesivamente. Los resultados tiempo - historia se muestran a continuación.

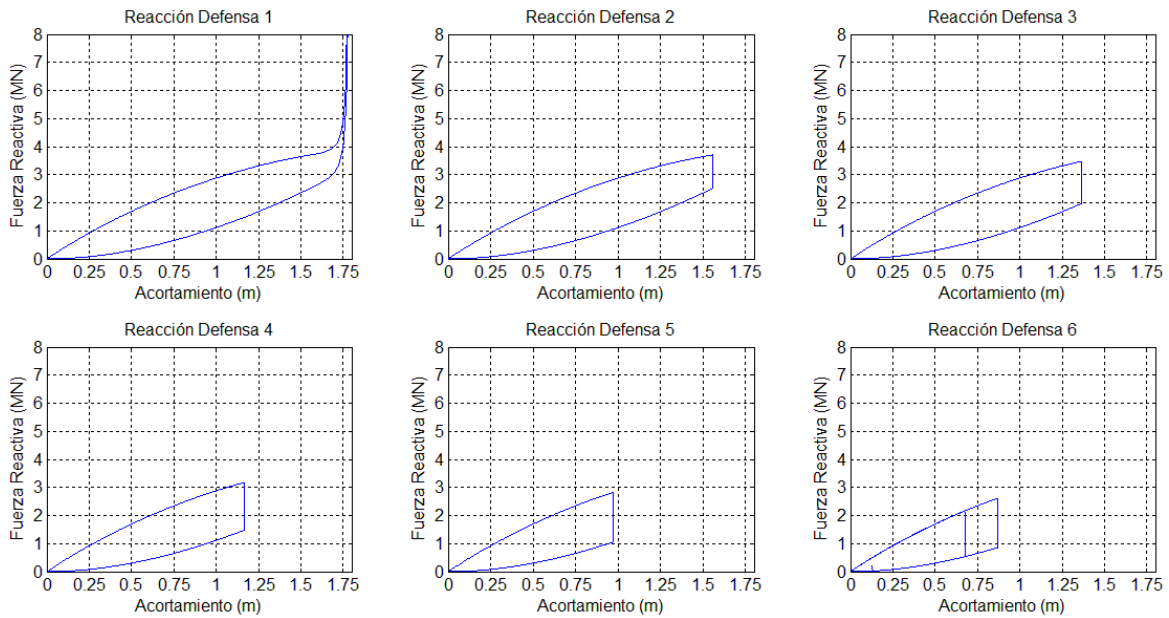


Figura 4.6: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 2 \text{ MN/m}$ y $H = 2 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

