

T
C266m
2008



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”



Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

CARLOS ANDRÉS CÁRDENAS MARTÍNEZ

VIÑA DEL MAR, CHILE

2008

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
INGENIERIA CIVÍL OCEÁNICA

CARLOS ANDRÉS CÁRDENAS MARTÍNEZ

Comisión Evaluadora

Calificación

Nota

Firma

Ernesto Gómez Araya

Profesor Guía

Patricio Winckler Grez

Profesor Evaluador 1

Mario Cáceres Muñoz

Profesor Evaluador 2

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

Este trabajo o alguna de sus partes no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Carlos Cárdenas Martínez
Alumno Memorista

Ernesto Gómez Araya
Profesor Guía

CONTENIDOS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1 | GENERALIDADES | 12 |
| 1.2 | DOCUMENTACIÓN UTILIZADA..... | 13 |
| 2 | OBJETIVOS | 14 |
| 3 | ANTECEDENTES GENERALES | 15 |
| 3.1 | GENERALIDADES | 15 |
| 3.2 | TIPOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA ACUICULTURA..... | 16 |
| 3.2.1 | BALSAS JAULAS METÁLICAS RECTANGULARES | 16 |
| 3.2.2 | BALSAS JAULAS PLÁSTICAS CIRCULARES..... | 17 |
| 3.2.3 | BALSAS JAULAS SUMERGIBLES..... | 18 |
| 3.3 | EQUIPAMIENTO COMPLEMENTARIO..... | 19 |
| 4 | METODOLOGÍA DEL ESTUDIO..... | 24 |
| 4.1 | GENERALIDADES | 24 |
| 4.2 | CONDICIONES NATURALES..... | 24 |
| 4.2.1 | MAREA..... | 24 |
| 4.2.2 | VIENTO | 26 |
| 4.2.3 | CORRIENTES..... | 35 |
| 4.2.4 | OLEAJE..... | 36 |
| 4.2.5 | BATIMETRÍA Y TIPO DE FONDO | 38 |
| 4.2.6 | FOULING | 39 |
| 4.3 | ESTIMACIÓN DE SOLICITACIONES..... | 44 |
| 4.3.1 | GENERALIDADES | 44 |
| 4.3.2 | VIENTO | 44 |
| 4.3.3 | CORRIENTES..... | 48 |
| 4.3.4 | OLEAJE..... | 50 |
| 5 | MODELO ESTRUCTURAL | 56 |
| 5.1 | GENERALIDADES | 56 |
| 5.2 | SISTEMAS DE FONDEO | 56 |
| 5.3 | ANÁLISIS DE FONDEO | 56 |
| 5.3.1 | ELEMENTO TIPO 1 | 57 |
| 5.3.2 | ELEMENTO TIPO 2..... | 64 |
| 5.3.3 | DETERMINACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE INICIO Y FIN DE LA CATENARIA | 67 |
| 5.3.4 | LÍNEA DE FONDEO COMPUESTA POR DISTINTO MATERIAL..... | 69 |
| 5.4 | GENERACIÓN DEL MODELO EN 2D..... | 71 |
| 5.4.1 | CENTRO DE GRAVEDAD | 71 |
| 5.4.2 | ROTACIÓN DE LAS COORDENADAS EN 2D..... | 73 |
| 5.5 | FLOTABILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO | 78 |
| 5.6 | DETERMINACIÓN DE LOS PESOS DE LOS DISPOSITIVOS DE FONDO | 81 |
| 5.7 | ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD..... | 84 |
| 5.7.1 | VARIACIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE LAS LÍNEAS DE FONDEO | 88 |
| 5.7.2 | CÁLCULO DE LAS TENSIONES CON BATIMETRÍA IRREGULAR..... | 90 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.7.3 | VARIACIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LAS FUERZAS EXTERNAS | 92 |
| 5.7.4 | AUMENTOS EN LA CANTIDAD DE LÍNEAS DE FONDEO..... | 94 |
| 5.7.5 | PESOS DE LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN..... | 100 |
| 6 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 103 |
| 6.1 | ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS..... | 103 |
| 6.2 | SISTEMAS DE FONDEO | 104 |
| 6.3 | COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA | 106 |
| 6.4 | LINEAMIENTOS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES | 107 |
| 6.4.1 | MODELACIÓN EN LABORATORIOS (3D) | 107 |
| 6.4.2 | INSTALACIÓN DE ESTRUCTURAS OFFSHORE..... | 108 |
| 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 110 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ciclo del Salmón..... | 16 |
| Figura 2: Balsas-Jaulas, tipo rectangular | 17 |
| Figura 3: Balsas-Jaulas, tipo circular..... | 18 |
| Figura 4: Balsas-Jaulas, tipo sumergible..... | 18 |
| Figura 5: Esquema típico de las balsas-jaulas (vista frontal)..... | 19 |
| Figura 6: Cadenas de anclajes..... | 20 |
| Figura 7: Herrajes tipo de un sistema de amarre..... | 20 |
| Figura 8: Elemento Boya | 21 |
| Figura 9: Flotadores..... | 21 |
| Figura 10: Muertos ángeles..... | 22 |
| Figura 11: Relación entre los parámetros aplicables al análisis..... | 23 |
| Figura 12: Comparación de curvas de mareas de Valparaíso y Puerto Montt..... | 25 |
| Figura 13: Niveles de diseño a través de los planos mareales..... | 25 |
| Figura 14: Medias mensuales del nivel del mar en Talcahuano..... | 26 |
| Figura 15: Estaciones Meteorológicas de la XI región de Chile..... | 27 |
| Figura 16: Corrección por ubicación del instrumento en tierra o agua..... | 29 |
| Figura 17: Relación entre diferencia de temperatura y RT..... | 30 |
| Figura 18: Corrección por variabilidad temporal del viento..... | 31 |
| Figura 19: Diagrama para realizar corrección de vientos | 32 |
| Figura 20: Derivador tipo, para correntometría lagrangiana..... | 35 |
| Figura 21: Correntómetro ADCP tipo, para correntometría euleriana..... | 36 |
| Figura 22: Geometría radial para aguas interiores | 37 |
| Figura 23: Medición de las profundidades a través de un ecosonda..... | 38 |
| Figura 24: Curva granulometrica tipo..... | 39 |
| Figura 25: Cuantificación de adherencias en aguas costeras españolas | 40 |
| Figura 26: Red extraída después de 6 meses de operación..... | 41 |
| Figura 27: Efecto fouling en el diámetro de la red pecera..... | 41 |
| Figura 28: Efecto fouling en una línea de fondeo..... | 42 |
| Figura 29: Aplicación de pintura anti-fouling a las redes peceras | 42 |
| Figura 30: Comparación de la fuerza del viento para distintas formulaciones..... | 46 |
| Figura 31: Factor de reducción para la fuerza del viento..... | 47 |
| Figura 32: Redes con nudo y sin nudos..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 33: Factor de reducción para la velocidad de la corriente..... | 49 |
| Figura 34: Fuerza de la corriente con fouling y sin fouling..... | 50 |
| Figura 35: Definición de parámetros característicos del oleaje | 50 |
| Figura 36: Clasificación de las ondas, según su período. | 51 |
| Figura 37: Teorías de oleaje..... | 52 |
| Figura 38: Gráfico de validación para el uso de distintas teorías. | 52 |
| Figura 39: Definición de las fuerzas básicas, horizontales y verticales. | 53 |
| Figura 40: Configuración tipo 1..... | 57 |
| Figura 41: Diagrama de cuerpo libre de un elemento de cuerda. | 57 |
| Figura 42: Elemento infinitesimal del cable. | 59 |
| Figura 43: Relación Tensión/Desplazamiento | 63 |
| Figura 44: Configuración tipo 2..... | 64 |
| Figura 45: Elemento boya, incorporado en el análisis. | 64 |
| Figura 46: Sistema de equilibrio, elemento boya | 65 |
| Figura 47: Esquema de una línea de fondeo con dos tipos de materiales..... | 69 |
| Figura 48: Esquema 3D del modelo estructural propuesto | 71 |
| Figura 49: Esquema de determinación del centro de gravedad (Imagen en planta). | 72 |
| Figura 50: Esquema de rotación de coordenadas. | 74 |
| Figura 51: Formulación del sistema discreto de la catenaria..... | 78 |
| Figura 52: Equilibrio de fuerzas en los N puntos..... | 78 |
| Figura 53: Equilibrio de fuerzas para el cálculo del peso..... | 82 |
| Figura 54: Ángulo de fricción interna de distintos materiales..... | 82 |
| Figura 55: Geometría y características del módulo de prueba (vista lateral)..... | 84 |
| Figura 56: Dimensiones del modulo de prueba (planta). | 85 |
| Figura 57: Modelación de la configuración tipo 1..... | 86 |
| Figura 58: Módulo de prueba con la incorporación de boyas. | 86 |
| Figura 59: Modelación de la configuración tipo 2..... | 87 |
| Figura 60: Perfiles de distintas líneas para una misma longitud inicial..... | 88 |
| Figura 61: Sensibilidad respecto a la longitud inicial..... | 88 |
| Figura 62: Modelación con batimetría irregular. | 91 |
| Figura 63: Casos a modelar | 92 |
| Figura 64: Módulo con la incorporación de 2 líneas. | 95 |
| Figura 65: Modelación con la incorporación de 2 líneas de fondeo. | 96 |
| Figura 66: Modelación con 4 líneas de fondeo. | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67: Modelación con 6 líneas de fondeo | 98 |
| Figura 68: Módulo de prueba con la incorporación de 4 líneas | 98 |
| Figura 69: Módulo en su condición final con 8 líneas de fondeo | 99 |
| Figura 70: Pesos de los elementos de hormigón | 101 |
| Figura 71: Dos elementos de hormigón por línea de fondeo | 106 |
| Figura 72: Modelo a escala de una estructura de cultivo | 108 |
| Figura 73: Comportamiento de una balsa circular ante condiciones extremas | 108 |
| Figura 74: Comportamiento de jaulas flexibles en condiciones de mar abierto | 109 |



INDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.1: Exportaciones alimentarias de Chile (US\$ Millones)..... | 15 |
| Tabla 3.2: Tamaños comunes de balsas-jaulas rectangulares | 16 |
| Tabla 3.3: Tamaños comunes de balsas jaulas circulares | 17 |
| Tabla 4.4: Red Nacional de Estaciones Meteorológicas de XI región..... | 27 |
| Tabla 4.5: Escala Beaufort del viento | 33 |
| Tabla 4.6: Escala granulométrica | 39 |
| Tabla 4.7: Estudio comparativos de fouling. | 43 |
| Tabla 4.8: Coeficientes de forma..... | 45 |
| Tabla 4.9: Coeficientes para el cálculo de las fuerzas verticales | 55 |
| Tabla 4.10: Coeficientes para el cálculo de las fuerzas horizontales | 55 |
| Tabla 5.11: Tensiones y desplazamientos de la configuración tipo 1. | 85 |
| Tabla 5.12: Tensiones y desplazamientos de la configuración tipo 2. | 87 |
| Tabla 5.13: Tensiones registradas con una fuerza externa de 2 [ton]..... | 89 |
| Tabla 5.14: Tensiones registradas con una fuerza externa de 1 [ton]..... | 89 |
| Tabla 5.15: Tensiones y desplazamientos con batimetría irregular. | 90 |
| Tabla 5.16: Tensiones y desplazamientos registrados con una tensión de inicio..... | 91 |
| Tabla 5.17: Casos a modelar..... | 92 |
| Tabla 5.18: Resultados de las tensiones en las líneas de fondeo, para todos los casos. | 93 |
| Tabla 5.19: Tensiones y desplazamientos de los distintos casos propuestos. | 94 |
| Tabla 5.20: Tensiones y desplazamientos con 6 líneas de fondeo. | 95 |
| Tabla 5.21: Tensiones y desplazamientos en 4 líneas y una fuerza en un sentido. | 96 |
| Tabla 5.22: Tensiones y desplazamientos en 6 líneas de fondeo y una fuerza en un sentido..... | 97 |
| Tabla 5.23: Tensiones y desplazamientos en las 8 líneas de fondeo. | 99 |
| Tabla 5.24: Ángulos de inicio y fin de la catenaria | 102 |

RESUMEN

Chile presenta las condiciones naturales, geografía, temperatura y calidad de las aguas necesarias para un desarrollo favorable de la industria del salmón, en particular en el sur del país. A esto se suma el apoyo de las políticas empresariales y comerciales que ayudan aún más al sostenimiento y crecimiento experimentado por el sector en estos últimos años.

