

Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Naval

"BARRERAS ARTIFICIALES PARA LA PROTECCIÓN DE CENTROS DE CULTIVOS ACUÍCOLAS"

Tesis para optar al Título de: Ingeniero Naval. Mención: Construcción Naval.

Profesor Patrocinante: Sr. Richard Luco Salman. Lic. Ing. Naval, Dr.

PEDRO ANDRÉS ALVAREZ RAMÍREZ. VALDIVIA - CHILE 2005 Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Naval, Mención Construcción Naval.

La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de Ingeniero en Construcción Naval.

EXAMEN DE TÍTULO:

Nota de Presentación
Nota de Examen(Ponderada)(1)4,514Nota de Examen
Nota final de Titulación(2)1,332(1+2)5,05

COMISIÓN EXAMINADORA: PROF. FREDY RIOS M. DECANO RMÄ PROF. RICHARD LUCO S. PROF. MARCOS SALAS I EXAMINADOR **FIRMA** PROF. NELSON PEREZ M EXAMINADOR PROF. Milton LEMARIE FIRMA SECRETARIO ACADÉMICO TRMA DICIEMBRE 26 DE 2005 Valdivia..

Nota de Presentación = NC/NA * 0.6 + Nota de Tesis * 0.2 Nota Final = Nota de Presentación + Nota Examen * 0.2 NC = Sumatoria Notas de Currículo, sin Tesis. NA = Número de esignaturos surredes y enrobedes incluido Préstico Profesio

NA = Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo a José Isaías Alvarez Torres, un padre adorable, y definitivamente, el ser humano que siempre he querido ser.

A Mireya Jovita Ramírez Contreras, mi madre, la mujer que me enseño el valor de una eterna sonrisa.

A Nicolás y Steffano, sé que creen en mí.

A Violeta, por su amor y paciencia durante la realización de este trabajo.

Gracias de Corazón.

AGRADECIMIENTOS:

Por todo lo logrado no hay más palabras que decir, sólo muchas gracias, profesores, compañeros, amigos y personas que sin saber ayudaron a la realización de este sueño.

En forma especial al Sr. Richard Luco Salman quién entrego lo medios para la realización de esta tesis, mostrando una vez más su calidad docente y por sobre todo, humana.

A mis fieles compañeros Nolberto, Pato, Ivonne, Javier, David, Rodrigo, Néstor y Alberto, muchachos, gracias por creer en mí, por su cordialidad y por haber compartido una parte de la vida con este ser que siempre los recordará, bajo el grito de Roda, Quilla y Crujía.

A todos Ustedes Mil Gracias.

INDICE

RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN	ii

CAPITULO I

1.0	Análisis de las fuerzas ambientales sobre una estructura flotante	1
1.1	1 Generalidades	1
1.2	2 Tipos de análisis en el diseño de un sistema de fondeo	2
1	.2.1 Análisis cuasiestático	3
1.3	3 Cálculo de las fuerzas ambientales	4
1	.3.1 Viento	5
	1.3.1.1 El fenómeno	5
	1.3.1.2 Metodología general para el cálculo	6
	1.3.1.2.1 Valores del coeficiente eólico (C_V)	10
1	.3.2 Corrientes	14
	1.3.2.1 El fenómeno	14
	1.3.2.2 Metodología general para el cálculo	16
	1.3.2.3 Velocidad de la corriente de marea	19
	1.3.2.4 Velocidad de la corriente inducida por viento	20
	1.3.2.5 Coeficiente de arrastre	21
1	1.3.3 Olas	23
	1.3.3.1 El fenómeno	23
	1.3.3.2 Formación de las olas generadas por el viento	25
	1.3.3.2.1 La generación de las olas por el viento	25
	1.3.3.2.2 Aproximación a la transmisión de la energía del viento a la ola	26
	1.3.3.2.3 Olas desarrolladas	27
	1.3.3.2.4 Relación vientos – olas	27
	1.3.3.3 Teorías del oleaje	28
	1.3.3.3.1 Teoría elemental del oleaje progresivo	28
	1.3.3.3.2 Métodos de estimación de oleaje	37
	1.3.3.3.2.1 Funciones teóricas de espectros de energía	38
	1.3.3.4 Metodología de cálculo	43

CAPITULO II

2.0 Generalidades sobre los rompeolas flotantes	49
2.1 Rompeolas	49
2.2 Elección del cuerpo a estudiar	57

CAPITULO III

3.0 Aspectos hidrodinámicos y ensayos de canal	58
3.1 Objetivos principales	58
3.2 Aspectos hidrodinámicos	58
3.2.1 Movimiento de Heave	59
3.2.1.1 Coeficiente de masa virtual (A ₃₃)	61
3.3.1.2 Coeficiente de amortiguación (B ₃₃)	61
3.3.1.3 Coeficiente de restauración	62
3.2.2 Movimiento de Roll	64
3.2.2.1 Coeficiente de amortiguación (B44)	64
3.2.2.2 Coeficiente de restauración (C ₄₄)	65
3.2.3 Datos obtenidos para los movimientos de Heave y Roll	66
3.2.3.1 Características generales e hidrostáticas	66
3.3 Eficiencia de un rompeolas flotante	69
3.4 Ensayo experimental para el DRF	76
3.4.1 Objetivo central	76
3.4.2 Características principales del tanque de pruebas	76
3.4.3 Modelo experimental	77
3.4.3.1 Escala del modelo	77
3.4.3.1.1 Resultados de escala para el DRF	81
3.4.3.1.2 Comentarios sobre la construcción del modelo y	81
3.4.4 Resultados del ensayo experimental	84
3.4.4.1 Test 1	84
3.4.4.2 Test 2	85
3.4.5 Análisis informe contenedor 40 pies	87
3.4.5.1 Batimetría	88
3.4.5.2 Correntometría	
3.4.5.3 Datos meteorológicos	

3.4.5.3.1 Datos de viento	89
3.4.5.3.2 Datos de oleaje	89
3.4.5.4 Método de predicción de altura de ola	89
3.4.5.4.1 Determinación del Fetch	89
3.4.5.5 Interacción oleaje – DRF	95
3.4.6 Conclusiones preliminares	100

CAPITULO IV

4.0 Análisis estructural mediante el MEF	101
4.1 Objetivo central	101
4.2 Proceso del MEF para la estructura en estudio	101
4.2.1 Consideraciones iniciales	101
4.2.2 Modelo a estudiar	102
4.2.3 Confección del modelo	103
4.2.4 Condiciones de contorno	104
4.2.5 Cargas	104
4.3 Presentación de resultados	106
4.3.1 Plancha plana	106
4.3.2 Plancha corrugada	107
4.4 Conclusiones preliminares	109
	110

CONCLUSIONES	
ANEXO	
BIBLIOGRAFIA	

RESUMEN

El presente trabajo estudia la posible construcción de un rompeolas flotante, que tiene como misión dar protección a las instalaciones de jaulas usadas en el cultivo de especies salmonideas, en la zona de Chiloé.

La condicionante principal es que el rompeolas debe ser confeccionado con contenedores de 40 pies.

En esta tesis se busca dar una primera aproximación al diseño de un artefacto de este tipo, considerando dos cosas básicamente, la primera, las fuerzas ambientales a las que un rompeolas estará sometido y la medición de su eficiencia, lo que abarca dar a conocer estos artefactos con sus virtudes y peligros.

De los resultados más preponderantes está la eficiencia del rompeolas, en él cual, tomándose como parámetro de medición el período de la ola aproximamos el rango de eficiencia.

SUMMARY

The present work studies the possible construction of a floating breakwater that has as mission to give protection to the facilities of cages used in fish farming in the area of Chiloé.

The main condition is that the breakwater should be made with containers of 40 feet.

In this thesis it is looked for to give a first approach to the design of a device of this type, considering two things basically, the first one, the environmental forces to those that a breakwater will be subjected and the mensuration of its efficiency, what understands to give to know these devices with its virtues and dangers.

The efficiency of the breakwater is of the most preponderant results, in him which, taking as mensuration parameter the period of the wave approaches the range of efficiency.

i

INTRODUCCIÓN

Comenzaremos por dar solución a la problemática de calcular las fuerzas medioambientales que determinarán finalmente las cargas a las que estará sometido el dique rompeolas flotante (DRF), reconociendo una metodología y respaldándola con la información pertinente.

Su objetivo es muy simple, entregar una metodología de cálculo para las fuerzas ambientales con la información básica para llevarla a cabo.

En la segunda parte se justifica la elección del cuerpo elegido para utilizarse como rompeolas, mostrando primeramente las ventajas y desventajas de estos artefactos. Su objetivo principal es dar a conocer los rompeolas flotantes de manera rápida y somera, revisando algunos ítems considerados como los más destacados.

El capítulo III habla exclusivamente sobre la eficiencia y la cuantificación de ésta, para artefactos de este tipo. Se realiza para nuestro caso la medición de su eficiencia a través de un ensayo experimental (Tanque de Pruebas) y su correspondiente análisis.

Finalmente se realiza una comparación entre dos piezas estructurales constituyentes de un rompeolas y que corresponde a la cara activa del DRF, tomando como parámetro de medición sus deformaciones y tensiones. La comparación se basa en el método de los elementos finitos. Su objetivo se enmarca dentro del campo de la eficiencia estructural decisoria, para un cuerpo natural existente a priori.

CAPITULO I

1.0 Análisis de las Fuerzas Ambientales sobre una Estructura Flotante

1.1 Generalidades

En estas obras navales las fuerzas ambientales son las que amenazan nuestro diseño de forma constante y en donde sus cargas cíclicas, pueden producir la falla de la estructura.

Todo cálculo de fuerzas sobre este tipo de estructuras flotantes, como por ejemplo, las balsas-jaulas y para nuestro caso el dique rompeolas flotante, están supeditados a sus líneas de fondeo principalmente, para nuestro diseño deberemos considerar, además, que el cuerpo flotante estará sometido en una de sus caras (de forma más frecuente) al impacto de las olas, debido a que su misión es disipar su energía y así ofrecer abrigo a las instalaciones de cultivo.

En forma general, la formulación de estas fuerzas se resolverán de la misma manera que se resuelve para las balsas-jaulas, respaldándonos en que muchos de los parámetros, como coeficientes de seguridad, valores para efectos medio ambientales (valor de la velocidad del viento para diseño, por ejemplo), o sea la base y metodología del cálculo, han sido tomados de las especificaciones para plataformas offshore, estipuladas por las Casas Clasificadoras de las cuales se reconocen ABS, BV, LR y otras instituciones referidas a este medio como API (American Petroleum Institute). Deberemos considerar dos diferencias principalmente, una se refiere a la movilidad del rompeolas y de una plataforma, el primero es limitado por el fondeo y el segundo es una estructura fija respecto del fondo marino y por supuesto las diferencias de esbeltez.

En este análisis también se debe considerar, el factor estructural del rompeolas flotante en especial su cara viva.

En el análisis de cada fuerza revisaremos su influencia en el rompeolas, para discriminar aquellos factores en los cálculos que no son aplicables debido a razones obvias de diferencias entre una balsa-jaula y un rompeolas flotante.

Por lo tanto a continuación se presenta una revisión general de la metodología de cálculo para las fuerzas ambientales.

1.2 Tipos de Análisis en el diseño de un sistema de fondeo

Las direccionales del cálculo de las fuerzas ambientales apuntan hacia sus líneas de fondeo. Primero debemos decidir el tipo de análisis a utilizar, tomando en consideración que todo diseño debe considerar y cubrir las condiciones extremas de cargas máximas y los efectos de la fatiga.

Si calculamos el equilibrio estático del sistema soportando las fuerzas ambientales e imponiendo un desplazamiento debido a las olas, estaremos considerando un "análisis cuasiestático" cuya precisión dependerá de la fiabilidad de los datos utilizados en los cálculos. Un "análisis dinámico" significaría considerar los movimientos que el artefacto transmite a sus líneas en donde su simulación puede predecir la respuesta del sistema. En un análisis dinámico podemos definir dos tipos:

- Análisis en el dominio del tiempo: permite analizar las condiciones extremas.
 Se realiza paso a paso, modificando los parámetros cada vez, por ello requiere de una gran capacidad de cálculo.
- Análisis en el dominio de la frecuencia: Se emplea para el estudio de la fatiga.
 Implica la resolución de una cierta cantidad de frecuencias, siendo el resultado final la superposición de las mismas.

También se deben considerar análisis más específicos, por ejemplo uno que considere situaciones de fallas en las líneas de fondeo. Un análisis de este tipo es el "análisis de los transitorios" en donde y tras la rotura de una línea, el sistema sufre un proceso transitorio combinado con las cargas ambientales. En dicha situación se dan tensiones muy altas que pueden provocar una rotura en cadena.

Otro análisis especifico sería el de estudiar la situación de ausencia de cada una de las líneas componentes del sistema y en forma individual, llamado "condición de línea rota".

Los coeficientes de seguridad serán introducidos como prevención de posibles errores en los datos o en estimaciones utilizados en los cálculos. Su valor depende, entre otras cosas, de la operación de la unidad y de la precisión del método que hayamos empleado para los cálculos. Para la industria offshore ya existen valores típicos y que son válidos para las mayorías de las Casas Clasificadoras.

1.2.1 Análisis cuasiestático

Las metodologías de cálculo empleadas por empresas del rubro acuícola se refieren todas al análisis cuasiestático. Este procedimiento de cálculo está bien documentado y aceptado por las Sociedades de Clasificación, pero su inconveniente radica en que necesita de información fiable para obtener resultados validos. Errores producto de este problema, surgen particularmente por subestimación o inexactitud de las condiciones climatológicas y ambientales de la localización de la instalación a fondear. En esta tesis será el tipo de análisis a estudiar.

Las fases más importantes del proceso de este análisis son:

- 1. Definir la geometría del sistema de fondeo
- 2. Aplicar las fuerzas ambientales y calcular los desplazamientos del sistema
- 3. Aplicar las fuerzas producidas por las olas y los movimientos inducidos
- Calcular las tensiones producidos por los máximos de las fuerzas y los movimientos
- 5. Comparar dichas tensiones máximas con la carga mínima de rotura del sistema
- 6. Calcular las cargas máximas para cada línea de fondeo y dirección
- 7. Introducir un factor de seguridad en los resultados de los cálculos
- Recalcular las cargas máximas suponiendo una línea rota, después de un fallo del sistema
- 9. Si la carga de rotura no es suficiente, aumentarla y volver a hacer los cálculos

El rompeolas estará compuesto por varios cuerpos flotantes asemejándose a un grupo de jaulas de los cuales existen dos objetivos muy importantes a cumplir por el sistema de fondeo:

- Mantener la posición de la instalación
- Garantizar el área/volumen de las jaulas (no aplicable para un DRF)

Debiendo cumplir además con:

- Tener una respuesta relativamente rígida (pretensión) en la zona inicial
- Aportar flexibilidad para grandes cargas, evitando las cargas de tipo sacudida

Además debemos considerar que los distintos cuerpos que forman un DRF, se interconectan entre sí, por lo cual se debe tener especial cuidado con las fallas allí. Evitar el roce de las líneas de fondeo, igual es una premisa, que por lo general se produce por problemas de emplazamiento.

1.3 Cálculo de las Fuerzas Ambientales

Analizaremos las fuerzas ambientales para estructuras flotantes solamente limitadas por sus fondeos y según el análisis cuasiestático. El siguiente esquema ilustra el procedimiento de análisis en estudio:





Análisis de las fuerzas ambientales sobre una estructura flotante

Sirve aclarar, que en el cálculo de las fuerzas ambientales no se puede considerar una máxima fuerza ambiental total. Podrían darse situaciones extremas como un Tsunami, huracanes, un terremoto con epicentro en el mar, por lo tanto, debemos elegir dentro de las probabilidades fenómenos ambientales probables. Son probabilidades típicas para esta clase de cálculos períodos de 25 a 50 años, sin embargo ningún pronóstico estadístico de eventos probables puede asegurar que los acontecimientos que excedan la máxima, no sucedan dentro del período de utilidad, de hecho, la exactitud de aquellas predicciones es limitada y podrían ser afectadas por los cambios climáticos.

1.3.1 VIENTO

1.3.1.1 El Fenómeno

El viento es la variable de estado de movimiento del aire. Es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Se denomina propiamente "viento" a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal, reservándose la denominación de "corriente de convección" para los movimientos de aire en sentido vertical que son los que caracterizan a los fenómenos atmosféricos locales, como la formación de nubes de tormenta.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores tales como el relieve y la aceleración de Coriolis.

En la superficie el viento viene definido por dos parámetros: la dirección en el plano horizontal y la velocidad.

La dirección del viento viene definida por el punto del horizonte del observador desde el cual sopla. En la actualidad, se usa internacionalmente la rosa dividida en 360°. El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj. De este modo, un viento del SE equivale a 135°, uno del S a 180°, uno del NW, a 315°, etc.

La velocidad del viento se mide preferentemente en náutica en nudos y mediante la escala Beaufort. Esta escala comprende 12 grados de intensidad creciente que describen el viento a partir del estado de la mar. Esta descripción es inexacta pues varía en función del tipo de aguas donde se manifiesta el viento.

Con la llegada de los modernos anemómetros, a cada grado de la escala se le ha asignado una banda de velocidades medidas por lo menos durante 10 minutos a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.

La unidad del viento en el sistema Internacional es m/s, sin embargo aún se usan los nudos (KN) y Km/h.

El aparato tradicionalmente empleado para medir la dirección del viento es la veleta que marca la dirección en grados en la propia rosa. Debe ser instalado de acuerdo a los procedimientos internacionales vigentes para evitar las perturbaciones.

Se considera que a partir de los 10 metros de altura sobre el nivel del mar las perturbaciones no afectan de forma notable a la medida.

La velocidad del viento se mide con el anemómetro, que es un molinete de tres brazos, separados por ángulos de 120º, que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad.

1.3.1.2 Metodología General para el Cálculo

La fuerza producida por el viento sobre las balsas-jaulas es considerada como la de menor intensidad seguida por las fuerzas de arrastre por olas y por corrientes submarinas, sin embargo puede producir fuerzas o momentos que pueden adquirir tanta o más importancia como las fuerzas generadas por el oleaje.

Las cargas producidas por el viento y sus efectos son de las más importantes para las estructuras flotantes ya que éstas son más susceptibles a los vientos extremos que las estructuras fundadas en tierra firme. Ya mencionamos algunas de las características del viento, dejando claro que, así como otros datos meteorológicos, posee un régimen variable en función del tiempo, la latitud y la ubicación geográfica.

Dentro de los principales inconvenientes en su medición esta el hecho de que las estaciones meteorológicas están basadas en tierra con lo cual los datos de meteorología marina son escasos.

Para desarrollar el cálculo de esfuerzos sobre la estructura incluimos el termino "Velocidad del viento de Diseño" parámetro que debe ser estimado con una certeza aceptable para los efectos de diseño de la estructura, estabilidad de una plataforma de trabajo y también de los mecanismos de anclaje, permitiendo a su vez, obtener soluciones económicas y seguras.

