

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS
NATURALES
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

**“METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y DIMENSIONAMIENTO DE
ELEMENTOS DE FONDEO Y DISPOSITIVOS DE
FONDO DE BALSAS-JAULAS”**

ALUMNO MEMORISTA: CARLOS CÁRDENAS MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA: ERNESTO GÓMEZ ARAYA



CONTENIDOS

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 OBJETIVOS
- 3 ANTECEDENTES GENERALES
- 4 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO
- 5 MODELO ESTRUCTURAL
- 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



INTRODUCCION

El estudio de conceptos tales como el comportamiento de la estructura en su entorno, componentes estructurales sometidos a una carga dinámica, etc. deben ser desarrollados por empresas y/o instituciones educacionales que ayuden a consolidar el tema estructural para cualquier tipo de estructura flotante

El presente documento propone la caracterización de los principales agentes (condiciones naturales) que influyen en el funcionamiento de las balsas-jaulas y considera una proposición de sistemas de ecuaciones que describan el comportamiento estructural de los sistemas de fondeo, con tal de dimensionar los dispositivos de fondo

Finalmente se obtienen las curvas de rigideces (tensión/desplazamiento) para conocer los mecanismos de falla de la estructura, con el fin de tomar acciones preventivas frente a solicitudes externas dominantes



OBJETIVOS

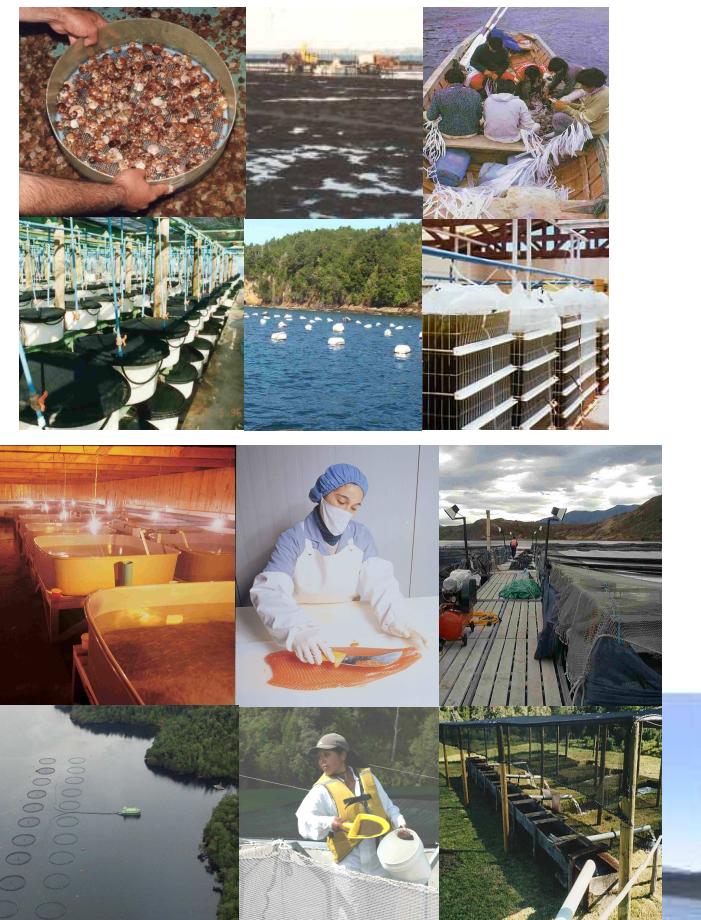
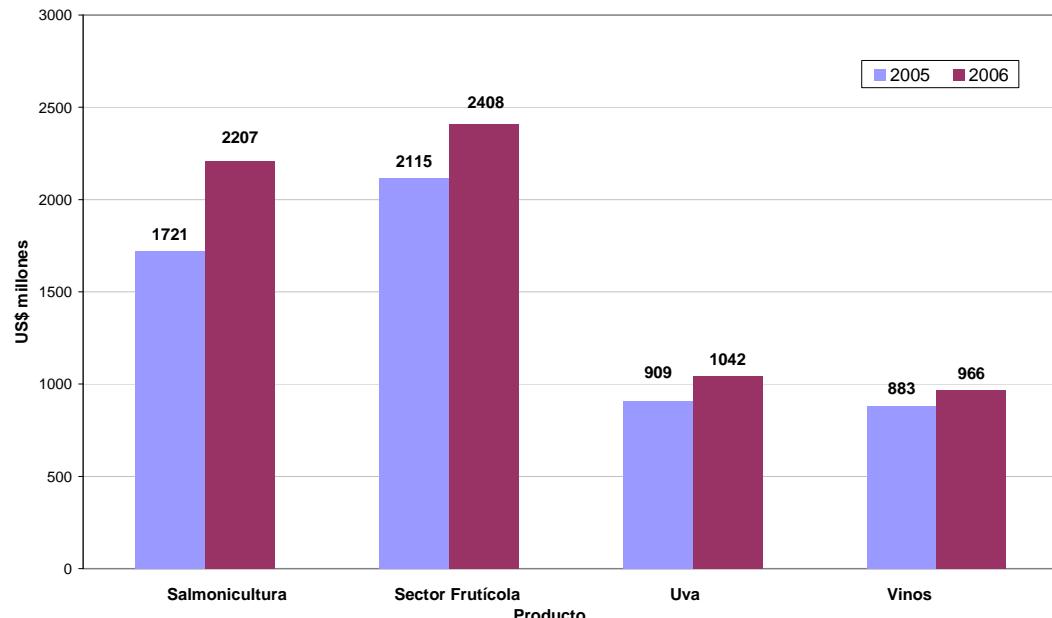
Generar una proposición metodológica para el análisis de balsas-jaulas, específicamente enfocado en la proposición de expresiones que ayuden a describir el comportamiento de las líneas de fondeo y la estructura en general, además del dimensionamiento de los elementos de fondeo

- **Definir las variables oceanográficas que afectan a la estructuras (estudios y consideraciones)**
- **Describir el comportamiento de los sistemas de fondeo, mediante un set de ecuaciones que modelen las líneas de fondeo, los desplazamientos y las tensiones en las líneas para obtener las diferentes curvas de rigideces del sistema**
- **Generar expresiones para determinar los pesos de los dispositivos de fondo**
- **Efectuar un análisis de sensibilidad para observar la influencia de ciertos parámetros que den mayor susceptibilidad al sistema y conocer las falencias del modelo propuesto**

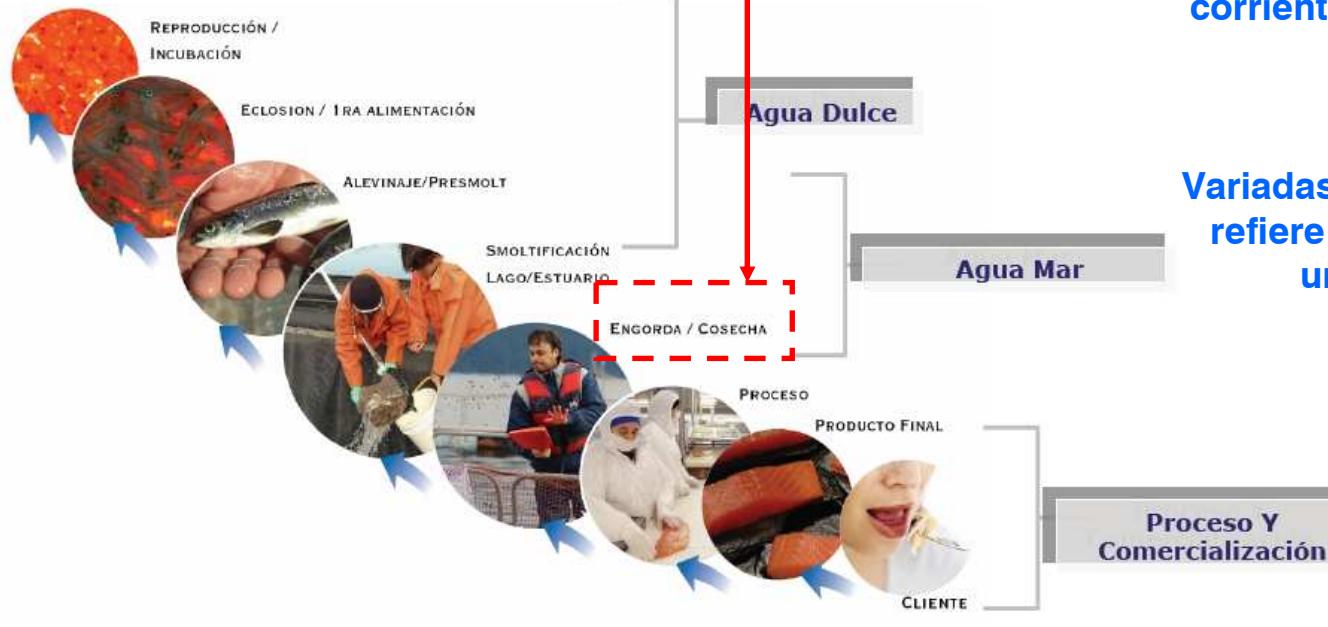


ANTECEDENTES GENERALES

Dentro del contexto económico, Chile es uno de los países importantes como productor de especies exportables y posee una industria con una alta tasa de crecimiento



Comparación con otros sectores
exportables



La X y XI región de Chile presentan excelentes condiciones naturales para la producción de cultivos de peces, principalmente por sus fiordos y lagos bien protegidos donde existen profundidades y temperaturas adecuadas para el cultivo, además de una óptima circulación de aguas producto de las corrientes generadas por la marea y el viento

Variadas son las etapas en lo que se refiere al cultivo de salmón, siendo una de las más importantes y conocidas

ENGORDA/COSECHA





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



Las balsas-jaulas consisten básicamente de una estructura rígida o semirrígida de variados diseños, formas y tamaños, las cuales están fondeadas al lecho marino mediante un sistema de fondeo

Estos sistemas deben estar diseñados para que no sufran daños mientras se encuentren en funcionamiento, por lo que su diseño y fabricación deben cumplir con todos los estándares de calidad y seguridad impuestos en la industria acuícola

TIPOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA ACUICULTURA

BALSAS-JAULAS METÁLICAS RECTANGULARES

Las balsas-jaulas de fierro galvanizado, presentan la desventaja de ser menos dúctiles, lo que en cierto modo se ha superado a través de la construcción de módulos, los que unidos convenientemente mediante rótulas, permiten dar mayor flexibilidad al sistema



F I C H A T E C N I C A

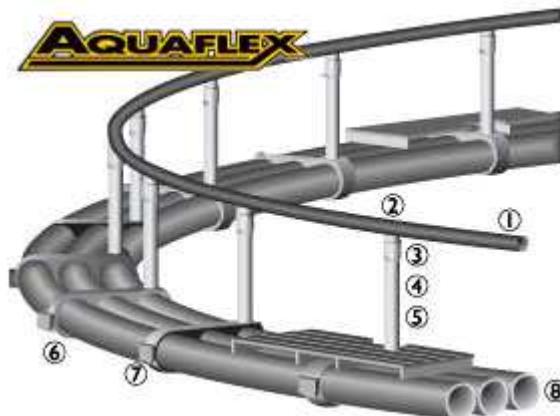
Fusion Marine S. A. se reserva el derecho de realizar mejoramientos y cambios a los productos y especificaciones sin aviso previo.

Medidas	10x10 m	25x15 m	20x20 m	30x30 m	40x40 m
Volumen en Metros cubicos por un metro de profundidad de red	100	225	400	900	1600
• Bodegas Flotantes de 50-60-100 Toneladas			• Plataformas de Trabajo		





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



BALSAS-JAULAS PLÁSTICAS CIRCULARES

Las balsas de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) presentan las ventajas de una mayor flexibilidad, no se corroen, pero habitualmente no son buenas plataformas de trabajo debido a los excesivos movimientos en la operatividad

F I C H A T E C N I C A

Fusion Marine S. A. se reserva el derecho de realizar mejoramientos y cambios a los productos y especificaciones sin aviso previo.

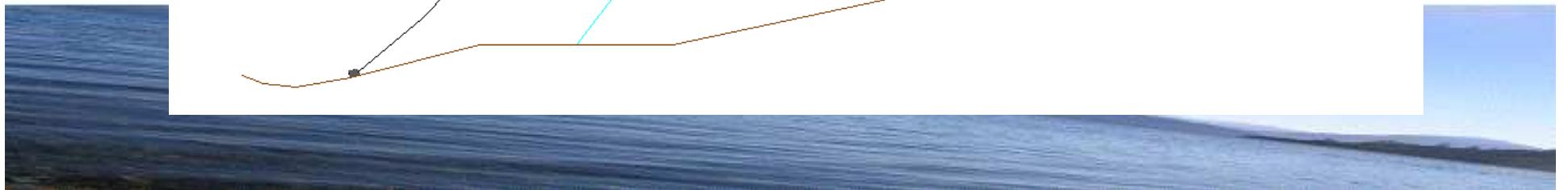
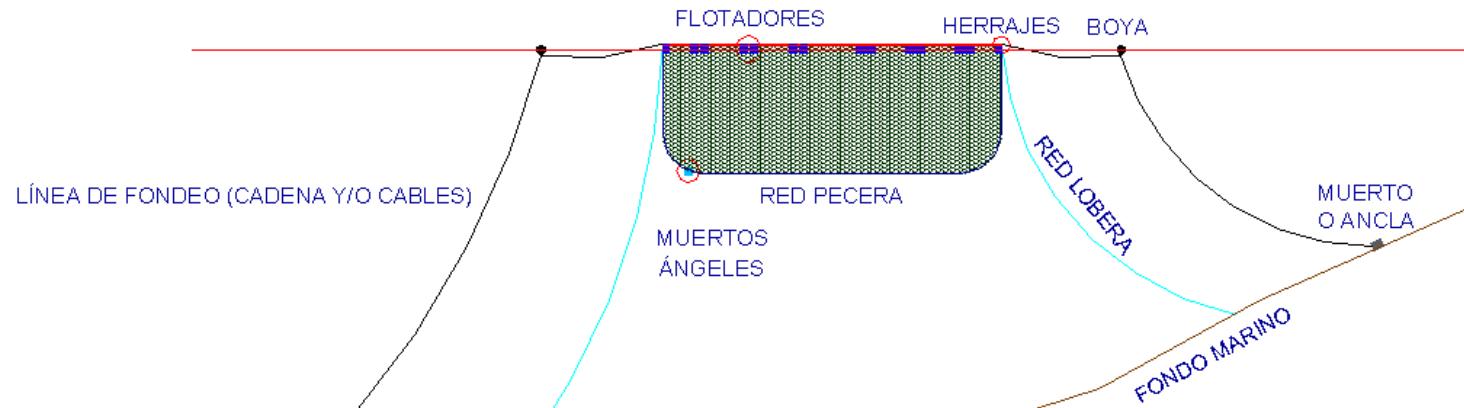
Diametro Interno	40 m	50 m	60 m
Circunferencia Interna	125 m	158 m	189 m
Numero de Barandas	50	62	76
Volumen en Metros cubicos por un metro de profundidad de red	1257	1963	2827



EQUIPAMIENTO COMPLEMENTARIO

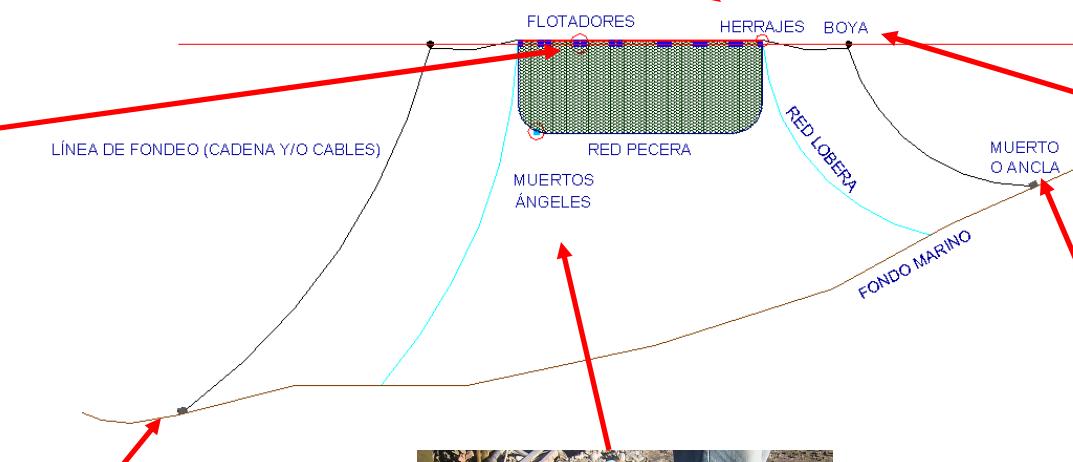
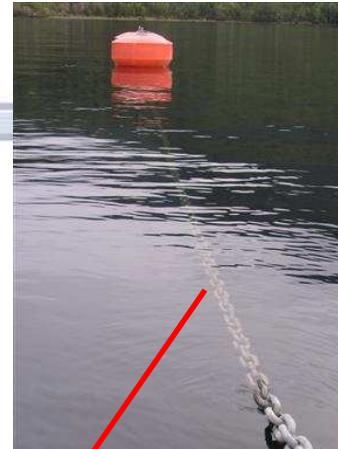
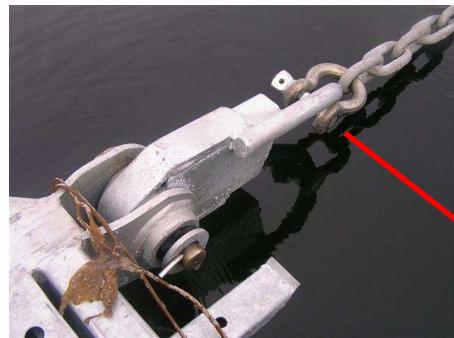
Las balsas-jaulas se componen de distintas estructuras que ayudan a mantener la estabilidad estructural y la flotabilidad

Existen variados equipos que cumplen esta función





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Las balsas-jaulas son el principal insumo de los centros de cultivos, las cuales deben tener resistencia y durabilidad en el tiempo que cumplan su funcionamiento (vida útil)

El problema primordial en su desempeño es el eventual garro de los elementos de anclaje (desplazamientos), lo que implica conocer bien su funcionamiento para encontrar una solución segura

En cuanto a la medición de los agentes oceanográficos, estos estarán regulados de acuerdo a las recomendaciones realizadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), donde en su publicación N°3201 hacen mención a la medición de estos estudios