La globalización se refleja en un cambio en la organización de la producción de salmones o cualquier tipo de peces que se desee cultivar, pues la industria hoy en día tiene la tecnología y los recursos para aumentar la producción a una gran velocidad. Para lograr la estabilidad de los precios y seguridad, es necesario desarrollar nuevos productos y descubrir nuevos mercados, reducir el costo de producción para ser más competitivos y equilibrar la oferta mundial de la industria a la demanda de los mercados de consumo. Esto implica la apertura de un mayor número de centros de cultivos y la incorporación de nuevas tecnologías que proporcionen ayuda al cultivo de las distintas especies que aportan a la exportación nacional. En este contexto, el diseño óptimo de las balsas-jaulas o estructuras de cultivos es un punto fundamental en el avance tecnológico.

El siguiente documento busca generar una propuesta metodológica detallada de los procedimientos de análisis de dimensionamientos de las balsas-jaulas, enfocada principalmente en los sistemas de fondeo (tensión/desplazamiento en las líneas de fondeo) y los dispositivos de fondo. En la actualidad, en nuestro país no existe una metodología sistemática para el diseño y análisis de este tipo de estructuras, por lo que el siguiente documento tiene por objetivo ser una base de apoyo para realizar los análisis mínimos para fondear este tipo de estructuras flotantes.

En el capítulo 1 se describirán los agentes oceanográficos que influyen en la funcionalidad y diseño de los sistemas de fondeo que componen las balsas-jaulas, tales como el viento, mareas, corrientes, oleaje, fouling, batimetría, etc. Estos agentes son de suma importancia ya que condicionan el análisis de estos artefactos navales, donde las mayores falencias en el diseño vienen dadas por la interpretación inapropiada o de los estudios realizados para representar las variables oceanográficas y de la simplificación extrema de las mismas al ser analizadas como variables estáticas sin considerar variaciones en el tiempo.

Los estudios oceanográficos se encuentran regularizados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (en adelante SHOA) que mediante su publicación N° 3201 "Instrucciones Oceanográficas N°1 – Especificaciones Técnicas para mediciones y análisis oceanográficos" realiza recomendaciones sobre las mediciones, interpretación y presentación de informes de las distintas variables que influyen directamente sobre las estructuras de cultivo.

En el capítulo 3 se presentan las expresiones de la hidrodinámica que permiten caracterizar los esfuerzos sobre la estructura recopiladas a través de una investigación bibliográfica en la literatura nacional y extranjera. Destacan las expresiones expuestas por Det Norske Veritas (DNV), American Bureau of Shipping (ABS) y Lloyd's Register (LR) y la norma Nch 432.Of1971- Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones. Se generan modelos que incorporan el comportamiento de las líneas de fondeo (mediante métodos iterativos y discretos) y el comportamiento de la estructura en general (desplazamientos).

Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad para determinar los agentes y/o componentes estructurales que influyen de manera directa en los resultados finales. Finalmente obtenidas las tensiones a través de las líneas se obtiene el dimensionamiento de los dispositivos de fondo.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La educación sobre el cultivo de especies marinas es la base fundamental para que la acuicultura sea sustentable en el tiempo. 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 aporten y ayuden a consolidar el tema estructural para cualquier tipo de estructura flotante.

En la actualidad, las instituciones universitarias tienen un gran abanico sobre las distintas disciplinas que conforman la acuicultura, tales como cultivos de moluscos, salud de peces, sistemas de cultivos marinos, etc. pero la gran debilidad viene relacionada con la capacidad estructural de las balsas-jaulas y especialmente en la eficiencia en sus sistemas de fondeo.

Por tal motivo, el presente documento propone caracterización de los principales factores (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 conocer y realizar futuras investigaciones sobre el tema.

Existen muchos factores que influyen directamente en la condición final de una estructura una vez sometida a fuerzas externas, por lo que se proponen una serie de modelaciones para conocer los agentes más influyentes en el diseño de los sistemas de fondeo. 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 sollicitaciones externas dominantes.

1.2 DOCUMENTACIÓN UTILIZADA

Para el desarrollo del documento se recurre a las siguientes referencias bibliográficas:

- Ref.1 AGUILAR URIBE, César. 2001: Consideraciones en el Sistema de Fondo de Balsas-jaulas del Tipo Rectangular. (Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería). Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile.

El documento explica las consideraciones realizadas antes de instalar estructuras de cultivo del tipo rectangular. Para ello se enfoca en los cuales se destacan los aspectos legales, aspectos medioambientales y aspectos climáticos e ingenieriles.

En los aspectos legales el documento presenta normativa y/o recomendaciones realizadas por la CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), DIRECTEMAR (Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante), SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada). Las condiciones naturales dominantes en los sectores donde se emplazan las balsas-jaulas consideran fuerzas actuantes en el medio tales como las olas, vientos y corriente, sometidas a variaciones climáticas donde éstas se parametrizan para luego ser aplicadas al módulo tipo rectangular. Finalmente se definen experiencias prácticas y criterios a seguir en la obtención de cada uno de los requerimientos.

- Ref.2 ALVAREZ RAMIREZ, Pedro. 2005: Barreras Artificiales para la protección de centros acuícolas. (Tesis para optar al título de Ingeniero Naval. Mención: Construcción Naval). Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile.

El documento tiene por objetivo estudiar la posible construcción de un rompeolas flotante, para dar protección a centros de cultivos acuícolas. El rompeolas que se desea diseñar es un contenedor de 40 pies y debe ser capaz de resistir los agentes que impacten a la estructura de cultivo. Dentro del estudio se busca dar una primera aproximación al diseño de un artefacto de este tipo, considerando dos conceptos básicos, las fuerzas ambientales dominantes en el sector de emplazamientos del proyecto y la eficiencia del rompeolas una vez que entra en funcionamiento.

Otros documentos bibliográficos utilizados en el desarrollo del presente documento se describen en el capítulo 7.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal es generar una proposición metodológica sobre el análisis de balsas-jaulas, enfocado a la proposición de expresiones que ayuden a describir el comportamiento de las líneas de fondeo y de la estructura en general, además de dimensionar los dispositivos que se encuentran en el fondo marino.

Los objetivos específicos definidos en el documento son los siguientes:

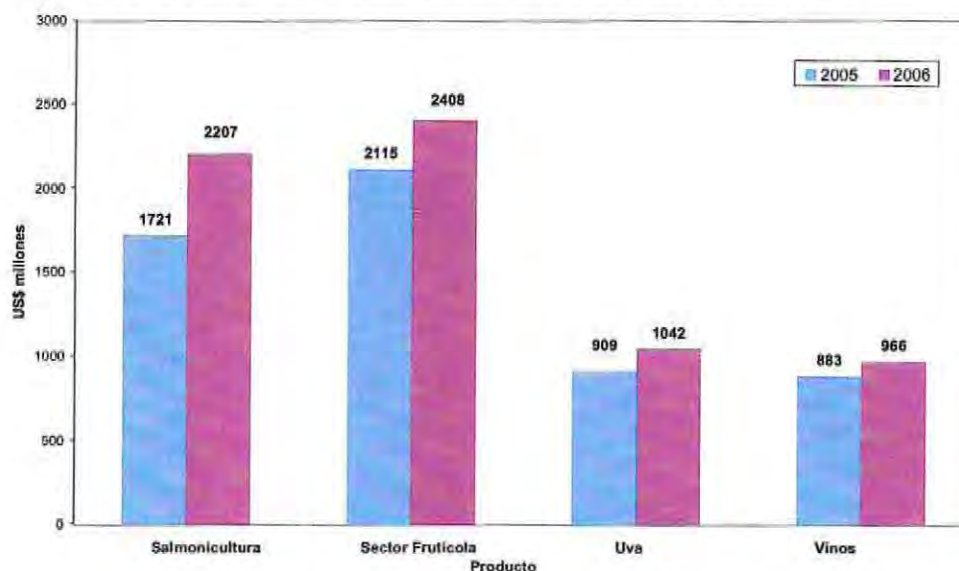
- Definir las condiciones naturales que afectan a la estructura (oleaje, vientos, mareas, corrientes, etc.) mediante estudios oceanográficos y caracterizar mediante expresiones de esfuerzos sobre la estructura.
- Describir el comportamiento de los sistemas de fondeo, mediante un conjunto de ecuaciones que modelen las líneas de fondeo, los desplazamientos y las tensiones en las líneas para obtener las diferentes curvas de tensión/desplazamiento del sistema.
- Determinar las dimensiones 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 potencialidades y falencias del modelo propuesto.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 GENERALIDADES

El sector acuícola se ha ido transformando en estos últimos años en una importante industria a nivel nacional y de una rápida expansión. En el contexto económico, Chile es el segundo productor mundial de salmón después de Noruega y el primero en la exportación de trucha. En el 2006 la industria aportó el 4 % de las exportaciones totales del país y el 50 % del total de las exportaciones pesqueras.

Tabla 3.1: Exportaciones alimentarias de Chile (US\$ Millones).



Fuente:Ref.3

Esto representa nuevos desafíos y necesidades en el sector acuícola, que deben ser cumplidos en forma satisfactoria, por lo que la inserción de nuevas tecnologías debe estar acorde con los adelantos tanto en producción como en infraestructura.

Las Regiones X y XI de Chile presentan excelentes condiciones naturales para la producción de salmones, 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 la engorda. Ésta se realiza en balsas-jaulas en el mar, donde se colocan redes para mantener los salmones en cautiverio y alimentarlos hasta cuando lleguen a su estado juvenil. La descripción del proceso y ciclo del salmón se presenta en la Figura 1.

Figura 1: Ciclo del Salmón.



Fuente: Ref.3

Las balsas-jaulas consisten básicamente en estructuras rígidas o semirrígidas preferentemente articulada de variados diseños, formas y tamaños. Éstas se encuentran ancladas al fondo marino mediante un sistema de fondeo. Estos sistemas deben estar diseñados para que no sufran daños mientras se encuentran en funcionamiento, por lo que su fabricación debe cumplir con todos los estándares de calidad y seguridad impuestos en la industria acuícola.

A continuación se presentan las diferentes tipologías de uso común en la industria acuícola chilena.