Para estudiar los parámetros del cálculo incluiremos, también, la normativa española R.O.M. *"Recomendaciones para Obras Marítimas"* que nos entrega una formulación para obtener el valor de la carga generada por el viento.

Las referencias que a continuación se presentan, se tomarán cuando no exista información meteorológica adecuada del sitio.

La sociedad de clasificación *"Lloyd's Register"* (1992), por ejemplo, señala que, para balsas jaulas ó sistemas de cultivo flotante, la estimación de las cargas por vientos debe considerar tanto la *"velocidad sostenida"* como las *"velocidades por ráfagas"*. Esta sociedad también indica que las cargas por viento sobre estas estructuras, son pequeñas, considerando que tienen escasa superestructuras, pero si cuentan con redes antidepredadoras aéreas, éstas pueden presentar una gran resistencia al viento. El asunto de las redes antidepredadoras no tiene relación con un DRF, sin embargo su área expuesta, es mayor que la de una balsa jaula. Lloyd's Register (1992) recomienda que la velocidad a considerar el promedio en una base de 1 minuto, a 10 metros de altura sobre el nivel del mar, cuando sea considerada conjuntamente con otras cargas ambientales. Cuando ésta es considerada en forma independiente deben calcularse las cargas debidas a las ráfagas de viento.

"American Bureau of Shipping" en sus reglas para construcción y clasificación de "Movile Offshore Drilling Units 2001" parte 3, capitulo 1, sección 2, cargas medioambientales, cargas producto del viento, dice que la velocidad mínima de viento para servicio costa afuera fijada están entre los 50 nudos para unidades de servicio restringido y los 70 nudos para unidades sin restricción. Para tormenta severa determina una velocidad de 100 nudos.

R.O.M presenta una extensa metodología en el libro "R.O.M 0.4-95 Acciones Climáticas II: Viento". Define como carga de viento a aquella carga de naturaleza variable producida por la actuación directa del viento sobre la estructura resistente o sobre elementos no estructurales que incidan sobre ella, independientemente de que se considere su actuación directamente para el cálculo estructural o como acción exterior de otras cargas variables o accidentales.

Considera que la acción del viento, a pesar de tener el carácter de carga dinámica frecuencial, podrá asimilarse en la mayor parte de los casos a una carga estática horizontal determinada según los criterios que nos ofrecen en su documentación, esto, apoya nuestra decisión de realizar el análisis de las fuerzas ambientales por el método cuasiestático.

Los valores representativos de la carga de viento se obtendrán a partir de la determinación del estado de "Viento de Proyecto" en la localización geográfica considerada, para cada una de las fases de proyecto e hipótesis de trabajo, éste quedará definido por los parámetros velocidad del viento y dirección, determinados a partir de un análisis estadístico unidimensional de la variable "velocidad del viento" utilizada como representativa de un estado de viento (media, máxima asociada a diversos intervalos de medición, o estimada a partir de observaciones desde buques en ruta), considerando la dirección de actuación, para dos tipos de situaciones: "Regímenes Extrémales" y "Regímenes Medios" bajo las condiciones que especifica la ROM.

La velocidad del viento de proyecto está considerada para dos condiciones climáticas:

 Extremas : se considera así, cuando ésta debe paralizar o limitar su operatividad mientras subsistan acciones climáticas superiores a los límites de explotación. Esta condición está asociada a las más severas condiciones climáticas para las cuales debe estar diseñada la estructura. Su cálculo se estipula en el apartado 3.2.1.2.1 "Velocidad del viento de proyecto en condiciones climáticas extremas". Normales : se considera que una estructura o instalación está sometida a condiciones normales de operación cuando ésta funciona sin limitaciones, no viéndose afectada por las condiciones climáticas.

En la ROM definen muy bien lo referente a la dirección del viento de proyecto, especifican que en el proceso de cálculo podrá admitirse simplificadamente del lado de la seguridad, que el viento actúa horizontalmente con igual intensidad y frecuencia en todas las direcciones, pudiendo obtenerse la velocidad del viento de proyecto a partir del régimen escalar correspondiente, además en estas condiciones se asociará a la velocidad de proyecto únicamente la dirección o direcciones que produzcan las acciones más desfavorables sobre la estructura analizada, esto nos lleva a estudiar las estructuras bajo la actuación del viento en la dirección de sus ejes principales y en ambos sentidos. Con ésta simplificación se debe tener mucho cuidado, puesto que se podría sobredimensionar las cargas.

La expresión general para el cálculo de la acción del viento sobre cualquier estructura situada en el mar viene dada por:

$$F_V = C_V \times \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times A$$

Donde:

- F_V : Fuerza del viento (N)
- C_V : Coeficiente eólico
- A : Área proyectada de las superficies a las que se enfrenta
- V : Velocidad del viento (m/s)
- ρ : Densidad del aire (1,222 1,226 Kg/m³)

Es fácil reconocer dos términos para la fuerza del viento, la presión (P) y el área (A), aquí "P" es denominado "Presión dinámica del viento (P_v)" algunos

autores incluyen el coeficiente eólico en esta formulación y otros sólo en la resolución final para obtener la fuerza.

Revisemos las siguientes formulaciones expresadas en N/m²:

- Lloyd's Register : P_V= 0.0625 x C_h x Cs x V²
 ABS : P_V= f x V²_k x C_h x C_s; Donde: f= 0.611
 R.O.M : Q_{V,f(Z)}= 0.6125 x V²_{V,f(Z)}
- Van Boven (68')y D' Arcangelo (69'): P_{VIENTO}= 0.0965 x C_h x C_s x V²

La metodología nos indica que la estructura deberá subdividirse en sus distintas partes, aplicando el coeficiente eólico correspondiente a cada una de las superficies, así el resultado final será la sumatoria de todas las partes.

De los parámetros que componen la formulación, el coeficiente eólico y la velocidad de proyecto se toman de valores experimentales (éste último, sólo si no se tienen registros de la zona de ubicación de la estructura), presentando un factor de proximidad a los resultados, de no ser bien escogidos pueden sobredimensionar el valor de la fuerza o bien entregar un valor menor al de diseño.

1.3.1.2.1 Valores del coeficiente eólico (C_V)

Estos valores varían ligeramente para las distintas fuentes consultadas. De forma general el coeficiente eólico se descompone en dos partes, representando una un factor de forma de la estructura y la otra un factor dependiente de la altura a la que está, dicha parte de la estructura, o sea:

$$C_V = C_s \times C_h$$

Donde:

- C_s= coeficiente de forma
- C_h= coeficiente de altura ó por corrección de por altura.

La ROM establece un factor de forma o coeficiente eólico de fuerza (C_f), éste coeficiente es variable en función de la dirección de actuación del viento. Sus valores se estipulan para un viento actuando en la dirección principal de los ejes de la estructura, a pesar de esto, entregan la posibilidad de calcular la fuerza resultante para viento actuando en cualquier dirección, con estos mismos coeficientes bajo una nueva formulación estipuladas en sus manuales.

De la bibliografía estudiada la ROM, ABS y la API, entre otras como la Lloyd's Register y Det Norske Veritas (DNV), tienen estos valores tabulados. La ABS y API tienen valores casi homologados, por tanto revisaremos las tablas de la ABS y de la ROM.

Valores para Cs			
Forma	Valor		
Esfericas	0.4		
Formas cilíndricas (todos los tamaños)	0.5		
Casco (tipo de superficie)	1.0		
Superestructura	1.0		
Estructuras aisladas (grúas, vigas, puentes, etc.)	1.5		
Áreas bajo cubierta (superficies lisas)	1.0		
Áreas bajo cubierta (baos y esloras)	1.3		
pescantes, aparejos de grúas (cada cara)	1.3		

Tabla Nº 1 Valores para el Coeficiente de forma según ABS

Altura (metros)	Altura (Pies)	Ch
0.0 - 15.3	0 - 50	1.00
15.3 - 30.5	50 - 100	1.10
30.5 - 46.0	100 - 150	1.20
46.0 - 61.0	150 - 200	1.30
61.0 - 76.0	200 - 250	1.37
76.0 - 91.5	250 - 300	1.43
91.5 - 106.5	300 - 350	1.48
106.5 - 122.0	350 - 400	1.52
122.0 - 137.0	400 - 450	1.56
137.0 - 152.5	450 - 500	1.60
152.5 - 167.5	500 - 550	1.63
167.5 - 183.0	550 - 600	1.67
183.0 - 198.0	600 - 650	1.70
198.0 - 213.5	650 - 700	1.72
213.5 - 228.5	700 - 750	1.75
228.5 - 244.0	750 - 800	1.77
244.0 - 256.0	800 - 850	1.79
256	850	1.80

Tabla Nº 2 Valores de corrección por altura según ABS

(La altura considerada es la distancia vertical desde la superficie del agua al centro del área definida)

La ROM especifica en su apartado 3.2.2.8.2 que el coeficiente eólico de fuerza para calcular la acción del viento sobre una estructura flotante prismática, como lo será el DRF, puede calcularse de la tabla 3.2.2.3.2 considerando las dimensiones geométricas correspondientes a la zona no sumergida. Esta tabla se muestra a continuación:

		ESBELTEZ $\lambda = h/b$							
		≤							
PLANTA	b/d	0.5	1	2	4	6	10	20	8
	1//4	0.70	0.70	0.75	0.75	0.75	0.80	0.90	1.20
	1//3	0.70	0.75	0.75	0.75	0.80	1.00	1.10	1.30
	1//2	0.75	0.75	0.80	0.85	0.90	1.20	1.30	1.60
VIENTO	2//3	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.30	1.50	1.80
	1	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.20	1.40	2.10
	1.5	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.60	2.00	2.40
d	2	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.60	2.00	2.30
	3	1.10	1.20	1.25	1.35	1.40	1.70	1.90	2.20
	4	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	2.10



Una consideración que debemos tener antes de calcular definitivamente la fuerza por viento es el valor de la velocidad a utilizar. Ya tenemos claro que debemos tomar siempre la velocidad máxima registrada en la zona o la máxima que se podría registrar y no sólo el promedio.

El viento cerca de la superficie está siendo afectado por fluctuaciones aleatorias conocidas como "*ráfagas de viento*", por ello se recomienda en el cálculo independiente de la fuerza producto del viento, considerar una superposición de las fluctuaciones aleatorias tridimensionales de las turbulencias atmosféricas, matemáticamente representado por:

$$V_{V(t)} = \alpha \times V_{media}$$

Donde α es un coeficiente de ráfaga o un factor de ráfaga, definido como la razón entre la velocidad momentánea del viento en un periodo corto de tiempo y la

velocidad media. Este valor puede ser obtenido de forma clásica, por ejemplo de una distribución de probabilidad, pero para ello debemos contar con el registro histórico de los vientos y como ya se ha mencionado carecemos de datos meteorológicos de los vientos en el mar, no obstante, podemos obtener los factores de ráfaga de las fuentes ya consultadas, por ejemplo, de la ROM.

Se debe tener presente que algunas fórmulas para calcular la fuerza ejercida por el viento, ya incluyen un porcentaje por factor de ráfagas como la expresión de Van Boven y D' Arcangelo que incorpora un 10% como factor de ráfagas en la constante 0,0965.

La ROM en su apartado 3.2.1.2 *"velocidad del viento de proyecto"* define valores para el cálculo del factor de ráfaga máxima, como función de las distintas alturas y categorías de rugosidad superficial y corresponden a intervalos de medición o duraciones de ráfaga de 3s, 5s, 15s y 1 minuto. No aplican factores de ráfaga máxima a alturas por debajo de los 10 metros, para esos valores se considera el valor correspondiente a una altura de 10 metros.

La determinación del intervalo de tiempo o duración de ráfaga "t" es considerada en función del tipo de estructura o elemento estructural según la tabla 3.2.1.2.1 de su libro de recomendaciones especificado para viento.

Para nuestro caso (DRF con contenedores) correspondería una duración de ráfaga (según la ROM) de 15 segundos, valor destinado a elementos e instalaciones móviles como pequeñas embarcaciones y elementos flotantes hasta 25 metros de eslora, para esta duración de ráfaga el valor para el factor de ráfaga es 1.38.

A considerar que, mientras más corta sea la duración de la ráfaga de viento, más alto será el pico de la velocidad del viento, por ello en la ROM adoptan como velocidad de proyecto la correspondiente al intervalo de medición o duración de ráfaga (t) más corto capaz de afectar a la estructura o elemento estructural considerado, entregando fuerzas de arrastre efectivas sobre la totalidad de la misma, o capaz de vencer la inercia de elementos o estructuras móviles o flotantes.

Por último, las expresiones finales para el cálculo de la fuerza producida por el viento, sólo incluyen él o las áreas proyectadas, a excepción de la ROM que también incluye el coeficiente eólico de fuerza, expresándose en como sigue: • Lloyd's Register : F_V = 0.0625 x C_h x Cs x V² x F (Nt) (F: área proyectada de todas las superficies)

• ABS :
$$F_V = P_V \times A$$
 (Nt)

- R.O.M : $F_V = C_V \times Q_{v, t(Z)} \times A$ (Nt) (Cv coeficiente eólico de fuerza)
- Van Boven (68') y D' Arcangelo (69'):

$$F_V = 0.0965 \times C_h \times C_s \times V^2 \times F$$
 (Nt)

1.3.2 CORRIENTES

1.3.2.1 El Fenómeno

Las corrientes marinas son movimientos de arrastre o traslado de aguas oceánicas producidas por la acción combinada del viento, las mareas y la densidad del agua, las que a su vez se originan por las variaciones de temperatura de las masas de agua de diversas latitudes, como el ecuador o el polo, no constituyendo un fenómeno de carácter periódico. La dirección de una corriente marina se indica siempre por la dirección de su desplazamiento.

Su origen puede ser atribuido a tres causas principalmente:

- Variación de la densidad de los senos de las olas
- Vientos sobre la superficie de los mares
- Desplazamiento de mareas producto de mareas y ondas internas

Para la acuicultura es de gran interés las corrientes locales, ósea, las que se dan cerca de las costas, estás pueden ser inducidas o influenciadas por múltiples factores como las características del lugar, perfiles de las costas, topografías del lugar o régimen local de vientos. Según su origen, se pueden clasificar en:

- Corrientes termohalinas
- Corrientes de arrastre o de viento
- Corrientes de gradientes o de mareas

En la metodología en revisión, se considera para un cálculo teórico, que las fuerzas producidas por las corrientes afectan principalmente a la red y a los flotadores, lo que es lógico por la cantidad de área que significa, comparada con el área de la estructura sumergida. Podemos descartar al sistema de fondeo, si se considera como un sistema independiente del resto y tomando en cuenta que los esfuerzos máximos que se producen en él, son producto del oleaje y de las corrientes desplazando la estructura, ejerciendo tensiones en sus líneas.

Debido a lo anterior y para un DRF el trabajo es mucho más simple de realizar, debido a que por la naturaleza del proyecto no se cuenta con redes. Es obvio entonces, que se debe calcular las fuerzas producto de las corrientes para el área sumergida principalmente, si hay flotadores, estos deben considerase.

Según las fuentes consultadas se deben considerar para el cálculo de las cargas por corrientes aquellas originadas por "mareas" y por "viento".

Lo ideal es medir la corriente con métodos instrumentales adecuados y para éste caso, a diferencia de los fenómenos viento y olas, ésta si se puede medir instrumentalmente.

En la práctica se realizan dos tipos de mediciones:

- Correntometría Euleriana o Fija
- Correntometría Lagrangeana

La Euleriana considera su estudio en función de un volumen o espacio por el cual entra y sale el fluido. En la práctica, consiste en una medición hecha por un instrumento que se sumerge y se fondea (ó invertido en superficie), luego emite señales sonoras definiendo el perfil de velocidades de las corrientes de un volumen de agua en forma cónica. Este instrumento se conoce como correntómetro acústico Doppler ó ADCP "Acoustic Doppler Current Profiler".

La correntometría Lagrangeana, sigue un volumen de agua en su desplazamiento por el espacio. Para estas mediciones se utilizan derivadores, aparatos que navegan por el mar, río, estuario o lago y que se construyen con distintas geometrías y para trabajar a distintas profundidades, describiendo sus trayectorias mediante el sistema de posicionamiento global ó GPS.

La velocidad de la corriente es preponderante en el cálculo de las fuerzas inducidas por corrientes, ésta puede variar a lo largo de la columna de medición, ósea en el sentido de la profundidad, pero también varia en orden decreciente en el sentido de la superficie o paralela a ella, producto del denominado efecto "sombra", que no es más que la disminución de la intensidad de la corriente al encontrar oposición en su camino.

1.3.2.2 Metodología general para el cálculo

La expresión general que analizaremos, pertenece a la fórmula clásica de mecánica de los fluidos para un elemento sumergido de una estructura flotante y que se muestra a continuación:

$$F_C = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A_C \times V_C^2$$

Donde:

- F_C : fuerza de la corriente (N)
- C_d : coeficiente de arrastre
- ρ : densidad del agua (1.025 1.040 Kg/m³)
- A_C : área de la superficie que se oponen a la corriente (m²)
- V_C : velocidad de la corriente (m/s)

La metodología del cálculo es idem al realizado para calcular la fuerza ejercida por el viento, tenemos una velocidad que medir, por medios empíricos o experimentales, aunque ya aclaramos que se puede medir *"in situ"* y también un coeficiente que debemos determinar.

Para realizar el cálculo subdividiremos la parte sumergida en sus distintas piezas, aplicaremos el coeficiente de arrastre correspondiente y la velocidad de cada una de ellas, el resultado final será la suma de cada una de las formulaciones diferenciadas.

La Casa Clasificadora ABS indica que al determinar las cargas debido al efecto simultaneo de olas y de la corriente usando la ecuación de Morrison's la velocidad de la corriente debe ser sumada vectorialmente a la velocidad orbital de la partícula, además indica que esta velocidad debe incluir las componentes de la corriente por marea, olas (store surge current) y viento.

Se incluye a continuación un perfil de velocidades de corrientes para aguas tranquilas y su modificación en presencia de olas (Fuente: ABS "Rules For Building And Classing Mobile Offshore Drilling Units 2001")



Figura Nº 2 Perfil de velocidades de corrientes

Donde:

V_t : componente de la velocidad actual de marea en la dirección del viento.

V_s : componente de la corriente de oleada de la tormenta.

- V_w : velocidad de la corriente conducida del viento.
- h : profundidad de la referencia o corriente conducida del viento (en ausencia de otros datos h se puede tomar como 5)
- z : distancia considerada bajo el nivel de aguas tranquilas
- d : profundidad desde el nivel de aguas tranquilas

La formulación entregada por ABS se presenta a continuación para la corriente asociada con olas:

$$V_C = V_t + V_s + V_w [(h-z)/h]$$
 Para $z \le h$

$$V_C = V_t + V_s$$
 Para z > h

Si se desea calcular la fuerza de arrastre sólo por corriente y para las partes de la estructura sumergida, se debe ver el apartado 1.7.2 del reglamento en cuestión.