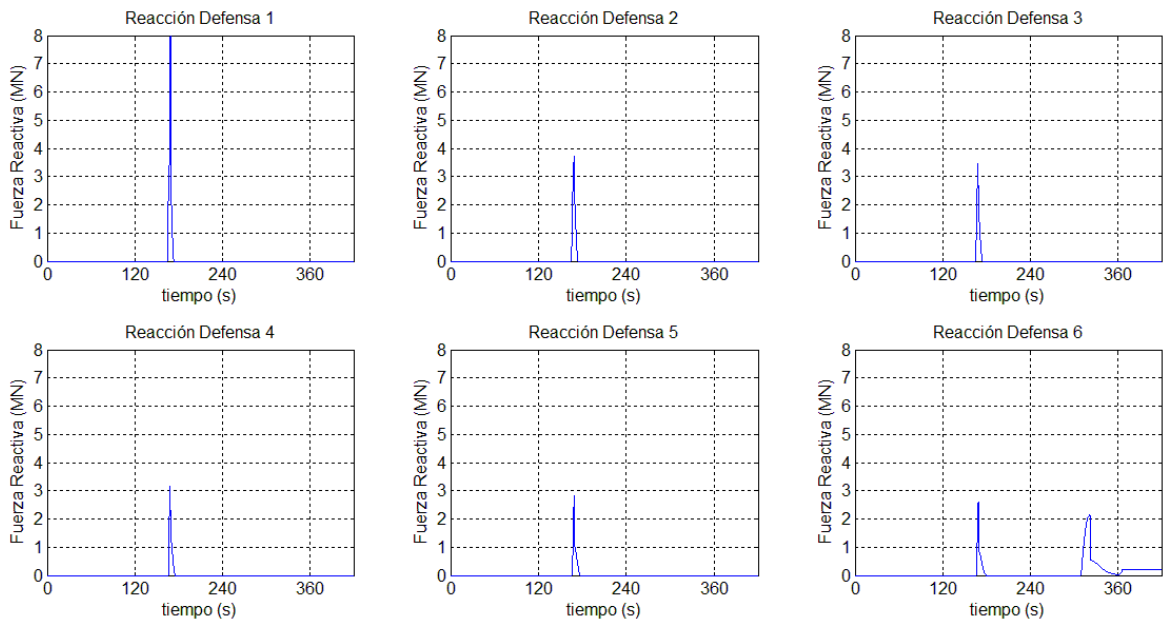


Figura 4.7: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 2 \text{ MN/m}$ y $H = 2 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

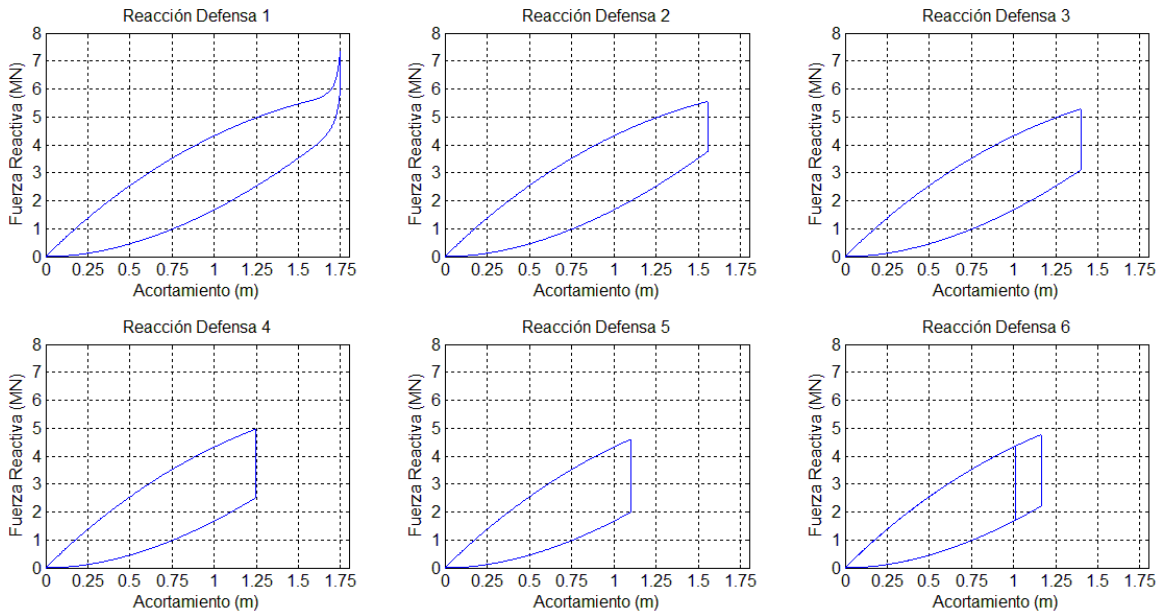


Figura 4.8: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 3 \text{ MN/m}$ y $H = 2 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