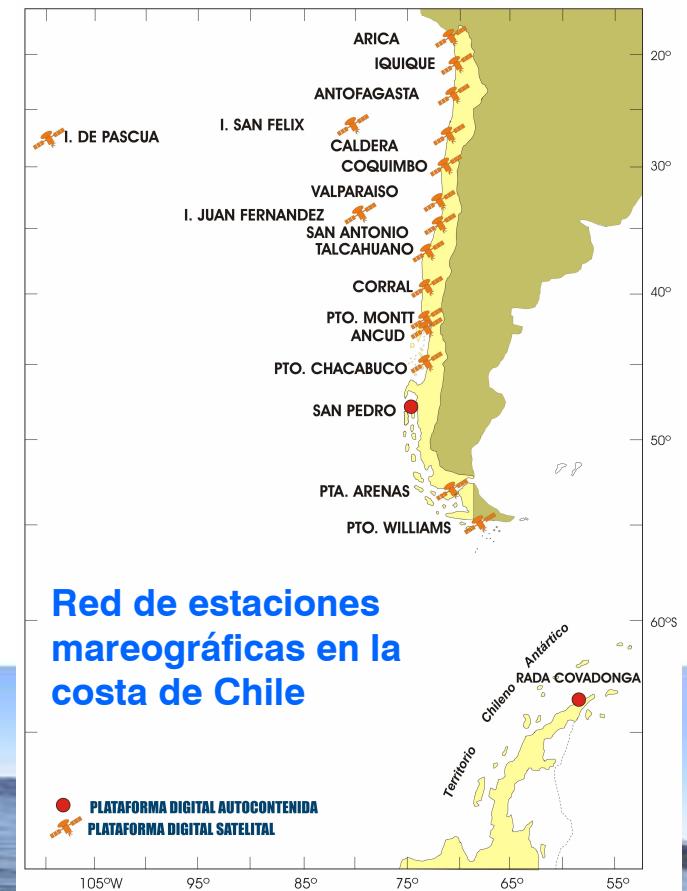
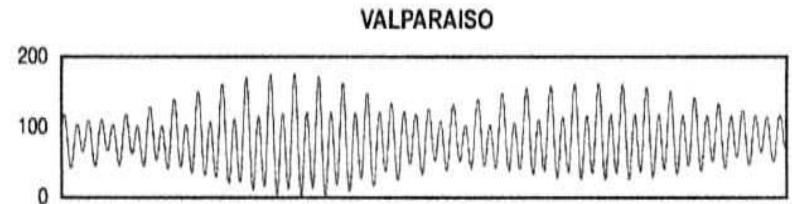
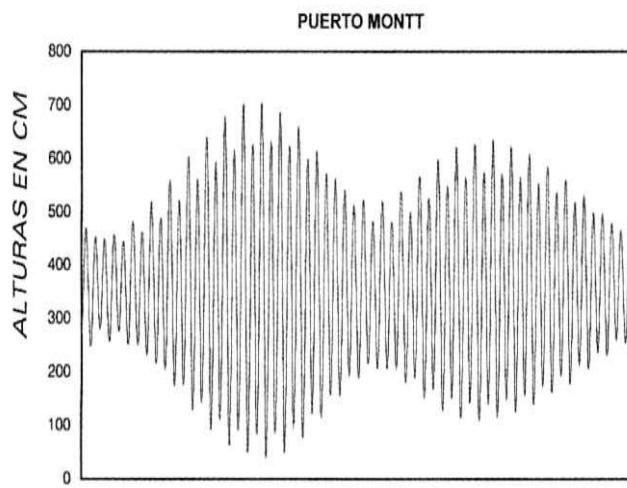


CONDICIONES NATURALES

MAREA

La marea es uno de los principales agentes que condicionan la hidrodinámica en sistemas semicerrados (estuarios, fiordos, etc.), por lo que su estudio es fundamental para establecer los niveles de diseño

Las diferencias de rangos entre distintas estaciones de la costa de Chile pueden ser llegar a ser considerables

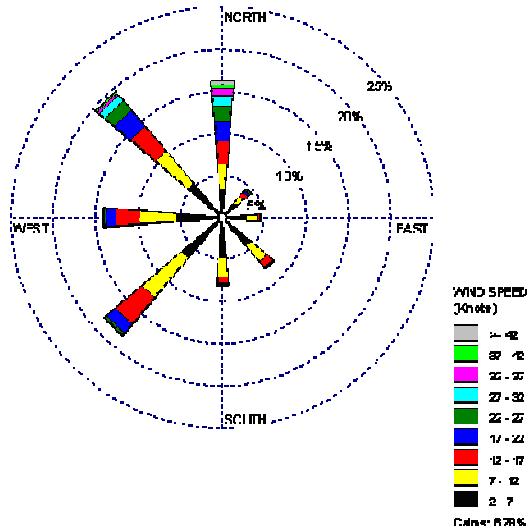


Red de estaciones
mareográficas en la
costa de Chile

● PLATAFORMA DIGITAL AUTOCONTENIDA
→ PLATAFORMA DIGITAL SATELITAL



UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

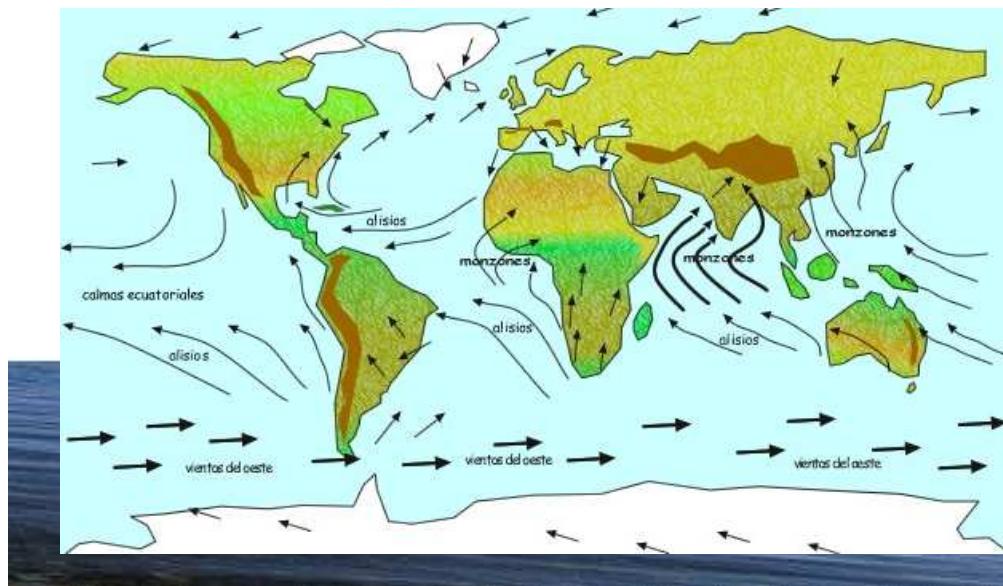


VIENTO

El estudio de viento estará orientado a determinar los siguientes conceptos:

La intensidad y dirección del viento extremo, que entrega el valor del viento de diseño que se utiliza para establecer las cargas externas sobre las secciones expuestas

Los vientos operacionales, en intensidades y dirección, se utilizan para establecer el patrón de corrientes





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

Se deben tener presentes aquellos lugares donde se disponga de estaciones pertenecientes a instituciones que administren datos históricos de vientos de largo plazo, tales como Dirección Meteorológica de Chile (Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Santiago) y el Servicio Meteorológico de la Armada (Playa Ancha, Valparaíso)



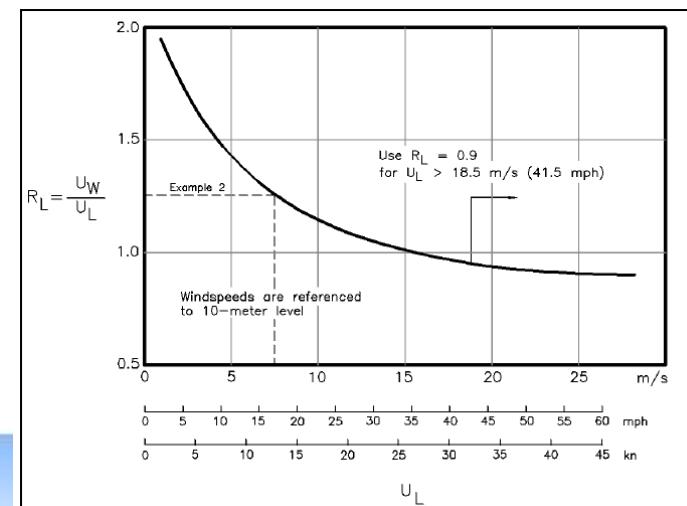
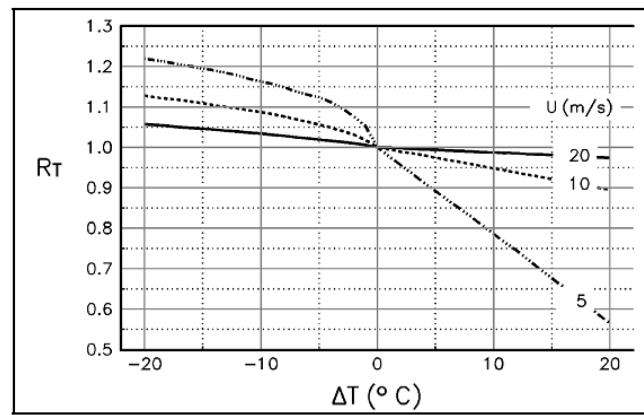
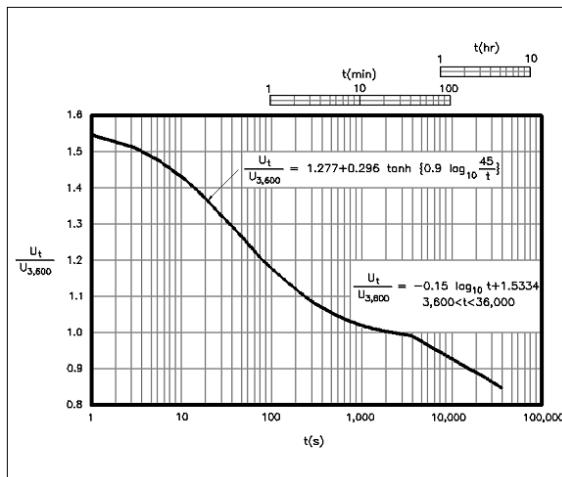
Dirección General de Aeronáutica Civil
Dirección Meteorológica de Chile
Meteorología Aeronáutica





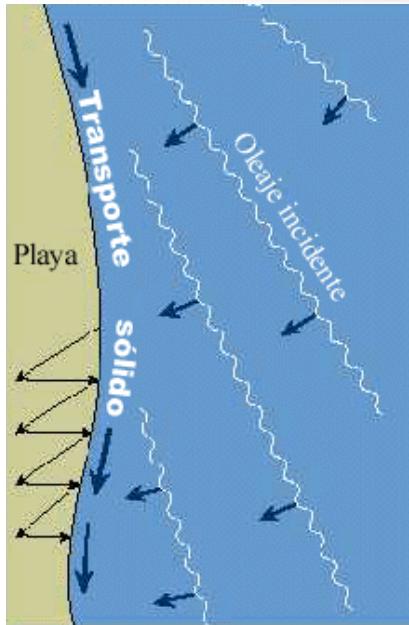
Los datos obtenidos en los estudios de viento, deben corregirse de acuerdo a los siguientes conceptos:

- Corrección por variabilidad temporal del viento
- Corrección por variabilidad vertical del viento
- Corrección por diferencia de temperatura entre el aire y el agua
- Corrección por ubicación del instrumento (tierra o agua)



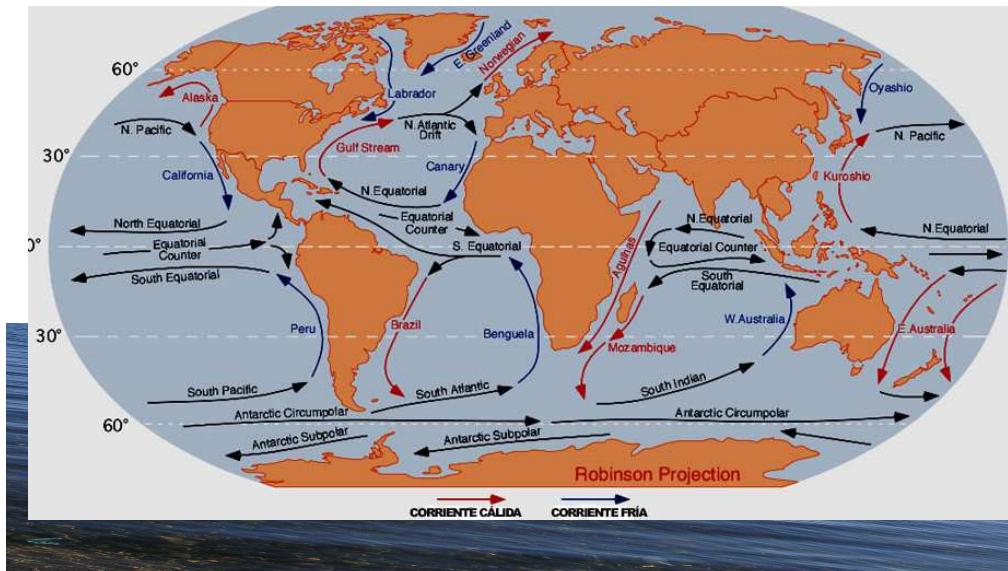


UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



CORRIENTES

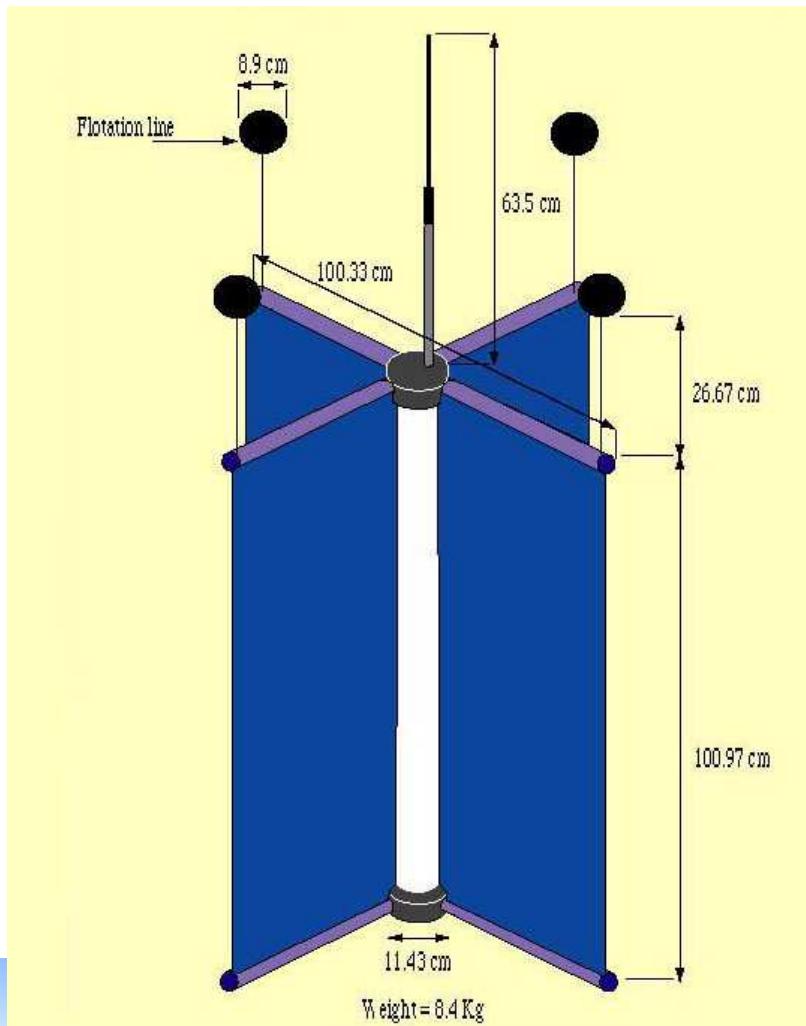
Las corrientes son un movimiento de traslación, continuado y permanente de una masa de agua
Los agentes externos que generan movimiento en el agua de mar estarán principalmente relacionados, en el caso de fiordos y estuarios, con la acción de la marea, el viento y el flujo de río



El estudio de corrientes tiene por finalidad caracterizar los patrones de corrientes, tanto en dirección como en velocidad, dominantes (mayor magnitud) en el sector de estudio

El método lagrangiano, que se realiza con el uso de derivadores, tiene por finalidad proveer la información necesaria para conocer la trayectoria de las partículas superficiales y subsuperficiales del mar

Las mediciones con derivadores se deben realizar por 12 horas en dos oportunidades durante el mismo mes, una en cuadratura (mínimo rango de mareas del mes) y la otra en sicigia (máximo rango de mareas del mes)





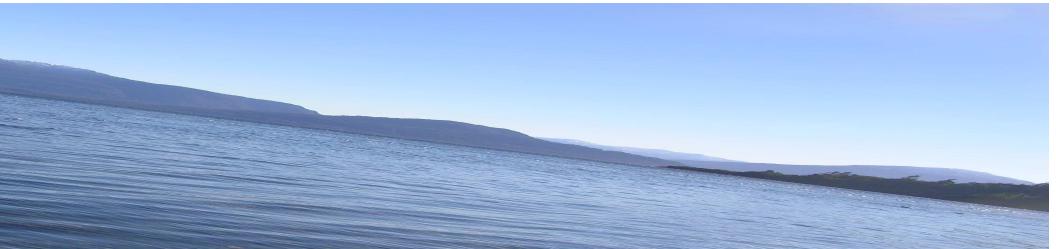
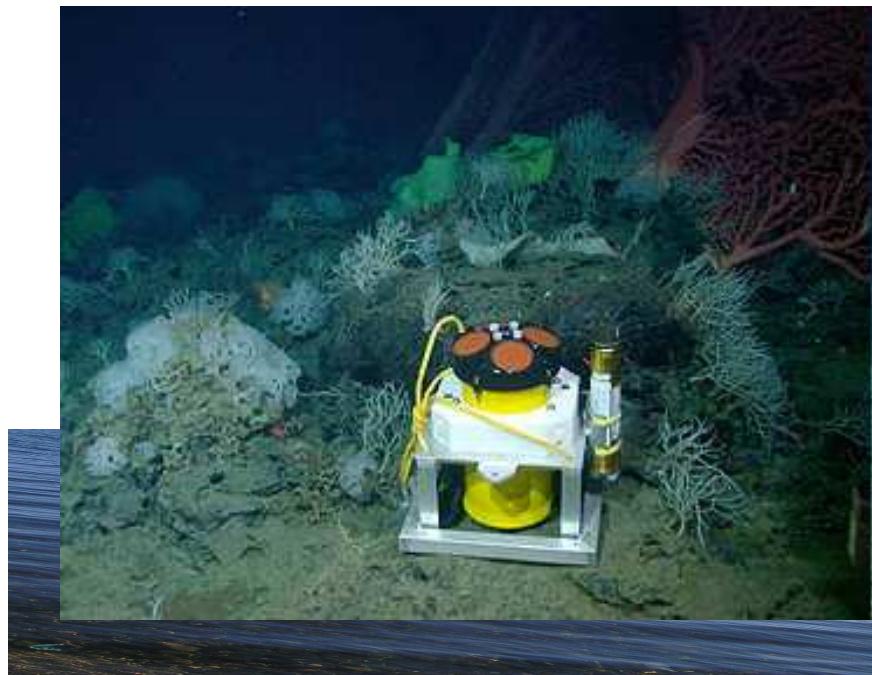
UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