La LR (1992) indica que, la velocidad de la corriente debe calcularse según la siguiente ecuación:

$$V_{C(Z)} = V_{tc(Z)} + V_{w(Z)}$$

Donde:

Z : profundidad tomando el nivel del mar como referencia

 $V_{C(Z)}$: velocidad total de la corriente al nivel Z

- $V_{tC(Z)}$: velocidad de la corriente de marea al nivel z
- $V_{w(Z)}$: velocidad de la corriente por viento a z metros

A pesar de que podemos tener la velocidad de la corriente de forma instrumental, repasaremos el cálculo teórico para la velocidad de la corriente por concepto de marea y para aquella inducida por el viento.

1.3.2.3 Velocidad de la corriente de marea

Los autores Edwards y Edelsten (1976) entregan una expresión basada en los datos geográficos del lugar y datos de las mareas, para el cálculo de una velocidad de marea máxima, limitándola a fiordos y bahías:

$$V_{tc(máx.)} = \frac{A \times H}{B} \times 10^{-4}$$

Donde:

V_{tc(máx)}: velocidad marea máx. (cm/seg)

A : área del fiordo u bahía (Km²)

B : área seccional de la bahía en el sitio (m^2)

H : amplitud de la marea (m)

Además, las siguientes ecuaciones empíricas, facilitan el cálculo para una velocidad de corriente de marea al nivel de "z" metros en cm/seg.

$$V_{tc(Z)} = V_{tc(0)}$$
 Para -(h-10) < z < 0

$$V_{tc(Z)} = V_{tc(0)} \times \log \left[\frac{1+9z}{10-h} \right]$$
 Para -h < z < -(h-10)

 $V_{tc\ (0)}$ es la velocidad de la corriente de marea al nivel o profundidad de referencia de 0 metros, y "h" es la profundidad del lugar relativa al nivel de referencia.

Las corrientes producidas por las mareas deben estudiarse a través de observaciones en el lugar y/o calcularlas y por supuesto considerando la amplitud

máxima de la marea, astronómica o en tormenta. En las cartas entregadas por el "SHOA" (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) aparecen muchos de estos datos, además de los estadígrafos de mareas, se estipulan sus velocidades, por lo cual no conviene ahondar más en ese aspecto.

1.3.2.4 Velocidad de la corriente inducida por viento

Esta velocidad se puede estimar de la siguiente forma, teniendo la salvedad de que h_0 es igual a 50 m y que corresponde a una profundidad de referencia para la corriente generada por viento.

Sí $h_0 \le z \le 0$, tenemos que:

• LR (1992)
$$V_{w(Z)} = V_{w(0)} \times \left[1 + \frac{z}{h_0}\right]$$

• Larsen (1976)
$$V_{w(Z)} = V_{w(0)} \times \left[1 + \frac{z}{h_0}\right]^{\frac{1}{7}}$$

Sí z < -h₀ ó >50 m, tenemos que: $V_{w(Z)} = 0$

Lloyd's Register estima, a través de expresiones empíricas, la velocidad de la corriente inducida por viento al nivel de la superficie (esto a falta de datos estadísticos) como:

$$V_{w(Z)} = 0.058 \times V_1$$

Donde:

V₁ : velocidad del viento promedio en un minuto y a 10 m sobre el nivel del mar.

Por último se recomienda que la velocidad mínima de diseño a considerar, según DNV (1988) no debe ser menor a 1.0 m/s. Rudi y Dragsund (1993) dicen que debe estar entre $0.20 \le V_{CURRENT} \le 1.0$ m/s.

1.3.2.5 Coeficiente de Arrastre

Este parámetro viene bien estudiado para las complicadas aproximaciones a piezas que forman parte de una balsa jaula, por ejemplo las redes. Un DRF no presenta tal dificultad.

El valor del coeficiente de arrastre C_D depende de factores como, la forma del objeto sumergido, el área de la superficie mojada y la rugosidad de ésta.

Para estructuras flotantes como balsas jaulas o nuestro DRF, aún están a la espera de un buen estudio que defina valores para el C_D, puesto que han sido postergados por los estudios en instalaciones fijas.

Tomaremos los valores entregados por la "American Petroleum Institute" ó API para el C_D, teniendo en cuenta que sus valores son para estructuras flotantes de gran tamaño (más esbelta).

Ellos definen dos tipos de artefactos flotantes:

- Artefacto tipo buque
- Artefacto semisumergible

De estos dos sólo nos interesa el segundo, por que su definición se apega a nuestro proyecto. Este se define como:

"Un artefacto semisumergible es aquél cuya carena está formada básicamente por superficies planas que se oponen ortogonalmente a la dirección del flujo de agua"

La fuerza de corriente en este caso es:

$$F = C \times (C_D \times A_C + C_D \times A_f) \times V_C^2 \qquad (Nt)$$

Donde:

C : $\frac{1}{2} \times \rho$; para ρ = 1031.24 Kg/m³

 A_{C} : Suma de las áreas proyec. de los elementos circulares sumergidos (m²)

 A_f : Suma de las áreas proyec. de los elem. con superficies planas (m²)

C_D : coeficiente de arrastre

Luego para esta formulación la API recomienda valores de $C_{D,}$ abarcando dos tipos de superficies:

- Superficies cilíndricas o redondeadas: C_D: 0.50
- Para superficies planas o conteniendo partes planas ver gráfico siguiente:



Gráfico № 1 C_D según API para superficies con elementos planos

1.3.3 OLAS

Hasta aquí hemos revisado la metodología de cálculo para las fuerzas medioambientales producto del viento y de las corrientes, las que han sido desarrolladas utilizando una formulación clásica, ósea, con "coeficientes".

Las fuerzas producto de las olas nos presentan un desafío mayor, debido a que es un tema netamente dinámico, lo que se contrapone en cierto sentido con nuestra metodología de cálculo cuasiestático, abordarlo de esta forma implicaría considerar a la ola incidiendo sobre la estructura de la forma más critica y volverla estática frente a ella, algo así como tomar una foto de la ola incidiendo sobre el DRF y será el modo en que trataremos el tema.

4.3.3.1 El fenómeno

El mar tiene una serie de movimientos que son los contribuyentes de energía al sistema, dentro de los principales, habíamos mencionado a las corrientes, ahora al oleaje y no podemos dejar de lado a las mareas de tormenta y los tsunamis. De los anteriores, el oleaje es la principal fuente de energía, puesto que al soplar el viento sobre la superficie y dependiendo de su intensidad podrá formar olas desde unos cuantos centímetros, hasta varios metros.

Este oleaje generado por la fuerza del viento queda definido por su altura, longitud y período como se muestra a continuación:



Figura Nº 3 Definición de las características del oleaje

Algunas definiciones comunes son:

- Altura de ola (H) : es la distancia vertical que existe entre una cresta y un valle o seno.
- Longitud de Ola (L) : es la distancia horizontal que existe entre dos crestas o dos valles consecutivos.
- Periodo de la Ola (T) : tiempo que transcurre entre el paso consecutivo de dos crestas o dos valles por el mismo punto.

Estas características en un sitio cualquiera del océano quedan determinadas por tres variables principalmente:

a). Fetch : es la distancia en la que actúa el viento sobre la superficie "libre" del mar.
b). Distancia de decaimiento : es la distancia que viaja la ola después de dejar la

zona de generación.

c). Velocidad del viento

d). Profundidad

Podríamos realizar una clasificación de las ondas que se presentan en el océano. Según el período, podemos obtener la siguiente tabla:

Periodo	Тіро	Fuerza que la produce	Fuerza que la restaura	
< 0.1 seg	Capilares	Viento	Tensión superficial	
0.1 a 1 seg	Ultragravedad	Viento	Tensión superficial, Fza de grav.	
1 a 30 seg	Gravedad	Viento	Gravedad	
30 seg a 5 min	Infragravedad	Viento	Gravedad	
5 min a 12 hr	Largo periodo	Tormentas y Tsunamis	Fuerza de Coriolis	
12 hr a 24 hr	Largo periodo	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis	
> 24 hr	Muy largo periodo	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis	

Tabla Nº 4 Clasificación de ondas según su periodo

En forma general podemos decir, que para Fetch, velocidades y duraciones grandes, el oleaje generado también será grande. Sin embargo debemos considerar que las olas no crecen en forma indefinida, sino que lo hacen hasta alcanzar un valor limite u asintótico. En consecuencia para una cierta velocidad de viento, un determinado tiempo de acción del viento y del fetch, uno de los dos últimos factores será limitante en el crecimiento de la ola.

Como se puede ver el viento juega un papel primordial en el fenómeno de oleaje, por lo cual le dedicaremos unas líneas para comprender mejor su accionar, pero sin olvidar que las olas en una determinada localidad son el resultado de la interacción de un gran número de componentes que se han originado en distintos lugares con vientos, fetches y tiempos mínimos, algo a tener muy en cuenta.

1.3.3.2 Formación de las olas generadas por el viento

El viento es causa de perturbación de la superficie libre de la mar, provocando olas. Esta perturbación dependerá de la intensidad o fuerza del viento, su duración y del Fetch, como ya se había mencionado. Entonces, fuerza, duración y Fetch, definen la perturbación y, en consecuencia, las características de las olas, sin embargo aún no se sabe a ciencias cierta, cual es el mecanismo por el cual se transfiere la energía del viento a la ola.

La ola de gravedad de la superficie del mar, puede ser definida a través de la energía, como el movimiento oscilatorio que transporta energía sin transportar masa de manera significativa. Estas olas de gravedad, así como otros tipos de olas, resultan del balance entre las energías cinéticas y potencial.

1.3.3.2.1 La generación de las olas por el viento

Al soplar una ligera ventolina sobre la superficie libre del mar, estando ésta en una condición ideal de calma, las olas que aparecerán serán capilares.

A esta rugosidad de la superficie libre de la mar se le opone la resistencia de la tensión superficial, de disminuir la ventolina el mar volverá a su estado de calma, si

aumenta la intensidad del viento y tiene la duración suficiente, las olas se convertirán en olas de gravedad, las que continuarán trasladándose aunque cese el viento. Entonces se diferencian la longitud y la duración de las olas de gravedad frente a las olas capilares.

1.3.3.2.2 Aproximación a la transmisión de energía del viento a la ola

A continuación se exponen tres formas distintas y complementarias de transmisión. La primera es la de mayor efectividad cuantitativa.

a). Las olas pueden obtener energía del empuje del viento si su velocidad de propagación es inferior a la de éste último. La efectividad de este tipo de transmisión dependerá del ángulo de incidencia del viento con la pendiente de la ola. La ola crecerá a razón de la energía entregada por el viento. El proceso de crecimiento seguirá hasta que las limitaciones de estabilidad de la ola lo permitan.

b). La fricción del viento sobre la superficie libre del mar es la segunda manera de transferir energía a la olas. Esta fricción varía de la cresta al seno. Las partículas de agua que forman la cresta de la ola se mueven en el mismo sentido que ésta y que el viento, teniendo como consecuencia que el arrastre por fricción acelera el movimiento de giro de estas partículas. El proceso inverso sucede en el seno de la ola, en donde las partículas se mueven en sentido opuesto a la ola y por tanto al viento, produciendo el arrastre por fricción una disminución de su velocidad.

A diferencia del empuje del viento sobre la ola, la fricción puede transmitir energía a las olas aún en el caso de que la velocidad de propagación de las mismas sea mayor que la del viento, debido a que son las partículas las que reciben el efecto acelerador o desacelerador de la fricción, moviéndose a una velocidad mucho menor que la del perfil de la ola.

c). La última forma de alimentación de la energía del viento a las olas se debe por la diferencia de presiones del aire entre las pendientes del perfil de la ola, anterior y posterior de la cresta. Se produce una sobrepresión en la pendiente anterior y depresión en la posterior.

1.3.3.2.3 Olas desarrolladas

Si consideramos que el viento sopla a una velocidad constante y durante un tiempo estimado como necesario para que las olas que aparezcan reciban el nombre de "*olas desarrolladas*", en ellas se alcanza un equilibrio entre la energía añadida que va recibiendo y la pérdida de la misma. Esta situación se identifica claramente, debido a que las características de la ola no variarán.

De suma importancia para un proyecto, como lo es el DRF, es saber como las olas pierden energía, en mar libre, por ejemplo, se produce principalmente por los movimientos turbulentos del agua y en menor medida por la viscosidad.

1.3.3.2.4 Relación viento-olas

La relación viento y mar se mide tradicionalmente con dos escalas, una mide la fuerza del viento y se denomina escala *"beaufort"* y la otra, caracteriza los estados de la mar y se le conoce como escala *"Douglas"*. En forma general estas constan de una graduación, de los nombres de cada grado y de la valorización correspondiente, siendo para el viento la velocidad y para la mar la altura de olas.

ESCALA DE BEAUFORT			ESCALA DE DOUGLAS			
Grado	Nombre	Velocidad Viento (m/s)	Grado	Nombre	H⅓ m	
0	Calma	0,0 - 0,2	0	Calma	0	
1	Ventolina	0,3 - 1,5	1	Llana	0,1 - 0,2	
2	Flojito	1,6 - 3,3	2	Dizada	0,3 - 0,5	
3	Flojo	3,4 - 5,4		RIZAUA	0,6 - 1,0	
4	Bonanc ible	5,5 - 7,9	3	Marejadilla	1.5	
5	Fresquito	8,0 - 10,7	4	Marejada	2.0	
6	Fresco	10,8 - 13,8	5	Gruesa	3.5	
7	Frescachón	13,9 - 17,1	1	Mun gruppe	5.0	
8	Duro	17,2 - 20,7	0	wuy gruesa	7.5	
9	Muy duro	20,8 - 24,4	7	Arbolada	9.5	
10	Temporal	24,5 - 28,4	8	Montañosa	12.0	
11	Borrasca	28,5 - 32,7	0	Confusa	15.0	
12	Huracán	> 32,7	9	Contusa	> 15	

Las dos escalas se relacionan en la tabla siguiente:

Tabla № 5 Escalas Beaufort y Douglas

Las metodologías de cálculo incluyen conceptos de predicciones y teorías de oleaje por lo cual es importante revisar éstos para tomar de ellos las deducciones posibles, o sea, tener al menos una idea de estas teorías y entender la mecánica del fenómeno. Dependiendo de las particularidades de un problema, existirá para éste, una teoría correctamente aplicable.

1.3.3.3 Teorías de oleaje

1.3.3.3.1 Teoría elemental del oleaje progresivo

Incluyendo algunos términos a la representación de la figura Nº 4 tenemos que:



Figura Nº 4 Definición de términos para una onda progresiva senoidal

En donde:

- C : velocidad de propagación de la ola (m/seg.)
- L : longitud de onda (m)
- d : profundidad (m)
- H : altura de la ola (m)
- a : semiamplitud o semialtura (m)
- η : desplazamiento vertical con respecto al nivel de reposo del mar
- T : período (seg.)
En forma práctica revisaremos las formulaciones y no así las deducciones que pueden ser obtenidas y estudiadas de las bibliografías que se refieren al tema.

La velocidad de una onda es la velocidad con que ésta se desplaza y la podemos calcular como:

$$C = \frac{L}{T}$$
 1.1

Además según la definición de velocidad aplicada a esta teoría tenemos que:

$$C = \sqrt{\left(\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)\right)}$$

ó también:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \sqrt{\left(\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \right)}$$
 1.2

Podemos definir también el número de la ola y su frecuencia angular de la formula anterior como:

N° de la ola :
$$k = \frac{2\pi}{T}$$

Frecuencia angular :
$$\varpi = \frac{2\pi}{T}$$

Combinando 1.1 y 1.2 obtenemos la longitud de la ola en función de la profundidad y del periodo:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\left(\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)\right)}$$
 1.4

Como L aparece en ambos lados de la ecuación 1.4 la solución primaria se encuentra por tanteo, pero también se puede solucionar a través de valores tabulados para relaciones de profundidad y largo del la ola en aguas bajas y profundas, sin dejar de lado la solución de Eckhart.

Formula aprox. de Eckhart :
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left[\frac{4\pi^2}{T^2}\frac{d}{g}\right]}$$

Clasificación	d/L	(2πd)/L	tanh(2πd/L)
Aguas profundas	> 1/2<≈	> Π	≈ 1
Transicionales	1/25 a 1/2	1/4 a π	tanh(2πd/L)
Aguas bajas	> 1/25	> 1/4	≈ 2πd/L



Por tanto y para aguas profundas definimos que:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

y para aguas bajas (d/L<1.25) la ecuación de velocidad se simplifica a:

$$C = \sqrt{gd}$$

La ecuación para describir la forma de una onda senoidal en función del tiempo "t" y una distancia "x" se escribe como sigue:

$$\eta = a\cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) = \frac{H}{2}\cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

La teoría lineal en análisis nos permite conocer el movimiento de las partículas de agua y sus trayectorias. De forma gráfica podemos ver las velocidades y aceleraciones de las partículas en una onda y su desplazamiento en una onda.



Figura Nº 5 Velocidades y aceleraciones de las partículas en una onda



Figura Nº 6 Desplazamientos de las partículas de agua en una onda

Del análisis de teoría potencial de olas se obtiene que las componentes de velocidad (u y w) y de aceleración (a_x y a_z) se expresan como:

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\left[\left(2\pi(z+d)\right)/L\right]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\operatorname{senh}\left[(2\pi(z+d))/L \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$a_x = +\frac{g\pi H}{L}\frac{\cosh\left[(2\pi(z+d))/L\right]}{\cosh(2\pi d/L)}sen\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$a_{z} = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\operatorname{senh}[(2\pi(z+d))/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

Los valores de desplazamiento de estas partículas son también calculables por la teoría lineal, teniéndose que, y para aguas bajas, las siguientes formulaciones:

$$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh\left[\left(2\pi(z+d)\right)/L\right]}{\operatorname{senh}(2\pi/L)} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$\zeta = +\frac{H}{2} \frac{\operatorname{senh}[(2\pi(z+d))/L]}{\operatorname{senh}(2\pi/L)} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

 $\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\zeta^2}{B^2} = 1$; donde A y B para una elipse es igual a:

$$A = \frac{H}{2} \frac{\cosh[(2\pi(z+d))/L]}{\operatorname{senh}(2\pi/L)}$$

$$B = \frac{H}{2} \frac{\operatorname{senh}[(2\pi(z+d))/L]}{\operatorname{senh}(2\pi/L)}$$

Para aguas bajas (d/L < 1/25) se tiene que:

$$A = \frac{H}{2} \frac{L}{2\pi d}$$
$$B = \frac{H}{2} \frac{z+d}{d}$$

Para aguas profundas:

$$A = B = \frac{H}{2}e^{2\pi z/L}$$

Otra información entregada por la teoría lineal es dar un valor para la presión subsuperficial que produce la ola bajo ella y una de mayor relevancia para nosotros es la velocidad de traslación de un grupo de olas. Esta velocidad grupal es distinta a una individual y se denomina como C_g y se determina como sigue:

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{L}{T} \left[1 + \frac{(4\pi d)/L}{\operatorname{senh}(4\pi d/L)} \right] = nC$$

en donde:

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(4\pi d)/L}{\operatorname{senh}(4\pi d/L)} \right]$$

y en aguas profundas, el término queda como:

$$\frac{4\pi d}{L} \operatorname{senh}\left(\frac{4\pi d}{L}\right) \to 0$$

entonces:

$$C_{g} = \frac{1}{2} \frac{L_{o}}{T} = \frac{1}{2} C_{0}$$

En aguas bajas la velocidad de grupo se presenta como:

$$senh\left(\frac{4\pi d}{L}\right) \approx \frac{4\pi d}{L}$$
 y $C_g = \frac{L}{T} = C \approx \sqrt{gd}$

La importancia que se mencionó para la velocidad de grupo de las olas se debe a que la energía del oleaje se propaga con esta velocidad. Esta energía en su valor total viene dada por la suma de la energía cinética (E_k , se produce por las velocidades orbítales de las partículas de agua) y por la energía potencial (E_p , producida por la altura de cresta de la ola, o sea una altura sobre el seno de la ola) y se puede escribir como sigue:

Para la energía total por unidad de ancho de cresta de ola:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8}$$

Para la energía promedio por unidad de área:

$$E = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8}$$

Otro dato de importancia es el flujo de energía, esto es, la razón en la que se transmite la energía en la dirección de propagación del oleaje.