3.2 TIPOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA ACUICULTURA

3.2.1 BALSAS JAULAS METÁLICAS RECTANGULARES

Las balsas-jaulas de fierro galvanizado, presentan la desventaja de ser menos flexibles, 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. Existen distintos tamaños de balsas-jaulas, siendo los más solicitados los módulos que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Tamaños comunes de balsas-jaulas rectangulares

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

Fuente: División de Jaulas Metálicas – Fusión Marine, Catálogo

Figura 2: Balsas-Jaulas, tipo rectangular



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 BALSAS JAULAS PLÁSTICAS CIRCULARES

Las balsas de HDPE (Poliétileno 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.

En el mercado existen variados diámetros, dentro de los se cuales destacan los observados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Tamaños comunes de balsas jaulas circulares

| FICHA TECNICA | | | |
|--|-------|-------|-------|
| 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 cúbicos por un metro de profundidad de red | 1257 | 1963 | 2827 |

Fuente: División de Jaulas Plásticas • TRITON - 450 Fusión Marine. Catálogo



Figura 3: Balsas-Jaulas, tipo circular

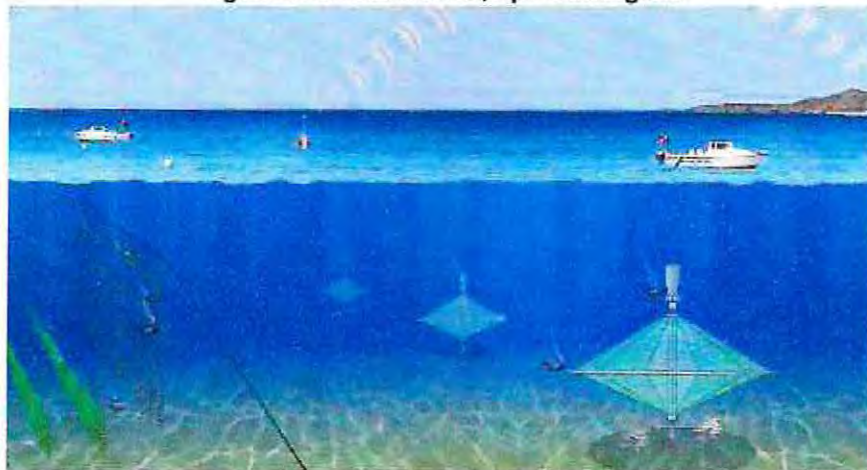


Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 BALSAS JAULAS SUMERGIBLES

Aunque no existen antecedentes de este tipo de jaulas en Chile, se conoce que algunos países están desarrollando esta tecnología para la crianza de peces planos (rodaballo), además de otro tipo de proyectos¹. Su ventaja principal es que al permanecer sumergidas evitan el efecto adverso del viento, olas y corrientes superficiales.

Figura 4: Balsas-Jaulas, tipo sumergible



Fuente: www.oceanspar.com

¹ PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO: Investigación y Desarrollo de un Sistema Integral de Engorde de Rodaballo en Jaulas de Fondo.

3.3 EQUIPAMIENTO COMPLEMENTARIO

Dentro de las estructuras de cultivos (balsas-jaulas) se encuentran subsistemas que ayudan a cumplir su funcionamiento (ver Figura 5), entre los que destacan los sistemas de paños (redes) y los sistemas de fondeo.

La función de las redes es de proteger y confinar a los salmones de los depredadores comunes. Para ello existen tres tipos de redes claramente definidas:

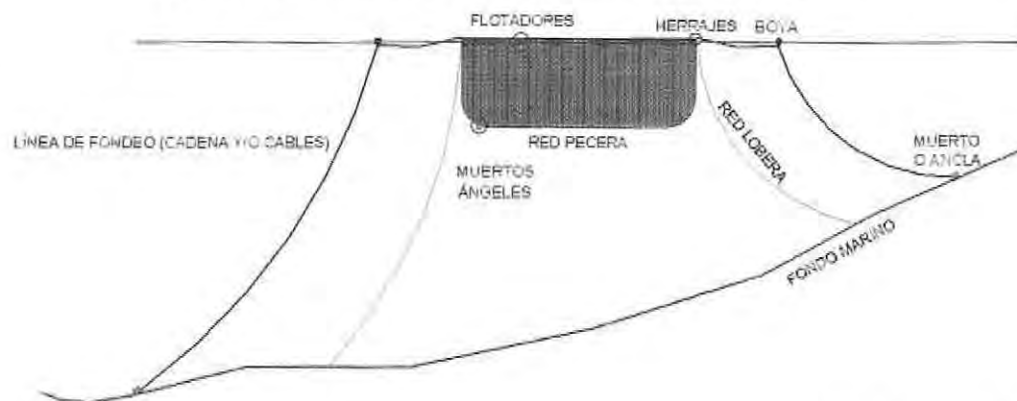
- La red pecera tiene como función confinar a los peces.
- La red lobera cumple la función de proteger a los peces de los lobos marinos.
- La red pajarera cumple la función de proteger de los depredadores aéreos.

En cuanto a los sistemas de fondeo, éstos tienen su eficiencia en las propiedades físicas del material que componen las líneas de fondeo (cable, cadenas, etc.) como de las características batimétricas y físicas del fondo. Estos factores se incorporan explícitamente en los cálculos del diseño de los dispositivos de fondo (específicamente en los muertos de hormigón), ya que influyen directamente en la determinación de los coeficientes de roce entre las superficies que pueden conformar el fondo marino.

Los dispositivos de fondo de uso convencional son anclas, muertos de hormigón y pernos de anclaje; su uso depende exclusivamente del tipo de fondo (fango, arena, rocas, etc.), además de los análisis previos del sector (pendientes dominantes, configuración de fondo, etc.).

El sistema de fondeo puede ser descrito en forma simplificada como un sistema de ecuaciones de equilibrio (estática de cables) que ayudan a entender de mejor manera la complejidad asociada a su funcionamiento.

Figura 5: Esquema típico de las balsas-jaulas (vista frontal)



Fuente: Elaboración Propia

Dentro de los elementos complementarios en las balsas-jaulas se destacan las siguientes:

- Líneas de fondeo normalmente compuestas por, cadenas, cable (ver Figura 6), que son las encargadas de estabilizar la estructura con los dispositivos de fondo. En la actualidad el uso de cadena implica un alto costo por lo que se desarrolla la técnica mixta entre el cable y la cadena.

Figura 6: Cadenas de anclajes



Fuente: Elaboración Propia

- Herrajes (ver Figura 7), que tienen la misión de unir los cables con las cadenas o unir las líneas de fondeo con la estructura de cultivo.

Figura 7: Herrajes tipo de un sistema de amarre



Fuente: Elaboración Propia

- Boyas (ver Figura 8), las cuales tienen por función dar flexibilidad al sistema de fondeo y también ser un señalizador para las embarcaciones que transitan por el sector.

Figura 8: Elemento Boya



Fuente: Elaboración Propia

- Flotadores (ver Figura 9), éstos se encuentran adosados a la plataforma de la estructura y cumplen la función de dar flotabilidad a la misma.

Figura 9: Flotadores



Fuente: Elaboración Propia

- Muertos ángeles (ver Figura 10), que evitan que la red pecera se deforme excesivamente por efecto de las corrientes y de esta manera no aplaste a los peces.

Figura 10: Muertos ángeles



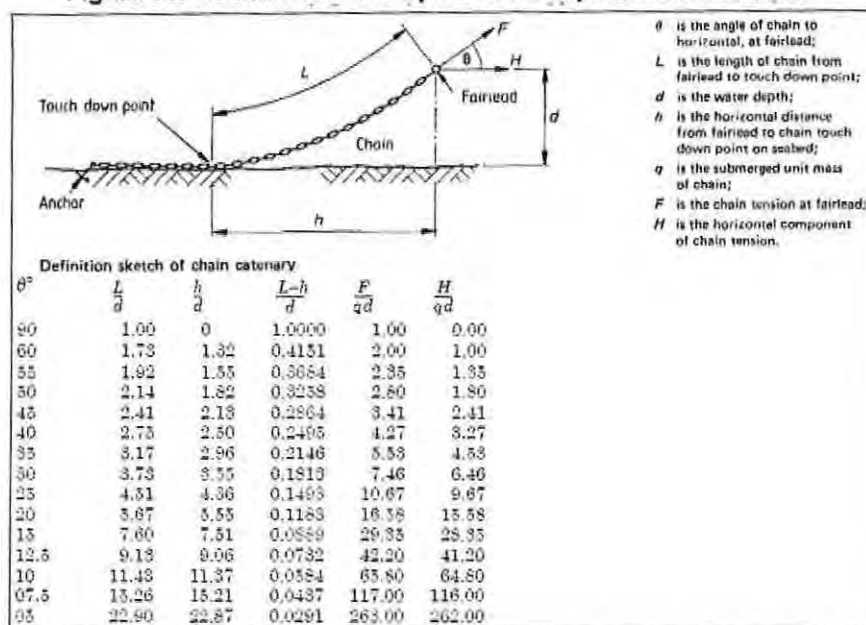
Fuente: Elaboración Propia

En referencia a los sistemas de anclajes, los comúnmente utilizados son los siguientes:

- Anclas: Son elementos fabricados de acero que tienen por función transmitir las fuerzas al fondo marino. Un ancla de uso común es el ancla de arado. Las recomendaciones generales respecto de este tipo de anclaje, hacen mención a que las líneas de fondeo deben tener una máxima longitud de proyección para así obtener un máximo de eficiencia. Esto para asegurar que el ángulo de inclinación entre el fondo y el ancla sea igual a 0. Las anclas son útiles en fondos arenosos.
- Muertos de Hormigón: Son elementos fabricados de hormigón donde su capacidad de agarre es variable, esto porque al ser introducido al mar, el muerto de hormigón pierde el 40% de su peso debido al empuje. El principio fundamental de estos elementos es el roce que exista entre las superficies de contacto (fondo marino: roca, arena, fango – hormigón). Esta fuerza se genera debido al contacto que existe entre dos materiales. La efectividad de un muerto de hormigón es función del tipo de fondo dominante en el sector de fondeo.
- Pernos de anclajes: Los pernos de anclajes son recomendados en el caso de tener fondo marino con abundancia de rocas.

De acuerdo a los distintos elementos que componen un sistema de cultivo, existen relaciones entre los componente que inician una primera aproximación sobre las consideraciones previas que se debiera tener para realizar el análisis. En la Ref.5 se ejemplifican mediante la Figura 11 la relación entre los distintos parámetros utilizados para el análisis.

Figura 11: Relación entre los parámetros aplicables al análisis.



Fuente: Ref.5

Dados los distintos sistemas de anclajes, estos pueden ser utilizados en forma mixta dependiendo de las condiciones de inicio del problema (tipo de fondo irregular) y de la complejidad en el fondeo de las estructuras de cultivo.

En Chile existen variadas empresas relacionadas con la construcción de balsas-jaulas y sistemas de fondeo, dentro de las cuales se destacan: Wavemaster Chile Ltda., Fusion Marine, Aqua Cards, Haug Aqua Chile, Walbusch S.A, y astilleros tales como Sitecna, Oxxean, por mencionar algunos.

4 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

4.1 GENERALIDADES

Las balsas-jaulas son el principal insumo de los centros de cultivos, deben tener resistencia y durabilidad durante su vida útil. Hoy en día se encuentran disponibles en el comercio en distintos tamaños y formas. El problema primordial en su desempeño es el eventual garreo de los elementos de anclaje (desplazamientos), lo que implica conocer bien su funcionamiento para encontrar una solución óptima.