El método euleriano, que consiste en mediciones en un punto fijo, las que se deberán realizar durante un período mínimo de 30 días. Esta medición se puede realizar en dos modalidades

Mediciones a profundidades discretas usando correntómetros, y a profundidades continuas usando un Perfilador Acústico de Corrientes Doppler (ADCP)

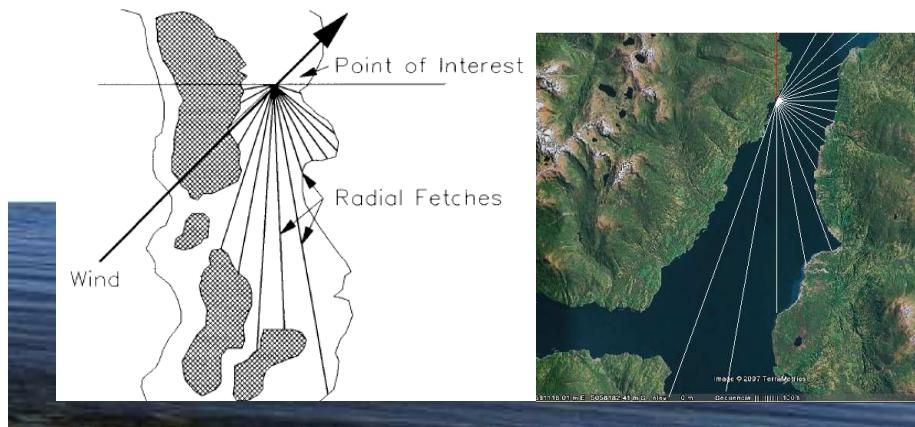
En correntómetros se recomienda utilizar un anclaje vertical consistente en un peso de fondo, una línea con boyas que aseguren verticalidad del sistema, y al menos tres correntómetros de registro autocontenido ubicados a profundidades representativas de condiciones de superficie, media y profunda





3.1.4 Clima de Oleaje en Aguas Interiores

- 3.1.4.1 El estudio de oleaje en aguas interiores se define como el cálculo de olas en el borde costero que no está sujeto a la influencia de zonas oceánicas (fiordos, canales y lagos).
- 3.1.4.2 Para el caso de aguas interiores, metodologías de hindcasting de olas locales (*seas*) deberán ser propuestas para aprobación del SHOA. Para esto, se utilizará información histórica de vientos, la cual deberá representar las condiciones locales de la zona en estudio para generar el clima de olas en el sitio de interés, tomando en cuenta todos los procesos de generación y transformación de oleaje.



OLEAJE

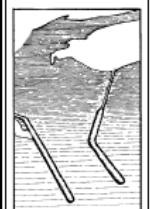
El estudio de olas estará orientado a determinar el oleaje extremo (dominante, o de mayor intensidad) en la zona de estudio, a objeto de determinar aspectos de operatividad y seguridad de las estructuras de cultivo, además de la determinación de los valores de diseño

Las olas que típicamente afectan a los módulos en aguas interiores son generadas por vientos locales denominados sea. Para caracterizar este oleaje, se debe recurrir a una metodología de pronóstico de oleaje utilizando información histórica de vientos





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



SHORE PROTECTION MANUAL

VOLUME I

Coastal Engineering Research Center

DEPARTMENT OF THE ARMY
Waterways Experiment Station, Corps of Engineers
PO Box 631
Vicksburg, Mississippi 39180



1984

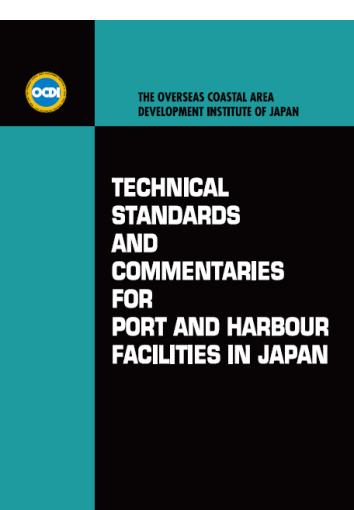
Approved For Public Release; Distribution Unlimited

Prepared for

DEPARTMENT OF THE ARMY
US Army Corps of Engineers
Washington, DC 20314

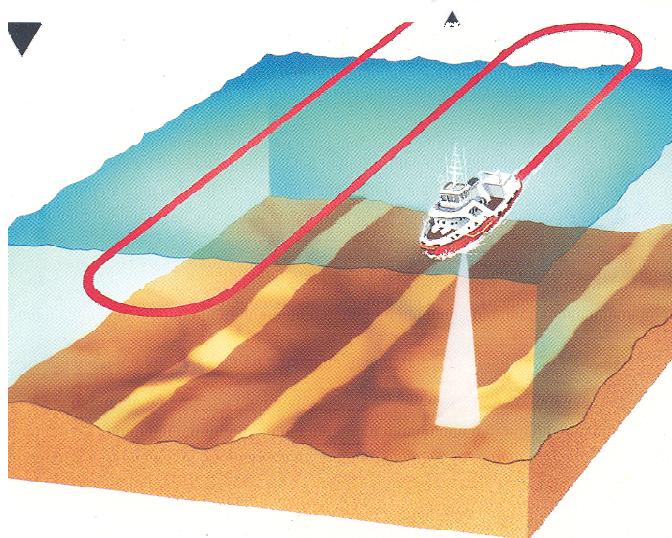
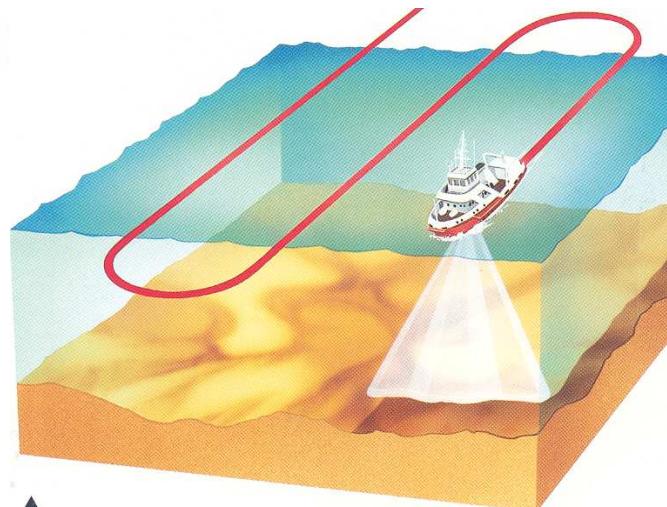
Las estructuras de cultivos se encuentran en lugares semicerrados donde el comportamiento y generación de oleaje suele ser bastante distinto que en costas abiertas
Por lo que hoy en el mercado existen software para la generación de oleaje a partir de datos de vientos

Se recomienda la utilización metodológica propuesta por el Shore Protection Manual (SPM) de 1984, que mediante el ACES realiza pronóstico de oleaje a partir de datos históricos de viento





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



BATIMETRÍA Y TIPO DE FONDO

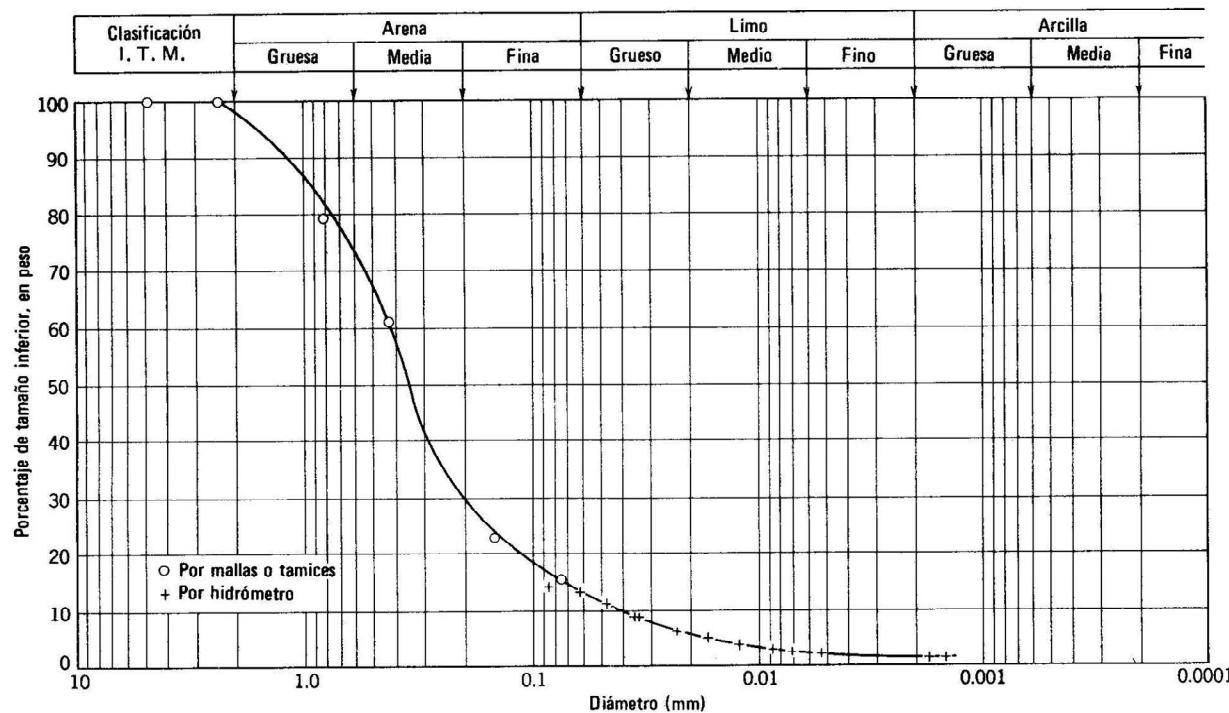
Un estudio batimétrico permite conocer las profundidades del fondo marino, que a su vez entregará una primera aproximación sobre las longitudes de las líneas de fondeo para un conjunto determinando de balsas-jaulas

Para ello existen distintas metodologías de medición, tales como ecosondas monohaz y multihaz, sistemas láser aerotransportados y otros sistemas mecánicos y de percepción remota

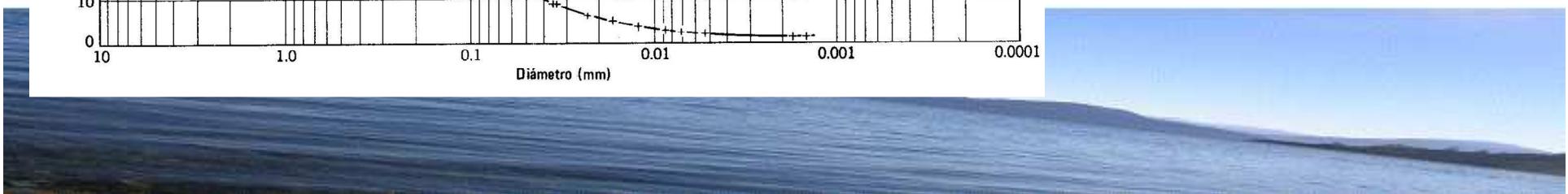


BATIMETRÍA Y TIPO DE FONDO

El estudio de la calidad de fondo tendrá como objetivo la caracterización del tipo de suelo marino del área de interés, relevante en la determinación del tipo de anclaje a utilizar



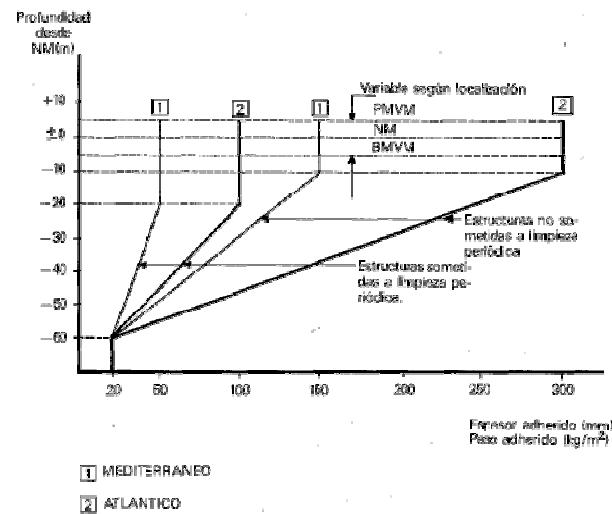
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002-0,06 mm
Arenas	0,06-2 mm
Gravas	2 mm-6 cm.
Cantos rodados	6-25 cm
Bloques	>25 cm





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

Cuantificación de adherencias marinas para aguas costeras españolas (ROM. 0.2-90)



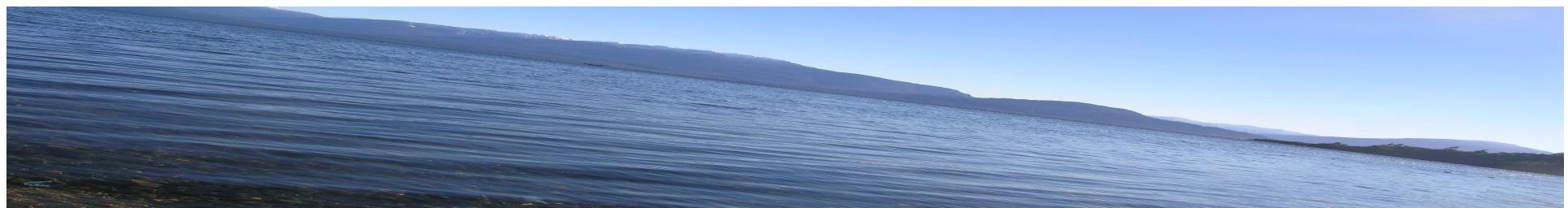
NM: Nivel medio del mar.
PMVM: Pleamar media de las vivas equinocciales (0,83 PMVE).
BMVM: Bajamar media de las vivas equinocciales (0,83 BMVE).

NOTA:

Para las adherencias que se desarrolle en agua dulce se supondrán pesos y espesores adheridos 1/3 de los indicados para el Mediterráneo, hasta 2 m por encima del Nivel Medio de Estaje.

FOULING

El fouling corresponde a los agentes marinos, ya sean algas o moluscos, que se adhieren a las estructuras marinas representando un aumento de la resistencia de la estructura a la corriente y al peso total de la estructura





Red pecera extraída
después de 6 meses de
operación



Efecto fouling sobre la red
pecera (aumento
considerable del diámetro)



ESTIMACIÓN DE SOLICITACIONES

Esto tiene relación con los estudios que se realizan en la descripción de los parámetros oceanográficos y con la forma de modelar las acciones del medio de carácter dinámico en algunos casos

Los inconvenientes de los estudios radican fundamentalmente en que surgen en la subestimación o inexactitud de las condiciones ambientales que existen en el sector de estudio, donde se requiere colocar las balsas-jaulas. Esto se traduce en cálculos erróneos que finalmente podrían producir fallas estructurales y de garreos en los artefactos navales

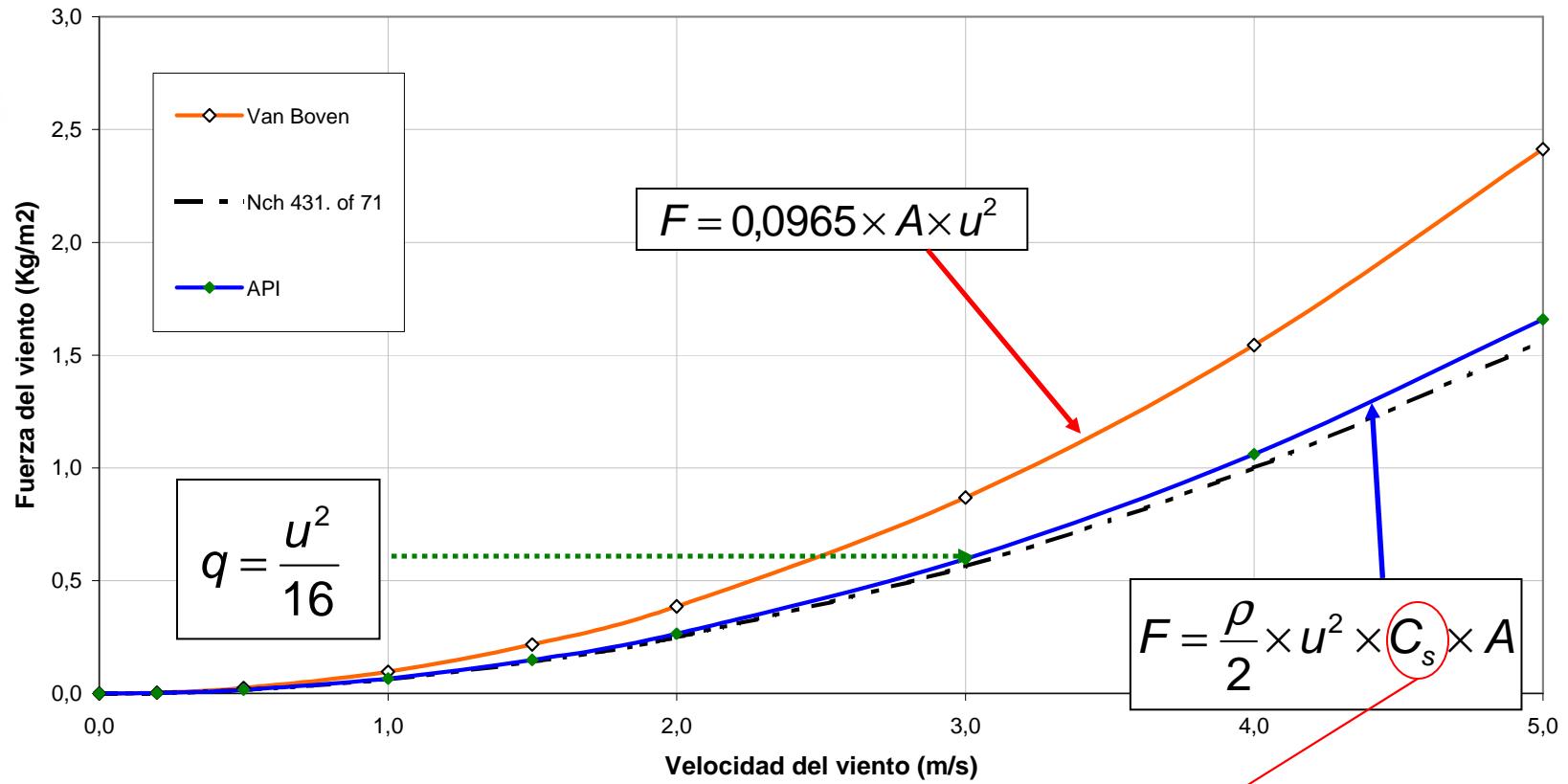
Como en Chile no existe normativa o recomendaciones orientadas al diseño de balsas-jaulas y específicamente en el fondeo de éstas, se recurre a bibliografía propuesta por diferentes empresas de carácter internacional (DNV, ABS, LR)