El promedio de flujo de energía por ancho de cresta unitario viene dado por:

$$\overline{E} = \overline{E}_n C = \overline{E}C_g$$

También se le conoce a este flujo de energía como potencia del oleaje y se puede formular para aguas bajas y profundas

 $\overline{P} = \overline{E}C_{p} = EC$; para aguas bajas

 $\overline{P}_{o} = \frac{1}{2}E_{o}C_{o}$; para aguas profundas

Es de un especial interés cuando se utilizan teorías, como las teorías lineales de predicción de oleaje, saber cuando es posible utilizar un cierto modelo en desmedro de otro menos indicado.

Estas otras teorías nos permiten calcular los mismos elementos que la teoría lineal, pero que se aplican para diferentes condiciones de profundidad.

a). La de Stokes de 2°, 3° y 4° orden para aguas profundas y parte de las transicionales.

b). La teoría *Cnoidal*, ésta se aplica fundamentalmente para aguas bajas y de transición.

c). La teoría de la *onda solitaria*, se aplica en el límite de rotura. Este tipo de onda es el caso límite de una onda "*cnoidal*" cuando $k^2 = 1$, K (k) = K(1) = ∞

d). Por último para los límites de rotura y aguas de transición existe la teoría función de corriente que se aplica en estos casos. Estas soluciones numéricas a las ecuaciones hidrodinámicas, describen el movimiento del oleaje y la teoría es similar a las de Stokes de orden superior

Las teorías no-lineales son complejas y de difícil aplicación, aunque autores como Skjelbreia y Hendrickson (1961) han confeccionado tablas con las soluciones para las ecuaciones de Stokes de 5º orden, además Wiegel (1964) ha presentado gráficos para aplicaciones ingenieriles de la teoría "*Cnoidal*".

Los siguientes gráficos nos pueden ayudar para decidir que teoría es más acertada de aplicar en el problema que tengamos.



Gráfico № 2 Regiones de validez para las teorías de oleaje según Komar (1976)



Gráfico Nº 3 Regiones de Validez de las teorías de oleaje Le Mehaute, (1969)

1.3.3.3.2 Métodos de estimación de oleaje

La tarea a seguir, después del estudio matemático de una onda senoidal, es la de proporcionar una metodología para predecir el oleaje real, el que lógicamente, es mucho más irregular que la aproximación matemática.

Existen dos tipos de predicción del oleaje:

- Predicción con base en datos meteorológicos ocurridos en el pasado
- Predicción con base en datos estimados

Como el oleaje real presenta diferentes alturas y períodos, se han establecidos dos términos para representar el oleaje real de una manera monocromática, uno es la *Altura de ola significante* "H_s" y el otro es el *Período significante* "T_s". Para su aplicación debemos obtener datos de altura de oleaje y períodos reales.

La altura de ola significante se define como la altura promedio del tercio de las olas más altas, lo que sería igual a la altura promedio estimada por un observador experimentado. Para un registro real, esta definición no es muy clara, no se sabe qué irregularidades deben considerarse para contar el número real de olas que nos darán el promedio del tercio más alto.

El período significante del oleaje que se obtiene de observaciones visuales corresponde al promedio de las 10 a 15 olas más grandes. Si se requiere un registro, se utiliza el nivel medio del mar y se obtiene el promedio del período de todas las olas que cruzan este nivel.

Por las ventajas que presenta sería apropiado utilizar una forma espectral de representación de los valores. Este proporciona una descripción estadística de todas las olas en el estado de mar analizado, siendo un método muy conveniente para estructuras flotantes.

Las fuerzas debidas al oleaje, se derivan de las formulaciones adecuadas desarrolladas para describir la distribución de energía de las olas con respecto a la frecuencia, en la superficie. Esto es lo que se denomina espectro de energía.

1.3.3.3.2.1 Funciones teóricas de espectros de energía

Estos espectros teóricos están formulados por autores que han realizado registros reales de mar, o sea sus funciones matemáticas reproducen o representan espectros reales de mar. En las siguientes formulaciones teóricas se presentan los espectros actualmente más usados:

• Espectro de Pierson & Moskowitz

$$S_{(w)} = \frac{8.1 \times 10^{-3} \times g^2}{w^5} \times e^{-0.74 \left[\frac{g}{V_V \times w}\right]^4}$$

En donde:

 V_V : velocidad del viento a una altura de 19.5 m

w : frecuencia de ola componente

• Espectro I.T.T.C (Internacional Towing Tank Conference):

$$S_{(w)} = \frac{A}{w^5} \times e^{-\frac{B}{w^4}}$$

En donde:

$$A = 8.1 \times 10^{-3} \times g^2$$

$$B = \frac{3.11}{\left(h_{\frac{w_1^1}{w_3}}\right)^2}$$

Como se puede ver esta función espectral requiere de la altura de ola significativa para poder ser resuelta.

La I.T.T.C recomienda, cuando no se tiene este valor H_s y si se tiene la velocidad, los siguientes valores:

Velocidad del viento (Kn)	Altura de ola Significativa (m)
20	3.1
30	5.1
40	8.1
50	11.1
60	14.6

Tabla Nº 7 Alturas de olas según ITTC en función de la velocidad del viento

• Espectro I.S.S.C (Internacional Ship Structure Congress):

$$S_{(w)} = \frac{A}{w^5} \times e^{-\frac{B}{w^4}}$$

En donde:

$$A = \frac{173 \times \left(h_{\frac{w_{3}^{1}}{3}}\right)^{2}}{\left(T_{\frac{1}{3}}\right)^{4}}$$

$$B = 691 \times \left(T_{\frac{1}{3}}\right)^{-4}$$

• Espectro de "Jonswap":

$$S_{w} = \frac{0.076 \times (\overline{X})^{-0.22} \times g}{w^{5}} \times e^{-\left(\frac{5}{4} \times \frac{w}{w_{m}}\right)^{-4}} \times G$$

Donde:

•
$$G = (3.3)^d$$

• $d = e^{\left[\frac{-(w-w_m)}{(2\sigma^2 \times w_m^2)}\right]}$
 $\sigma = 0.07$ para cuando w < w_m
 $\sigma = 0.09$ para cuando w > w_m

$$\circ \quad w_m = \frac{2 \times \pi \times f_n \times g}{V_V}$$

$$\circ \quad f_n = 3.5 \times (\overline{X})^{-0.33}$$

• $\overline{X} = \frac{g \times X}{V_v^2}$; donde X es igual al Fetch

Sirve aclarar que los espectros de energía mostrados anteriormente, son puntuales unidireccionales, o sea, sería la función espectral que se espera en una zona determinada, en donde las olas del mar tienen una sola y bien definida dirección. Si se desea conocer el efecto de las olas en otras direcciones distintas a la predominante, ITTC e ISSC recomiendan el uso del espectro direccional. Gracias al espectro direccional tomamos en cuenta que la energía total de un estado de mar se compone de olas cuya dirección es levemente diferente a la dirección principal. En términos prácticos para hacer uso de la función espectral, ocupamos el valor de la varianza de ésta función que corresponde al área encerrada bajo su curva (m₀). Este valor puede ser usado en estadígrafos de predicción para oleaje, obteniéndose mucha información valiosa, entre ellos la altura de ola significativa.

$$m_o = \int_0^\infty S(w) \times dw$$

Ha modo de ejemplo se presentan los siguientes estadígrafos:

•	Altura media de olas	:	$h_{\overline{w}} = 2.5 \sqrt{m_o}$
•	Amplitud media de olas	:	$h_{\overline{a}} = 1.5 \sqrt{m_o}$

- Altura significativa : $h_{\overline{w}\frac{1}{3}} = 4.0\sqrt{m_o}$ • Amplitud significativa : $h_{\overline{a}\frac{1}{3}} = 2.0\sqrt{m_o}$
- Altura de ola más frecuente : $h_{\overline{w}f} = 2.0\sqrt{m_o}$ Amplitud de ola más frecuente : $h_{af} = \sqrt{m_o}$

Además podemos conocer la altura de ola probable más alta la que viene dada por:

$$h_{w \max.prob.} = \sqrt{m_o} \times \sqrt{\left(8 \times_e \log(N^\circ deObservaciones)\right)}$$

Como otro ejemplo del uso de la varianza (m₀) podemos ver la expresión para estimar la probabilidad de ocurrencia de corto plazo de una cierta altura o amplitud de ola dada:

$$P[h_a\rangle a] = e^{-\frac{a^2}{2m_o}}$$

De forma gráfica también podemos resolver las incógnitas de H_s y del T_s en función del Fetch y la velocidad del viento, conocidos son los monogramas del "US Army Corps of Engineers". Para un cálculo rápido y de mediana aproximación se presentan los siguientes monogramas:



Gráfico Nº 4 Gráfica del Fetch para aguas profundas (King 1972)



Gráfico № 5 Gráfica del Fetch para aguas oceánicas (Darbyshire y Draper, 1963)



Gráfico Nº 6 Gráfica del Fetch para aguas costeras (Darbyshire and Draper, 1963)

1.3.3.4 Metodología de cálculo

Ya se mencionó que el análisis del efecto de las olas sobre una estructura flotante mediante el método cuasiestático es complejo. Existen recomendaciones de investigadores y también consenso por parte de las instituciones que regulan y clasifican la construcción de estas estructuras en cuanto a los procedimientos seguidos para el cálculo se refiere.

Instalaciones fondeadas permanentemente se diseñan con el temporal de retorno de 50 años, a pesar de ello, la mayor altura de ola probable bajo esa condición como las condiciones medias de las olas son importantes. La mayor altura probable de ola, sirve para diseñar las condiciones del sistema de fondeo, para evitar la rotura instantánea de las líneas de fondeo.

Si pensamos en prolongar la vida útil de la instalación, los estudios que podamos realizar con los datos medios de las olas nos entregarían la posibilidad de comprobar los efectos probables de la fatiga, por ello ambos datos son importantes. El efecto exclusivo de las olas sobre un objeto flotando sobre el agua (sin viento ni corrientes) y además con una condición ideal de masa cero, experimentará un movimiento que puede ser dividido en dos componentes:

- Movimiento estacionario de deriva en dirección de la propagación de las olas.
- Movimiento circular periódico superpuesto

Ahora, cualquier objeto flotante responde al movimiento inducido por las olas, pero un cuerpo con masa presenta una inercia ante una excitación exterior como ésta, por tanto, no seguirá el movimiento dibujado por las olas.

A tener en cuenta que, la relación "Flotabilidad residual – Masa" es directamente proporcional a la respuesta que tendrá el cuerpo para seguir o no el movimiento que le impone la ola, o sea, cuanto mayor sea la relación "Flotabilidad residual – Masa" del cuerpo flotante, más se acercará su movimiento a ser idéntico al de la ola y dependiendo del movimiento que le impone ésta, serán, más o menos violentos.

La rapidez y la amplitud de los movimientos de una estructura, generados por las olas, dependen de dos factores:

- De la propia estructura
- De las características de las olas que inciden en él.

Una vez que ya tenemos claro la teoría y el comportamiento de la estructura, podemos avanzar hacia el siguiente paso que sería desarrollar el procedimiento de cálculo y que por supuesto, tiene que estar en concordancia con los cálculos anteriores, o sea, ceñirse a lo estipulado por alguna Sociedad de Clasificación o por alguna institución reconocida en este medio.

Según ABS; Parte 3, Capítulo 1, Sección 2, *"Cargas medioambientales; Cargas por oleaje"* la formulación semi-empírica, como la de Morrison, puede ser usada en estructuras esbeltas las cuales no modifican significativamente el campo de olas incidentes. Para calcular cargas de ola en estructuras que modifican significativamente el oleaje, se deben usar métodos de difracción, por ejemplo, Froude – Krylov y las fuerzas resultantes de la difracción y reflexión del oleaje.

Es aquí en donde encontramos una diferencia importante entre el procedimiento de cálculo para una balsa jaula y un dique rompeolas flotante, sin embargo igual aplicaremos la ecuación de Morrison por facilidad de cálculo y que en términos prácticos esta aprobada para estructuras que están sometidas a condiciones más adversas.

Debido a que éste procedimiento de cálculo viene dado de las plataformas offshore, su aplicación está condicionada a este medio, por ello no es difícil de comprender porqué los valores de coeficientes o las recomendaciones en algunos valores estén todos orientados hacia los pilares de tipo cilíndrico, pero también ellos indican que en las fórmulas en donde se ve involucrada el área del cilindro, ésta se puede reemplazar por el área de la estructura que estemos analizando.

Esta formulación considera a la fuerza hidrodinámica actuando normal al eje de una estructura cilíndrica, y que dada por la ecuación de Morrison, la que se expresa como la suma de vectores de las fuerzas de "arrastre" y la de "Inercia", teniéndose que:

$$F_w = F_D + F_I$$

En donde:

 F_W : fuerza hidrodinámica por unidad de longitud a lo largo del miembro, actuando normal al eje de dicho miembro.

F_D : es la fuerza de arrastre o *"Drag"* por unidad de longitud

F₁ es la fuerza de inercia por unidad de longitud

Desglosando estas fuerzas tenemos que:

La *fuerza de arrastre* por unidad de longitud para un elemento rígido y estacionario viene expresado como:

$$F_D = \left(\frac{C}{2}\right) \times D \times C_D \times u_n \times (u_n)$$
 (kNt/m)

Donde:

C : 1.025

D : ancho proyectado en metros, del elemento en la dirección de la componente de velocidad perpendicular al flujo

C_D : coeficiente de arrastre (adimensional)

u_n : componente de la velocidad, normal al eje de elemento en (m/s)

 (u_n) : valor absoluto de u_n en (m/s)

La *fuerza de inercia* por unidad de longitud para un elemento rígido y estacionario está dado por:

$$F_I = C\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)C_M \times a_n \text{ (kNt/m)}$$

En donde:

 C_M : coeficiente de inercia basado en la masa del fluido desplazado por unidad de longitud (adimensional)

 a_n : componente del vector aceleración, normal al eje del elemento en (m/s²)

El área de la sección transversal $\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ para una estructura que tenga

otra forma no cilíndrica, puede ser reemplazada por el valor correspondiente a la nueva sección.

Los valores de velocidad y aceleración pueden ser calculadas por las teorías de ondas que ya hemos visto, pero siguiendo con el reglamento, éste nos entrega un set de ecuaciones para obtenerlos:

Para la velocidad del agua:

• Horizontal $V_x = 0.5\omega h_w e^{-kh} \cos(kx - \omega t)$

• Vertical
$$V_y = 0.5\omega h_w e^{-kh} sen(kx - \omega t)$$

Para la aceleración:

- Horizontal $\alpha = 0.5\omega^2 h_w sen(kx \omega t)$
- Vertical $\alpha = -0.5\omega^2 h_w \cos(kx \omega t)$

Dentro de éste mismo procedimiento podemos incluir la carga por impacto de oleaje el que nos será muy útil por la naturaleza del proyecto.

Borgman (1965) menciona que las olas grandes ejercen fuerzas mayores a las esperadas de ellas en función de su altura, es lo que denominamos golpe de ola o efecto "*slamming*" la que tiene sus ya conocidos efectos, por ejemplo, la fatiga.

La fuerza de slamming puede calcularse según una expresión entregada por la Lloyd's Register y que se presenta a continuación:

$$F_{\text{slamming}} = C_{\text{s}} \times \frac{\rho}{2} \times D \times U^2$$
 (Nt)

En donde:

- C_s : coeficiente de golpes por olas (se recomienda 3.5)
- D : diámetro local efectivo del miembro (m)
- U : velocidad relativa del agua normal a la superficie (m/s)

Otro factor importante es que por su naturaleza, el DRF debe reflejar las olas y debido a eso en estas estructuras flotantes se produce otra fuerza, la fuerza de *"deriva"* ó *"wave drift",* la magnitud de esta fuerza depende del período de la ola.

La ecuación que define a la fuerza de deriva es la siguiente:

$$F_{wavedrift} = C_{wd} \left(\frac{\rho \times g}{2}\right) \times LC \times \left(\frac{H}{2}\right)^2$$

En donde:

- C_{wd} : coeficiente por resistencia por wave drift (0.8 1.2)
- H : altura de la ola a considerar (m)
- LC : longitud (paralelo al flujo) característica del cuerpo (m)

También podemos estimar, de una forma más conservadora, la fuerza de deriva, no considerando la modelación de la estructura y tomando en cuenta que la estructura refleja todas las olas, cuya situación es la de mayor transmisión de energía.

Las expresiones son las siguientes:

$$F_{wd} = \rho \times g \times L \times \left(\frac{H_s^2}{16}\right)$$
 Para mares irregulares

$$F_{wd} = \rho \times g \times L \times \left(\frac{H_s^2}{8}\right)$$
 Para mares regulares

En donde:

F_{Wd} : fuerza de deriva (Nt)

- ρ : densidad del agua (Kg/m³)
- g : aceleración de gravedad (m/s²)
- L : longitud del elemento de la estructura considerado (m)
- H_S : altura de ola significativa (m)

CAPITULO II

2.0 Generalidades Sobre los Rompeolas Flotantes

Se ha hablado de dique rompeolas flotante (DRF) con total soltura en el capítulo anterior, esto se debe directamente ha que ese es su perfil de misión, ahora si tomamos las definiciones entregadas por el Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Portuarias de la Republica de Chile tendremos el respaldo de ello. Este ente gubernamental define como:

- Dique : obra destinada a lograr superficies de aguas tranquilas al interior de su trazado, cuando un oleaje la azota por el lado exterior.
- Dique de abrigo : ídem al anterior.
- Dique reflectante : donde el oleaje se refleja sin destruirse el movimiento ondulatorio.
- Dique rompeolas : se diseña para mitigar la acción del oleaje, destruyendo el movimiento ondulatorio.