La metodología propuesta para el análisis contempla inicialmente la descripción de los agentes oceanográficos más influyentes y establecer las sollicitaciones externas de la estructura. Por lo tanto es recomendable que los estudios oceanográficos se rijan de acuerdo a la publicación N° 3201 Instrucciones Oceanográficas N°1 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (en adelante SHOA) donde se hacen mención sobre la medición e interpretación de los estudios mencionados (Ref.6).

Se recurre a bibliografía especializada con el objetivo de generar expresiones que caractericen las fuerzas sobre la estructura y se propone un sistema de ecuaciones para resolver los sistemas de fondeo. Estas ecuaciones son complejas de resolver por lo que es recomendable para futuras investigaciones la implementación del modelo estructural mediante algún software de programación tales como MATLAB, VISUAL BASIC, etc.

4.2 CONDICIONES NATURALES

En esta sección se proponen las condiciones naturales más importantes para obtener las cargas ambientales utilizadas en el dimensionamiento de los elementos y dispositivos de fondo.

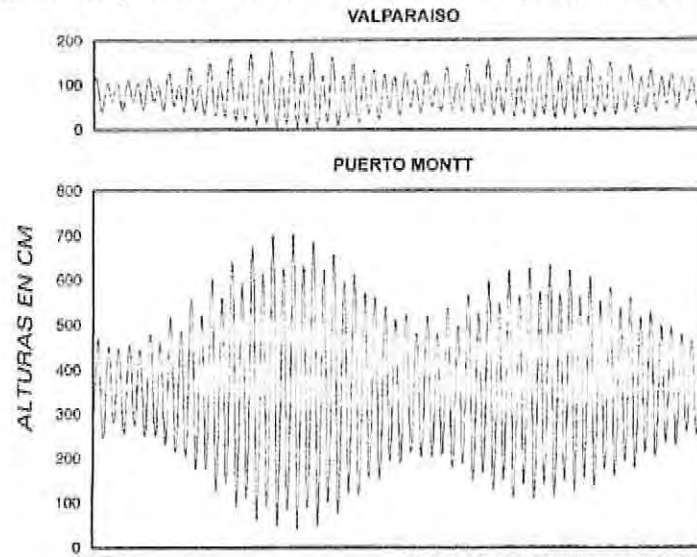
4.2.1 MAREA

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 en los rangos de marea entre estaciones de la costa de Chile pueden llegar a ser considerables (Figura 12). En sitios con altos rangos de nivel de marea, el nivel del mar es un factor a considerar en el análisis, por lo que cada sitio de estudio se establecerán los distintos niveles de diseño a través de los planos mareales, tal como se observa en la Figura 13.

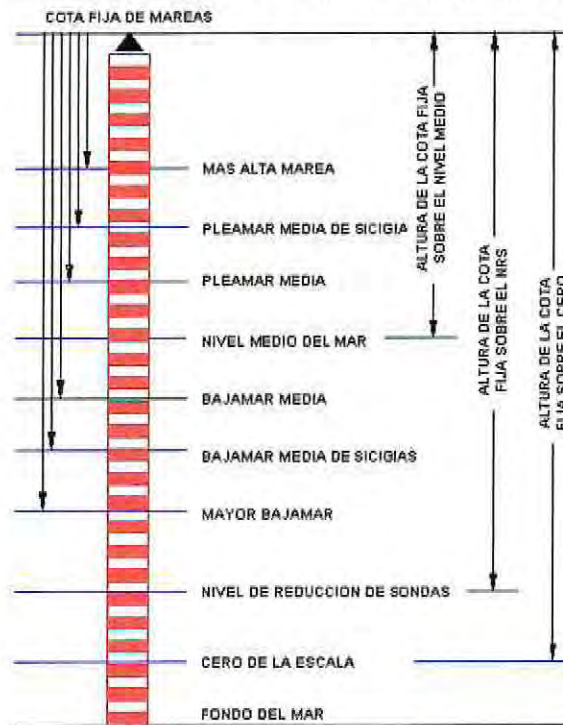
En las X y XI regiones donde se ubican mayoritariamente los centros de cultivo, se evidencian rangos importantes de hasta 7 m en el mar interior de Chiloé, que descienden gradualmente hacia el Golfo Corcovado por efecto de la amplificación de la onda de marea en este cuerpo de agua.

Figura 12: Comparación de curvas de mareas de Valparaíso y Puerto Montt.



Fuente: Tablas de Mareas del SHOA, 2008

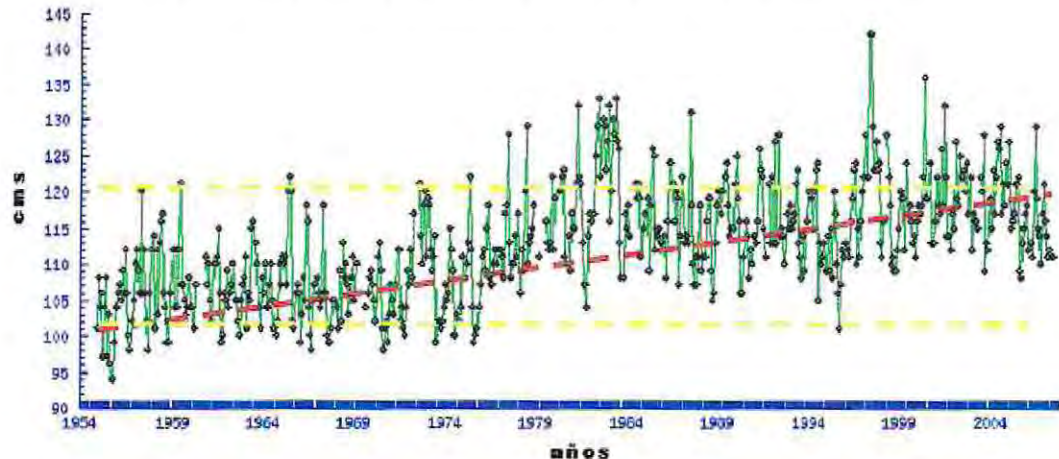
Figura 13: Niveles de diseño a través de los planos mareales.



Fuente: COI 504 V.02 - Hidráulica Marítima [Mareas].ppt (Clases PWG)

En el caso del aumento global del nivel del mar (ver Figura 14), este no influye directamente en el diseño de estructuras flotantes, ya que estos efectos se observan en una escala temporal considerable.

Figura 14: Medias mensuales del nivel del mar en Talcahuano.



Fuente: www.shoa.cl

En la Figura 14, se muestra un aumento de 20 cm en 50 años de registro, que se traduce en 4 mm/año. De acuerdo a la bibliografía extranjera y estudios relacionados con el aumento global del nivel del mar (Ref.7), este último aumenta entre 1 a 3 mm/año, por lo que la estación ubicada en Talcahuano representa bien la tendencia mundial de aumento del nivel del mar. Pero también el mismo autor menciona y hace un alcance sobre las estaciones ubicadas en los límites de convergencia de placas tectónicas pueden presentar niveles alterados.

4.2.2 VIENTO

El estudio de viento está orientado a determinar los valores de esfuerzos de arrastre y eventualmente de presión a los que estará sometida la estructura. Los parámetros más relevantes a considerar son:

- 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.

El instrumento para la medición del viento deberá permanecer a lo menos 12 meses en el sitio de interés, para captar la variabilidad estacional en el sector de estudio. En 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), se considerarán además, estas series de tiempo.

En la Tabla 4.4 muestra las principales estaciones meteorológicas dependientes de la Dirección Meteorológica de Chile en la XI región.

Tabla 4.4: Red Nacional de Estaciones Meteorológicas de XI región

| Nº | Código | Nombre de la Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Altura | Activada |
|----|--------|------------------------------|------|---------|----------|--------|----------|
| 1 | 44001 | Puerto Puyuhuapi | PLUV | 44:19 | 72:37 | 5 | 01/936 |
| 2 | 45001 | Puerto Aysén Aeródromo | S/AR | 45:24 | 72:40 | 10 | 02/931 |
| 3 | 45002 | Coyhaique Escuela Agrícola | T/PL | 45:33 | 72:02 | 343 | 09/965 |
| 4 | 45004 | Teniente Vidal Coyhaique Ad. | S/AR | 45:35 | 72:07 | 310 | 01/943 |
| 5 | 45005 | Balmaceda Aeródromo | S/AR | 45:54 | 71:43 | 520 | 12/950 |
| 6 | 46001 | Chile Chico Aeródromo | S/AR | 46:33 | 71:42 | 63 | 10/963 |
| 7 | 47001 | Lord Cochrane Aeródromo | S/AR | 47:14 | 72:33 | 182 | 07/969 |
| 8 | 48002 | Villa O'Higgins Subcomisaría | T/PL | 48:00 | 72:33 | 274 | 07/996 |

Fuente: Elaboración Propia

En los casos donde el sitio de estudio se encuentre lejano de cualquier estación meteorológica mencionada anteriormente, se deberá encontrar una correlación mediante algún método estadístico de los datos observados versus los datos históricos, con el fin de proyectar en el tiempo los datos observados. En la se presentan las estaciones meteorológicas en la XI región de Chile.

Figura 15: Estaciones Meteorológicas de la XI región de Chile.



Fuente: Elaboración Propia

Para un estado de viento dado, se define como velocidad básica del viento a la velocidad media del viento en un intervalo de 10 minutos medidos a 10 metros de altura sobre la superficie del mar abierto o un campo abierto sin obstáculos, los datos obtenidos en el registro debieran corregirse (Ref.8) de acuerdo a los siguientes conceptos:

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

A continuación se describen las distintas correcciones para los registros del viento en un estudio dado.

4.2.2.1 CORRECCIÓN POR VARIABILIDAD VERTICAL DEL VIENTO

Los perfiles de velocidades del viento siguen el patrón logarítmico de Von Karman con velocidades progresivamente crecientes con la altura. Este patrón también predice que a menores alturas la influencia topográfica es mayor y los esfuerzos de corte aumentan en magnitud.

De acuerdo a este patrón logarítmico, la capa de esfuerzo superficial es constante y efectos como la fuerza de Coriolis es poco relevante. Debido a estas características, la velocidad del viento superficial tiene un perfil de la siguiente forma:

$$U_z = \frac{U_*}{k} \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

Donde:

- U_z : La velocidad del viento a la altura z por encima de la superficie.
- U_* : Velocidad de fricción.
- k : Constante de Von Karman (aproximadamente igual a 0.4)
- z_0 : Altura de rugosidad de la superficie.