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

ESTIMACION DE FUERZAS POR VIENTO



Donde:

A: Área expuesta al viento (m²)

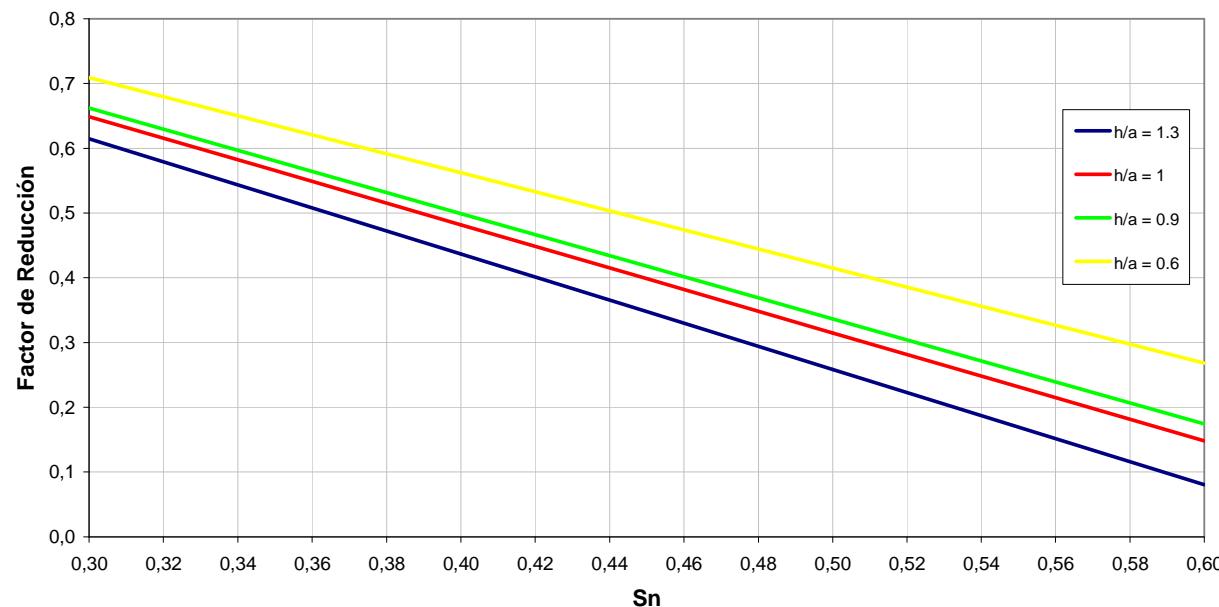
u: Velocidad del viento (m/s)

ρ: Densidad de viento (kg/m³)

C_s: Coeficiente de forma

Beams.....	1.5
Sides of buildings.....	1.5
Cylindrical sections.....	0.5
Overall projected area of platform.....	1.0

En cuanto a las expresiones anteriores, estas tienen su aplicabilidad a la estructura expuesta normal a la dirección del viento (estructura sobre la línea de flotación) y no sobre las estructuras amarradas a ésta. Aquellos módulos ubicados a sotavento están protegidos por los otros módulos y por ende experimentan esfuerzos menores



Donde:

k: Factor de reducción

**Sn: Factor de Solidez
(cuociente entre área efectiva expuesta la flujo y el área total de la red)**

h: altura de la red (m)

a: distancia entre una red y la próxima (m)



$$k = \left(1.15 - 1.67 \times S_n \times \sqrt{\frac{h}{a}} \right) \quad \text{para} \quad S_n \leq 0.6$$

$$k = \left(1.15 - 4 \sqrt{\frac{h}{a}} \right) \quad \text{para} \quad S_n > 0.6$$



$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2$$

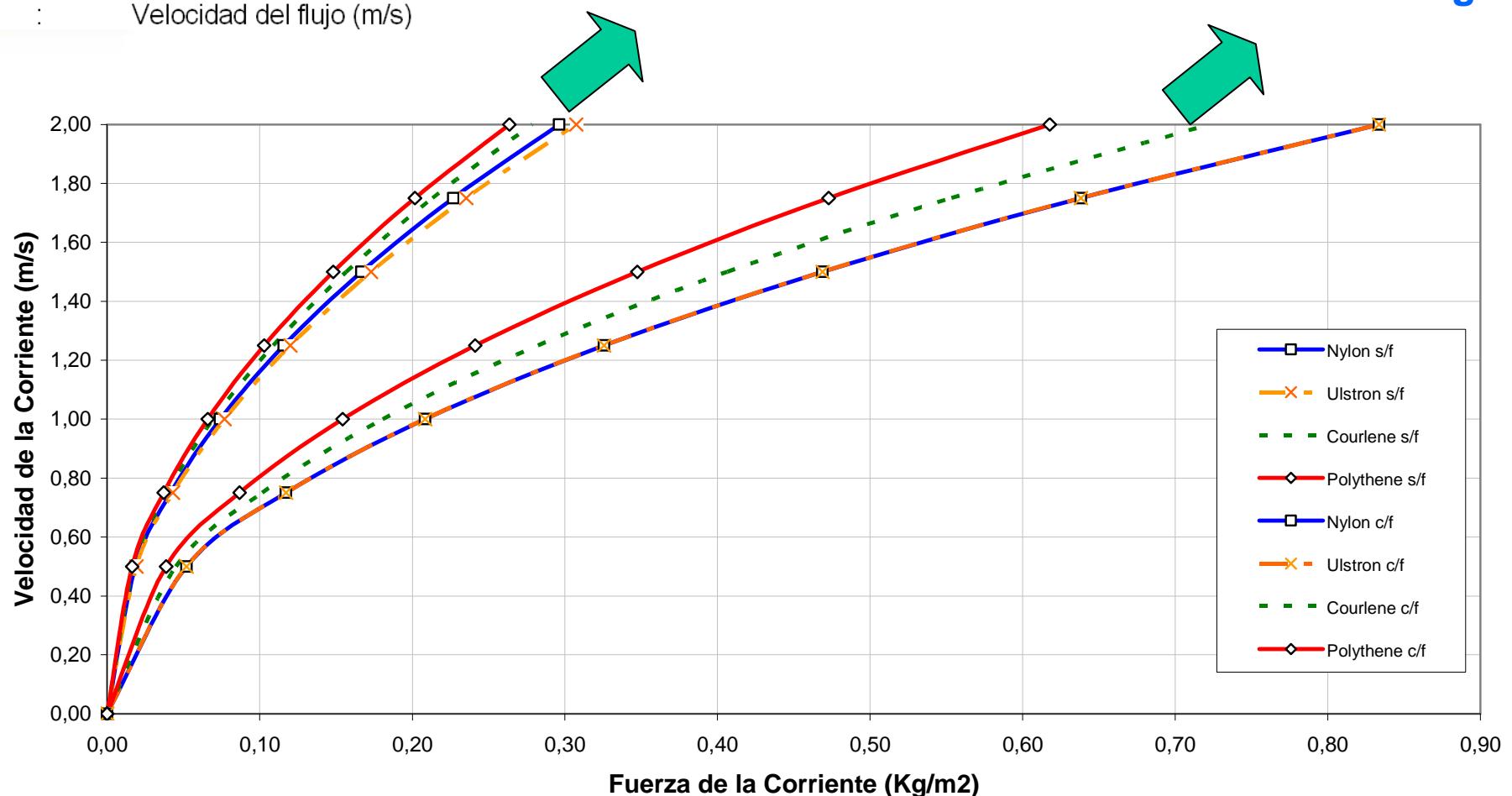
Donde:

- F : Fuerza debido a las corrientes (N)
- ρ : Densidad de agua de mar (kg/m^3)
- C_d : Coeficiente de arrastre
- A : Área expuesta efectiva al flujo (m^2)
- V : Velocidad del flujo (m/s)

ESTIMACION DE FUERZAS POR CORRIENTES

Sin Fouling

Con Fouling



$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2$$

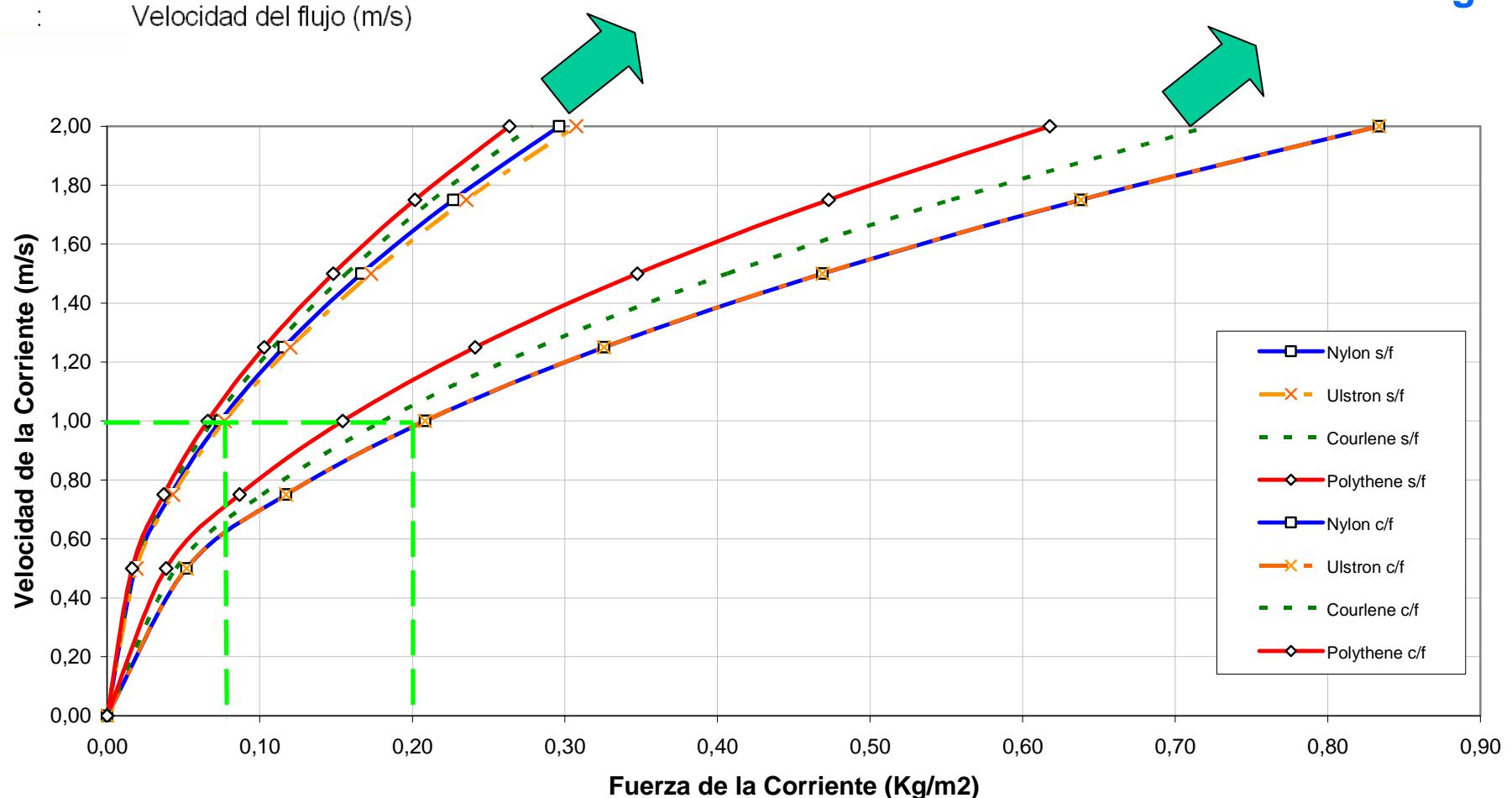
Donde:

- F : Fuerza debido a las corrientes (N)
- ρ : Densidad de agua de mar (kg/m^3)
- C_d : Coeficiente de arrastre
- A : Área expuesta efectiva al flujo (m^2)
- V : Velocidad del flujo (m/s)

ESTIMACION DE FUERZAS POR CORRIENTES

Sin Fouling

Con Fouling



$$Cd = 1 + 3,77 \times \left(\frac{d}{a}\right) + 9,37 \times \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

Para redes con nudos

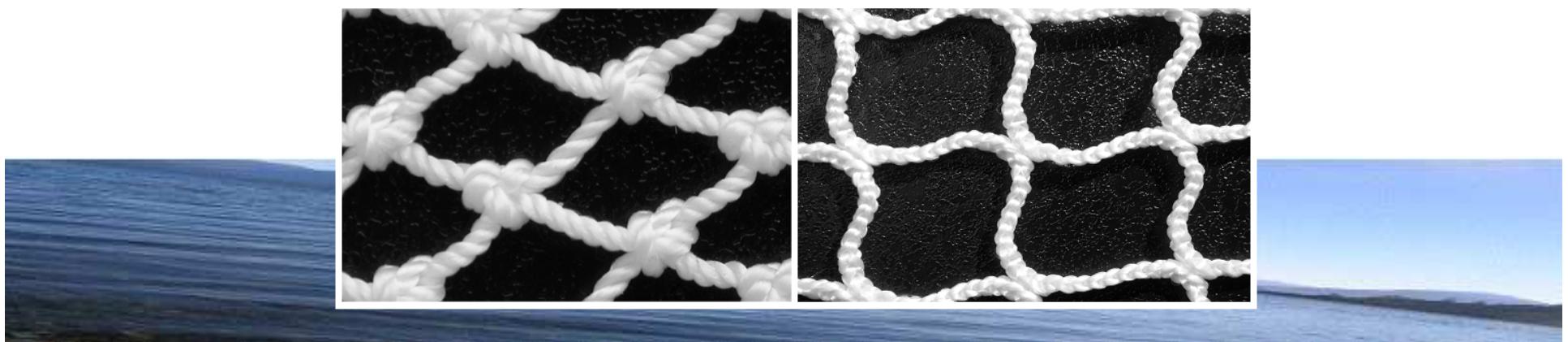
$$Cd = 1 + 2,73 \times \left(\frac{d}{a}\right) + 3,12 \times \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

Para redes sin nudos

$$A = 4 \times m \times n \times d \times a$$

Donde:

- | | | |
|---|---|---|
| A | : | Área expuesta efectiva al flujo (m ²) |
| m | : | número de mallas verticales por unidad de longitud. |
| n | : | número de mallas horizontales por unidad de longitud. |
| d | : | diámetro de la barra (m) |
| a | : | tamaño de la barra (m) |





De acuerdo a la Rudi y Aarnes (MARINTEK)

Algunos autores plantean que la velocidad de la corriente disminuye en un 10 % al traspasar de una red a otra. Por lo que el factor de reducción se puede calcular de la siguiente manera:

ENVIRONMENTAL FORCES ON A FLOATING CAGE SYSTEM, MOORING CONSIDERATIONS

H. Rudi, J.V. Aarsnes and L.A. Dahle, MARINTEK A/S, Trondheim, Norway.

Due to general environmental as well as biological reasons, fishfarming tend to go into less sheltered areas with improved water quality. This imply that ocean cages must be able to withstand seastates in the range of 2-5 m and current velocities of 2-3 kn. This trend will increase the demand for accurate prediction of the environmental forces including current and wave forces, acting on the cage system. Based on results from current forces and dynamic motion measurements, different mooring systems has been evaluated and a detailed mooring analysis of this actual cage system is outlined.