2.1 Rompeolas

Los rompeolas son estructuras usadas para atenuar o eliminar a las olas. Estos ayudan a prevenir daños en las líneas costeras, puertos y en otras construcciones hechas por el hombre, por ejemplo balsas jaulas.

Existen dos tipos de rompeolas, las "barreras solidarias al suelo marino" y aquellas en estudio en ésta tesis, los "rompeolas flotantes", éste último sólo tiene limitaciones en su movimiento debido a sus líneas de fondeo.

Nadie puede negar la importancia de estas estructuras, ellas han jugado un rol importante, por ejemplo en la invasión en Normandía, en la protección que han brindado en las costas que comenzaron a poblarse de forma explosiva desde el año 1960 y de su importancia en la protección de estructuras costas afuera, sólo por dar algún ejemplo.

Pasando rápidamente a las ventajas de los rompeolas podemos apuntar las siguientes:

1. Los DRF son estructuras más económicas que aquellas solidarias al suelo marino en aguas profundas.

 Pueden atenuar efectivamente alturas de olas moderadas (menores o iguales a 2 m).

3. Pobre condiciones del suelo, pueden hacer más factible la utilización de un DRF que utilizar escombros de alto tonelaje como rompeolas artificial.

4. Producen una mínima interferencia en la circulación de corrientes, transporte de sedimentos y en la migración de peces.

5. Pueden ser movidos con facilidad y ser ubicados en distintas posiciones o bien ser transportados a otro lugar.

Algunas desventajas de los DRF son:

1. Los DRF son menos efectivos a la hora de atenuar alturas de olas reducidas que las estructuras fijas; en la practica el limite superior para el período de diseño de la ola esta en el rango de entre 4 a 6 segundos (igual que para un mínimo de frecuencias de entre 1.0 rad/seg a 1.6 rad/seg).

2. Son susceptible a las fallas estructurales durante catástrofes como tormentas.

3. Si la estructura falla en su sistema de anclajes, el rompeolas puede convertirse en un peligro.

4. En comparación con un rompeolas fijo o artificial, un DRF requiere una elevada mantención.

Podemos contar también con aquellas ventajas de los DRF utilizando estructuras o cuerpos "inflables", algo que es relativamente nuevo y que apunta ha convertirse en una muy buena solución.

Algunas ventajas de este sistema son:

1. Opuesto a un rompeolas rígido, que absorbe la energía de las olas por su masa y su sistema de fondeo, los rompeolas de cuerpos inflables pueden absorber esta energía a través de las deformaciones de su estructura.

2. Cuando el rompeolas no es requerido, puede ser desinflado y retirado de forma eficiente

3. El rompeolas puede ser inflado en tierra o sobre un barco

Algunas de sus desventajas son:

- 1. El proceso de inflado y remolque puede encarecer el sistema
- 2. La estructura sufre el riesgo de ser agujereada o pinchada.

Hoy existen muchos tipos de DRF, estos pueden estar construidos con diferentes materiales, formas y sistemas de fondeo. Todas estas variables pueden generar una larga lista de posibles DRF, aún así, todos ellos pueden ser clasificados dentro de cuatro grupos básicos:

- Caja (Box-type)
- Pontón (Pontoon)
- Mat
- Tethered

Los DRF del tipo "Box" son de concreto reforzados, formados por módulos rectangulares, conectados con medios rígidos o flexibles a otros módulos, pueden constituir un DRF de mayor longitud.

Pueden también, ser construidos en módulos de acero o incluso formado por gabarras o barcazas. Estas estructuras pueden tener variados usos, incluyendo el uso recreacional y fondeo de botes.

La principal desventaja de estas estructuras es que, se considera de alto costo comparado con un tipo "tires" y requiere de una alta mantención. Uno de los parámetros que restringe el diseño de estas estructuras es su relación "ancho efectivo de estructura – Longitud ola", cuando éste valor se incrementa, el coeficiente de transmisión de la ola aumenta. El coeficiente de transmisión de la ola es la relación entre la altura de la ola después de que ha chocado en el DRF y la altura de la ola incidente. Se entiende que para propósitos de diseño, el coeficiente de transmisión de la ola ser el más bajo que permita el caso dado, esto indicaría que las alturas de olas se verían disminuidas (ver capitulo III para mayor información).

El DRF tipo pontón ó "Pontoon types" incluye en su categoría a diferentes modelos tales como, el tipo "escalera", "catamarán", "pontón pendiente" y el denominado "frame type" o tipo cerco o marco. Estas estructuras prismáticas son ideales para otros usos como pasillos flotantes, de resguardo de bahías, fondeadero de botes ó embarcaderos para pesqueros. Los tipos pontón son generalmente más económicos que los "box types" y sus ventajas y desventajas son similares.

Es importante destacar a aquellos DRF formados por neumáticos, unidos entre si y que en conjuntos forman un efectivo abrigo conocidos también como "Tires Mat". Especialistas en estos diseños son, la conocida empresa Goodyear y le siguen Wave Maze y Wave – Guard.

Algunas de las ventajas de de los tires mat son por ejemplo, su bajo costo, diseño y construcción simple, muy versátil, bajas cargas a los fondeos y mayor efectividad que los tipos box y pontón. Dentro de su desventajas se tiene su falta de boyantes, un vida útil de 15 a 20 años, no amortiguar efectivamente a olas de larga longitud, presentan problemas por efecto de enfriamiento excesivo, además de no ser construidos adecuadamente pueden convertirse en escombros flotantes.

El último tipo de DRF es el Tethered o moored que traducido sería algo así como fondeado ó anclado, todos los DRF son fondeados, pero éste recibe su nombre porque no utiliza su masa para atenuar a las olas, sino que, usa su sistema de fondeo para disipar esta energía. Cuando las olas mueven el rompeolas el sistema de fondeo restringe éste movimiento, entonces la energía de la ola es transferida a las anclas y después al suelo marino disipando la altura de ola. Estos pueden tener una sección rectangular y puede estar sumergido ó parcialmente sumergido.

La verdad es que, la información al respecto de este DRF, es muy escasa y poco clara, y la investigación entorno a ellos es muy tenue, por lo cual es mejor no referirse al tema por ahora.

Para el conocimiento común, también podemos mencionar, que existen rompeolas muy distintos a los anteriores en su estructura y principio de funcionamiento, estos son los rompeolas "Neumáticos" y los "Hidráulicos".

Un rompeolas neumático utiliza aire a presión y uno hidráulico utiliza agua a presión, ambos son bastantes antiguos, el primero data desde el año 1915.

No existe claridad en su efectividad, por lo cual nunca se ha expandido su uso, además los estudios sobre el fenómeno de control de olas por burbujas de aire no llegan a consenso en sus resultados. Sin embargo, de todos los paper informativos sobre el tema, si concuerdan en una cosa, la alta cantidad de energía que se requiere para el funcionamiento de una planta real, o sea, se necesita mucho poder, lo que hace al método impracticable.

A continuación se presentan algunos modelos que representan, ingenio, creatividad y uso adecuado de recursos.

• R1:

Este rompeolas flotante de hormigón está concebido para servir de atenuador del oleaje producido por el viento, en zonas semi-abrigadas. Su diseño está optimizado para atenuar oleajes de hasta 5,0 segundos de período (Ts) y 1,8 metros de altura de ola (Hs).

Características Principales

ESLORA	20,00 m.
MANGA	4,00 m.
PUNTAL	1,80 m.
FRANCOBORDO	0,60 m.
PESO	55 Tm.
FLOTABILIDAD	450 Kg./m2
HORMIGON	H-400
POLIESTIRENO	15 Kg./m3.



• R2:

Este rompeolas está diseñado para aguas algo más abrigadas que el anterior y esta calculado para atenuar olas producto del viento y por el paso de buques. Puede atenuar olas de hasta 4.0 segundos de período (Ts₎ y 1,2 metros de altura de ola (H_s), además puede utilizarse como fondeadero ó muelle de amarre.

ESLORA	12,00 & 20,00 m.
MANGA	3,00 m.
PUNTAL	1,20 & 1,80 m.
FRANCOBORDO	0,60 m.
PESO	24 & 40 Tm.
FLOTABILIDAD	450 Kg./m2.
HORMIGON	H-400
POLIESTIRENO	15 Kg./m3.



• R2:

Este atenuador es más sofisticado está construido en materiales como aluminio, madera y acero galvanizado, entre otros. Posee un panel corrugado que sirve de filtro para la onda de mar, disipando su energía. Su flotabilidad se la da unos flotadores similares a los utilizados en balsas jaulas.

ESLORA	14.60 m.
MANGA	1.83-3.66 m.
PUNTAL	1.22 m.
FRANCOBORDO	0.305-0.914 m.
PESO	5.000-10.000 lbs.



• R4:

El siguiente rompeolas es de construcción muy simple y su forma dista bastante de las anteriores, pero su eficiencia no. Esta diseñado para usos variados como atenuar olas, de barrera para zonas de nado, control de la erosión costera, etc.



• R5:

El siguiente rompeolas presenta un avance notable en cuanto a diseño. Su forma, diseñado incluso para usos militares, sirve perfectamente como atenuador del oleaje y para el control de la erosión costera.



En una de estas últimas imágenes, se puede apreciar, claramente, el efecto atenuador de éste rompeolas.

Todos los DRF anteriores obedecen a distintas formas, y sin embargo cumplen todos sus cometidos, debido a que, y como ya se había mencionado la energía de las olas se puede atenuar o eliminar de distintas maneras, unos reflejan las olas, las absorben o las destruyen.

Ahora debemos entrar al proceso de la selección de nuestro cuerpo flotante. Además de lo ya visto en cuanto a la forma de disipar energía sus ventajas y desventajas, como todo proyecto, éste no siendo la excepción, también depende de otros factores, incluso que llegan a ser más preponderantes que los ya mencionados. Primero está el nacimiento de ésta tesis, su concepción se debió al interés de una empresa por proteger su cultivos acuícolas y también de poder emplazar en zonas poco protegidas nuevos centros de cultivo, utilizando para ello un gran stock de contenedores de 40'. El segundo factor que pesa, es el estudio basado en la viabilidad de un rompeolas, del cuál, se busca poder comparar y analizar su información con la nuestra, obtenida por medios experimentales. Este informe se basa en un contenedor de 40'.

Por tanto todo apunta al estudio de un cuerpo prismático del tipo sección rectangular de dimensiones y propiedades mecánicas homologadas a las de un contenedor de 40'. Este cuerpo también facilitará el estudio hidrodinámico en el tanque de pruebas, lo que se mencionará en forma extensa en el capítulo siguiente.

2.2 Elección del cuerpo a estudiar

Así el DRF estará conformado con un cuerpo prismático rectangular, con lo cual puede entrar en la clasificación de los DRF del tipo pontón, asumiendo sus ventajas y sus desventajas. Queda fuera del alcance de ésta tesis, la parte estructural, salvo, el análisis final para la elección del tipo de cara viva a usar.

Por tanto se considerará un cuerpo rectangular, formado por seis lados paralelos, cuyas dimensiones corresponden a un contenedor de 40 pies.

Dimensiones principales Largo : 12 m Ancho: 2.4 m Alto : 2.4 m



Figura Nº 7 Contenedor de 40 pies

CAPITULO III

3.0 Aspectos Hidrodinámicos y Ensayos de Canal

3.1 Objetivos principales

Se busca poder determinar en éste capitulo, los principales aspectos hidrodinámicos relevantes a un artefacto de este tipo, estudiando básicamente, sus movimientos principales influenciados por su función como rompeolas flotante (Heave y Roll).

Estudiar los parámetros de eficiencia del cuerpo seleccionado, otorgando un marco teórico claro y conciso sobre la performance de un rompeolas flotante.

Describir y analizar el ensayo en el tanque de pruebas, realizado para el DRF definido en el capítulo anterior y que tiene como objetivo demostrar la eficiencia aproximada de este cuerpo en una situación ideal de estudio.

3.2 Aspectos Hidrodinámicos

Nos interesa definir ciertas características hidrodinámicas por lo cual se dejó un apartado exclusivo para ello. En este apartado, encontraremos los datos hidrodinámicos del DRF, con una obtención rápida a través de maxsurf, así y sin mayores inconvenientes se obtendrán datos como los radios y alturas metacéntricas.

El objetivo es encontrar los periodos de Roll y Heave, que son los dos movimientos a los cuales se prevé que el DRF estará sometido constantemente.

Estos períodos serán estudiados también, en el tanque de pruebas, de ser posible.

La experiencia ha dictado que muchas fallas en los fondeos de estos artefactos se deben por resonancias en las frecuencias de movimientos como el Heave, además para nosotros tiene otro especial interés, si éste movimiento se acopla al de las olas, no existirá atenuación alguna de ellas, de ahí la importancia de conocerlo y controlarlo.

3.2.1 Movimiento de Heave

El movimiento de Heave pertenece a los movimientos oscilatorios que generan fuerzas y momentos de restauración de un cuerpo flotante, junto con el Roll y el Pitch. Un cuerpo flotante, en realidad, experimenta una combinación de algunos o de todos los modos, pero en una primera aproximación de cálculos estos se estudian desacoplados y bajo modelos lineales.

En el caso de una oscilación libre o "Heave libre", el desplazamiento hacia arriba desde la posición de equilibrio hasta el punto extremo superior es igual a la distancia desde el punto de equilibrio hasta la posición extrema inferior. Esta magnitud es conocida como "amplitud del movimiento de Heave" y el tiempo requerido para un ciclo completo se denomina "período de Heave".

En un movimiento armónico simple, el período de oscilación es independiente de la amplitud de la oscilación. El movimiento de Heave libre se considera como un movimiento armónico, por lo cual al periodo de Heave se le conoce como "Período natural" y la frecuencia de oscilación correspondiente, se denomina "frecuencia natural".

Ahora, si consideramos la amortiguación o "damping" la amplitud de oscilación disminuye gradualmente hasta que el cuerpo flotante finalmente se detiene en su posición de equilibrio original.

El período será ligeramente mayor en la oscilación amortiguada.

El caso más real en Heave sería para una oscilación forzada y amortiguada, considera al cuerpo oscilando verticalmente por una fuerza fluctuante, pero periódica. Por un cierto lapso de tiempo el movimiento será irregular, lo que se conoce como "oscilación transciente", pero si contamos la amortiguación, ésta devuelve el movimiento regular, quedando una "oscilación de estado permanente".

La frecuencia natural en Heave analizado en forma simplificada como lineal y desacoplado de otros modos de movimiento, se define como:

$$W_Z = \sqrt{\frac{C_{33}}{(M + A_{33})}}$$

Donde:

C ₃₃	: coeficiente de restauración de Heave desacoplado, lineal
M + A ₃₃	: coeficiente de masa virtual en oscilación de Heave desacoplado

Entonces podemos definir el período natural en Heave como:

$$T_Z = \frac{2\pi}{W_z}$$

La frecuencia de Heave con amortiguación se escribe como:

$$W_d = \sqrt{\left(W_z^2 - N^2\right)}$$

Donde:

$$N = \frac{B_{33}}{2(M + A_{33})}$$

Importante es saber si podemos tener un acoplamiento peligroso entre el movimiento propio y el inducido, o sea, medir el factor de sintonía entre la frecuencia natural de Heave y la frecuencia de encuentro, así tenemos que:

$$\Lambda = \frac{W_E}{W_Z}$$

Los coeficientes A_{33} , B_{33} y C_{33} corresponden al coeficiente de masa virtual en Heave, al coeficiente de amortiguación o de damping y al coeficiente de restauración, todos ellos lineales y desacoplados.

Los coeficientes A₃₃ y B₃₃ se pueden calcular analíticamente de diversas formas por ejemplo, por la teoría de fajas o "Strip Theory". A continuación se muestra el procedimiento rápido de cálculo, para estos coeficientes.

Se demuestra en mecánica de fluidos que cuando un cuerpo se mueve con aceleración en un medio fluido, la fuerza para acelerarlo es mayor que el producto de su masa por la aceleración. Esta fuerza de aceleración se calcula según la ley de Newton considerando que la masa a acelerar es la del cuerpo más una cantidad adicional.

Experimentos han demostrado que la cantidad de ésta masa adicional en movimiento de Heave, es del orden de 0.8 a 1.1 de la masa del cuerpo flotante.

El procedimiento más exacto de cálculo por Strip theory, por ejemplo, parte de la base de una franja de sección circular que tiene una masa adicional dada por:

$$a_{33} = \frac{\rho \times \pi \times B_n^2}{8}$$
; Para una sección de buque, por ejemplo,

sería:

$$a_{33} = \frac{C \times \rho \times \pi \times B_n^2}{8}$$
; Donde C se define como la constante

de Lewis, autor que ha propuesto sus valores a través de gráficos y B_n es la manga del cuerpo flotante.

Entonces para obtener la masa adicional del buque integramos de la forma siguiente:

$$A_{33} = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} a_{33} dx$$

3.2.1.2 Coeficiente de Amortiguación desacoplado y Lineal (B₃₃)

El coeficiente de damping normalmente depende de factores tales como:

- Tipo de Movimiento Oscilatorio
- Frecuencia de encuentro Cuerpo Ola
- Formas de la carena

Su cálculo es ídem al coeficiente A₃₃, ósea, por el Strip Theory, además asume que éste coeficiente se debe principalmente a olas generadas, y por tanto su valor está directamente relacionado con la amplitud de ellas.

Se define el coeficiente de damping, para una franja de largo diferencial como:

las olas irradiadas y la amplitud del movimiento de Heave. Este valor se conoce como la constante de Grim y se puede obtener de los gráficos que O. Grim. ha entregado.

Para la totalidad del cuerpo flotante, buque o artefacto de relaciones geométricas similares, se tiene que:

$$B_{33} = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} b_{33} dx$$

3.2.2.3 Coeficiente de restauración C₃₃ desacoplado y lineal

La fuerza de restauración en Heave se debe al empuje adicional que se produce cuando el cuerpo flotante es sumergido una cierta cantidad. Se asume que si esta variación de calado es pequeña, la fuerza de restauración corresponde al peso del agua desplazada o empuje. Por lo tanto el coeficiente de restauración es igual a:

$$C_{33} \cong g \times A_{WL} \times \rho$$

En la siguiente página se muestran los gráficos para obtener las constantes de Lewis y Grim. Estas curvas están definidas para una constante y una relación. La constante es el coeficiente de la maestra y la relación es aquella que divide la manga por el calado.



 $\label{eq:Grafico N^0 7} Gráfico N^0 7 \\ Constante de Lewis para \beta_n = CM = 1 \\$



Gráfico Nº 8 Constante de Grim para $\beta_n = CM = 1$

3.2.2 Movimiento de Roll

En Roll se describen los coeficientes de amortiguación, restauración e inercia adicional. La inercia adicional se suma a la inercia de la masa del cuerpo flotante obteniéndose la inercia virtual en Roll, expresándose como:

$$I_V = I_{XX} + A_{44}$$

También:

 $I_V = \frac{\Delta}{g} \times K_{XXV}^2$; El radio de giro se puede estimar como un valor entre 0.33 y 0.45 veces la manga.