De acuerdo a la definición de la velocidad básica del viento, la velocidad se mide a 10 metros de altura, por lo que a alturas de medición distintas a ésta última se deberá resolver la expresión propuesta anteriormente (ecuación 1). Finalmente la ecuación (2) representa la solución simplificada de la ecuación (1), que se representa mediante la siguiente forma:

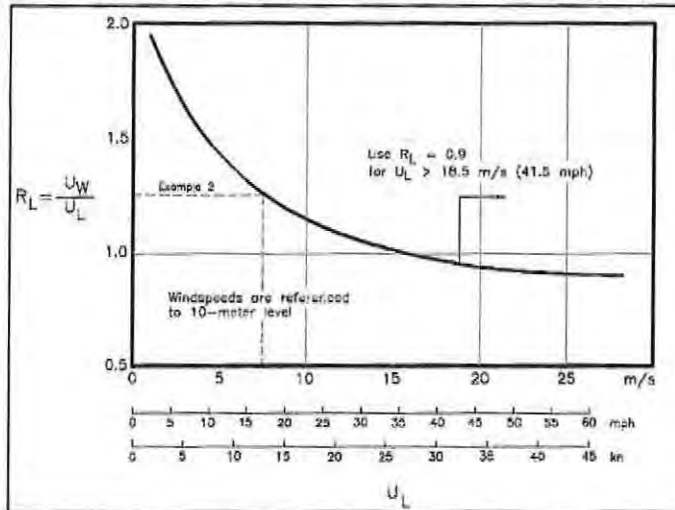
$$U(10) = U(z) \times \left(\frac{10}{z}\right)^n \quad (2)$$

Los valores del " n " varían de acuerdo a la rugosidad superficial y a la estabilidad atmosférica. Este parámetro puede adoptar valores de 1/10 a 1/4 en lugares de medición sobre la tierra y de 1/7 en lugares de medición sobre el mar. Este cambio de " n " varía principalmente por efecto de la temperatura. Cabe mencionar la ecuación (2) es válido entre los 8 – 12 m (Ref.9).

4.2.2.2 CORRECCIÓN POR UBICACIÓN DEL INSTRUMENTO EN TIERRA O AGUA

Dado por la topografía y los distintos accidentes geográficos, los resultados de las mediciones en tierra serán distintos que los resultados obtenidos en las mediciones hechas en el mar. En el caso que la medición fuese hecha en el mar los datos medidos no deberán corregirse, en cambio, si los datos fuesen medidos en la tierra, estos deberán corregirse de acuerdo a la Figura 16.

Figura 16: Corrección por ubicación del instrumento en tierra o agua

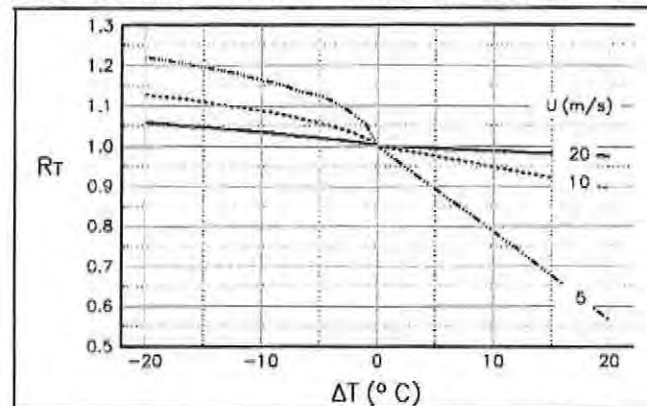


Fuente: Ref.8

La Figura 16 muestra la relación que existe entre la velocidad medida en el mar (U_W) y en la tierra (U_L). En el caso de obtener mediciones en tierra se ingresa con la velocidad medida y luego se interseca con la curva para obtener R_L . Si se presentan velocidades en tierra mayores a 18.5 m/s, se adopta un R_L igual a 0.9.

4.2.2.3 CORRECCIÓN POR DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL AIRE Y EL AGUA

La Figura 17 muestra la relación que existe entre la diferencia de temperatura entre el agua y el aire y el parámetro de corrección. En general solo cuando la condición de la capa del contorno atmosférico esta disponible como información, se puede utilizar la Figura 17.

Figura 17: Relación entre diferencia de temperatura y R_T 

Fuente: Ref.8

En cambio, si la información antes descrita no se encuentra disponible, mediante observaciones directa, el usuario puede inferir en que condición se encuentra el sistema, para lo cual se puede basar en los siguientes conceptos.

- Estable: Cuando el aire es más cálido que el agua, la capa que existe entre el agua fría y el aire produce que la mezcla de la columna de aire disminuya. En este caso se adopta un $R_T = 0.9$
- Neutral: Cuando el aire y el agua tienen la misma temperatura, la temperatura del agua no afecta la columna de aire. En este caso se adopta un $R_T = 1.0$
- Inestable: Cuando el aire es más frío que el agua, significa que la capa entre el agua cálida y el aire produce que la mezcla de la columna de aire aumenta. En este caso se adopta un $R_T = 1.1$

Finalmente, cuando no se tiene ningún tipo de información se asume un valor de $R_T = 1.1$.

4.2.2.4 CORRECCIÓN POR VARIABILIDAD TEMPORAL DEL VIENTO

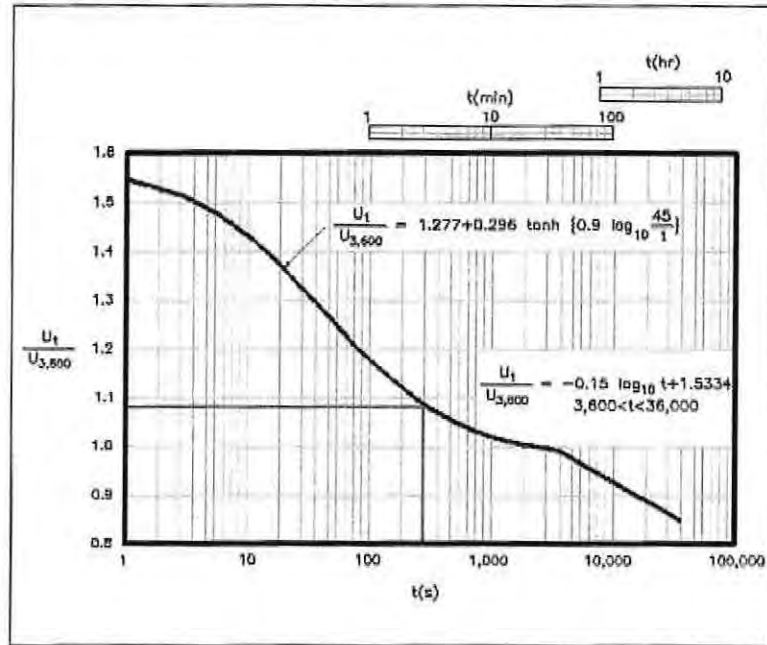
Es fundamental comprender la variabilidad temporal del viento, pues los sistemas reaccionan (estructuras, sistemas de atraque, etc.) de manera diferentes a vientos prolongados, rachas, etc.

Cuando las mediciones se realizan en cuerpos de aguas cerrados o semicerrados tales como fiordos, estuarios, ríos etc. la velocidad del viento máxima para generar una condición de Fetch limitado en el caso de un cuerpo de agua limitado corresponde a aquella condición en que el viento transfiere la máxima cantidad de energía al oleaje, el tiempo de observación para las mediciones se propone de 1 a 5 min. En el caso de las observaciones de grandes lagos y/o extensiones oceánicas, los intervalos de velocidad máxima del viento podrán registrarse entre los 15 a 30 min.

En el caso de los datos hayan sido adquiridos en intervalos fuera de los recomendados en el párrafo anterior, se aplicará la siguiente corrección ilustrada en la Figura 18. Por ejemplo, si se tienen datos de viento tomados en promedios durante 5 minutos, y se desea obtener su promedio horario, se ingresa a través del eje x con el tiempo de 5 minutos (300 segundos), observándose el valor del coeficiente:

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = 1.09 \quad \Rightarrow \quad \frac{U_t}{1.09} = U_{3600}$$

Figura 18: Corrección por variabilidad temporal del viento

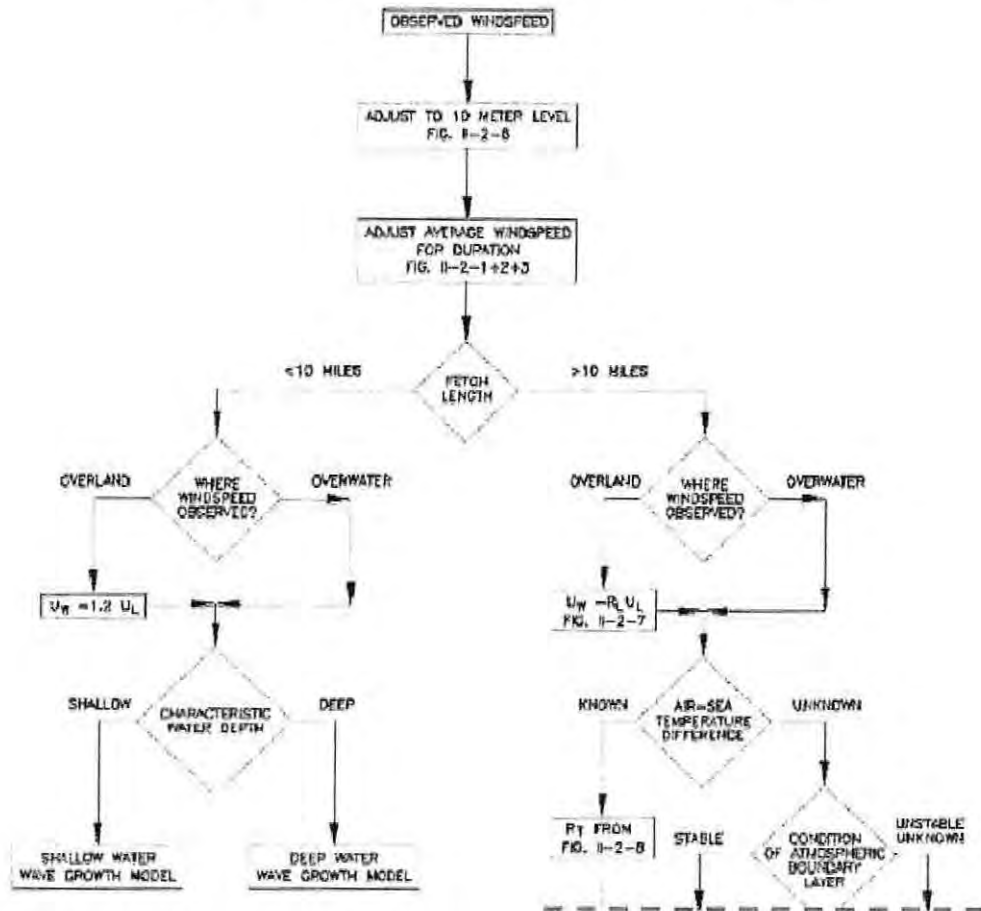


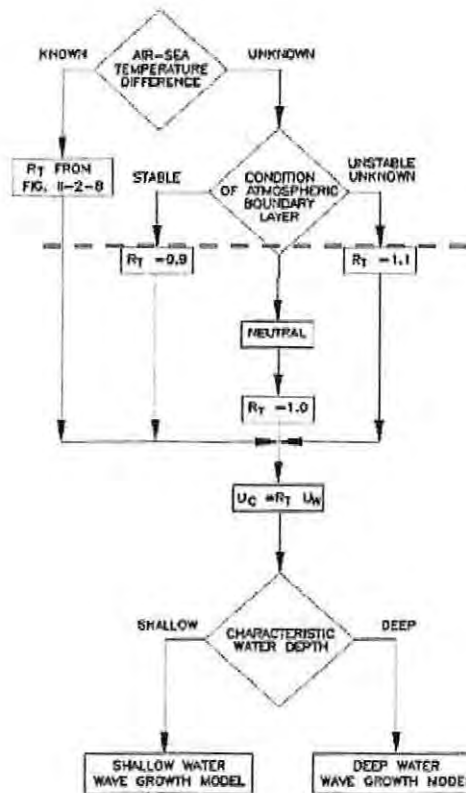
Fuente: Ref.8

Finalmente las distintas correcciones debido al viento se pueden resumir en la Figura 19.