INTRODUCTION

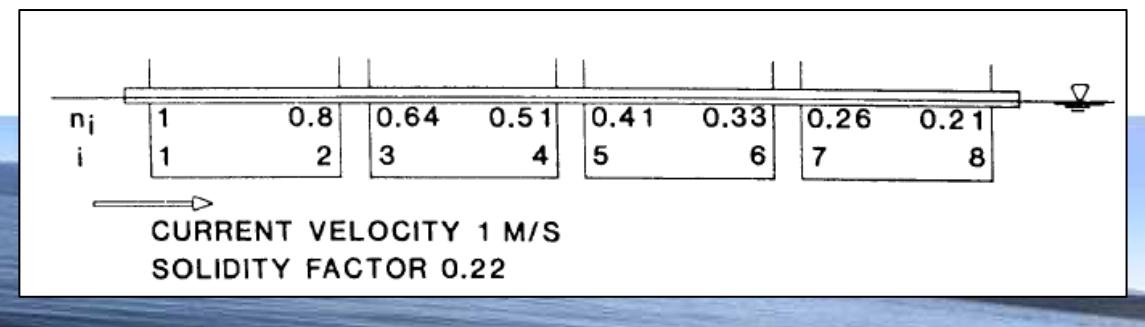
Among Norwegian fish farmers and manufacturers of fish farming equipment there has been an increasing interest for the environmental loads from wind, current and waves acting on the fish farming plants.

$$k = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

Donde:

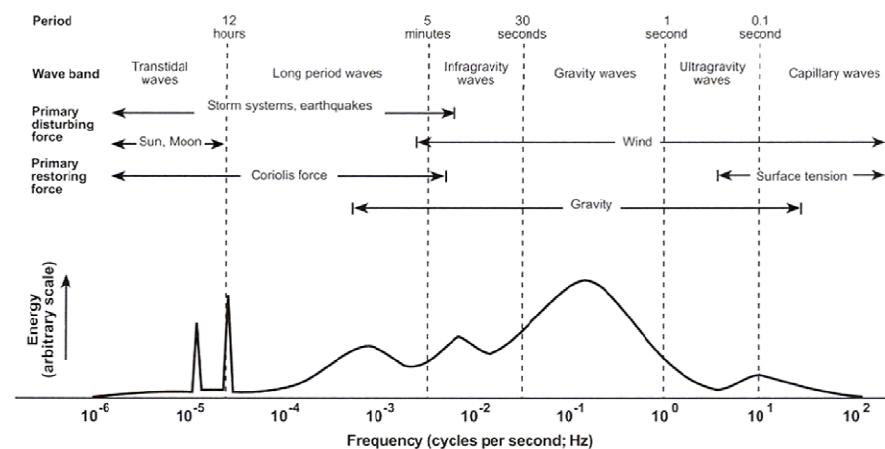
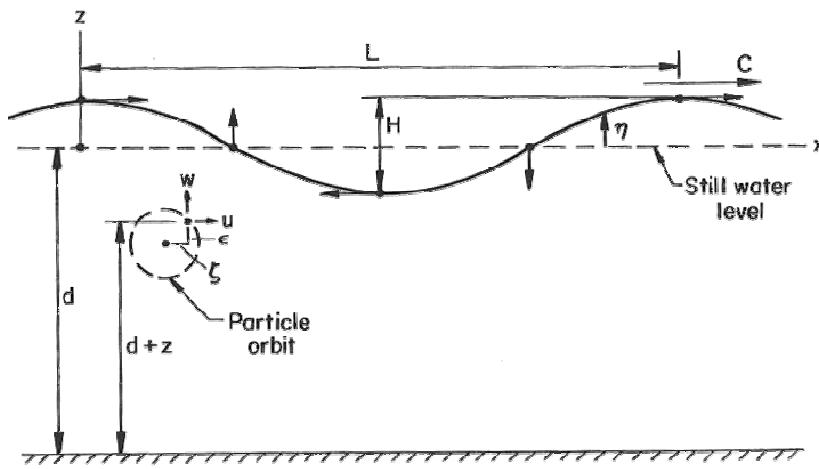
V_2 : Velocidad de la corriente en la posición n+1(m/s).

V_1 : Velocidad de la corriente en la posición n (m/s).



ESTIMACION DE FUERZAS POR OLEAJE

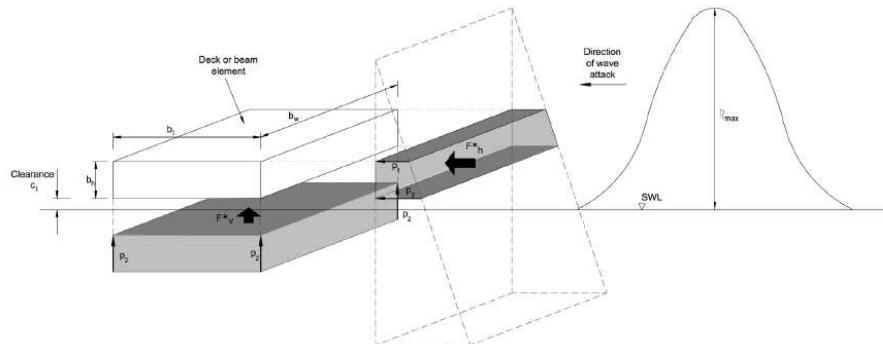
Las fuerzas generadas por el oleaje tienen carácter dinámico por lo que su análisis es más complejo que los casos anteriores. Para comprender en forma adecuada el efecto del oleaje sobre la estructura flotante, se introducen conceptos básicos de mecánicas de olas



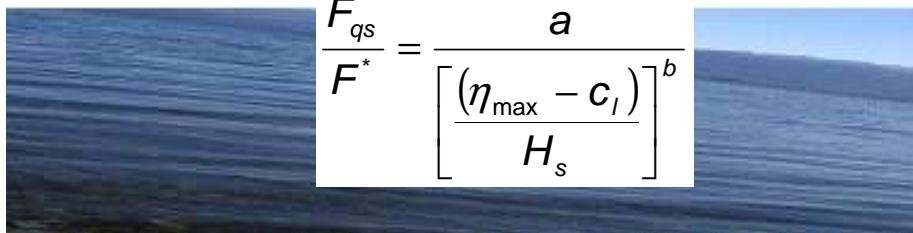
Existen variados mecanismos de generación de ondas en el océano, tales como: viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc. Por lo tanto dependiendo de estos diferentes mecanismos las ondas se comportan distintamente y principalmente sus características difieren unas con otras (períodos, longitud, etc). Para el caso de estudio, las ondas gravitacionales (3 a 30 s) serán utilizadas para los distintos análisis en el presente documento



UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



Wave load and configuration	a	b
Upward vertical forces (seaward beam & deck)	0.82	0.61
Upward vertical forces (internal beam only)	0.84	0.66
Upward vertical forces (internal deck, 2 and 3-d effects)	0.71	0.71
Downward vertical forces (seaward beam & deck)	-0.54	0.91
Downward vertical forces (internal beam only)	-0.35	1.12
Downward vertical forces (internal deck, 2-d effects)	-0.12	0.85
Downward vertical forces (internal deck, 3-d effects)	-0.80	0.34



$$\frac{F_{qs}}{F^*} = \frac{a}{\left[\frac{(\eta_{max} - c_l)}{H_s} \right]^b}$$

ESTIMACION DE FUERZAS POR OLEAJE

Las fuerzas verticales y horizontales se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$F_v^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_l} p_{hyd} dA \cong b_w \times b_l \times p_2$$

$$F_h^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_l} p_{hyd} dA \cong b_w (\eta_{max} - c_l) \frac{p_2}{2} \quad \text{para:} \quad \eta_{max} \leq c_l + b_h$$

$$F_h^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_l} p_{hyd} dA \cong b_w b_h \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \quad \text{para:} \quad \eta_{max} > c_l + b_h$$

Los parámetros correspondientes a las expresiones anteriores se definen a continuación:

Desnivelingación máxima (Stansberg, 1991):

$$\eta_{max} = \frac{H_{max}}{2} \exp\left(\frac{2\pi}{L_m} \times \frac{H_{max}}{2}\right)$$

Altura de ola máxima (Goda, 2000):

$$H_{max} = H_s \times 0.706 \sqrt{\ln N_2}$$

Presión en la cara inferior del elemento:

$$p_1 = [\eta_{max} - (b_h + c_l)] \rho g$$

Presión en la cara superior del elemento:

$$p_2 = [\eta_{max} - c_l] \rho g$$

Wave load and configuration	a	b
Shoreward horizontal forces, F_{hs+} (seaward beam)	0.45	1.56
Shoreward horizontal forces, F_{hs+} (internal beam)	0.72	2.30
Seaward horizontal forces, F_{hs-} (seaward beam)	-0.20	1.09
Seaward horizontal forces, F_{hs-} (internal beam)	-0.14	2.82

MODELO ESTRUCTURAL

El modelo estructural comprende el análisis de los sistemas de fondeo, tanto en sus sistemas de amarres (cadenas y/o cables), sistemas de anclajes (muertos de hormigón, anclas, pernos) y el comportamiento de la estructura en general

La finalidad de esta propuesta es generar expresiones que describan el comportamiento y calculen las tensiones y desplazamientos de la estructura

SISTEMAS DE FONDEO

El sistema de fondeo, tal como se definió anteriormente tiene por finalidad contrarrestar o resistir las fuerzas estáticas y dinámicas que afectan a las estructuras de cultivos. Para esto se proponen diferentes formulaciones que ayudan a comprender de una manera práctica su funcionamiento

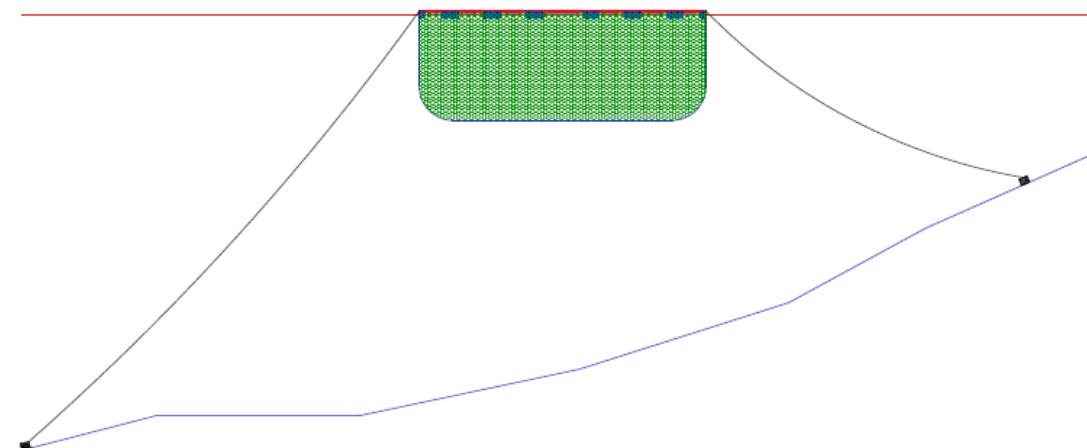
Se analizarán dos tipos de configuraciones



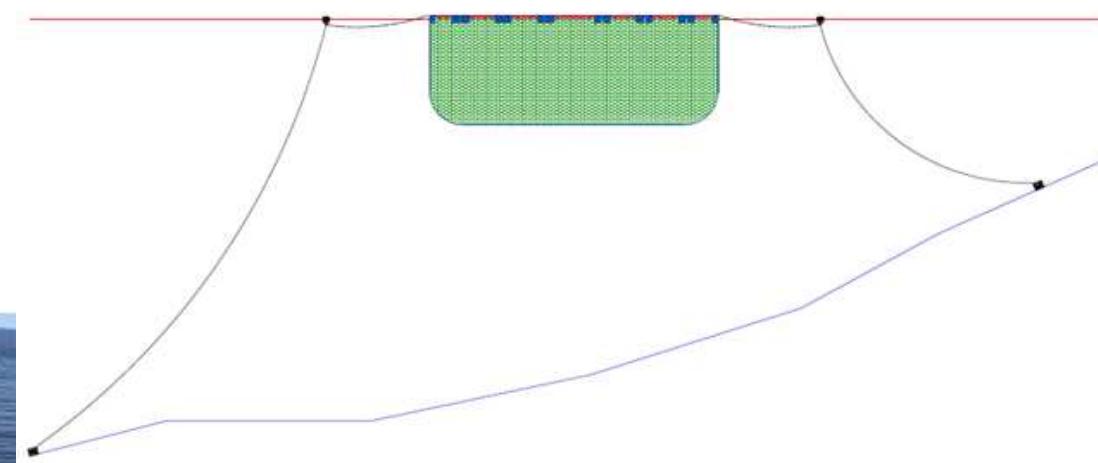


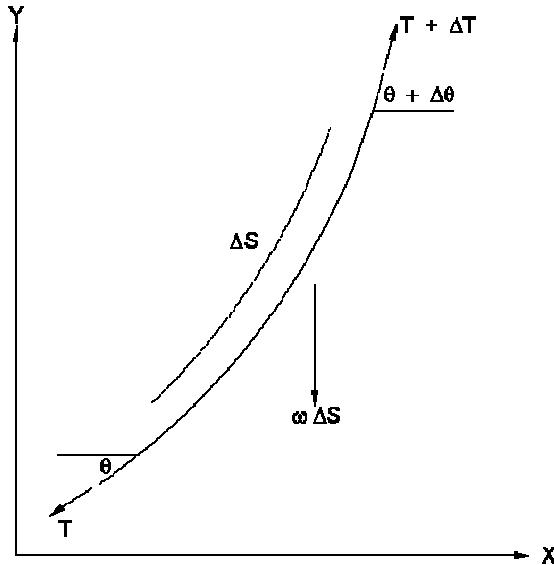
UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

CONFIGURACIÓN TIPO 1



CONFIGURACIÓN TIPO 2





$$\sum F_h = 0$$

$$-T \cos(\theta) + (T + \Delta T) \cos(\theta + \Delta\theta) = 0$$

$$\frac{d(T \cos(\theta))}{ds} = \frac{d(T \cos(\theta))}{dx} = 0$$

$$T \cos(\theta) = \text{constante} = T_H$$

$$\sum F_v = 0$$

$$-T \sin(\theta) + (T + \Delta T) \sin(\theta + \Delta\theta) - \omega \Delta s = 0$$

$$\frac{dT \sin(\theta)}{ds} = \omega$$

$$d(T \sin(\theta)) = \omega ds$$

$$\frac{d(T \sin(\theta))}{d\theta} = \omega \frac{ds}{d\theta}$$

La catenaria es la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos que no está sometida a otras fuerzas distintas que su propio peso, donde se hacen despreciables los efectos de fuerzas por corrientes en el cable

PARA LA CONFIGURACIÓN TIPO 1

Diagrama de cuerpo libre



$$(x_2 - x_1) = \Delta x = \frac{T_H}{\omega} \ln(\sec \theta + \tan \theta) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$(y_2 - y_1) = \Delta y = \frac{T_H}{\omega} \sec \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

Se obtiene la relación tensión horizontal en función de los parámetros de las cadenas o cables que componen el sistema de fondeo, las propiedades físicas de las mismas y las condiciones naturales del sector de emplazamiento

$$T_H = \frac{\Delta R \omega}{\cosh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{T_H} \right)^2 \left[L_0^2 - \Delta Z^2 \right] + 1 \right]}$$

Donde:

ΔR : Distancia entre los dos puntos de anclaje

w : Densidad lineal del cable

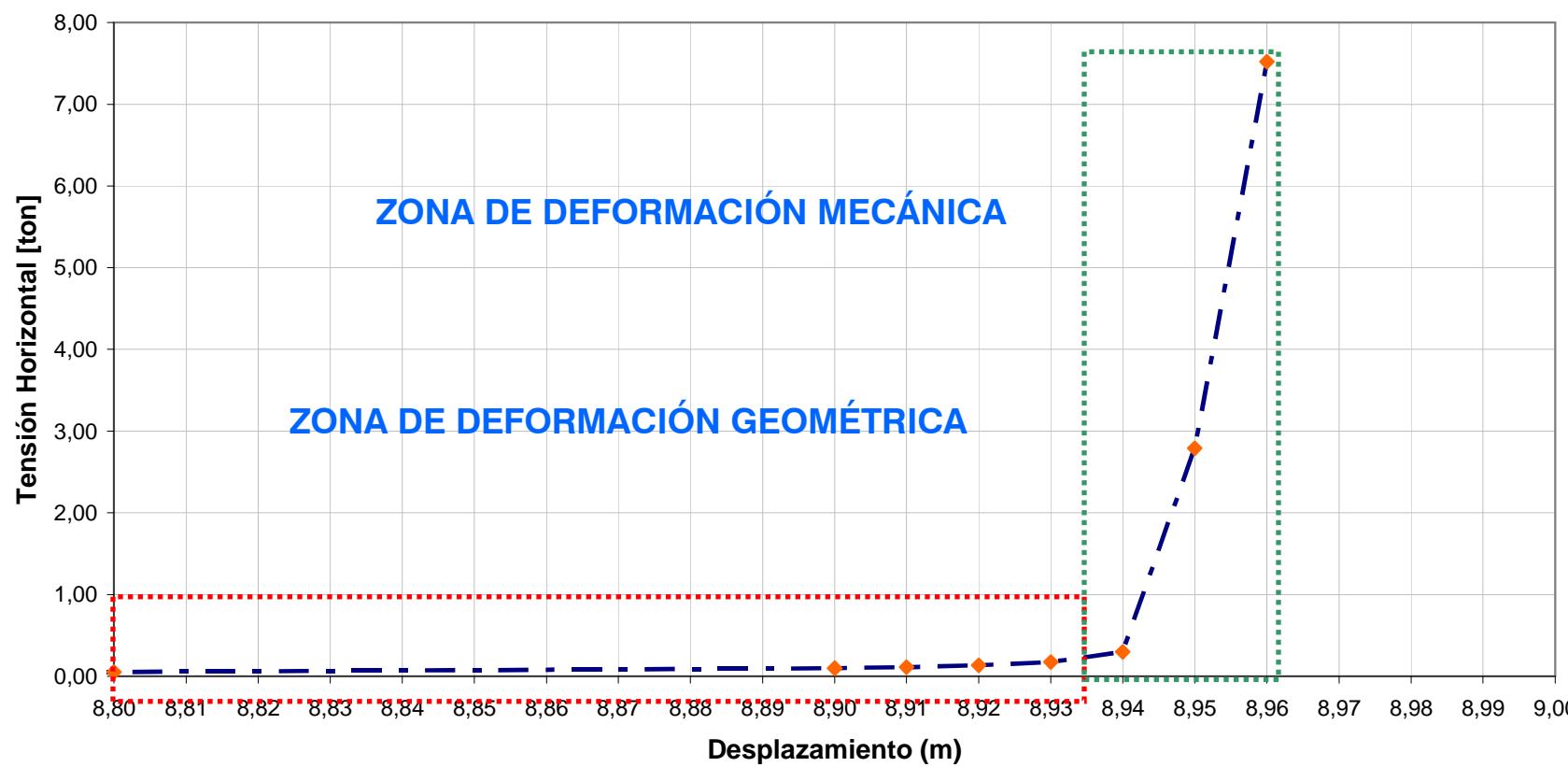
L_0 : Longitud inicial del cable

ΔZ : Profundidad medida desde el sistema de amarre de la balsa



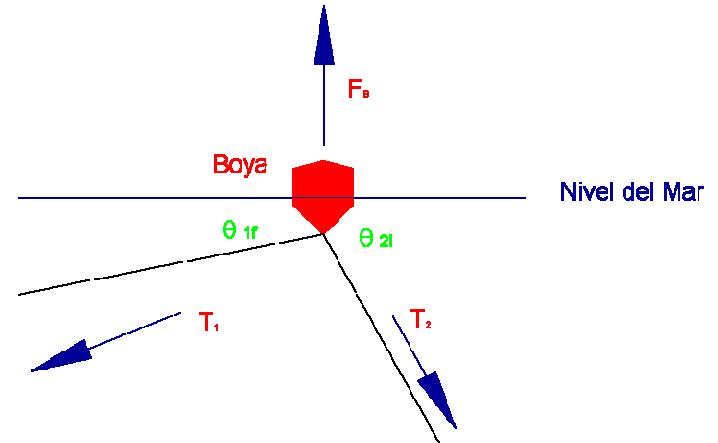
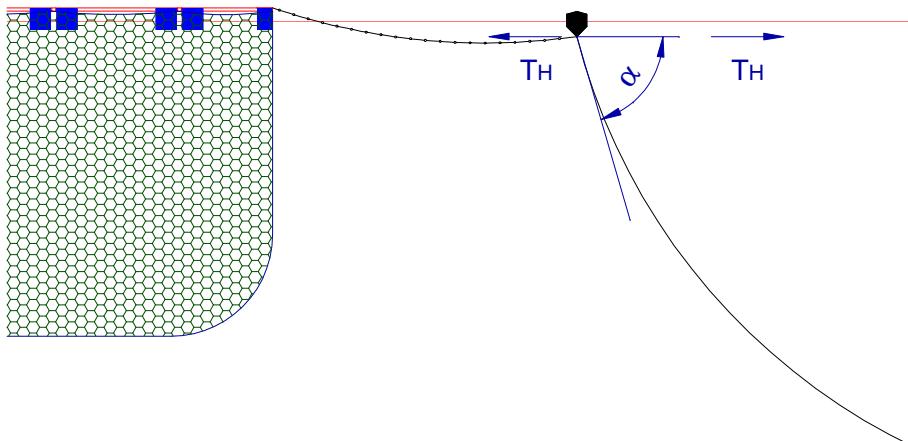
LA REACCIÓN TH - ΔR ES NO-LINEAL