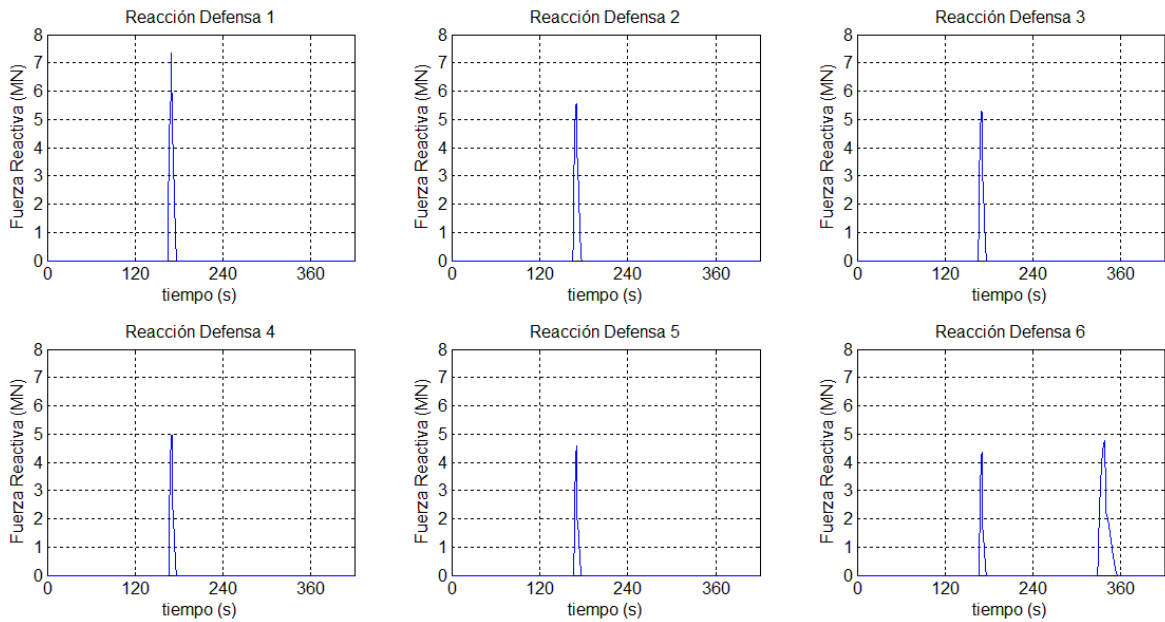


Figura 4.9: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 3 \text{ MN/m}$ y $H = 2 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