Figura 19: Diagrama para realizar corrección de vientos





Fuente: Ref.8

Por lo general es poco común que existan mediciones prolongadas en el mismo lugar de estudio, por lo que los datos de observadores locales usando la Escala de Beaufort (Tabla 4.5) del viento, se hace útil a la hora de evaluar las velocidades que alcanza este fenómeno en el lugar donde se requiere fondear la estructura. Además esta información se puede complementar con datos obtenidos de la Capitanía de Puerto más cercana a la zona de estudio.

Tabla 4.5: Escala Beaufort del viento

| Fuerza | Denominación | Velocidad m/seg. | Velocidad nudos |
|--------|--------------------|------------------|-----------------|
| 0 | Calma | Menos de 0,3 | Menos de 1 |
| 1 | Brisa leve | 0,3 - 1,5 | 1 - 3 |
| 2 | Brisa | 1,6 - 3,3 | 4 - 6 |
| 3 | Viento suave | 3,4 - 5,4 | 7 - 10 |
| 4 | Viento moderado | 5,5 - 8,0 | 11 - 16 |
| 5 | Viento regular | 8,1 - 10,7 | 17 - 21 |
| 6 | Viento fuerte | 10,8 - 13,8 | 22 - 27 |
| 7 | Viento muy fuerte | 13,9 - 17,1 | 28 - 33 |
| 8 | Temporal | 17,2 - 20,7 | 34 - 40 |
| 9 | Temporal fuerte | 20,8 - 24,4 | 41 - 47 |
| 10 | Temporal fortísimo | 24,5 - 28,4 | 48 - 55 |
| 11 | Temporal deshecho | 28,5 - 33,5 | 56 - 65 |
| 12 | Huracán | más de 33,5 | Sobre 65 |

Fuente: Ref.10

Obtenidos los datos y corregidos según corresponda, la generación de informe debe contener los siguientes conceptos:

- Para todo el largo de la base de datos, la identificación de la máxima velocidad de viento registrada para cada dirección.
- Análisis estadístico de los valores extremos que resulte en una estimación de las máximas velocidades de viento con periodos de retorno se estimen convenientes

4.2.3 CORRIENTES

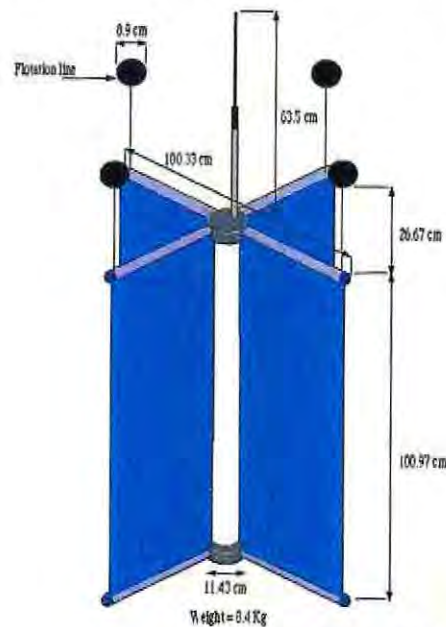
Las corrientes son un movimiento de traslación, continuado y permanente de una masa de agua. Los agentes externos que generan movimiento en el agua de mar estarán principalmente relacionados, en el caso de fiordos y estuarios, con la acción de la marea, el viento y el flujo de ríos. Estos agentes generan gradientes de presión superficiales (mareas y flujo de río) y tensión superficial (viento) que inducen aceleraciones. La trayectoria de las corrientes puede ser modificada por el efecto de Coriolis, la batimetría y la configuración de línea de costa, por lo que se deberá prestar atención a estos factores al seleccionar el sitio de la instalación.

El estudio de corrientes tiene por finalidad caracterizar los patrones de corrientes, dominantes (mayor magnitud) tanto en dirección como en velocidad, en el sector de estudio. La medición de corrientes permite conocer la fuerza total que afecta a la obra sumergida de la balsas-jaulas (redes peceras y loberas), y su mejor orientación con respecto de ellas.

Los dos métodos para la medición de corrientes son:

- El método lagrangiano, que se realiza con el uso de derivadores (Figura 20), 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).

Figura 20: Derivador tipo, para correntometría lagrangiana



Fuente: Elaboración Propia

- El método euleriano consiste en mediciones en un punto fijo, que deberán realizarse 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 el caso de recurrir a 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. En reemplazos, de los correntómetros también se recomienda la instalación de un Perfilador Acústico de Corrientes Doppler (ADCP) (ver Figura 21) instrumento que tiene la capacidad de medir la velocidad y dirección de las corrientes en toda la columna de agua y el perfil de velocidades con un mayor resolución vertical. Utilizando este instrumento mirando hacia abajo, montado en una plataforma móvil, como muestra la Figura 19, también se pueden realizar mediciones en secciones alrededor de las balsas-jaulas para conocer los flujos de transporte neto hacia dentro y hacia fuera en toda la columna de agua.

Figura 21: Correntómetro ADCP tipo, para correntometría euleriana.



Fuente: Elaboración Propia

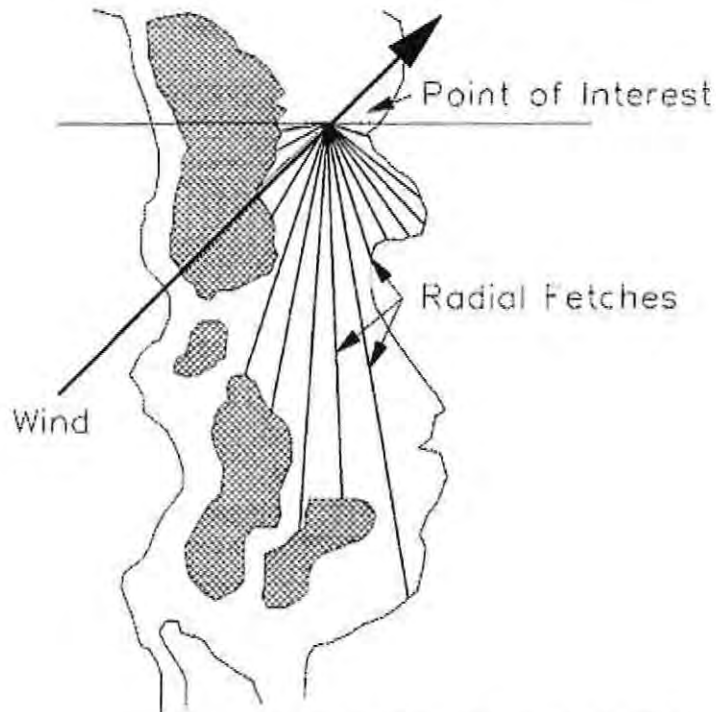
4.2.4 OLEAJE

El estudio de oleaje es relevante para los módulos ubicados en sectores abiertos al mar o en ubicaciones donde la configuración del cuerpo de agua permite la generación de oleaje local. 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 llegan a la costa de Chile pueden ser generadas por mecanismos de origen local y/o remoto. En el primer caso, los vientos locales generan oleaje en la zona inmediata, denominado **sea** (oleaje de generación local), con períodos típicos inferiores a 6 s. En el caso del oleaje de origen remoto, denominado **swell**, éstas pueden provenir desde cualquier región de la cuenca del Océano Pacífico, con períodos típicos del orden de 10 a 25 s" (Ref.6).

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, la cual deberá representar las condiciones locales, tomando en cuenta todos los procesos de transformación de oleaje pertinentes a la zona de generación. El procedimiento debe caracterizar la geometría radial de las aguas interiores que circunscriben el sitio de interés (Figura 22), utilizando funciones de corrección a los datos de viento (ver sección 4.2.2) y de transferencia de energía para obtener las características de oleaje (altura significativa, período de peak espectral y dirección de incidencia) a partir de la magnitud y dirección del viento y la geometría.

Figura 22: Geometría radial para aguas interiores



Fuente: Manual Automated Coastal Engineering System

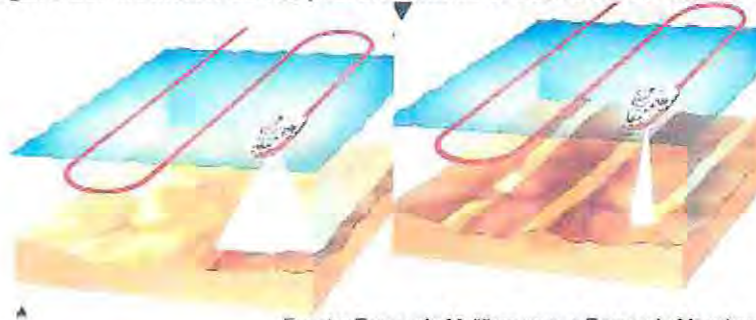
Las estructuras de cultivos se encuentran en lugares semicerrados donde el comportamiento y generación de oleaje suele ser bastante distinto que en costas abiertas. Por lo tanto existen software para la generación de oleaje a partir de datos históricos de vientos.

Entre ellos se destacan STWAVE (Steady State Spectral Wave Model), MIKE 21 NSW (Near Shore Spectral Wind-Wave Module) ACES (Automated Coastal Engineering System), etc. Algunos de los software mencionados requieren de un pago previo para su uso, por lo que se recomienda la utilización metodológica propuesta por el Shore Protection Manual (SPM) de 1984, que mediante el ACES, un software de libre distribución, realiza pronóstico de oleaje a partir de datos históricos de viento (Ref.11).

4.2.5 BATIMETRÍA Y TIPO DE FONDO

Un estudio batimétrico permite conocer las profundidades del fondo marino y determinar de manera indirecta una primera aproximación sobre las longitudes de las líneas de fondeo para un conjunto determinando de balsas-jaulas. Existen distintas metodologías de medición, tales como ecosondas monohaz y multihaz, sistemas láser aerotransportados y otros sistemas mecánicos y de percepción remota. La Figura 23 muestra la obtención de datos a través de un sistema multihaz y monohaz.

Figura 23: Medición de las profundidades a través de un ecosonda.



Fuente: Ecosonda Multihaz versus Ecosonda Monohaz

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. Por ejemplo en el caso de utilizar muertos de hormigón como sistema de anclaje, la importancia del estudio radica en la obtención del coeficiente de roce que exista entre el elemento de hormigón y la composición del fondo marino para la determinación del ángulo de fricción interna.