3.2.2.1 Coeficiente de amortiguación (B₄₄) desacoplado y lineal

Se debe principalmente por la generación de olas. Este damping calculado sin los efectos de la fricción y generación de remolinos, puede ser una aproximación buena en general.

Por la teoría de fajas tenemos para una sección de la carena:

$$b_{44} = \frac{\rho \times g^2}{W_e^2} \left(\frac{B_n}{2}\right)^2 \overline{A}_{\phi}^2$$

En que:

$$\overline{A}_{\phi} = d_{\phi} \left[\frac{W_e^2 \times B_n}{2g} \right]^2$$
En donde d_{Φ} ha sido propuesto por Lewis y se puede ver en el siguiente gráfico:



Gráfico № 9 Coeficiente d_o para determinar el amortiguamiento en Roll

3.2.2.2 Coeficiente de Restauración (C44) desacoplado y lineal

Este corresponde al efecto del momento de adrizamiento en cualquier ángulo de escora.

Se expresa como:

$$C_{44} = \rho \times g \times \nabla \times GM$$
 T; Válido para ángulos pequeños (12º a 15º)

Con los coeficientes definidos escribimos la frecuencia, el período y el factor de sintonía para el movimiento de Roll en olas regulares.

• Frecuencia Natural de Roll

$$W_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{C_{44}}{(I_{XX} + A_{44})}\right)} \quad ; y \text{ la amortiguada } W_{d} = \sqrt{(W_{\phi}^{2} - N^{2})}$$

Donde

$$N = \frac{B_{44}}{2 \times (I_{XX} + A_{44})}$$

• Factor de sintonía:

$$\Lambda = \frac{W_e}{W_{\phi}}$$

Y luego el período de Roll: $T_{\phi} = \frac{2\pi}{W_{\phi}}$ y el amortiguado $T_{\phi} = \frac{2\pi}{W_d}$

3.2.3 Datos obtenidos para los movimientos de Heave y Roll

3.2.3.1 Características generales e hidrostáticas

Ítems	Valor	Unidades
Longitud	12.00	m
Ancho	2.40	m
Alto	2.40	m
Desplazamiento	40.60	ton
Volumen	39.59	m^3
Calado desde LB	1.38	m
Eslora a la flotación	12.00	m
Manga a la flotación	2.40	m
Área en la flotación	28.79	m^2
Ср	1.00	
Cb	1.00	
Cm	1.00	
Сwp	1.00	
LCB	6.00	m
LCF	6.00	m
КВ	0.69	m
KG	0.00	m
BMt	0.35	m
BMI	8.72	m
GMt	1.04	m
GMI	9.41	m
KMt	1.04	m
KMI	9.41	m
Inmersión (TPc)	0.30	ton/cm
МТс	0.32	ton.m
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	734.10	ton.mm

Hidrostáticas Contenedor 40'



Valores gráficos para Heave:

Gráfico Nº 10 Coeficientes A33 y B33



Gráfico Nº 11 Frecuencias de Heave en función del período

En las hidrostáticas se debe considerar que se estudio con un calado aproximado de 1.4 metros, valor que se justificará en la parte de eficiencia de un rompeolas flotante.

Se analizó el factor de sintonía para los períodos de olas que son de importancia para el estudio del contenedor (rango de 1 a 8 seg. aprox.) y se encontró que las frecuencias de Heave y la frecuencia de las olas, se igualan para un período aproximado entre 3 a 3.5 seg. Esta ola tiene una longitud cercana a los 15 metros.

Físicamente, ésta sincronización de frecuencias, significa un mayor esfuerzo en los puntos de anclaje y a la línea de fondeo en si, debido a que el cuerpo presentará una mayor respuesta a ésta excitación y su amplitud de movimiento vertical será mayor a lo usual.

Por lo tanto, el fondeo debe cumplir la misión de encontrar el equilibrio entre rigidez y flexibilidad, o sea, deberá evitar los movimientos que lo puedan volver ineficiente y también darle la libertad para que las cargas puedan transmitirse sin mayores inconvenientes.

Aquí ya se puede encontrar la primera desventaja de éste cuerpo, su gran masa. Al ser sacado del reposo generará grandes cargas al fondeo y además, las frecuencias que involucran sintonía son de alta probabilidad lo que implica una carga impuesta de régimen casi permanente.

Para Roll los resultados fueron los siguientes:

Tw (seg)	WΦ (rad/seg)	TΦ (seg)	Factor de Sintonía	Long. Ola
4.3	2.28	2.24	0.52	28.87

El período 4.3 segundos es el promedio de los períodos estudiados para el movimiento de Heave, esto, al no tener datos del período significativo. Se encontró que un período de 2.24 segundos de duración provocaría sincronía.

Los valores se calcularon con valores distintos a las hidrostáticas vistas anteriormente (ver anexo con procedimiento de cálculo).

La tendencia apunta entonces a movimientos constantes de sincronismo o cercanos a él, por lo cual se debe tener sumo cuidado con el fondeo de éste cuerpo, sus refuerzos y las zonas adyacentes a los tiros.

3.3 Eficiencia de un rompeolas flotante

De los criterios para medir la eficiencia, actuación en su medio, ó "Performance", de un rompeolas flotante, él más importante, es la cuantificación de la transmisión de la ola incidente.

Las presiones dinámicas también son valores importantes de cuantificar, debido a que podemos utilizarlos para calcular fuerzas y momentos, esfuerzos de trabajo y por último medir su vida útil, ósea, son valores que deben tomarse en cuenta en la eficiencia del DRF.

El coeficiente de atenuación K_T relaciona las alturas de las olas transmitidas y las incidentes.

Un valor de K_T = 0.5 ó menor, es indicativo de una excelente performance, al transmitirse sólo la mitad de la ola incidente. El valor de K_T está basado en el rango completo de frecuencias de las olas incidentes. Un coeficiente de transmisión que está en función de la frecuencia K_T (f) se calcula en primera aproximación como la relación de alturas de olas a las frecuencias de ellas en forma individual. Esta aproximación es justamente la que buscamos en nuestro ensayo en el tanque de pruebas.

La expresión de ésta aproximación es:

$$K_{T}(f) = \frac{a_{T}(f)}{a_{I}(f)} = \frac{H_{T}(f)}{H_{I}(f)} = \sqrt{\frac{S_{T}(f)}{S_{I}(f)}}$$

Donde:

 $a_T(f)$: amplitud de ola transmitida como función de la frecuencia

a_l(f) : amplitud de ola incidente como función de la frecuencia

- $H_T(f)$: altura de ola transmitida como función de la frecuencia
- H_I(f) : altura de ola incidente como función de la frecuencia
- $S_T(f)$: espectro de ola transmitida
- S_I(f) : espectro de ola incidente

El coeficiente de transmisión de ola K_t, depende fuertemente del período de la ola incidente, pero no completamente. Es muy común entonces, que el K_t se trace gráficamente en función del período, pero también se puede graficar como función de la relación del ancho efectivo del rompeolas (longitud en el sentido de viaje de las olas) y la longitud de la ola.

La siguiente ecuación tiene una carácter especial, en ella se asume la no disipación de energía y puede ser derivada del campo de la conservación de la energía de la ola:

$$a_i^2 = a_t^2 + a_r^2$$

Donde:

 a_r : amplitud de la ola reflejada ($H_r/2$)

Esta ecuación nos indica que la amplitud de la ola transmitida, lo que es equivalente a la altura, se puede reducir por el incremento de la reflexión. Esto incide en que, una estructura de gran calado puede, en ciertos casos, ser más efectivo que una estructura con poco calado. Si esto no es siempre así, se debe a que la transmisión de la ola no depende solamente de la geometría, sino también de los movimientos dinámicos del rompeolas.

A continuación podemos analizar los resultados obtenidos para el coeficiente de transmisión de un modelo DRF tipo cajón rectangular realizado en un tanque de pruebas (Carver 1979). Como características principales de este cuerpo ensayado, está su ancho efectivo de 4.9 metros y un calado de 1.1 metros, además estaba fondeado con cadenas y anclas a una profundidad de agua de 7.6 metros.

Los resultados se muestran gráficamente en el gráfico Nº 12 como función del período y como función de la relación ancho efectivo y longitud de ola.



Gráfico Nº 12 Coeficiente de transmisión (Carver 1979)

De la gráfica en función del período, podemos ver claramente la dependencia del K_t con éste, tomando valores altos para olas largas y valores relativamente pequeños para las olas cortas.

De la gráfica en función de la relación ancho efectivo y longitud de ola se observa que, cuando la longitud de la ola crece el coeficiente de transmisión disminuye (B/L decrece). Entonces podemos decir que la habilidad del rompeolas para reducir olas, decrece, dramáticamente cuando la longitud de la ola incidente se acerca a la longitud del ancho efectivo. De todas formas este concepto se puede encontrar intuitivamente, el rompeolas hace muy poco por reducir las olas cuando sus dimensiones son pequeñas comparadas con las dimensiones de la ola.

Se debe tener sumo cuidado con las interpretaciones de los resultados que se han presentado, producto de interpretaciones erróneas, proyectos de DRF se han convertido en basura flotante.

Por ejemplo del gráfico en función de la relación ancho efectivo y longitud de ola un valor de K_t de 0.4, se podría tomar también para una estructura de forma rectangular similar al del estudio con tal que sólo se cumpla que la relación B/L sea igual o menor a 0.4.

Para el caso estudiado por Carver el ancho efectivo de su estructura es de 4.9 metros y la longitud de ola que corresponde a una relación B/L igual a 0.4 es de 12.2 metros, si tomamos una ola con el doble de longitud que la anterior tenderemos a pensar que para reducir la altura de ola incidente en un 40% el ancho efectivo del rompeolas deberá ser de 9.8 m por qué simplemente estaremos manteniendo la relación B/L igual a 0.4.

La razón por la cuál no se puede conjeturar esto, es que un aumento en el ancho efectivo del DRF aumentaría a su vez la masa del rompeolas y la inercia rotatoria lo que tendría un efecto dramático en la respuesta del movimiento del DRF frente a la ola incidente.

Para aguas profundas d/L > 0.5, las olas con períodos cortos tienen su energía concentrada cerca de la superficie en donde flota el rompeolas, donde el 70% de la energía cinética se concentra en una zona comprendida en el 20% superior de la columna de agua (olas de períodos cortos cercanos a los 5 segundos).

Por ello una barrera lo bastante rígida puede bloquear una parte importante de la energía de la ola, aunque el calado o la inmersión sea menor que la profundidad total de la comuna de agua afectada.

Una barrera que bloquea la mitad superior de la columna de agua, podría reducir hasta un 96% de la energía de la ola incidente, transmitiendo así sólo un 4%, lo que equivale a un coeficiente de transmisión de 0.2, asociada a olas pertenecientes a un estado de mar 3 ó marejada (en mares desarrollados).

Para aguas de transición y aguas bajas d/L < 0.5, la misma barrera y que también ocupa la mitad de la columna de agua, transmitiría un 50% de la energía de la ola.

Para lograr una reducción de un 96% como en el caso anterior, la profundidad de inmersión o el calado tendría que ser de un 90% a un 95% de la profundidad de la columna de agua. Basados en estudios y ensayos en terreno, el investigador Jones (1971) encontró que la velocidad de grupo, pendiente de la ola y la longitud del rompeolas relativa a la dirección paralela de viaje de ellas, son los parámetros más importantes que afectan la atenuación de la ola.

Para rompeolas flotantes alineados en dirección normal a la dirección de viaje de las olas, la longitud relativa (ancho del rompeolas en la dirección de viaje de la ola) debe ser mayor a la unidad. En general para una longitud de ola dada, y si el calado es pequeño, la longitud relativa debe ser más grande y viceversa. Así si el calado es relativamente poco profundo, el ancho efectivo del rompeolas necesita ser mayor para compensar. Jones (1971) también informó, sobre pruebas anteriores y estudios que mostraron que, razones de 1:4 ó 1:3 (calado : ancho efectivo), son proporciones que previenen que el rompeolas actué como un generador de olas.

Como ya se había mencionado, una cantidad de la energía de la ola incidente se refleja por la estructura y otra cantidad pasa por debajo (o por encima) del DRF. Además la acción de las olas incidentes, excita movimientos en el DRF haciendo que se comporte como un generador de olas (como el generador de un tanque de pruebas). Por lo tanto el total transmitido es la suma de los componentes que pasan por debajo (o por encima), más la componente de las generadas por el mismo DRF.

Los resultados de los señores Carver y Jones reafirman una gran desventaja de este tipo de artefactos, que dice que, generalmente su uso está limitado a áreas

73

donde el período de diseño de la ola incidente es relativamente pequeño, reservado para riveras y otras áreas que tienen distancias cortas de generación de vientos.

De los rompeolas vistos en el capítulo II, se destacan finalmente, tres grupos o dos para ser más exacto, los "rígidos" formados por cajas prismáticas, generalmente de concreto, con materiales auxiliares para su flotación y conectados entre si por conectores flexibles. Una variación de estos son los rompeolas tipo catamarán los que poseen gran estabilidad frente a la agitación de las olas para una masa idéntica al de una caja prismática. En el otro grupo están aquellos rompeolas flexibles y de los cuales se destacan aquellos formados por neumáticos interconectados entre sí.

Estos se pueden ver en la siguiente figura:



Figura Nº 8 Rompeolas Característicos

La eficiencia de estos rompeolas ha sido estudiada y cuantificada por su coeficiente de transmisión en función de la relación B/L. El tipo caja es de concreto con un ancho efectivo de 4.87 metros y un calado de 1.07 metros, ensayado en 7.6 metros de profundidad de agua (Hales 1981). El segundo es un rompeolas tipo catamarán con dos cajas de 1.07 metros de ancho efectivo y 1.42 metros de calado y un ancho total en el sentido de la propagación de las olas de 6.4 metros, testeado en una profundidad de agua de 7.6 metros (Hales 1981). El rompeolas formado por cuatro módulos de neumáticos tiene un ancho efectivo total de 12.8 metros, ensayado en una profundidad de agua de 3.96 metros (Giles and Sorensen, 1979). Sus fondeos tienen la configuración mostrada en la figura Nº 8.

Los valores obtenidos para el K_t (C_t) se muestran en el siguiente grafico:



Gráfico Nº 13 Coeficientes de Transmisión en Rompeolas típicos

3.4 Ensayo experimental para el DRF

3.4.1 Objetivo central

El objetivo central de ésta sección, es describir el proceso, teoría y resultados del ensayo de nuestro modelo para el DRF y cuyas características se definieron en el capítulo anterior. Estos ensayos se realizaron en el tanque de pruebas perteneciente a la Universidad Austral de Chile.

Se busca con estos ensayos poder definir la "performance" o eficiencia del DRF, bajo ciertas condiciones. Estas condiciones se manejarán en el marco de dos premisas principalmente:

- 1. Las condiciones inherentes al emplazamiento final del DRF.
- 2. Las limitaciones propias del tanque de pruebas y sus características.

3.4.2 Características principales del tanque de pruebas

Para éste ensayo se utilizó, como ya se mencionó, el tanque de pruebas hidrodinámicas y su generador de olas regulares, de la Universidad Austral de Chile.

Las principales características del tanque de ensayos son:

Largo	: 45	metros
Ancho	: 3	metros
Altura	: 2	metros
Profundidad de agua	: 1.8	metros

Las olas generadas en el tanque de pruebas, son fenómenos gravitatorios y por ello, la correlación y sus características aplicadas al prototipo se relacionan de acuerdo a la escala del modelo respectivo y a la ley general de semejanza de Froude.

Dentro de las magnitudes de amplitud y frecuencia de las olas regulares y con los equipos y forma de registro de resultados queda el pero de que no podemos estudiar períodos, y por tanto frecuencias de olas, que eran de interés para ésta tesis, debido a que no se pueden generar olas con los períodos que uno desee, sólo se pueden tener valores cercanos a ellos, aún así consideraremos suficiente los que si se pueden estudiar para tener una aproximación hacia la real eficiencia de este cuerpo prismático al momento de atenuar a las olas impuestas.

3.4.3 Modelo experimental

La escala del modelo que debemos ensayar es el primer paso hacia el ensayo en si. Esta escala depende de factores tan disímiles como las dimensiones del cuerpo real y las limitaciones propias del tanque de prueba.

El cuidado que debemos tener con las limitaciones del tanque pasan principalmente por las características de las olas que puede generar, que es lo que nos interesa, se revisó éste punto y se determinó que el rango de frecuencias que puede generar van desde los 46 ciclos por minuto a los 80 ciclos por minuto.

La geometría del cuerpo a utilizar para el ensayo y que corresponde a un contenedor de 40 pies, no presenta inconvenientes a la hora de ser escalado para obtener el modelo, sólo se debe tener en cuenta que la posición del cuerpo estará de tal forma que reciba a las olas por la escuadra un "Beam sea", ahí tenemos un tope máximo de 3 m que corresponde al ancho del canal.

3.4.3.1 Escala del modelo

Existen formulaciones que hablan sobre el análisis dimensional del modelo y su congruencia con el cuerpo real.

Para entender esto mejor consideremos el movimiento de Heave de un barco y su modelo en olas regulares. Para un primer alcance podemos asumir que desconocemos los procesos físicos involucrados, a pesar de ello podemos asegurar que la amplitud del movimiento de Heave X_{33} es una función de la amplitud ζ_0 , la longitud de ola λ , la velocidad U, el ángulo de encuentro μ , la forma y las inercias del casco, además podríamos esperar que la amplitud del movimiento de Heave dependa de propiedades físicas del agua, densidad ρ y viscosidad μ_w y de la aceleración de gravedad. Así podemos escribir una expresión matemática general que relacione estas once cantidades de la forma siguiente:

 $x_{33} = f_1\{\zeta_0, \lambda, U, \mu, L, [x_B], [I], \rho, \mu_w, g\}m$

Donde f_1 es una función indeterminada y que es igual para ambos, o sea modelo y barco. $[X_b]$ representa un número suficiente de coordenadas que definen la forma del casco y [I] representa los momentos de inercia del casco. Massey (1986) muestra como ésta expresión, puede escribirse en términos de un número pequeño de parámetros no dimensionales.

La teoría del análisis dimensional permite un número de parámetros no dimensionales a ser determinados y para nuestro caso, la amplitud del movimiento de Heave puede expresarse como una función de términos que componen siete grupos. Muchas y diferentes formulaciones son posibles y son igualmente validas, pero es conveniente expresarlo de la forma siguiente:

$$\frac{x_{30}}{\zeta_0} = f_2 \left\{ \frac{\zeta_0}{L}, \frac{\lambda}{L}, \frac{U}{\sqrt{gL}}, \mu, \frac{[x_B]}{L}, \frac{[I]}{\rho L^5}, \frac{\rho UL}{\mu_w} \right\}$$

Donde f₂ es una función desconocida y que es igual para el modelo y el barco.