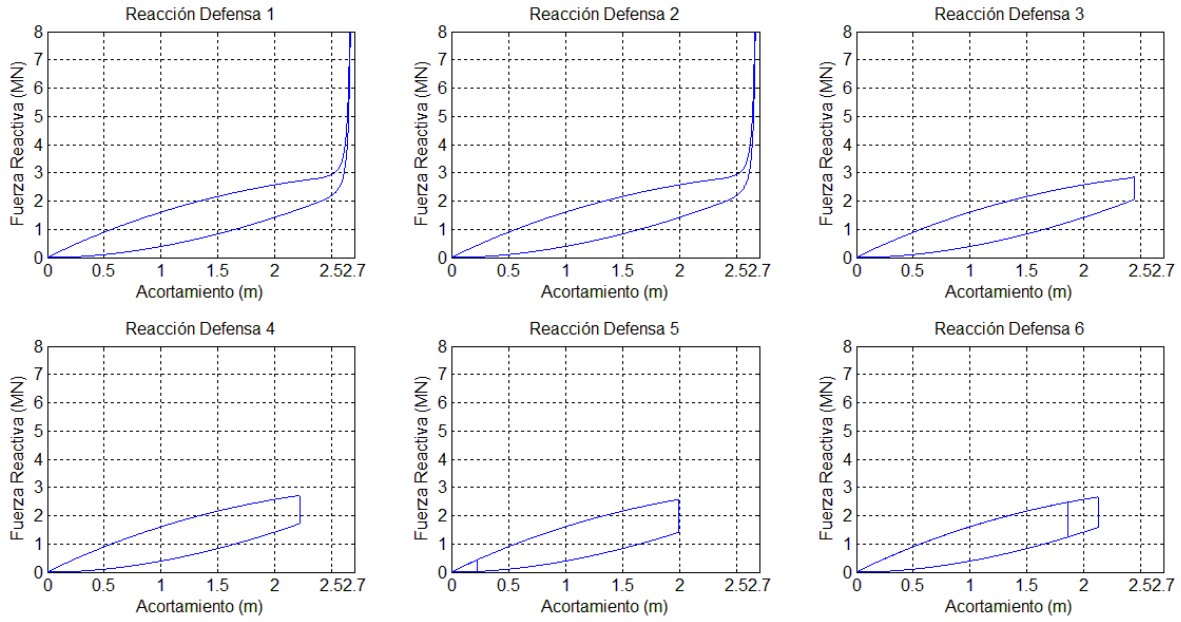


Figura 4.10: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 1 \text{ MN/m}$ y $H = 3 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

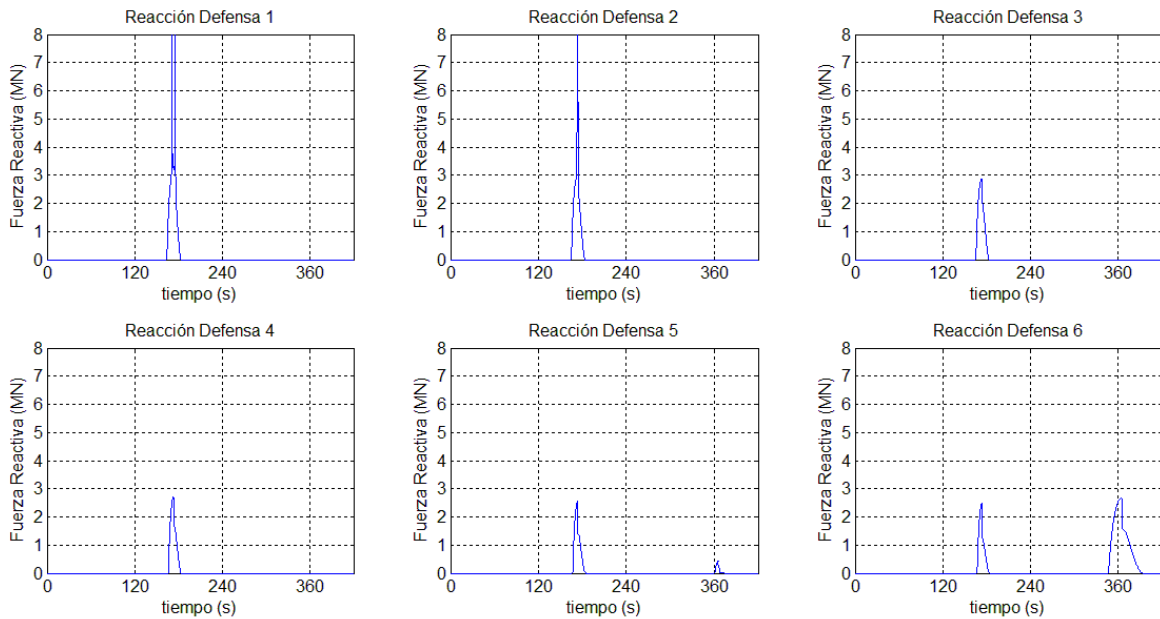


Figura 4.11: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 1 \text{ MN/m}$ y $H = 3 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