Para caracterizar el tipo de fondo es recomendable realizar un estudio de granulometría que se puede abordar mediante los siguientes métodos:

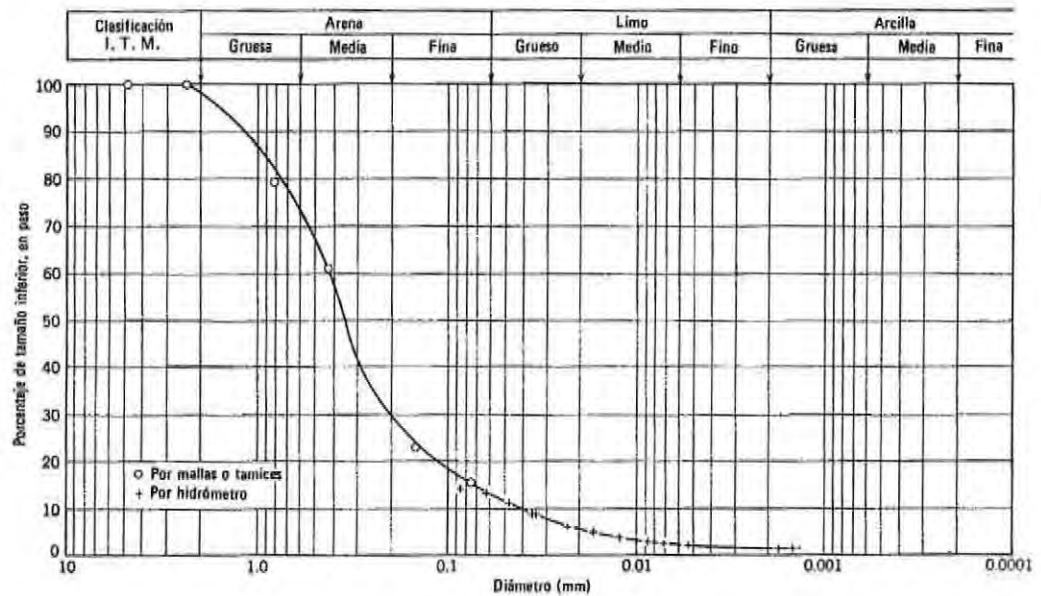
- El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices.
- Una medición más exacta se utiliza un granulómetro láser, cuyo rayo difracta en las partículas para poder determinar su tamaño.

Tabla 4.6: Escala granulométrica

| 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 |

Fuente: Ref.12

Figura 24: Curva granulometrica tipo.



Fuente: Ref.12

4.2.6 FOULING

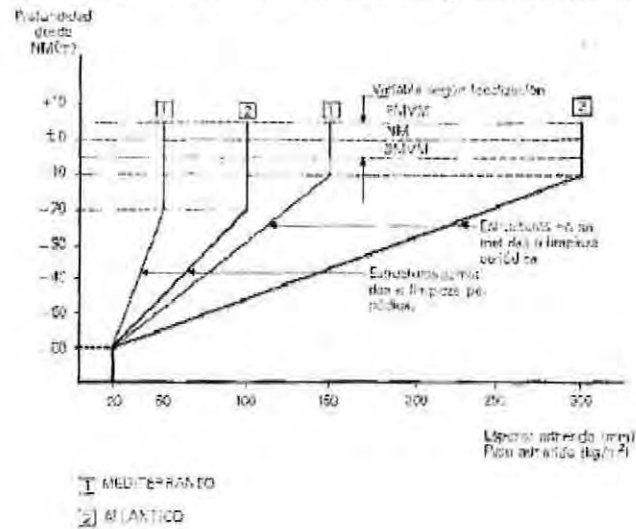
El crecimiento de organismos marinos o fouling constituye también un factor relevante en el diseño de balsas- jaulas. El fouling corresponde a los agentes marinos, ya sean algas o moluscos, que se adhieren a las estructuras marinas representando un aumento de la resistencia de la estructura a la corriente y al peso total de la estructura.

Su importancia radica en que obliga a sobredimensionar los componentes estructurales sumergidos, ya sea modificando el diámetro de las redes y el volumen de los flotadores. Por tal motivo es recomendable llevar un monitoreo mensual de la acción de estos agentes para poder así apreciar la fluctuaciones de los organismos que originan el fouling.

En el caso de la acuicultura, el fouling es de suma importancia ya que el aumento del peso de la estructura en forma considerable, afecta de manera directa en la estabilidad y finalmente provoca un aplastamiento de los salmones en cultivo. En la Figura 26 se muestra una red extraída después de 6 meses de operación.

A modo de ejemplo en las Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas (Ref.13) presentan una tabla con la cuantificación de las adherencias marinas en las aguas costeras españolas (ver Figura 25).

Figura 25: Cuantificación de adherencias en aguas costeras españolas



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 desarrollen 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 Estiaje.

Fuente: Ref.13

En la Figura 25 se muestra el peso adherido a las estructuras productos de los agentes marinos. En el caso de las costas chilenas se recomienda para futuras investigaciones realizar un catastro acerca del comportamiento de éstos agentes marinos y así obtener parámetros de diseño para futuros proyectos de investigación y desarrollo.

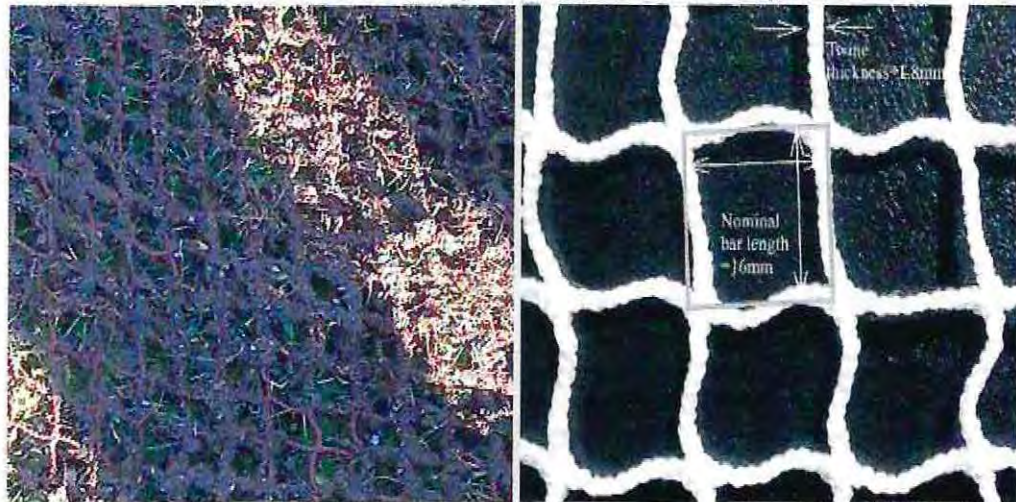
Figura 26: Red extraída después de 6 meses de operación.



Fuente: Elaboración propia

En el caso de la red pecera (Figura 27), es recomendable su intercambio por un período no mayor a los 6 meses, ya que el aumento considerable en el diámetro de sus barras (Twinw tichness - Figura 27) condiciona las cargas que registra la red por el motivo de aumentar de manera directa el área efectiva.

Figura 27: Efecto fouling en el diámetro de la red pecera.



Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Efecto fouling en una línea de fondeo.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 28 muestra del crecimiento marino en las líneas de fondeo, esto influye en un aumento del área efectiva normal al flujo de la corriente en su rugosidad (ambas proporcionales a las fuerzas de arrastres) y en el peso de las líneas. Tanto para las líneas como para las redes, existen métodos tal como la aplicación de pinturas anti-fouling (ver Figura 29) que impiden el incrustamiento de especies marinas.

Figura 29: Aplicación de pintura anti-fouling a las redes peceras



Fuente: Elaboración propia

Para obtener una noción acerca del efecto del crecimiento marino es necesario observar la Tabla 4.7, donde se muestra un aumento en el coeficiente de arrastre de la red de distinto material después de 1 mes de operación.

En la Tabla 4.7 se presenta la comparación para distintos tipos de materiales (**Net Material**), tipo de malla (**Mesh Type**), longitud nominal de la barra (**Nominal Bar**), espesor del diámetro (**Twine Diameter**), razón entre la longitud nominal de la barra y el espesor del diámetro (**a/d**), y coeficiente de arrastre (**C_d**). En el caso de redes de Nylon por ejemplo el coeficiente aumenta más del doble en un mes de funcionamiento.

Tabla 4.7: Estudio comparativos de fouling.

COMPARISON OF VARIOUS TYPES OF NETTING
(Numbered to Correspond with Marine Fouling Test Panels—Plates I and II)

| Net Ref No. | Material | Mesh Type D = Diamond S = Square | Nominal Bar Length 'a' in. | Twine Diameter 'd' in. | 'a/d' | C _d |
|-------------|----------------------------------|--|----------------------------|------------------------|-------|----------------|
| 1 | Nylon | D | 1 | 0.09 | 11.1 | 1.416 |
| 2 | Ulstron | D | 1 | 0.10 | 10.0 | 1.270 |
| 3 | Courlene | D | 1 | 0.075 | 13.3 | 1.332 |
| 4 | Polythene | S | 1 | 0.06 | 16.6 | 1.260 |
| 5 | Polythene (Cupra-proofed) | S | 1 | 0.06 | 16.6 | 1.260 |
| 6 | Plastabond Chain-link | D* | 1 | 0.10 | 10.0 | 1.304 |
| 7 | Galvanised Chain-link | D* | 1 | 0.08 | 12.5 | 1.238 |
| 8 | Plastabond Chain-link | D* | 3 | 0.10 | 30.0 | 1.094 |
| 9 | Netlon | S* | 2 | 0.13 | 15.4 | 1.192 |
| 10, 11 | Galvanised Square Mesh Courlene† | S* | 1 | 0.10 | 10.0 | 1.304 |
| — | Courlene† | D | 2.65 | 0.138 | 19.2 | 1.198 |

* Knotless Net

† Courlene, not tested but shown for comparison

COMPARISON OF VARIOUS TYPES OF FOULED NETTING AFTER ONE MONTH'S IMMERSION IN SEA WATER

| Net Ref No. | Net Material | Mesh Type D = Diamond S = Square | Nominal Bar Length 'a' in. | Twine Diameter 'd' in. | a/d ₁ | Cd ₁ |
|-------------|----------------------------------|--|----------------------------|------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Nylon | D | 1 | 0.09 | 2.5 | 3.985 |
| 2 | Ulstron | D | 1 | 0.10 | 2.5 | 3.985 |
| 3 | Courlene | D | 1 | 0.075 | 2.9 | 3.455 |
| 4 | Polythene | S | 1 | 0.06 | 3.3 | 2.953 |
| 5 | Polythene (Cupra-proofed) | S | 1 | 0.06 | 5 | 2.129 |
| 6 | Plastabond Chain-link | D* | 1 | 0.10 | 5 | 1.671 |
| 7 | Galvanised Chain-link | D* | 1 | 0.08 | 6.7 | 1.48 |
| 8 | Plastabond Chain-link | D* | 3 | 0.10 | 12 | 1.25 |
| 9 | Netlon | S* | 2 | 0.13 | 6.6 | 1.48 |
| 10, 11 | Galvanised Square Mesh Courlene† | S* | 1 | 0.10 | 7.7 | 1.408 |
| — | Courlene† | D | 2.65 | 0.138 | 6.6 | 1.78 |

* Knotless Net

† 2.65 in. Courlene, not tested but shown for comparison

Fuente: Ref.14 (Milne, 1970)

4.3 ESTIMACIÓN DE SOLICITACIONES

4.3.1 GENERALIDADES

Para el cálculo de esfuerzos es necesario estimar las fuerzas externas que afectan la estructura que se desea diseñar. Esto tiene relación con los estudios oceanográficos y con la forma de modelar las acciones dinámicas del medio.

En este capítulo se presentan formulaciones de uso común en la bibliografía especializada, que permiten la estimación de las fuerzas que actúan sobre la estructura de estudio. Para el caso del viento, se utiliza además la Norma Nch 432. Of 1971 del Instituto Nacional de Normalización (INN – Ref.15) para comparar con las recomendaciones extranjeras.