Es importante mencionar que la relación $Th - \Delta R$ es debido a la deformación geométrica, es decir, que el cable o cadena es inextensible. Pero dado altos valores de Th esto no es cierto por lo que existe una parte de la curva que es determinada por la deformación geométrica y otra por una deformación mecánica (Ley constitutiva)



PARA LA CONFIGURACIÓN TIPO 2

Diagrama de cuerpo libre con la incorporación del elemento
boya



Dos catenarias





PARA LA CONFIGURACIÓN TIPO 2

Planteamiento de las ecuaciones de equilibrio

$$\sum Fh = 0$$

$$-T_1 \cos(\theta_{1r}) + T_2 \cos(\theta_{2i}) = 0$$

$$-T_{H1} + T_{H2} = 0$$

$$T_{H2} = T_{H1}$$

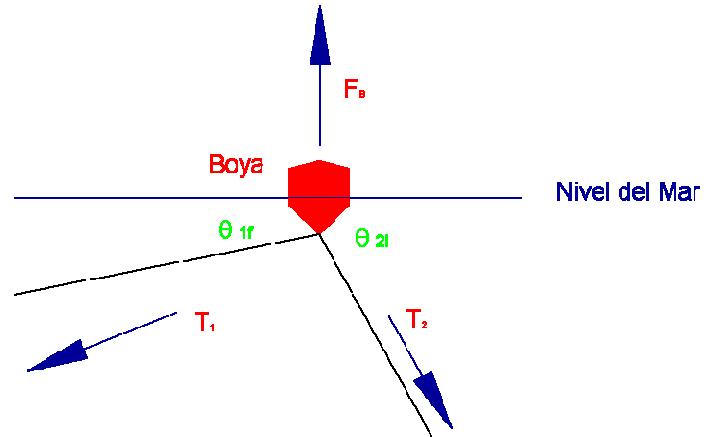
$$\sum Fv = 0$$

$$F_B - T_1 \sin(\theta_{1r}) - T_2 \sin(-\theta_{2i}) = 0$$

$$F_B = T_H (\tan(\theta_{1r}) - \tan(\theta_{2i}))$$

Donde F_B corresponde a la fuerza de la boyas

$$T_H = \frac{\Delta R}{\frac{1}{\omega_1} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{T_H} \right)^2 \left(L_{01}^2 - \Delta Z_{01}^2 \right) + 1 \right) \right] + \frac{1}{\omega_2} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_2}{T_H} \right)^2 \left(L_{02}^2 - \Delta Z_{02}^2 \right) + 1 \right) \right]}$$





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

**FINALMENTE SE OBTIENE UNA EXPRESIÓN GENERAL
PARA “n” TRAMOS**

$$T_H = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{\frac{1}{\varpi_i} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\varpi_i}{T_H} \right)^2 \left(l_{0i}^{-2} - \Delta \zeta_{oi}^{-2} \right) + 1 \right) \right]}$$



Dado el sistema anterior, se pueden obtener los ángulos de inicio y fin de la catenaria en función de las propiedades físicas de los cables o cadenas

$$\theta_1 = \alpha \tan \left(\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H} \right)^2 - 1} - \left(\frac{L_0 \omega}{T_H} \right) \right)$$

$$\theta_2 = \alpha \cos \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H} \right)} \right)$$

Por lo tanto la fuerza de la boyas queda definida de la siguiente manera:

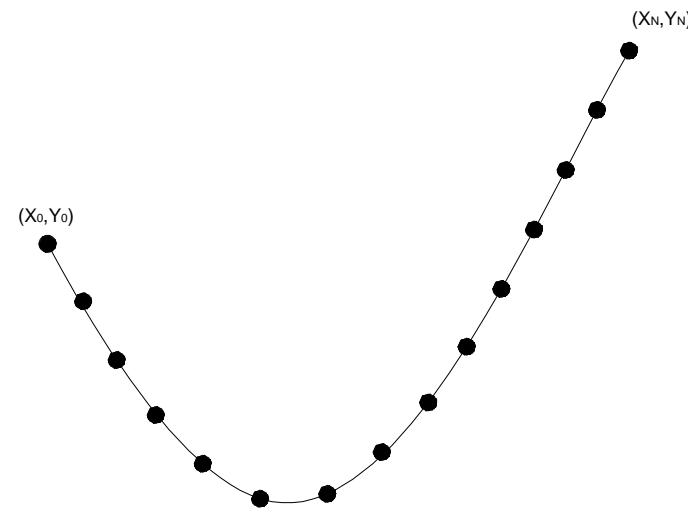
$$F_B = T_H \left(\tan \left(\alpha \cos \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z_1 \omega}{T_H} \right)} \right) \right) - \tan \left(\alpha \tan \left(\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_2} + \frac{\Delta Z_2 \omega}{T_H} \right)^2 - 1} - \left(\frac{L_0 \omega}{T_H} \right) \right) \right) \right)$$





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
C H I L E

FLOTABILIDAD DEL MODELO PROPUESTO MEDIANTE ANÁLISIS DISCRETO



$$\sum F_H = 0$$

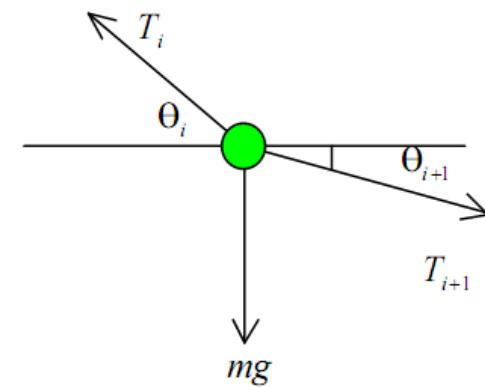


$$\sum F_V = 0$$

$$T_i \cos \theta_i = T_{i+1} \cos \theta_{i+1}$$

$$T_i \cos \theta_i = T_{i+1} \cos \theta_{i+1} = T_H = \text{constante}$$

$$T_i \sin \theta_i - T_{i+1} \sin \theta_{i+1} = mg$$



Los resultados del planteamiento propuesto:

$$\sum_{i=1}^N L_d = \sum_{i=1}^n \left[1 + \frac{(T_i)}{E \times A} \right] \times \frac{L_i}{N}$$

$$\theta_N = \tan^{-1}(\tan \theta_0 - \lambda)$$

$$\lambda = \frac{mg}{T_H}$$

Por lo tanto para que se obtenga el equilibrio, se tiene que dar la siguiente relación:

$$F_V = Flotabilidad \rightarrow F_V - Flotabilidad = 0$$

En caso de obtener una flotabilidad mayor o menor a las fuerzas verticales, Se deberán recalcular los parámetros de entrada variando los pesos de los elementos de fondeo (cable y/o cadena)





DETERMINACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE FONDO

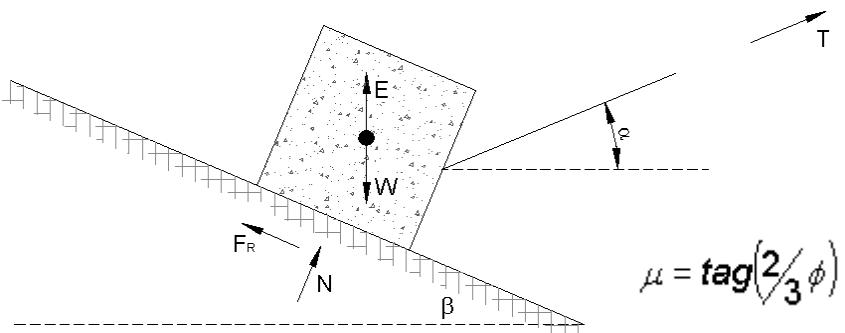
Muertos de Hormigón

Dado el siguiente esquema

Se tienen las siguientes ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_H = 0 \quad N - (W - E)\cos(\beta) + T\sin(\alpha + \beta)$$

$$\sum F_V = 0 \quad -F_R + (W - E)\sin(\beta) + T\cos(\alpha + \beta)$$



Clasificación	ANGULOS DE FRICCIÓN							
	Angulo de talud natural	Talud (vert. a hor.)	Para la resistencia residual					
			Para la resistencia máxima	Compacidad media		Compacta		
i (°)	φ cv (°)	tg φ cv	φ (°)	tg φ	φ (°)	tg φ		
Limo (no plastico)	26 a 30	1:2 1:1,75	26 a 30	0,488 0,577	28 a 32	0,532 0,625	30 a 34	0,577 0,675
Arena uniforme fina a media	26 a 30	1:2 1:1,75	26 a 30	0,488 0,577	30 a 34	0,577 0,675	32 a 36	0,675 0,726
Arena bien graduada	30 a 34	1:1,75 1:1,50	30 a 34	0,577 0,675	34 a 40	0,675 0,839	38 a 46	0,839 1,030
Arena y grava	32 a 36	1:1,60 1:1,40	32 a 36	0,625 0,726	36 a 42	0,726 0,900	40 a 48	0,900 1,110

$$F_R = (W - E)\sin(\beta) + T\cos(\alpha + \beta)$$

$$N = (W - E)\cos(\beta) - T\sin(\alpha + \beta)$$

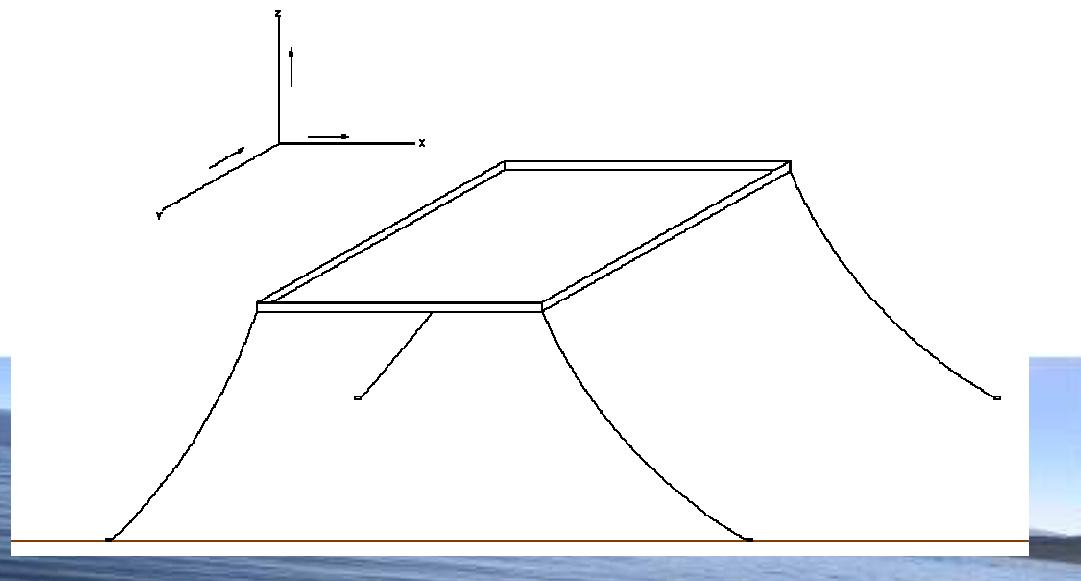
$$F_{Rmáx} = \mu N$$

$$FS = \frac{F_{Rmáx}}{F_R}$$

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD RESPECTO AL MODELO ESTRUCTURAL

Si se considera un módulo de prueba con las siguientes características iniciales

- Área de 100 m² (10 x 10)
- 4 líneas de fondeo, en cada una de sus aristas
- Fondeado a 8 m de profundidad (Batimetría regular)
- Longitud inicial de 11 m en cada línea de fondeo
- Distancia horizontal de 7,07 m, entre dispositivo de fondo y módulo de prueba.
- Fuerza externa = $F = (F_x, F_y) = (2,2)[ton]$

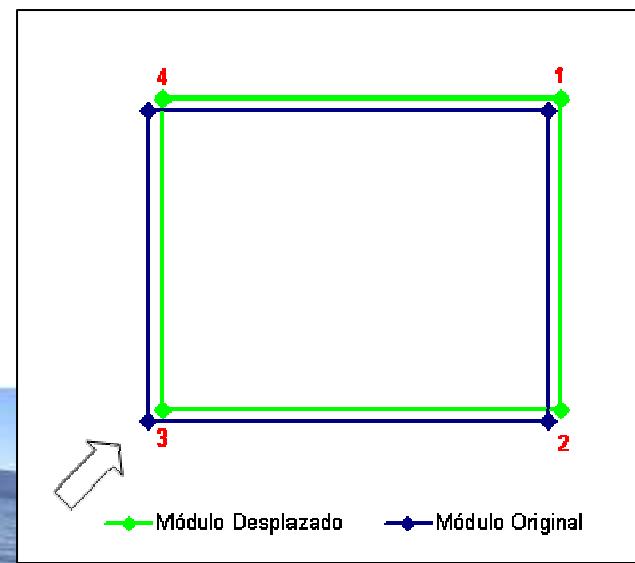
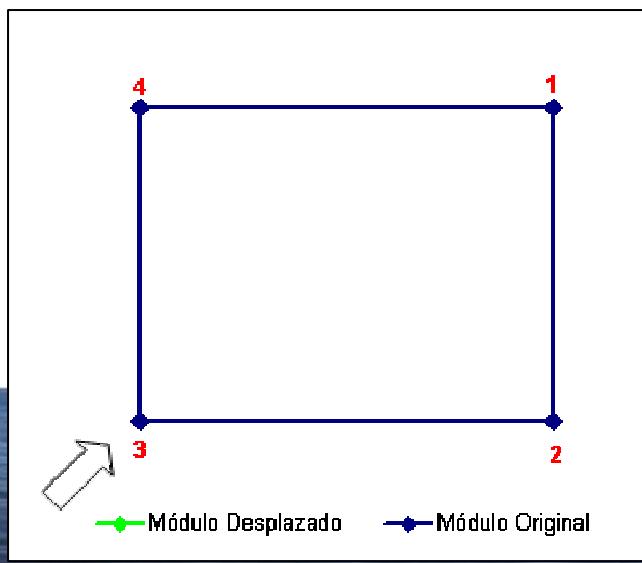




UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

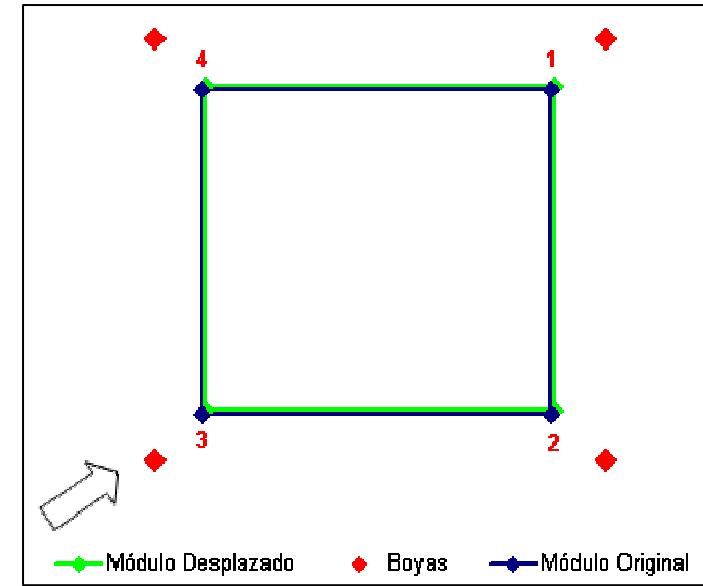
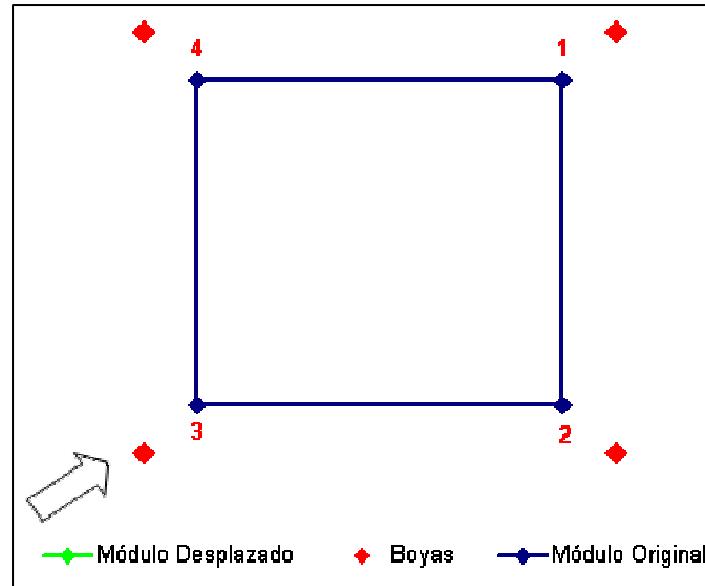
En la Tabla se observan las tensiones para la configuración tipo 1