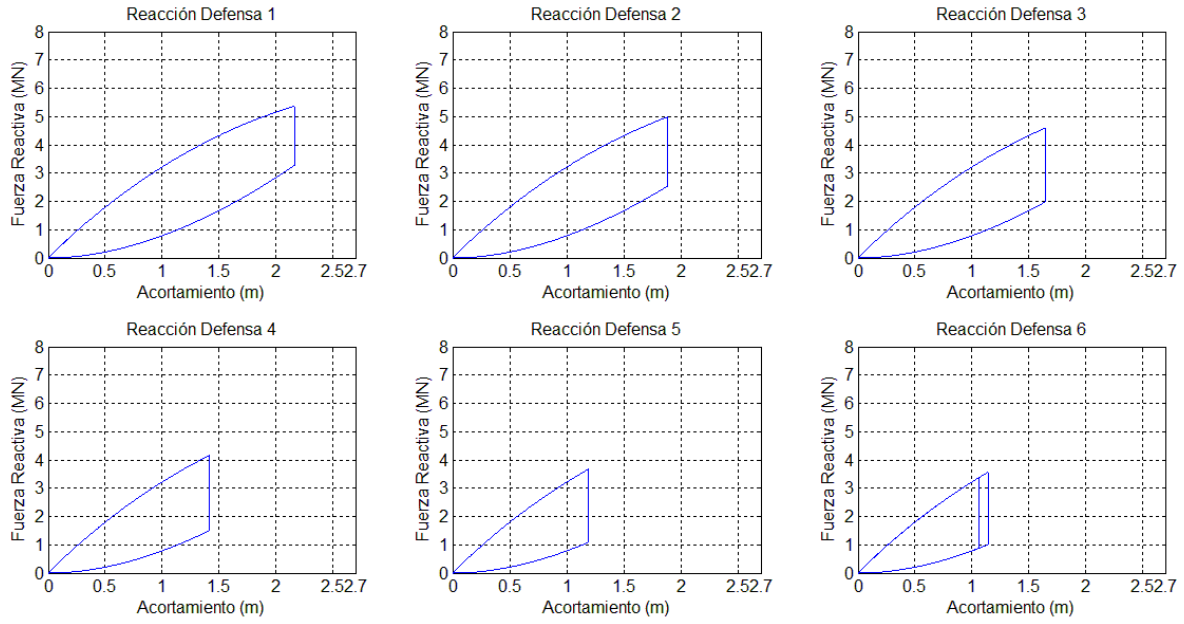


Figura 4.12: Ciclos histeréticos para defensa $K_0 = 2 \text{ MN/m}$ y $H = 3 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

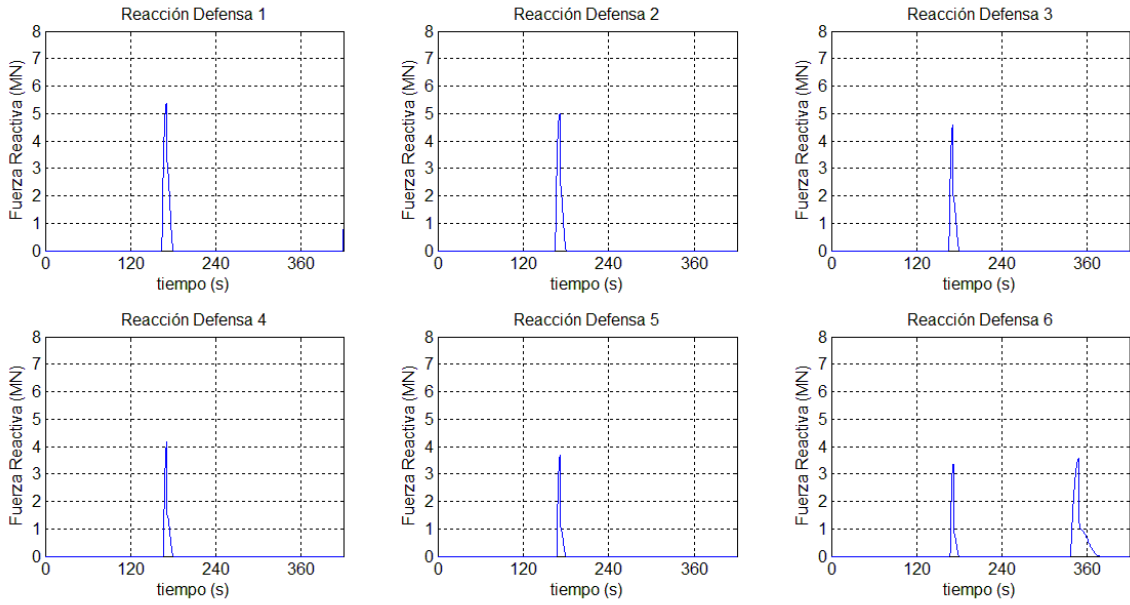


Figura 4.13: Fuerzas reactivas en el tiempo para defensa $K_0 = 2 \text{ MN/m}$ y $H = 3 \text{ m}$ (Arroyo, C., 2016).