La ecuación anterior nos dice que la amplitud de Heave no dimensional puede ser igual para ambos casos, modelo y barco previendo que todos los parámetros de los grupos a la derecha de la ecuación tengan los mismos valores numéricos tanto para el modelo como para el barco. Este requisito dicta las condiciones requeridas por el modelo experimental.

La escala del modelo o su relación de dimensionado se define como:

$$R = \frac{L_{DRF}}{L_M}$$

Definida ésta relación podemos aseverar leyes de escalado, en las cuales no ahondaremos más puesto que son universalmente utilizadas y no compete a ésta tesis comprobarlas o refutarlas. Estas fórmulas son los multiplicadores para obtener las propiedades del modelo a partir de las propiedades del cuerpo real:

1. Masa: Masa cuerpo full escala

$$\frac{\rho_{M}}{\rho_{DRF} \times R^{3}}$$

 Longitud: longitud del DRF; todas las dimensiones; surge, sway, heave, desplazamientos absolutos y relativos; longitudes y amplitudes de ola, altura de ola significante.

$$\frac{1}{R}$$

3. **Time:** ondas y períodos del movimiento, tiempo transcurrido; intervalos entre eventos, período de la ola modal etc.

$$\frac{1}{\sqrt{R}}$$

 Velocidad: velocidades del cuerpo a full escala; surge, sway, heave, velocidades del movimiento absoluto o relativo; velocidad de la ola o de un grupo de olas.

$$\frac{1}{\sqrt{R}}$$

5. **Aceleración:** surge, sway, heave, aceleraciones absolutas o relativas, aceleración de gravedad.

1

6. **Ángulos:** roll, ángulos de pitch y yaw; heading, estabilizadores y ángulos de timón; fases.

7. Velocidad angular: roll, velocidades de pitch y yaw; estabilizadores y relaciones del timón.

$$\sqrt{R}$$

8. Aceleración angular: roll, aceleraciones de pitch y yaw, estabilizadores y aceleraciones angulares del timón.

R

9. **Presiones y esfuerzos:** presiones de impacto por slamming y wetness; presión hidrostática; presiones dinámicas; esfuerzos.

$$\frac{\rho_{M}}{\rho_{DRF} \times R}$$

10. frecuencias: frecuencia de encuentro; frecuencia de eventos intermitentes; rpm de la hélice.

$$\sqrt{R}$$

11. Fuerzas: fuerzas excitadoras; fuerzas de corte; tensión; peso; empuje

$$\frac{\rho_{M}}{\rho_{DRF} \times R^{3}}$$

12. Momentos: momentos excitadores; momento flector; momento de torsión; torque.

$$\frac{\rho_{M}}{\rho_{DRF} \times R^{4}}$$

Datos del DRF				
Largo	12.00	m		
Ancho	2.40	m		
Alto	2.40	m		
Masa	4138.63	kgmasa		
Т	1.38	m		
KB	0.69	m		
KG	0.00	m		
BMt	0.35	m		
BMI	8.72	m		
GMt	1.04	m		
GMI	9.41	m		
KMt	1.04	m		
KMI	9.41	m		
Velocidad	0.00	nudos		

3.4.3.1.1 Resultados de escala para el modelo del DRF

Siguiendo las leyes de escala se obtuvieron los siguientes valores:

Datos Modelo Experimental			
Largo	1.20	m	
Ancho	0.24	m	
Alto	0.24	m	
Masa	4.04	kgmasa	
Т	0.14	m	
KB	0.07	m	
KG	0.00	m	
BMt	0.03	m	
BMI	0.87	m	
GMt	0.10	m	
GMI	0.94	m	
KMt	0.10	m	
KMI	0.94	m	
Velocidad	0.00	nudos	

Como ya se ha mencionado los períodos no se pueden llevar a priori al tanque de pruebas para ser estudiados, porque no se pueden generar a voluntad, por lo tanto se debe seguir el camino inverso y extrapolar los periodos de las olas generadas.

3.4.3.1.2 Comentarios sobre la construcción del modelo y el proceso del ensayo

Con las dimensiones escaladas para el modelo, se confeccionaron dos módulos en PRFV, estos dos módulos simulan lo que en la realidad serían dos contenedores de 40' conectados por robustas bisagras que le evitarían los momentos.

Se pensó en un conjunto de dos, por qué se vuelve menos riesgoso y más viable fondear en la realidad dos contenedores como una unidad a que una hilera de 10 a 15 contenedores para cubrir el área necesaria por la concesión. La separación entre ellos es de medio metro, separación delimitada por las bisagras utilizadas en la conexión de balsas jaulas y suficiente para que una ola no se transmita del todo.

Se reforzó interiormente con placas de madera a las cuales, por el exterior, se hicieron firmes los tornillos de las bisagras de unión, de las tapas y de los tirantes de donde se fijaron las líneas para el fondeo.

En ningún momento se trató de escalar el fondeo, esto presentaba una tarea muy difícil, puesto que en la realidad, forman un conjunto muy complicado de cadenas, cables, refuerzos, flotadores y platos de derivación, entre otros elementos. Un línea de fondeo típico se puede apreciar en la figura Nº 9.



Figura Nº 9 Elementos de Fondeo

Además los autores de los estudios mencionados, dicen que la influencia del fondeo (a nivel de estudio en tanques de ensayo), no interfiere mayormente en la obtención de la performance de un rompeolas flotante. Así se escogió cables de nylon para fondearlo con una distribución como la que se muestra a continuación:



Figura Nº 10 Disposición de Líneas de fondeo Modelo de Ensayo

La inmersión del cuerpo real es de 1.4 metros, éste valor se debe a que se tomó en cuenta la poca longitud del ancho efectivo (sólo 2.4 metros), por lo cual el calado debía ser mayor a la unidad, y limitado por un factor de logística visual, sobre el nivel de aguas tranquila, se pensó entonces, en dejar un metro sobre el nivel de él. Esto nos da un desplazamiento de 40.6 toneladas. El contenedor de 40' sólo pesa 3 toneladas aproximadamente (6799 Lb.), por lo cuál el modelo tuvo que ser lastrado con 25 kg, el resto pertenece al peso propio del modelo. En la realidad el DRF puede llevar un piso de cemento con chatarra como lastre para alcanzar dicho calado.

Finalmente el modelo se fondeo a un tercio de la longitud del canal tomando como punto de referencia al generador de olas, con 4 pesos principalmente de unos 60 kg cada uno y dos más pequeños de unos 20 kg. Esta distancia se fijo para evitar el efecto de las olas reflejadas por el fondo (en el sentido longitudinal) del canal.

La distancia total del modelo fue de 2.45 metros, quedando el modelo más cerca del costado en el cual se encontraba la tabla de referencia de medidas, para obtener aproximadamente las alturas de las olas incidente y la transmitida.

Con respecto al ensayo, éste se dividió en dos partes, en la primera se procuró llegar a los valores extremos (máximo y mínimo) que puede entregar el generador del tanque de pruebas, así se obtuvo una ola con un período alto del orden de 1.3 segundos (47 ciclos/minutos) y de uno bajo, del orden de 0.76 segundos (79 ciclos/minutos).

En la segunda parte, se intentó ir disminuyendo los períodos partiendo del más alto posible (1.26 segundos aprox.) hasta el más bajo (0.75 segundos aprox.) sumando un total de 7 pruebas, todos hechos en aguas perfectamente calmas.

Los resultados de la primera parte se presentarán en forma de imágenes para visualizar los extremos de la eficiencia.

De los resultados de ambas partes se confeccionará un gráfico que busca expresar la eficiencia y comprobar lo dicho en el marco teórico anterior sobre la eficiencia de un rompeolas flotante.

Se enunciarán las conclusiones de dicho ensayo, analizando, problemas y proponiendo soluciones, dentro de la temática de esta tesis, en conjunto con la revisión de un informe que habla sobre el mismo tema.

3.4.4 Resultados del ensayo experimental

3.4.4.1 Test 1:



Imagen Nº 1



Imagen Nº 2

En el marco teórico se menciona como un rompeolas flotante del tipo caja prismática tiene un coeficiente alto de transmisión en períodos cercanos a los 4 segundos. Del ensayo podemos confirmar que para nuestro cuerpo prismático esto se cumple a cabalidad, la ola que se ve en la imagen Nº 1 es una ola de 4 segundos aproximadamente, una ola larga que hace que la relación B/L sea baja presentando una eficiencia pobre. La tendencia del cuerpo es de seguir el movimiento impuesto por la ola, un movimiento más bien suave de baja atenuación como se ha mencionado, que se debe principalmente a la reflexión de la masa superior de agua al llegar su forma al rompeolas.

3.4.4.2 Test 2:



Imagen Nº 3



Imagen Nº 4

De ambas imágenes se puede confirmar lo estudiado con anterioridad, esta ola es la de máxima frecuencia posible entregada por el generador de olas (80 ciclos/minutos) que en la realidad correspondería a una ola con un período de unos 2.4 segundos.

Las olas se caracterizan por una alta frecuencia que al interactuar con el DRF provoca en él movimientos pequeños, en realidad mantiene gran estabilidad frente a éste embate, lo que lleva también a que no genere olas atrás de él. Sumando todas las componentes se puede decir finalmente que reduce a menos de un 40% la altura de la ola incidente.

Con ésta primera parte se quiso acotar el rango de eficiencia de éste cuerpo en su estado natural, confirmar lo dicho en el marco teórico (ó refutarlo si hubiese sido el caso).

La primera ola, en un mar desarrollado, podría darse con frecuencia en un estado de mar de "Marejada" y para el segundo caso un mar "Risada". Es evidente que las condiciones en olas irregulares no es fácil de cuantificar, pero al menos ya se tiene una aproximación lo suficientemente válida para aseverar el funcionamiento del DRF.

Sirve aclarar también que lo más que se ha logrado alcanzar en cuanto a eficiencia y tomando en cuenta al período como parámetro de medición, es de 6 segundos, pero en una estructura flotante de rivera donde el fondeo puede optimizarse con otras herramientas.

Con los valores combinados de la primera y segunda parte del ensayo se confeccionó de forma aproximada el siguiente gráfico en el cuál se cuantifica la eficiencia de éste cuerpo, medido bajo el fundamento de la primera definición dada para éste concepto.



Gráfico Nº 14 Coeficiente de Transmisión para el DRF

3.4.5 Análisis informe contenedor 40 pies

Ahora podemos revisar el estudio realizado para éste mismo rompeolas, el cuál está basado netamente en un estudio teórico, en donde se aplicaron ecuaciones de evolución de oleaje para aguas someras y poco profundas. Para éste estudio privado, además, se confeccionó un plano de batimetría del área concesionada, la correntometría y el análisis granulométrico. Este análisis tiene como finalidad, poder conocer y apoyarse en otro recurso, para el mejor entendimiento de lo hecho hasta ahora y desde otra visión.



Figura Nº 11 Referencia de ubicación geográfica carta 7000 – S.H.O.A

Como se ve en la figura Nº 11 el centro a proteger se encuentra ubicado en la costa noroeste de isla Quenac, en la provincia de la Isla Grande de Chiloé.

Las principales observaciones de este informe se resumen a continuación.

3.4.5.1 Batimetría

De ella podemos decir que se utiliza como dato de entrada para el modelo empírico de previsión de altura de ola y para el de propagación de la misma y además para medir la interacción Oleaje – DRF.

De la batimetría se encontró el siguiente mapa y el rango de profundidades que van desde los 20 a los 40 metros.



Figura Nº 12 Plano de Batimetría

3.4.5.2 Correntometría

De la correntometría Euleriana y Lagrangeana se encontró la dirección y velocidad predominante de las corrientes en la zona. Estas mediciones se tomaron en condición de Sicigia en los meses de Diciembre del 2004 y Enero del 2005.

El valor máximo medido por el correntometro acústico Doppler fue de 2.1 nudos.

3.4.5.3 Datos Meteorológicos

3.4.5.3.1 Datos de Viento

No se tienen registros históricos de los vientos en la zona de fondeo, por lo cuál se decide tomar el valor de 60 Kn, recomendado por las Casas Clasificadoras, como velocidad de diseño.

3.4.5.3.2 Datos de Oleaje

Con estas mediciones tampoco se cuenta, por lo cuál se aplica un método teórico de predicción a través de un modelo espectral de energía para aguas profundas. Para propagar la ola tipo incidiendo sobre el conjunto de jaulas, también se aplicó un modelo matemático

3.4.5.4 Método de Predicción de Altura de Ola

Para determinar el oleaje de diseño se determinó la utilización de métodos y modelos teórico – empíricos de previsión de oleaje (como los ya mencionados en el capitulo I) a partir de datos de viento.

3.4.5.4.1 Determinación del Fetch

Esta magnitud medida In Situ, sólo tuvo una pequeña complicación para ser encontrada, esto se debió porque cuando el ancho no es de un valor cercano a la longitud (ancho limitado), es necesario efectuar una sustitución remplazando la longitud del Fetch, por una longitud "efectiva" de Fetch, equivalente a la longitud del Fetch no limitado que produce los mismos efectos en el punto de previsión.



Dirección del Fetch efectivo en Quenac Figura Nº 13 El Fetch efectivo se calcula trazando con origen en el punto de previsión y final en la primera intersección con la línea de la costa, nueve rectas radiales a intervalos de 3º a partir de la dirección media de actuación del viento generador y ambos lados de la misma. De esta forma la longitud del Fetch será la media aritmética de la longitud de las rectas radiales, expresándose como:

$$L_F = \frac{\sum_{i=1}^{9} r_i}{9}$$

Finalmente la distancia máxima encontrada es de 38 millas náuticas y la distancia efectiva de Fetch es de 21 millas.

Sobre el régimen de viento se vuelve a tomar las recomendaciones de las casas clasificadoras de lo cual ya se converso en un comienzo.

De la duración asignada a los estados de viento generadores de oleaje, tenemos una velocidad de viento y longitud de Fetch determinados, con lo cuál el oleaje irá en incremento hasta alcanzar un estado de equilibrio. Considerando un mar totalmente desarrollado los aumentos en la duración del viento no darán lugar a aumentos de altura de ola o el período.

Con respecto a la profundidad, si ésta es mayor a 90 metros los mecanismos de generación de oleaje no están sustancialmente afectados por las variaciones de profundidad, ni por las transformaciones de oleaje asociadas a fenómenos como la fricción de fondo.

El método paramétrico escogido para describir la evolución temporal de las elevaciones del mar fue el de "Jonswap" (Join North Sea Wave Proyect).

De los resultados de ésta caracterización del oleaje, con datos principales como los 60 Kn, un Fetch efectivo de 21 millas náuticas y una profundidad de 50 metros, se obtuvo por el espectro de Jonswap una altura de ola significante de 3.1 (m).

El modelo de propagación de oleaje es un punto interesante en este informe, con él se busca evaluar la factibilidad de instalar el DRF en la zona mencionada y bajo las condiciones encontradas, a través de un modelo numérico de evolución del oleaje. Para evaluar el oleaje en el área de interés, se utilizó la metodología sustentada en las teorías de onda de "Airy" y de "Rayos" (Shore Protection Manual, 1984; ACES, 2000), las que proveen una buena estimación de la evolución del oleaje y su energía hacia la costa.

Para la evaluación del oleaje en la zona de estudio, se generó una malla cuadrada de 50 x 50 nodos, de espacios iguales, limitándola, en el mar, por el área efectiva de acción del viento, y en tierra por la línea del litoral.

El sistema de ecuaciones se resolvió generando módulos en el software MATLAB, los que corresponden a programas de cálculo de:

- longitud de onda
- velocidad de onda
- refracción
- altura de ola
- densidad de energía.

Dentro de los parámetros de evaluación (períodos y alturas de olas) debemos tomar en cuenta que difiere bastante de lo que se realizó anteriormente, en el estudio teórico y en el ensayo en el tanque de pruebas.

En éste informe se consideraron condiciones extremas para altura y período de las olas y para el viento.

Dos escenarios posibles fueron los escogidos. La condición de oleaje Nº 1 con olas de 2.9 metros de altura y un período de 6.4 segundos. La condición Nº 2 tiene olas de 3.6 metros de altura y 6.9 segundos de período. Para ambos casos la dirección del viento fue de NE (35º).

Los resultados abarcan los siguientes puntos estudiados:

- Evolución de oleaje (6.4 y 6.9 seg. de período)
- Evolución de oleaje y altura de ola (6.4 seg. y 2.9 m 6.9 seg. y 3.6 m)
- Evaluación de energía del oleaje (6.4 seg. y 2.9 m 6.9 seg. y 3.6 m)

Los resultados obtenidos se muestran en las imágenes de la página siguiente.



Evolución de Oleaje Propagación de ola T= 6.4 seg.



Figura № 15 Evolución de Oleaje Propagación de ola T= 6.9 seg.



Figura № 16 Evolución de Oleaje Propagación de ola T= 6.4 seg. y altura inicial de 2.9 m.



Figura № 17 Evolución de Oleaje Propagación de ola T= 6.9 seg. y altura inicial de 3.6 m.



Figura № 18 Evaluación de Energía del Oleaje Propagación de ola T= 6.4 seg. y altura inicial de 2.9 m.



Figura № 19 Evaluación de Energía del Oleaje Propagación de ola T= 6.9 seg. y altura inicial de 3.6 m.

De las imágenes se distingue claramente que los cambios en las características de las olas ocurren principalmente en las áreas de menor profundidad, además en la zona del emplazamiento de la zona de cultivo el oleaje no presentaría ninguna variación de sus características (altura, período y energía).

3.4.5.5 Interacción Oleaje – DRF

Para estudiar la interacción, en este informe, se consideraron dos posibles emplazamientos para el DRF frente al centro de cultivo, el primero marca su posición a 50 metros y el segundo a 100 metros. Estos resultados también se muestran en forma gráfica en las siguientes imágenes y para los siguientes casos:

- Evolución de Oleaje con Rompeolas para:
 - Propagación de ola de T: 6.4 seg. H: 2.9 m DRF a 50 m
 - Propagación de ola de T: 6.4 seg. H: 2.9 m DRF a 100 m
 - Propagación de ola de T: 6.9 seg. H: 3.6 m DRF a 50 m
 - Propagación de ola de T: 6.9 seg. H: 3.6 m DRF a 100 m
- Evaluación de Energía de Oleaje con Rompeolas para:
 - Propagación de ola de T: 6.4 seg. H: 2.9 m DRF a 50 m
 - Propagación de ola de T: 6.4 seg. H: 2.9 m DRF a 100 m
 - Propagación de ola de T: 6.9 seg. H: 3.6 m DRF a 50 m
 - Propagación de ola de T: 6.9 seg. H: 3.6 m DRF a 100 m

En las páginas siguientes se muestran las imágenes correspondientes a cada punto ya mencionado.



Figura № 20 Evolución de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.4 seg. – H: 2.9 m. – DRF a 50 m.



Figura № 21 Evolución de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.4 seg. – H: 2.9 m. – DRF a 100 m.



Figura № 22 Evolución de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.9 seg. – H: 3.6 m. – DRF a 50 m.



Figura № 23 Evolución de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.9 seg. – H: 3.6 m. – DRF a 100 m.