	Condición Inicial	Condición Final
	T_H [ton]	T_H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	0,02
Línea 3	0,02	2,84
Línea 4	0,02	0,02
Δx (m)	0,00	0,36
Δy (m)	0,00	0,36
$\Delta \theta$ ($^{\circ}$)	0,00	0,00





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE



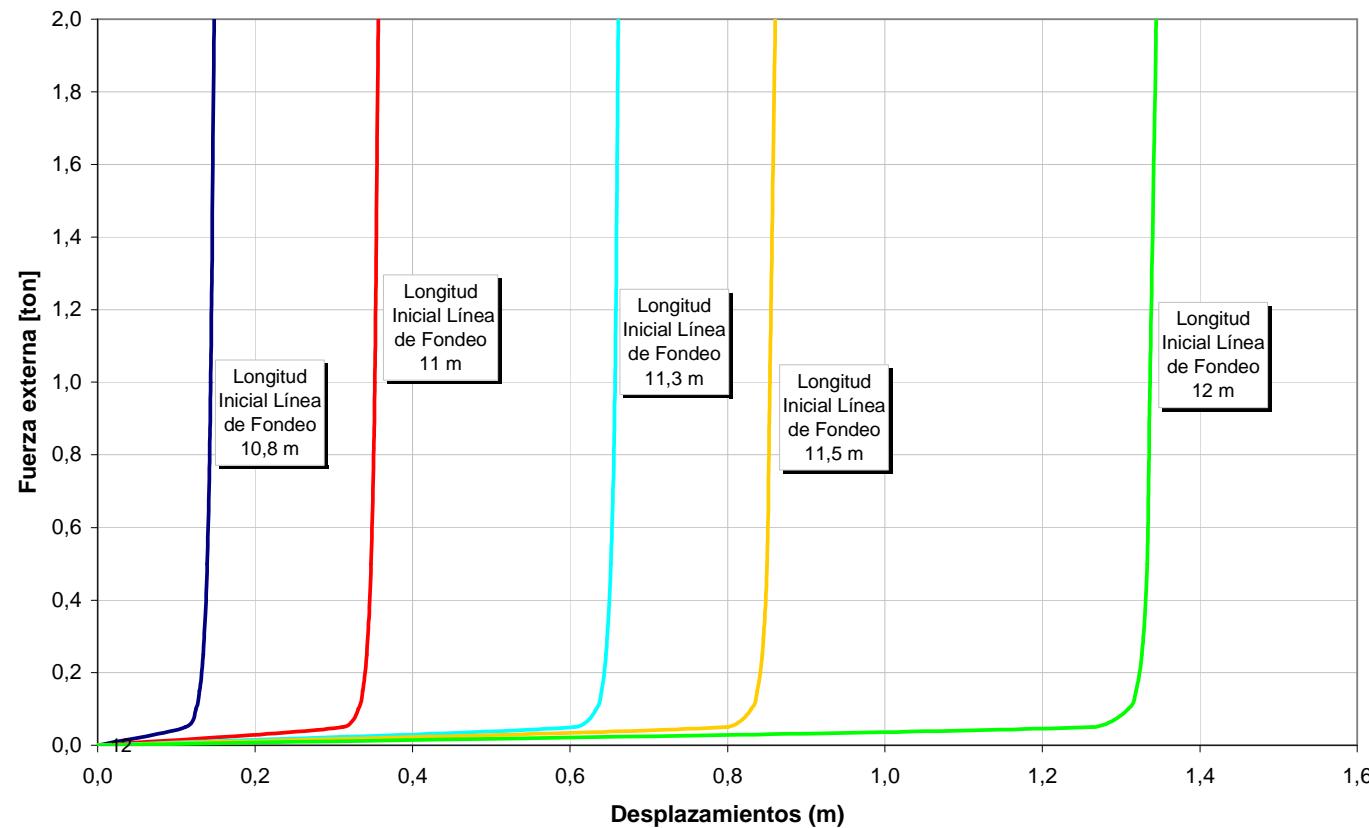
	Condición Inicial	Condición Final
	T_H [ton]	T_H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	0,02
Línea 3	0,02	2,84
Línea 4	0,02	0,02
Δx (m)	0,00	0,18
Δy (m)	0,00	0,18
$\Delta \theta$ (°)	0,00	0,00

Se obtienen resultados similares para la tensión horizontal, pero los desplazamientos son menores para la configuración tipo 2





VARIACIÓN DE LA LONGITUD INICIAL



Para una fuerza externa de 2 ton



Longitud Inicial (m)	10,8	11,0	11,3	11,5	12,0	10,8	11,0	11,3	11,5	12,0	T _H Inicial [ton]	T _H Final [ton]
	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01		
Línea 1	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03
Línea 2	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03
Línea 3	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	2,85	2,84	2,83	2,83	2,83	1,44	1,44
Línea 4	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03



Para un fuerza externa de 1 ton

Longitud Inicial (m)	10,8	11,0	11,3	11,5	12,0	10,8	11,0	11,3	11,5	12,0	T _H Inicial [ton]	T _H Final [ton]
	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01		
Línea 1	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03
Línea 2	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03
Línea 3	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	1,44	1,42	1,42	1,42	1,42	1,44	1,44
Línea 4	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
C I E

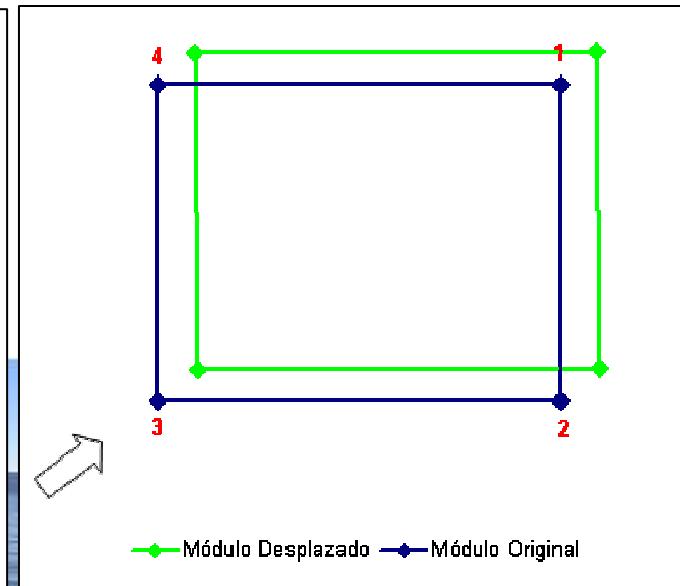
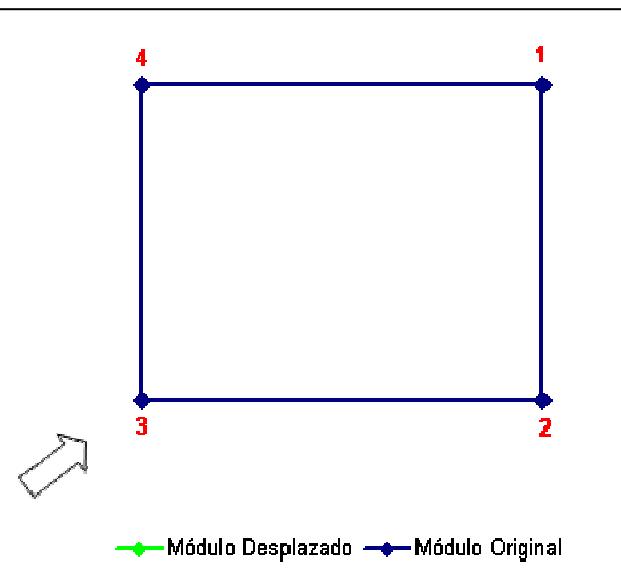
	Condición Inicial	Condición Final
	T_H [ton]	T_H [ton]
Línea 1	0,01	0,00
Línea 2	0,01	0,02
Línea 3	0,01	2,82
Línea 4	0,01	0,01
Δx (m)	-0,17	1,90
Δy (m)	0,39	2,00
$\Delta \theta$ (°)	0,00	0,35

Los aumentos de longitudes producen mayores desplazamientos

MODELO CON BATIMETRÍA IRREGULAR

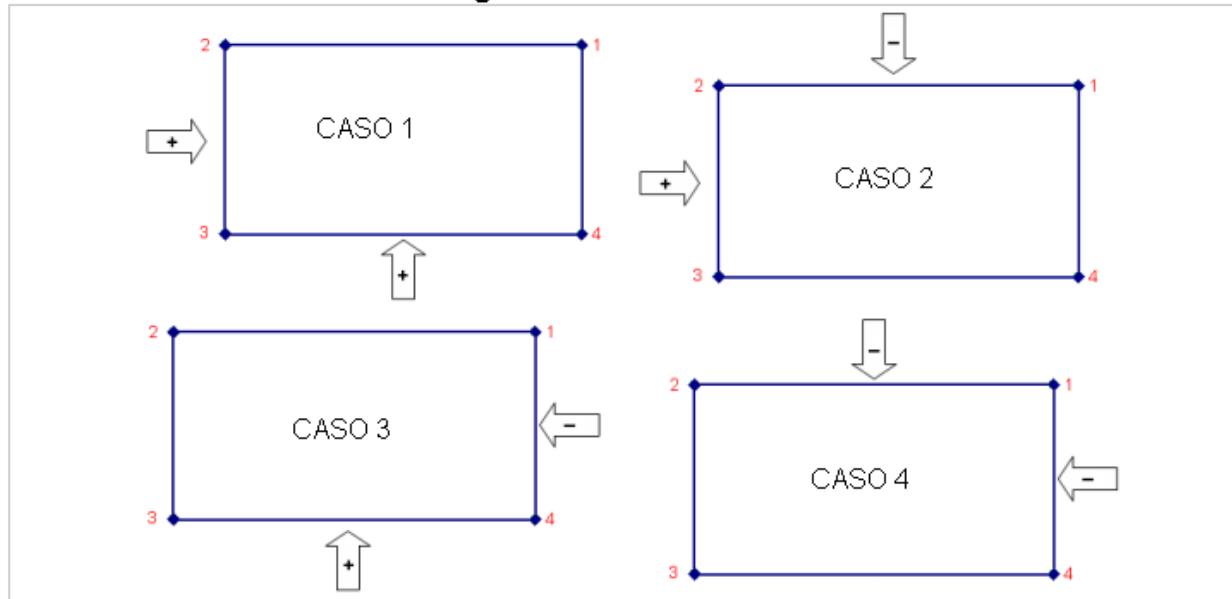
Dadas las siguientes condiciones iniciales:

- Área de 100 m² (10x10)
- Batimetria irregular con las siguientes características:
 - Línea 1 fondeada a -8 m, longitud inicial de 12 m
 - Línea 2 fondeada a -6 m, longitud inicial de 10 m
 - Línea 3 fondeada a -10 m, longitud inicial de 14 m
 - Línea 4 fondeada a -10 m, longitud inicial de 14 m
- Distancia horizontal de 7,07 m, entre dispositivo de fondo y módulo de prueba.
- Fuerza externa = $F = (F_x, F_y) = (2,2)$ [ton]



CAMBIO EN EL SENTIDO DE LAS FUERZAS EXTERNAS

Las tensiones responden a la magnitud total de la fuerzas externas



		T_H [ton]
Caso 1	Línea 1	0,01
	Línea 2	0,01
	Línea 3	2,84
	Línea 4	0,01
Caso 2	Línea 1	0,01
	Línea 2	2,84
	Línea 3	0,01
	Línea 4	0,01
Caso 3	Línea 1	0,01
	Línea 2	0,01
	Línea 3	0,01
	Línea 4	2,84
Caso 4	Línea 1	2,84
	Línea 2	0,01
	Línea 3	0,01
	Línea 4	0,01



Por lo tanto para conocer la complejidad del modelo, se realiza 4 modelaciones considerando, batimetría irregular con las condiciones iniciales mencionadas anteriormente y los 4 casos correspondientes al sentidos de las fuerzas externas

Caso 1

	Condición Inicial	Condición Final
	TH [ton]	TH [ton]
Línea 1	0,01	0,00
Línea 2	0,01	0,02
Línea 3	0,01	2,82
Línea 4	0,01	0,01
Δx (m)	-0,17	1,90
Δy (m)	0,39	2,00
$\Delta \theta$ (m)	0,00	0,35

Caso 2

	Condición Inicial	Condición Final
	TH [ton]	TH [ton]
Línea 1	0,01	0,05
Línea 2	0,01	2,82
Línea 3	0,01	0,01
Línea 4	0,01	0,01
Δx (m)	-0,17	-0,34
Δy (m)	0,39	-1,60
$\Delta \theta$ (m)	0,00	-5,39

Caso 3

	Condición Inicial	Condición Final
	TH [ton]	TH [ton]
Línea 1	0,01	0,05
Línea 2	0,01	0,00
Línea 3	0,01	0,01
Línea 4	0,01	2,81
Δx (m)	-0,17	-2,59
Δy (m)	0,39	1,27
$\Delta \theta$ (m)	0,00	3,48

Caso 4

	Condición Inicial	Condición Final
	TH [ton]	TH [ton]
Línea 1	0,01	2,82
Línea 2	0,01	0,04
Línea 3	0,01	0,00
Línea 4	0,01	0,01
Δx (m)	-0,17	-1,08
Δy (m)	0,39	-1,60
$\Delta \theta$ (m)	0,00	1,39



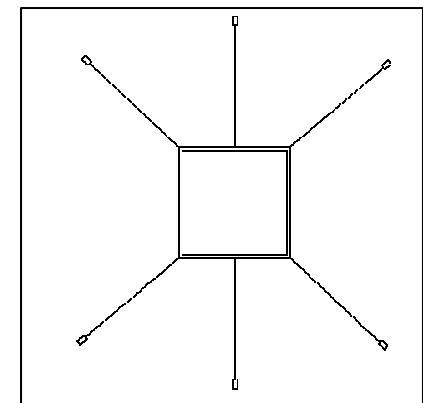
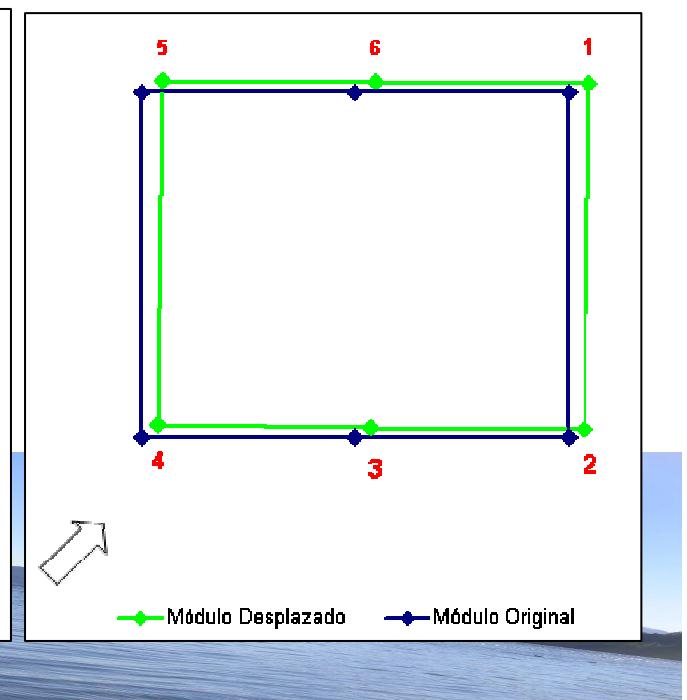
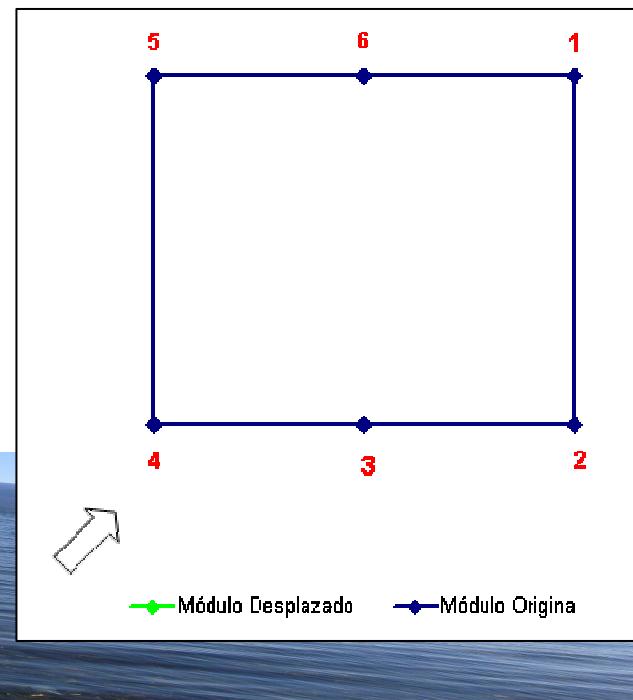
AUMENTOS EN LA CANTIDAD DE LÍNEAS DE FONDEO - 6

- Área de 100 m² (10x10)
- Batimetría regular a -8 m de profundidad con una longitud inicial en cada línea de 11 m
- Distancia horizontal de 7,07 m, entre dispositivo de fondo y módulo de prueba.
- Fuerza externa : $F = (F_x, F_y) = (2,2)[ton]$

	Condición Inicial	Condición Final
	T _H [ton]	T _H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	0,02
Línea 3	0,02	0,04
Línea 4	0,02	2,82
Línea 5	0,02	0,02
Línea 6	0,02	0,02
Δ x (m)	0,00	0,41
Δ y (m)	0,00	0,30
Δ θ (°)	0,00	-0,66