De los gráficos presentados, obtenidos con los valores seleccionados del análisis paramétrico, la defensa que mejor se comporta realizado el análisis tiempo historia es la del caso 4, con $H = 3$ metros, $K_0 = 2$ MN/m y $L = 5.66$ metros. Los motivos de esto es que para las condiciones impuestas, como lo son la deformación máxima de la defensa, $0.8 \cdot H$, es la única que cumple el aplastamiento máximo admisible. Las otras defensas al no cumplir esta condición, actúan como un apoyo fijo, transmitiendo estos esfuerzos al muelle, y en el peor de los casos al casco del buque. Por tanto la defensa elegida para este caso es **$H = 3$ metros y $K_0 = 2$ MN/m**.

Para terminar el análisis de la defensa puesta en el muelle, y considerando que los parámetros obtenidos como óptimos para la defensa, se procede al diseño del resorte que cumple con la rigidez solicitada. Para esto se plantean las siguientes expresiones (Fenolosa, C., 2006).

$$K_r = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot N} \quad (4.1)$$

$$\tau_{max} = \frac{8 \cdot F_{max} \cdot D}{\pi \cdot d^3} = \frac{G \cdot d \cdot u_{max}}{\pi \cdot D^2 \cdot N} \quad (4.2)$$

Donde,

D : Es el diámetro de la espira del resorte, hasta eje de la barra que lo forma.

d : Es el diámetro de la barra cilíndrica que forma el resorte

N : Número de espirales que conforman al resorte completo.

Debido a que la deformación máxima demandada a la defensa, u_{MD} , resultó ser de aproximadamente 1.8 m de acuerdo a Fig 4.12, la longitud máxima que puede tener el resorte comprimido es $L_r = 0.9$ m. Esto último impone una restricción que vincula N con d , de modo que $N \cdot d = L_r^m \leq 90$ cm. Por otra parte, como hipótesis de diseño se ha asumido que la máxima compresión admisible de la defensa es $u_{MA} = 0.8H$, lo cual deja un largo de resorte comprimido máximo de $0.1H = 30$ cm. Sin embargo, esta última consideración es sólo una hipótesis, no una restricción, por lo que para los cálculos del resorte se considerará en este caso que la longitud mínima del resorte comprimido es $L_r^m = N \cdot d = 60$ cm.

En un resorte helicoidal, se debe cumplir que $d < D$, pues la espira deja espacio vacío en el interior del resorte. Debido a lo anterior, para efectos de análisis, se define la variable adimensional $n = D/d$, luego, D se puede expresar en función de d como $D = n \cdot d$.

Considerando lo anterior, las ecuaciones (4.1) y (4.2) se transforman en:

$$K_r = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n^3 \cdot d^3 \cdot N} = \frac{G \cdot d^2}{8 \cdot n^3 \cdot L_r^m} \quad (4.3)$$

$$\tau_{max} = \frac{8 \cdot n \cdot K_r \cdot u_{MD}}{\pi \cdot d^2} = \frac{G \cdot u_{MD}}{\pi \cdot n^2 \cdot L_r^m} \quad (4.4)$$

El material del resorte es de acero de alto contenido de carbono A-228, resistente a la corrosión y a bajas temperaturas. Las propiedades del material son $G = 80.000 \text{ MPa}$ y $F_y = 347 \text{ MPa}$.