Figura № 24 Evaluación de Energía de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.4 seg. – H: 2.9 m. – DRF a 50 m.



Figura № 25 Evaluación de Energía de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.4 seg. – H: 2.9 m. – DRF a 100 m.



Figura № 26 Evaluación de Energía de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.9 seg. – H: 3.6 m. – DRF a 50 m.



Figura № 27 Evaluación de Energía de Oleaje con Rompeolas Propagación de ola T: 6.9 seg. – H: 3.6 m. – DRF a 100 m.

3.4.6 Conclusiones preliminares

Sin duda que lo primero que viene a la mente fue lo expuesto en el marco teórico sobre eficiencia de un rompeolas flotante, en el cual se mencionan, entre otras cosas, que los períodos máximos de eficiencia, rondan los 4 a 5 segundos y además, tratar de atenuar una altura de ola de más de 2 metros ha sido históricamente, para éste tipo de artefactos, un gran punto débil, pero la verdad es que, en un mar con 60 nudos de viento y altura de ola significante cercana a los 4 metros, existen preocupaciones mayores que atenuar el efecto de esas olas, sin embargo, estas condiciones son necesarias para poder resolver con toda seguridad la problemática del buen cálculo de las líneas de fondeo.

Con respecto a la eficiencia y tomando en cuenta lo expuesto por los autores que han estudiado el tema y sumando a ello el ensayo experimental, no creo que en tales condiciones se pueda medir la viabilidad de instalar un DRF y llegar a ser determinantes o concluyentes para su ejecución.

Es evidente que el rompeolas creará algún tipo de influencia en su medio y eso se puede evidenciar en los mapas en donde se evalúa la evolución de la energía hacia la costa, pero lo que es más importante aún es poder decir en que situaciones realmente el DRF cumplirá su misión.

El informe concluye finalmente que el estado de mar con las condiciones impuestas sufre cambios en la evolución del oleaje al presentarse un obstáculo frente a ellas, generando disminución de la altura del oleaje y disipación de energía.

Si colocamos un objeto como una roca por ejemplo en el cause de un río, éste creará un cambio en las aguas que por ese río corren, ahora si reemplazamos a la roca por un cuerpo que sufra de desplazamiento de sólido rígido, su comportamiento frente a los movimientos impuestos hará que su efecto sea totalmente distinto o quizás despreciables en el avance normal de las aguas de ese río.

Las ecuaciones estudiadas no comprenden módulos que evalúen esta interacción, por lo cual se abre una brecha grande en la que se escapa la real situación del DRF en su medio de trabajo.

Se recomienda finalmente considerar este punto, por ser determinante en la medición de eficiencia de un rompeolas flotante.
CAPITULO IV

4.0 Análisis estructural mediante el MEF

4.1 Objetivo central

Se busca en éste capítulo entregar, con números, una respuesta a la inquietud de si es mejor un contenedor con paneles de planchas planas ó uno con planchas corrugadas.

Demostrar la gran ayuda que significa la utilización de una herramienta como el método de los elementos finitos en la rápida solución de problemas estructurales.

Dar un pequeño paso hacia la eficiencia, ahora estructural, para el DRF.

Considerar al método de los elementos finitos como lo suficientemente conocido como para no discutir sobre su concepción, así como tampoco, su evolución.

4.2 Proceso del MEF para la estructura en estudio

4.2.1 Consideraciones iniciales

Se estudiará la plancha en su ubicación más desfavorable, considerando la condición normal de operación del DRF.

La situación más desfavorable será tomada como olas golpeando en un 100% de la cara expuesta activa del DRF en un ángulo de 90º (Beam sea). Para lo anterior se considerará sólo el área de un contenedor.

Se estudiará el problema en el software Algor, en resumen por que la geometría y la naturaleza de las cargas, no presentarán discrepancias mayores en comparación con otros softwares, además, el estudio es del tipo estructural lineal, con lo cual sólo buscamos parámetros comparativos de desplazamientos y esfuerzos principales.

4.2.2 Modelo a estudiar

El modelo es simplemente una plancha rectangular que forma parte de las caras mayores del contenedor.

Para la chapa plana las cotas son las siguientes:



Figura Nº 28 Plancha Plana

Para la chapa corrugada se tienen las siguientes dimensiones:



Figura № 29 Plancha Corrugada



Detalle Corruga

El espesor de la chapa es de 4 mm y para ambas planchas es igual. El material también será el mismo para ambos y se escogió un acero ASTM-A36 que sería el más representativo.

4.2.3 Confección del Modelo

Se realizaron dos modelos de placas, cuyos elementos pueden tener un valor mínimo, para el lado menor, de 40 mm para asegurar el comportamiento del elemento, esto también nos dará un mallado lo suficientemente fino como para no realizar un test de convergencia y aceptar los resultados como validos, además como el resultado que más nos interesa es la posible deformación, el mallado no necesita ser tan fino, en cuanto al tamaño de sus elementos se refiere.

Así los modelos quedaron determinados de la forma siguiente:



Figura Nº 31 Densidad de Malla Plancha Plana



Figura Nº 32 Densidad de Malla Plancha Corrugada

4.2.4 Condiciones de Contorno

Los contenedores poseen un marco estructural muy resistente, el que le ayuda a soportar las grandes cargas por peso, de los demás contenedores cuando son apilados y transportados, en el cuál, también se apoyan los medios de estiba. Este marco resistente no deja duda sobre su resistencia pues soporta cargas mayores a las esperadas en las condiciones de mar. Por tanto la zona de peligro es la cara que soportará los golpes de slamming.

Por todo lo anterior se decidió considerar la condición de contorno de la plancha como restringido en todos los sentidos (empotrados), puesto que en todas sus orillas, la plancha sea plana o corrugada, posee una muy alta rigidez.

4.2.5 Cargas

La situación más desfavorable es aquella en la cuál la cara activa recibe carga hidrostática y golpes de olas con una altura igual a la altura máxima del DRF. Combinando las dos cargas podemos afirmar que el golpe de ola es una carga mayor que la carga sola por presión hidrostática. Así la fuerza ejercida por un slamming se repartirá en toda el área de la cara activa como una presión uniforme. En el fondo es una carga dinámica aplicada como una carga estática.

El valor de la fuerza por slamming se puede calcular por reglamento de las casas clasificadoras.

Según Lloyd's Register tenemos que:

$$F_{\text{slamming}} = C_s \times \frac{\rho}{2} \times D \times U^2$$

Los parámetros de ésta fórmula fueron definidos en el capitulo I, pero rápidamente podemos mencionar que "C_s" es un coeficiente por impacto de ola, "p" es la densidad del agua de mar, "D" es el diámetro local efectivo y "U" la velocidad relativa del agua normal a la superficie.

En el gráfico siguiente se muestra el valor de la fuerza de slamming en función de la velocidad.



Gráfico Nº 15 Fuerza de Slamming en función de la Velocidad Superficial del mar

Sin consideramos para el cálculo, una fuerza de slamming de 100.000 N en un área repartida uniformemente de 12x2.4 m², se tiene entonces, una presión impuesta por slamming de 3472 N por metro cuadrado.

Con la geometría, las condiciones de contorno y las cargas listas podemos encontrar las deformaciones para los dos casos en estudio. De ante mano se puede decir que la plancha corrugada debe resistir mejor esta carga, debido a que en el sentido de ésta, tiene una mayor inercia impuesta por su forma, a diferencia de la plancha plana.

En imágenes podemos percibir las deformaciones y las tensiones, que sin duda sabemos tendrá su máximo en la cercanía a las condiciones de borde.

Al final se resumen las conclusiones para esta comparación.

4.3 Presentación de Resultados:

4.3.1 Plancha plana



Figura Nº 34 Tensiones de Von Mises para Caso Plancha Plana

Son pocos los comentarios nuevos que se pueden hacer al respecto, de todas formas podemos decir que las deformaciones en la plancha desnuda supera muy por arriba un valor máximo permitido llegando a los 25 cm.

Debemos aclarar, de todas formas, que los contenedores con ésta configuración no tienen una plancha desnuda, sino un panel formado por chapas planas y refuerzos interiores, por lo cual las deformaciones estarían por debajo de lo calculado, aun así, seguirían teniendo menos resistencia en el sentido de acción de la carga que una corruga.

Las tensiones máximas están en los empotramientos como ya se había dicho. El valor predominante está por sobre los 2000 Kg/cm² llegando a ser una tensión muy por encima de una tensión de trabajo normal y aceptable que al menos considere un factor de seguridad 2.

Para ambas situaciones, el panorama mejoraría enormemente si instalamos una adecuada y bien calculada distribución de refuerzos en esta cara. Por dar un ejemplo, una simple configuración de dos pletinas de 100x10 mm, una longitudinal y una transversal, distribuidos en los ejes de simetría de la plancha, reduciría las deformaciones máximas en un 88% y a las tensiones principales en un 63%. Entonces si tenemos en vez de una plancha desnuda un panel y a ese panel lo reforzamos los valores de deformaciones y tensiones llegarían a ser aceptables en cualquier norma.

Como se busca utilizar materiales reciclados o dados de baja de otros usos, por ejemplo los contenedores, la idea es no alterarlos mayormente por un asunto de costos obviamente, por ello, reforzar un contenedor con paredes planas, no sea una idea muy viable, pero eso quedará definitivamente determinado una vez que se presenten los resultados para la plancha corrugada, que como se ha dicho con anterioridad, creemos es la mejor opción.

4.3.2 Plancha Corrugada

Una gran mayoría de los contenedores posee la configuración de paredes corrugadas, que, por lo general, no se atiesan mayormente, fuera del marco reforzado que ya hemos mencionado para el de paredes planas. El tipo de corruga, no es una corruga estándar de uso corriente, más bien esta diseñada especialmente para soportar las cargas que le impone su uso, es así como los datos de la corruga especificada para ésta comparación se tomó de un levantamiento.



Figura № 35 Deformaciones para Caso Plancha Corrugada



Figura Nº 36 Tensiones para Caso Plancha Corrugada

Los valores numéricos arrojados son aclaratorios, tensiones por debajo de los 2.5 e7 N/m² y deformaciones que apenas alcanzan el milímetro son pruebas irrefutable de la bondad de este tipo de plancha frente a la carga impuestas y bajo las consideraciones tomadas.

4.4 Conclusiones Preliminares

Los resultados son concluyentes, para un contenedor de paredes planas, tenemos valores de deformaciones y tensiones por sobre toda norma.

Un contenedor de paredes corrugadas tiene deformaciones del orden de un milímetro y tensiones por debajo de una tensión de trabajo en el que se haya considerado un coeficiente de seguridad 2 para el material estipulado.

Por lo tanto, bajo las consideraciones hechas y la carga impuesta, un contenedor de paredes corrugadas se presenta como la opción con mayores ventajas para el uso de rompeolas flotante, frente a uno de paredes planas.

De utilizarse un contenedor de paredes planas bastaría con estudiar una distribución adecuada de refuerzos para volverlo eficiente, estructuralmente hablando.

Se debe considerar, también, que un contenedor de paredes planas utiliza paneles con chapas y refuerzos livianos en su interior, no se recomienda por tanto la utilización de un contenedor en el cual existan zonas cerradas propensas a atrapar humedad y convertirse en foco de corrosión sin control posible por el exterior. En este caso el contenedor de paredes corrugadas posee nuevamente la delantera, teniendo una disposición estructural generalmente, monolítica.

Si consideramos otra carga de importancia para comparar estos dos contenedores, sólo nos quedaría la carga de tiro de las líneas de fondeo, pero en este punto no existen diferencias radicales si tomamos en cuenta que el fondeo tendrá sus puntos de amarre en el marco estructural resistente de los contenedores. Este marco estructural no debería presentar diferencias entre uno y otro contenedor (siendo estos de la misma clasificación). Con respecto ha su resistencia, no cabe duda que soportarían las cargas del tiro, sin embargo, la última palabra la daría una simulación en elementos finitos, por ejemplo, para definir el estado último de resistencia.

Dentro de otros factores que podría tomarse para decidir entre uno y otro está, el lograr la estanqueidad y la permeabilidad de los contenedores, pero al igual que en el caso anterior, las dificultades de éste punto serían iguales para ambos casos y no existiría un parámetro definido de comparación que medir.

CONCLUSIONES FINALES

Del capítulo I se concluye que, el procedimiento de cálculo presentado otorga una alta confiabilidad para analizar las fuerzas ambientales que afecten a una estructura flotante que deberá tener un fondeo permanente, al encontrar éste su fundamento, en un campo en el cuál estas fuerzas se calculan para condiciones extremas de diseño como es el campo del diseño de plataformas de extracción petrolíferas costa afuera, además la metodología está avalada y controlada, por las Casas de Clasificación.

Sobre las posibles incertidumbres que podría presentar la metodología con respecto a los valores calculados, por ser para estructuras de mucho más tamaño, no se considera un factor de discriminación, debido a que, si no se pierde control sobre los datos ambientales que se definen por el emplazamiento y sobre los valores de los distintos coeficientes que entran en juego, los resultados presentarán una muy buena aproximación, como ha quedado demostrado en los numerosos cálculos de éste tipo, hechos para la industria acuícola.

De todas formas se considera que ésta aproximación es valida para diseñar las líneas de fondeo y todo el sistema de anclaje, pero no se recomienda para el cálculo de estructuras en general, por que el sobredimensionamiento en las piezas tiene una alta posibilidad de ocurrencia. Esto último siempre y cuando se determine lo más exacto posible la vida útil del artefacto y ésta no vaya más allá de los 15 a 20 años.

Del capítulo III se concuerda completamente con los autores que ya han estudiado el tema de los rompeolas flotantes y que como en esta tesis consiguieron sus conclusiones, de estudios realizados en tanques de pruebas.

Sobre la eficiencia del contenedor, como un cuerpo sin alteraciones, que resguarde a las instalaciones acuícolas, se prevé un buen comportamiento y una eficiencia suficiente para atenuar a las olas de las características mencionadas. Se debe considerar, sin embargo, que los resultados se tomaron de condiciones ideales (ensayo en tanque de pruebas), en un mar con olas irregulares la eficiencia puede fluctuar en ambas sentidos.

La eficiencia en el lugar final de funcionamiento, dependerá en gran medida de un adecuado fondeo, el que entregue un equilibrio entre rigidez y elasticidad, no permita los movimientos excesivos y que controle los movimientos que aquí se estudiaron, considerando de ellos sus frecuencias naturales.

En cuanto a mejoras en la eficiencia del contenedor como rompeolas, se puede aconsejar una configuración nueva en el cual se pueda ampliar el ancho efectivo. Lo anterior deberá ser acompañado por un nuevo estudio de la distribución de masa y análisis de movimientos, para estar seguros de que la eficiencia realmente se puede conseguir por ésta vía.

Del capítulo final las conclusiones son las ya expuestas y sin duda la utilización de un contenedor de plancha corrugada no sólo sería mejor en cuanto a soportar las cargas impuestas por el mar sino que también por que su forma generaría turbulencia con lo cual se tendría una nueva componente de disminución de energía de las olas incidentes.

Finalmente, no se puede dejar de mencionar después de todo lo estudiado, que existen medios con mucho más ventajas que un contenedor para realizar la misma misión, y es ahí donde queda el camino abierto para la investigación y la mejora continua.

ANEXO

Datos y procedimientos para obtener el periodo de Roll

Datos del Contenedor

Largo	: 12	m
Ancho	: 2.4	m
Alto	: 2.4	m
Calado	: 1.38	m
Peso	: 3.8	ton.
Lastre en Fondo	: 36.7	ton.

$$Bmt = \frac{I_{XX}}{\nabla} \qquad : 0.349 \text{ m}$$
$$K = \frac{Calado}{V} \qquad : 0.60 \text{ m}$$

 $K_B = \frac{Cullud}{2} : 0.69 \text{ m}$

$$G_{MT} = B_{MT} + K_B - K_G$$

CALCULO DEL KG						
		Peso	KG	Mto. Vertical		
Casco		3.8	1.2	4.56		
Lastre		36.7	0.25	9.175		
	Σ	40.5	Σ	13.735		

$$K_G = \frac{\sum M to Vertica \ l}{\Delta}$$

 $K_{G} = 0.34 \text{ m}$

Por lo tanto $G_{MT} = 0.699 \text{ m}$; aprox. 0.7 m

Para la obtención del Periodo de Roll se aplicaron las ecuaciones vistas en el capítulo correspondiente.

BIBLIOGRAFIA

1. American Bureau of Shipping (ABS)	
"Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units"200)1
2. Det Norske Veritas (DNV)	
"Rules for Classification of Mobile Offshore Units"	96
3. Lloyd's Register (LR)	
"Provisional Rules and Regulations for the Classification of Fish Farm"19	92
4. Seakeeping: "Ship Behaviour in Rough Weather"	
ARJM Lloyd19	98
5. "Design and Construction of ports and marine structure"	
Technology Corporation, Livermore, California19	85
6. The Norwegian Maritime Directorate (NMD)	
"Regulations for Mobile Offshore Units"(-)
7. The design construction and location of marine floating cages	
N. M. Kerr	88
8. Seacage design technology	
Blair Mofatt19	91
9. Cage aquaculture	
Malcom C. M. Beveridge19	87
10. Field and numerical comparisons of the RIBS floating breakwater	
Journal of Hidraulic Research, Vol. 40 Nº320	02

11. Principles of Naval Architecture
Sname
12. American Petroleum Institute (API)
Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for
floating structure1996
13. Floating Structures: a guide for design and analysis Vol. 1 & 2
N.D.P. BARLTROP OPL, Ledbury, England1998
14. Very large floating structures: applications, analysis and design
E. Watanabe, C.M. Wang, T. Utsunomiya and T. Moan
15. Wave transmission on submerged breakwaters made of hollow hemispherical shape artificial reefs.
H.D Armono, K.R. Hall Canadian Coastal Conference
16. An Examination of Breakwater performance in harbor
James P. McKinney and Margaret A. Sabol
17. Design of floating production storage offloading vessel for the gulf of México
Texas A&M University2003
18. Harbor Hydrodynamics
EM 1110 – 2 – 1100 (Part II)2002
19. Ingeniería de Sistema de Fondeo
Seminario de Formación Profesional (UACH)1996
20. Recomendaciones para Obras Portuarias (ROM)
Manual Español para Obras portuarias()

21. Elementos de Hidrodinámica Naval I y II
Nelson Alejandro Pérez Meza()
22.Comportamiento del Buque en el Mar
Nelson Alejandro Pérez Meza2004
23. Seminario Ingeniería y Acuicultura (UACH)
José Núñez Basáñez (Universidad Politécnica de Madrid)2004
24. Introducción a la Hidráulica Marítima
Gustavo A. Silva Medina()
25. S.H.O.A.
Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada()
26. Informe Viabilidad DRF
Nautatec Chile Ltda(2005)

Referencia Electrónica

27. Marina system Ibérica	
28. ShoreMaster	
29. Dock's Pete's WaveEater [™]	
30. MGS	
31.TTI service Mooring	
32. EZ – Dock	
33. WhispWave	
34. DNV	