Comparando con la 1º
modelación

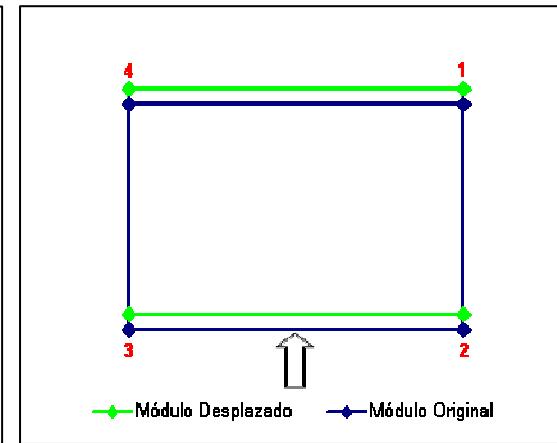
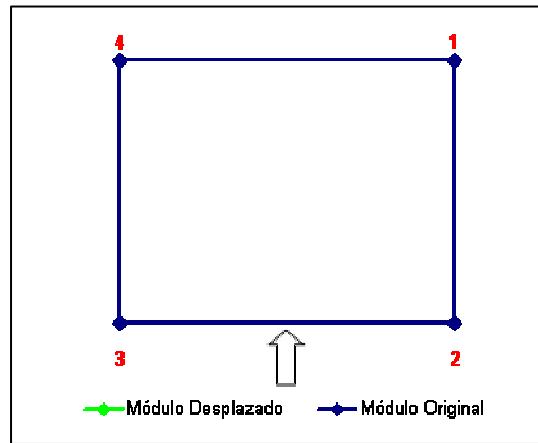
	Condición Inicial	Condición Final
	T _H [ton]	T _H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	0,02
Línea 3	0,02	2,84
Línea 4	0,02	0,02
Δ x (m)	0,00	0,36
Δ y (m)	0,00	0,36
Δ θ (°)	0,00	0,00



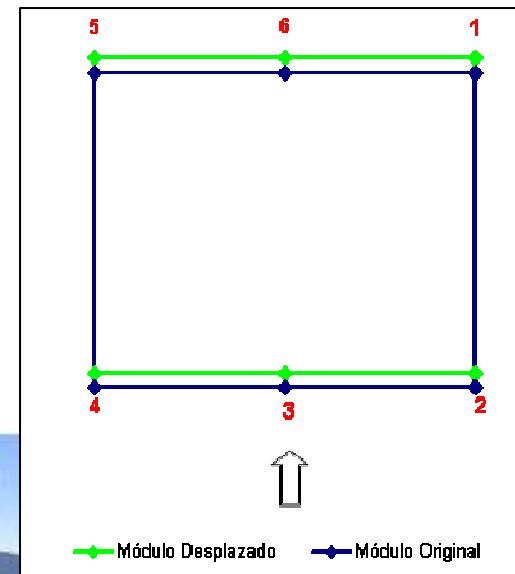
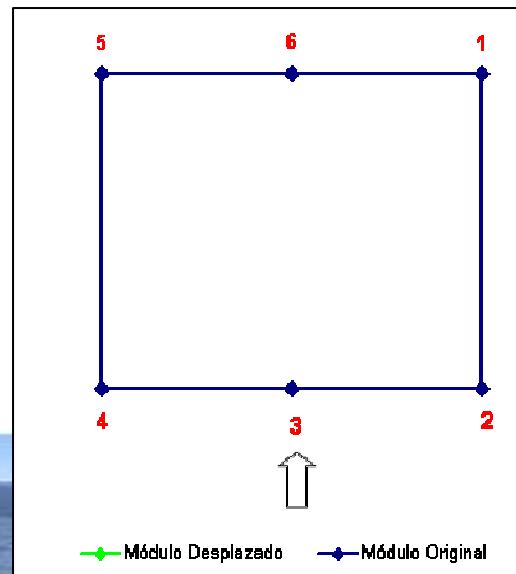


UN
VA
C

	Condición Inicial	Condición Final
	T_H [ton]	T_H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	1,34
Línea 3	0,02	1,34
Línea 4	0,02	0,01
Δx (m)	0,00	0,00
Δy (m)	0,00	0,68
$\Delta \theta$ ($^{\circ}$)	0,00	0,00



	Condición Inicial	Condición Final
	T_H [ton]	T_H [ton]
Línea 1	0,02	0,02
Línea 2	0,02	0,04
Línea 3	0,02	1,97
Línea 4	0,02	0,04
Línea 5	0,02	0,02
Línea 6	0,02	0,01
Δx (m)	0,00	0,00
Δy (m)	0,00	0,47
$\Delta \theta$ ($^{\circ}$)	0,00	0,00

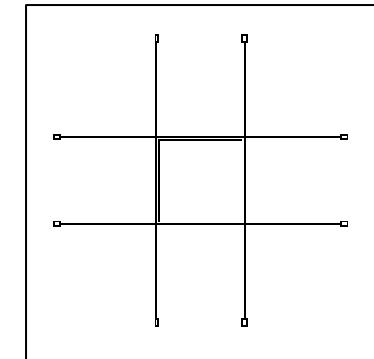




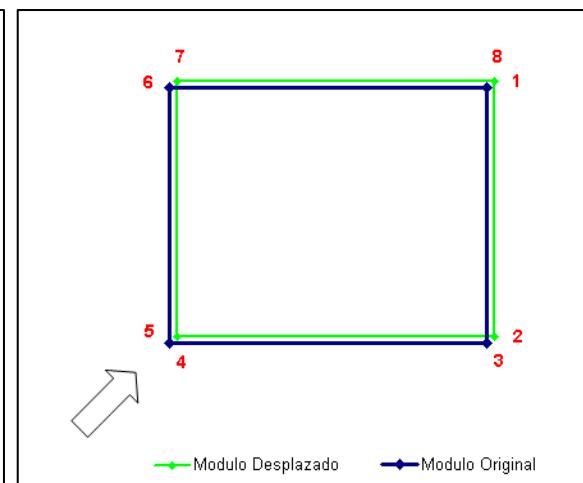
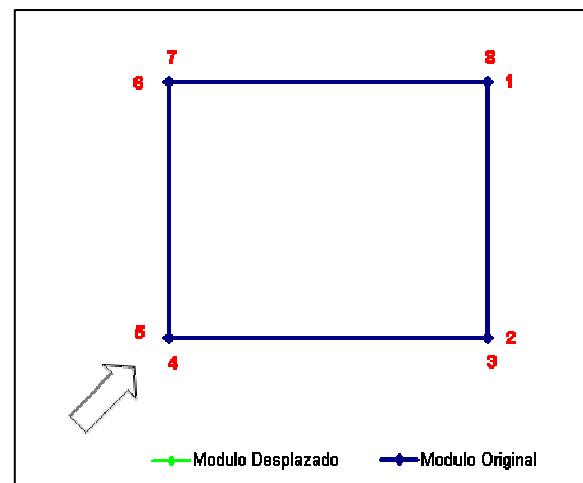
UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
C H I L E

AUMENTOS EN LA CANTIDAD DE LÍNEAS DE FONDEO - 8

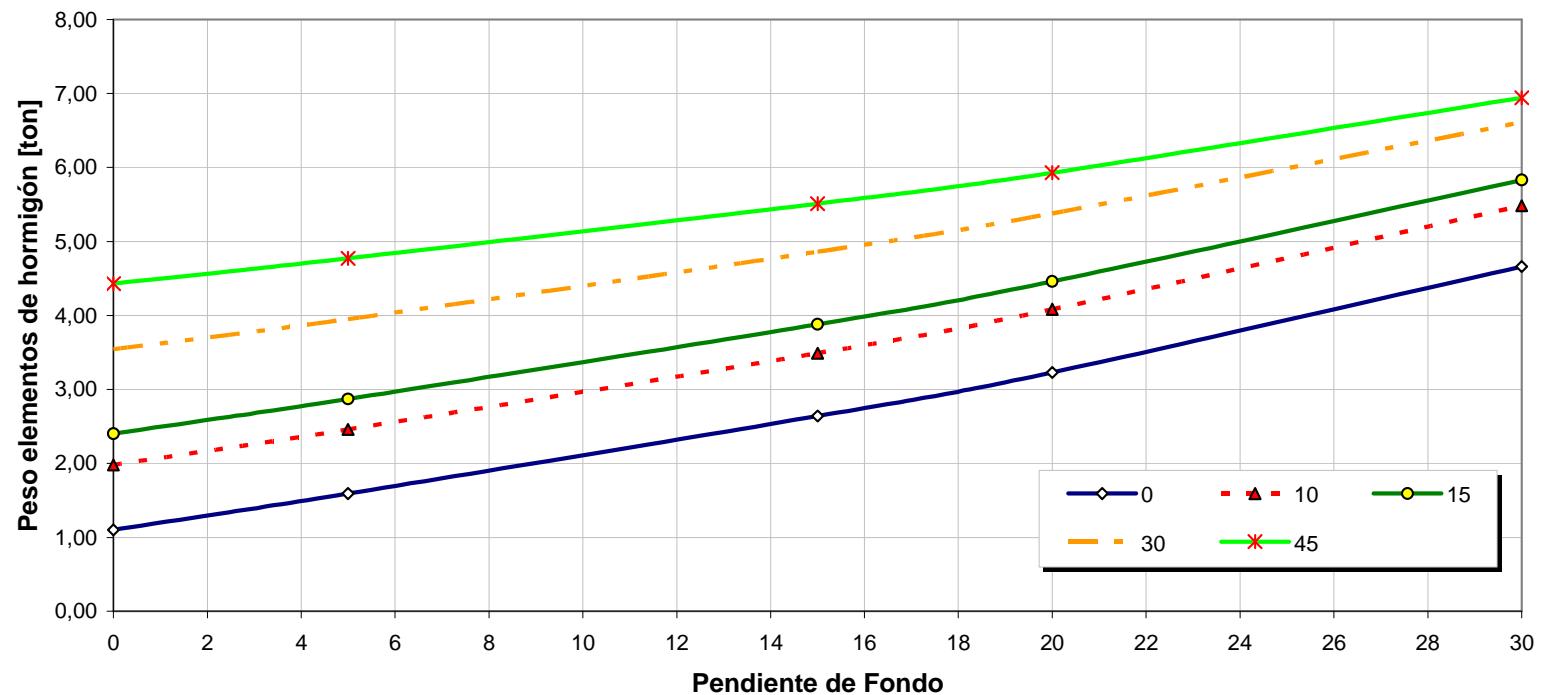
- Área de 100 m² (10x10)
- Batimetría regular a -8 m de profundidad con una longitud inicial en cada línea de 11 m
- Distancia horizontal de 7,07 m, entre dispositivo de fondo y módulo de prueba.
- Fuerza externa : $F = (F_x, F_y) = (2,2)[ton]$



	Condición Final	Condición Inicial
	T _H [ton]	T _H [ton]
Línea 1	0,02	0,01
Línea 2	0,02	0,01
Línea 3	0,02	0,01
Línea 4	0,02	1,84
Línea 5	0,02	0,07
Línea 6	0,02	1,36
Línea 7	0,02	0,56
Línea 8	0,02	0,01
Δx (m)	0,00	0,48
Δy (m)	0,00	0,48
Δθ (°)	0,00	-0,03



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD RESPECTO A LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS

Los estudios oceanográficos deben realizarse de acuerdo a la pub. 3201

El análisis realizado corresponde a una representación de las variables en forma estática y/o quasi-estática, produciendo una discordancia al momento de analizar las cargas hidrodinámicas por oleaje

El oleaje es una carga dinámica variable en el tiempo, donde la constante exposición de los centros de cultivos a este agente, puede producir fallas tanto en el diseño estructural de los sistemas de fondeo como inconvenientes en la operatividad.



SISTEMAS DE FONDEO

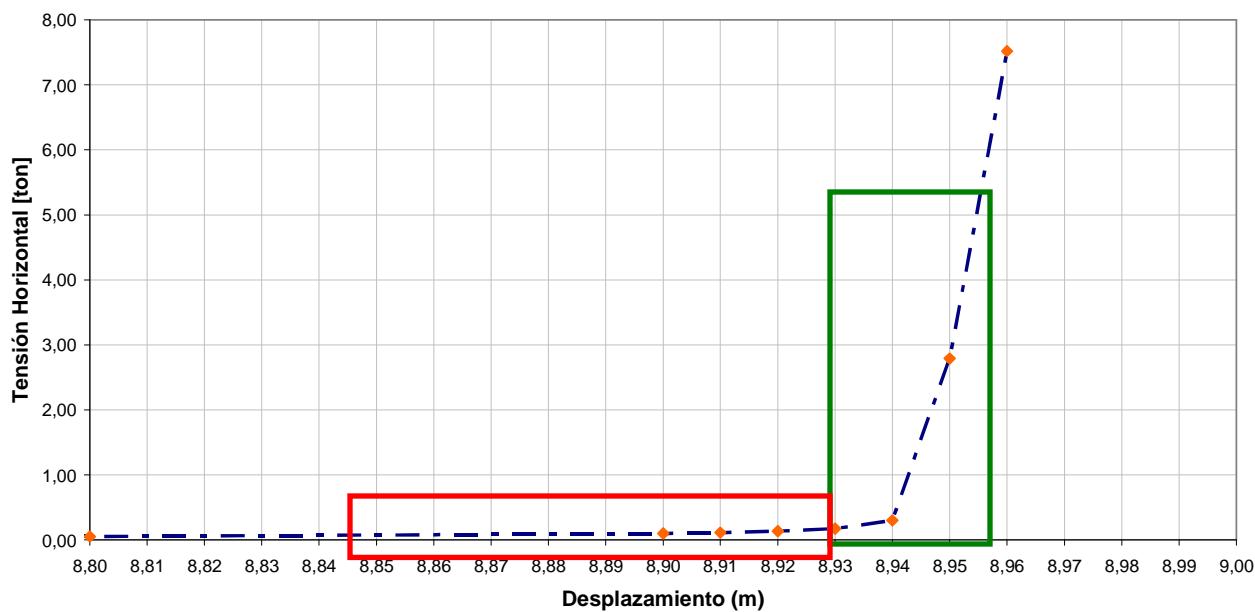
En el análisis de los sistemas de fondeo intervienen varios parámetros y agentes que dimensionan finalmente los dispositivos de anclajes y además define las condiciones de operatividad de cualquier estructura flotante

Las líneas de fondeo se componen de distintos tipos de materiales que influyen de manera directa en la condiciones finales del sistema

La relación que existen entre la tensión y los desplazamientos suele ser bastante compleja de asimilar, ya que los componentes estructurales preponderantes en esta relación actúan de manera no-lineal, asumiendo un estado de incertidumbre antes del análisis



Dada una curva característica de la relación tensión/desplazamiento, ésta indica una zona (cuadro rojo) donde la deformación se totalmente geométrica donde las propiedades físicas del cable o cadena de fondeo no influyen de manera directa



En cambio el módulo de elasticidad se hace importante, cuando esta curva se torna casi en forma exponencial, lo que dificulta su comportamientos para obtener valores de diseño. Pequeños incrementos en el desplazamiento generan aumentos considerables en las tensiones de diseño



COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Ante el impacto de las fuerzas externas la estructura tiende a utilizar las líneas que se encuentran en la posición más desfavorable

Las modelaciones en el análisis de sensibilidad permitieron conocer que las tensiones registradas en las líneas de fondeo son generadas mayoritariamente por la magnitud total de las fuerzas externas y en un pequeño porcentaje por la tensión inicial producida por la longitud de las líneas de fondeo

Por lo tanto existe una relación que se debe considerar al momento de realizar el análisis, generación de mayores tensiones lo que implica elementos de anclaje e mayor dimensión (costo) o estructura con un mayor grado de libertad que implica directamente la inoperatividad del módulo producto de desplazamientos mayores



COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

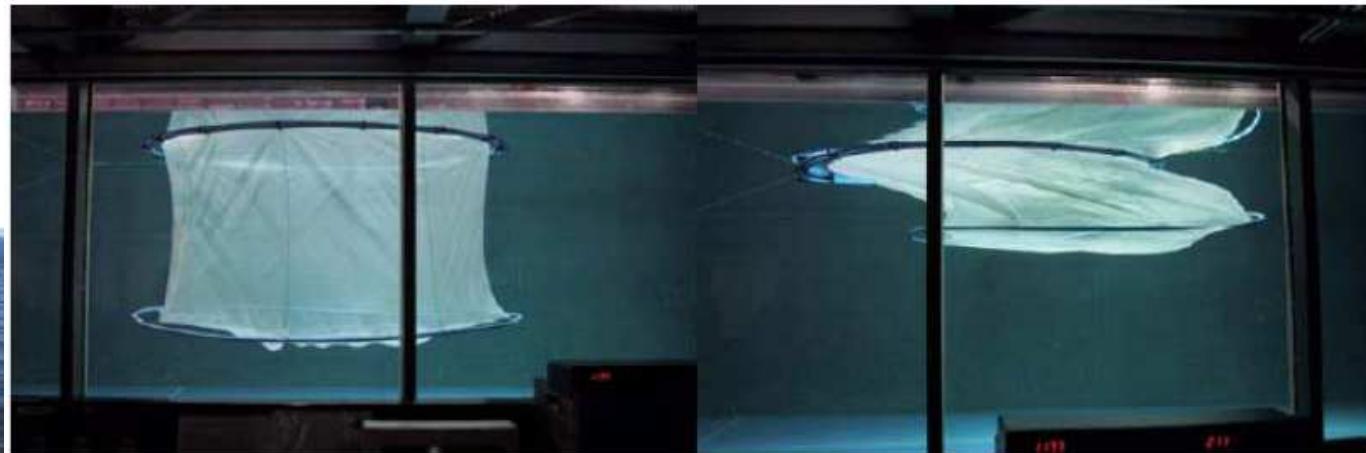
En general y considerando la configuración 3-D de las balsas jaulas; la diversidad en las condiciones iniciales del sistema de fondeo, se debe considerar que: frente a una solicitud externa, cada una de las líneas de amarre reaccionará en forma distinta, ya que la rigidez de cada línea es no-lineal, por lo tanto podrían esperarse efectos no deseados en los desplazamientos de las balsas-jaulas, tales como:

1. Sobre esfuerzo de un línea, que podría llevar la falla de la línea
2. Torsión de la plataforma, que en condiciones extremas llevaría a inoperatividad.
3. Desplazamiento de los dispositivos de fondo.



LINEAMIENTOS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Generación de Modelos en Laboratorios (3D)



Generación de Modelos para Instalación de Estructuras Offshore





AGRADECIMIENTOS

En especial a mi Familia

A mis Amigos

A mis Compañeros

A mis Profesores

Y a todos los que vinieron a apoyarme o solamente a sapear!!!!!!!!!!!!!!

A todos

Muchas Gracias





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

FIN DE LA PRESENTACIÓN

**“METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y DIMENSIONAMIENTO DE
ELEMENTOS DE FONDEO Y DISPOSITIVOS DE
FONDO DE BALSAS-JAULAS”**

MUCHAS GRACIAS