Conocidos estos parámetros, se puede determinar la rigidez del resorte helicoidal necesario para la defensa. Sin embargo, también se debe cumplir que la tensión de corte presente en la espira sea menor o igual al 60% de la tensión de fluencia del material.

Se realizó un análisis paramétrico del resorte para determinar la combinación apropiada de parámetros n y d que proporciona la rigidez necesaria, satisfaciendo la condición de tensión admisible al corte. Los resultados de este análisis, se muestran en tabla 4.3, en la cual se señala en negrita, los parámetros de diseño adecuados para el resorte.

Tabla 4.3: Rigidez del resorte, K_r , y tensión máxima de trabajo, τ_{max} , para una combinación de parámetros n y d del mismo. La rigidez del resorte en el cuerpo de la tabla está en MN/m.

K_r (MN/m)		Diámetro de la barra que conforma el resorte, d (mm)							
n	τ_{max} (MPa)	125	150	175	200	225	250	275	300
3	8.488	9,65	13,89	18,90	24,69	31,25	38,58	46,68	55,6
4	4.775	4,07	5,86	7,98	10,42	13,18	16,28	19,69	23,4
5	3.056	2,08	3,00	4,08	5,33	6,75	8,33	10,08	12,0
6	2.112	1,21	1,74	2,36	3,09	3,91	4,82	5,84	6,94
7	1.559	0,75	1,09	1,49	1,94	2,46	3,04	3,67	4,37
8	1.194	0,51	0,73	1,00	1,30	1,65	2,03	2,46	2,93

De la tabla (4.3), se puede observar que existen tres combinaciones de parámetros n y d , las cuales se encuentran destacadas, con los cuales se satisface la condición de rigidez requerida. Sin embargo, ninguna de esas combinaciones cumple la condición impuesta para el límite máximo de tensiones, que debe ser el 60% de la tensión de fluencia, esto es igual a 208MPa.

Como conclusión general de la tabla 4.3, se puede decir que el resorte helicoidal no es apto para satisfacer ambas las condiciones de diseño de la defensa portuaria propuesta, al menos no para el puerto en estudio. Lo anterior no significa que la defensa propuesta no pueda ser implementada en dicho puerto, sino que para hacerlo, deben ser estudiadas otras alternativas de elementos que proporcionen la rigidez requerida.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados observados se comportan según lo esperado, con lo que se comprueba que el dissipador friccional actúa muy bien para disipar grandes cantidades de energía, esto se puede apreciar en el análisis paramétrico de una sola defensa. Además, se nota que para una altura de defensa dada, la disipación de energía crece de manera cuadrática a este parámetro.

Del análisis estático de la defensa, se ve que los parámetros de disipación de energía dependen de dos factores, como lo son la altura de la defensa y la rigidez del resorte. A su vez el largo de la barra, es directamente dependiente de la altura de la defensa, por lo que con uno de los factores, se puede definir la geometría del dispositivo. Al ser este parámetro definido a priori para un buque de diseño cualquiera o dimensiones del puerto, la energía disipada y la deformación máxima quedarían definidas por la rigidez del resorte.

Por lo tanto, para optimizar la energía disipada, minimizando el impacto de las fuerzas de atraque sobre el buque y el muelle, es conveniente convertir la energía cinética del buque en energía disipada en la defensa, ocupando toda la capacidad de deformación de esta última, reduciendo así la fuerza máxima requerida. Eventualmente, un diseño basado en dimensiones impuestas (altura de defensa y largo de barra), puede conllevar a fuerzas que pueden superar la resistencia del casco del buque. En este caso es conveniente aumentar las dimensiones de la defensa para disipar la misma energía con un desplazamiento mayor y por ende una fuerza reactiva menor. Como última opción, es posible que la fuerza reactiva máxima obtenida como resultado de una asignación de dimensiones de la altura de la defensa y el largo de la barra, conduzcan a una fuerza que esté muy por debajo de la resistencia del casco del buque. En este caso, es posible disipar la energía del impacto con una fuerza mayor estando aún en el rango de seguridad del casco, reduciendo las dimensiones de la defensa (y por tanto su desplazamiento relativo), y aumentando la rigidez del resorte. Esto último conduciría a un diseño igualmente seguro pero con una defensa de menor escala y costo.

Para el caso de la defensa puesta en el muelle del puerto en estudio, de todas las defensas que cumplirían con la disipación mínima y la reacción máxima que requiere el puerto, obtenidas del análisis paramétrico de la defensa como elemento ajeno al muelle, sólo una cumple la condición puesta en el muelle. Esto se debe a que en el análisis paramétrico de la defensa no se considera el caso dinámico, no así el estático.

De acuerdo a la formulación presentada anteriormente, se consideran todos los parámetros físicos que se tienen que tomar en cuenta en el análisis del problema. Sin embargo, al obtener que los desplazamientos del muelle son de orden de milímetros, y las defensas, según el análisis tiempo historia, es del orden de 1.5 metros, se valida la hipótesis de considerar los apoyos de muelle y duques como rígidos. Esto implica que la deformación se concentra sólo en las defensas.

En general, para escoger los parámetros geométricos de una defensa, deben considerarse las condiciones y formas de ataque posibles en el muelle y las maniobras que requieran hacerse al momento del ataque, pues es muy distinta la sollicitación para un ataque con ángulo, donde sólo podría actuar una defensa, a un ataque en paralelo a línea de muelle, donde actuarían todas a la vez. Esto influye muy fuertemente en el diseño de la defensa.

Al hacer el análisis para seleccionar la defensa óptima del puerto en estudio, el parámetro que define esto es la cantidad máxima de energía disipada. La defensa, como dispositivo disipador de energía de ataque, cumpliría muy bien las expectativas para ser considerada como una opción real de ser usada en los puertos chilenos y extranjeros, pues según los cálculos de análisis paramétrico, luego comprobados en el análisis de ataque, se ajusta bastante bien a una defensa de la envergadura del puerto en cuestión. Esta defensa, además tiene el beneficio de disipar energía en su proceso de carga y descarga, siendo muy poca la energía que debe ser disipada por otras partes del sistema, como estructuras o casco del buque.

Sin embargo, en su construcción debería ser considerada cerrada, de modo que no existiera el riesgo de humedad y salinidad en la parte metálica del disipador para así evitar variaciones en el coeficiente de roce, resistencia y rigidez de los elementos considerados en el diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, D. (2010). Mecanismos de absorción de energía en sistemas de defensas portuarias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Chopra, A. (2001), Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. California.
- Falk, P.A. (2010). Análisis del comportamiento de estructuras de acero provistas de disipadores de energía tipo “slotted bolted connection”, Universidad de Chile, Chile.
- Grigorian, C. E., Popov, E. E. (1993). Slotted bolted connections for energy dissipation, Department of Civil Engineering University of California, Berkeley.
- Kamrava, A. (2014). Seismic Isolators and their types, Department of Environment and Civil Engineering, University of Technology, Iran.
- Kelly, T. (2001). In-Structure Damping and Energy Dissipation – Design Guidelines, Holmes Consulting Group Ltd. Wellington, Nueva Zelanda.
- Lama, W.F. (2013). Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores visco-elásticos para la ciudad de Guayaquil, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- Memoria de cálculo cabezo y defensas Puerto Punta Caullahuapi, Calbuco Ingenieros.
- Paz, M. (1992). Dinámica estructural, Editorial Reverté, España.
- Pérez, A. Barboza, R. Ramos, J. (2013). Calidad del agua del refugio mata redonda y los arrozales colindantes, Guanacaste, Costa Rica.
- Trelleborg Engineered Systems (2001). Sistemas de defensas para muelles y barcos Fentex, España.
- Tsinker, G. (1986). Floating Ports. Golf Publishing Company. Houston, Texas, USA.