Como en Chile no existe normativa o recomendaciones orientadas al fondeo de balsas-jaulas éstas, se recurre a bibliografía propuesta por diferentes entidades internacionales con el fin de presentar expresiones con cumplan con los estándares de calidad. Dentro de las más importantes y recurridas se encuentran la American Bureau of Shipping (ABS), Lloyds Register (LR), Det Norske Veritas (DNV), entre otras.

Los problemas que se derivan de los estudios oceanográficos son la subestimación y/o inexactitud de las condiciones ambientales que existen en el sector de estudio, donde se requiere colocar las balsas-jaulas. Lo que se traduce en cálculos erróneos que finalmente podrían producir fallas estructurales y garreo en los artefactos navales. Por tal motivo dentro de los cálculos finales se incorporan factores de seguridad para obtención de resultados confiables.

A continuación se presentan formulaciones orientadas a la definición de las cargas de vientos, corrientes y oleaje.

4.3.2 VIENTO

Las fuerzas debidas al viento son consideradas de menor impacto en el caso de las estructuras acuícolas, pero no dejan de ser relevantes a la hora de evaluar su buen funcionamiento. La fuerza del viento afecta directamente a la estructura que se encuentra sobre la línea de flotación (Obra Muerta), o elemento plano, y a las redes pajareras que oponen resistencia al viento.

Se debe aclarar que la acción del viento a pesar de tener carácter de carga dinámica, se asimila a una carga estática horizontal sobre la estructura.

4.3.2.1 FUERZAS SOBRE ELEMENTOS PLANOS

Para el cálculo se recurrirán a las expresiones generales básicas para caracterizar la acción del viento sobre la estructura (Ref.16):

$$F = \frac{\rho}{2} \times u^2 \times C_s \times A \quad (3)$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire (1.3 Kg/m³).
- u^2 : Velocidad del viento (m/s).
- Cs : Coeficiente de Forma (Tabla 4.8).
- A : Área de la estructura (normal al flujo – m²).

Tabla 4.8: Coeficientes de forma

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

Fuente: Ref.16

De la expresión general (3) algunos autores han derivado expresiones a partir de datos empíricos, algunos de los cuales se reproducen a continuación:

Van Boven, (1968 –Ref.14)

$$F = 0,0965 \times A \times u^2 \tag{4}$$

Donde:

- F : Fuerza debido al viento (Kg)
- A : Área expuesta el flujo del viento (m²)
- u : Velocidad del viento (m/s)

En Chile el Instituto Nacional de Normalización a través de su publicación *NCH 431. of 71 – Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones* estima algunos valores que son recomendables para el diseño de construcciones. Dentro de la Norma Nch se refiere la fórmula para calcular la presión básica del viento, la cuál tiene la siguiente forma:

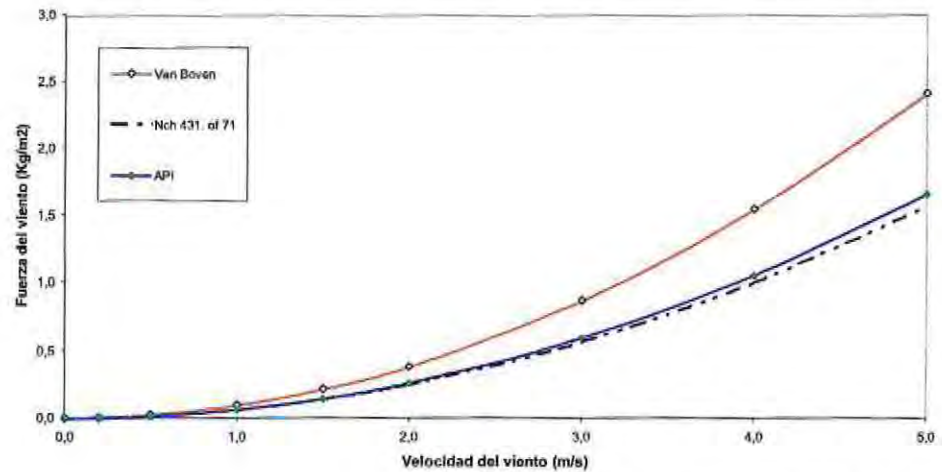
$$q = \frac{u^2}{16} \tag{5}$$

Donde:

- q : Presión básica del viento (Kg/m²)
- u^2 : Velocidad máxima instantánea del viento (m/s)

En la Figura 27 se presenta una comparación entre las expresiones propuestas:

Figura 30: Comparación de la fuerza del viento para distintas formulaciones



Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 FUERZAS SOBRE LAS REDES

La fuerza del viento sobre las redes es de menor magnitud que las fuerzas por otro tipo de agente oceanográfico, por lo tanto se puede esperar que las redes no presenten obstáculo, dado que el área efectiva expuesta al flujo es menor respecto de las otras áreas de la estructura, frente a la resistencia del viento.

En el caso que se requiera calcular las fuerzas sobre las redes, esta se puede representar mediante la siguiente expresión (Ref.14):

$$F = K \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \quad (6)$$

Donde:

- F : Fuerza del viento (Kg)
- K : Coeficiente de resistencia $\left(= \frac{1-\beta}{\beta^2} \right)$
- d : Diámetro de la barra (m)
- l : Tamaño de la barra (m)
- ρ : Densidad del aire (1.3 Kg/m³)
- V : Velocidad del viento (m/s)

La ecuación (6) tiene su aplicabilidad sobre estructura expuesta en forma normal a la dirección del viento (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. El factor de reducción o efecto sombra (Ref.17) que experimentan los módulos interiores sobre la red (panel perpendicular al flujo), tiene la siguiente expresión:

$$k = \left(1.15 - 1.67 \times S_n \times \sqrt{\frac{h}{a}}\right) \quad \text{para } S_n \leq 0.6 \quad (7)$$

$$k = \left(1.15 - \sqrt{\frac{h}{a}}\right) \quad \text{para } S_n > 0.6 \quad (8)$$

Donde:

- S_n : Factor de Solidez
- h : Altura de la red (m)
- a : Distancia entre una red y la próxima (m)

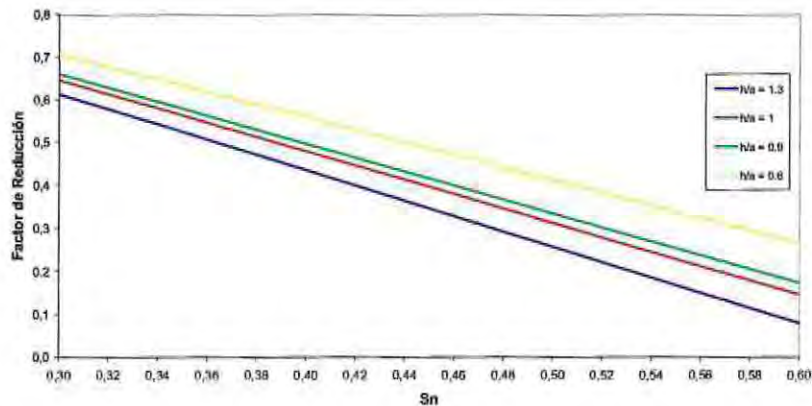
El factor de solidez es función entre el área efectiva expuesta al flujo y el área total de la red.

Si $h/a < 1$ entonces $k = 1$

Si $h/a > 1$ entonces k es calculado de acuerdo a las ecuaciones (7) u (8), considerando $h/a = 1$

En la Figura 31 se observan los factores de reducción a través de las redes, en función del factor de solidez, la altura y distancia entre redes.

Figura 31: Factor de reducción para la fuerza del viento.



Fuente : Elaboración propia

4.3.3 CORRIENTES

Las corrientes constituyen una de las variables oceanográficas más importantes, ya que corresponden a movimientos de masas de aguas que inducen esfuerzos de arrastres sobre los elementos sumergidos y por ende condicionan el diseño de los sistemas de fondeo. Las cargas producidas por las corrientes inciden de manera directa la red pecera, los flotadores y la red lobera, además de los sistemas de fondeo.

La expresión general para caracterizar la acción de la corriente sobre una estructura que se opone a su flujo es la siguiente (Ref.16):

$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2 \quad (9)$$

Donde:

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

El área expuesta efectiva de la red se puede obtener de la siguiente expresión:

$$A = 4 \times m \times n \times d \times a \quad (10)$$

Donde:

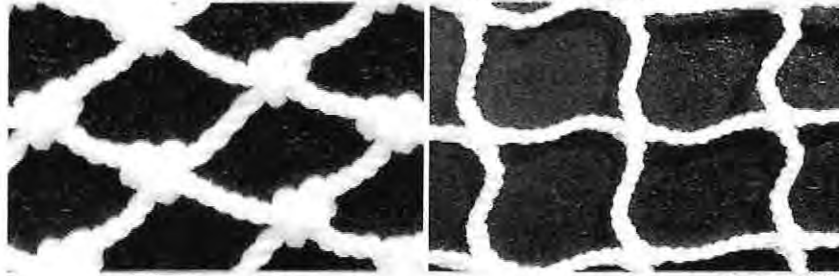
| | | |
|---|---|---|
| A | : | Área expuesta efectiva al flujo (m^2) |
| m | : | número de mallas verticales por unidad de longitud. |
| n | : | número de mallas horizontales por unidad de longitud. |
| d | : | diámetro de la barra (m) |
| a | : | tamaño de la barra (m) |

Para calcular el coeficiente de arrastre se propone la expresión de Saunders-Roe (1965) para redes con y sin nudos (Figura 32):

$$Cd = 1 + 3,77 \times \left(\frac{d}{a}\right) + 9,37 \times \left(\frac{d}{a}\right)^2 \quad \text{Para redes con nudos}$$

$$Cd = 1 + 2,73 \times \left(\frac{d}{a}\right) + 3,12 \times \left(\frac{d}{a}\right)^2 \quad \text{Para redes sin nudos}$$

Figura 32: Redes con nudo y sin nudos



Fuente: Ref.17

El fouling afecta de manera directa a la estimación de las fuerzas por corriente, ya que este agente marino se incrusta en las mallas aumentando la sección efectiva que se opone al flujo. Como se observa en la ecuación (9) tiene directa relación con los coeficientes de arrastre y que se traduce finalmente en el aumento de la resistencia por concepto de las corrientes. Además del aumento en el área efectiva, se producen problemas de flotabilidad, ya que existe un aumento paulatino en el peso total de la estructura.

La oposición al flujo genera una reducción de la velocidad de la corriente en forma paulatina hacia módulos ubicados al interior de la estructura. Este factor de reducción explica la disminución de la velocidad de la corriente de pasar de una malla a otra afectando hasta el último par de jaulas.

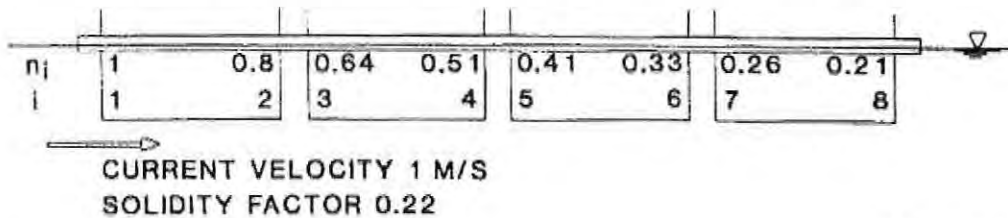
De acuerdo a lo que se propone en la Ref.17, la velocidad de la corriente disminuye en un 10% al traspasar de un malla a otra (Figura 33), por lo tanto, su expresión se puede definir de la siguiente manera:

$$k = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \tag{11}$$

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).

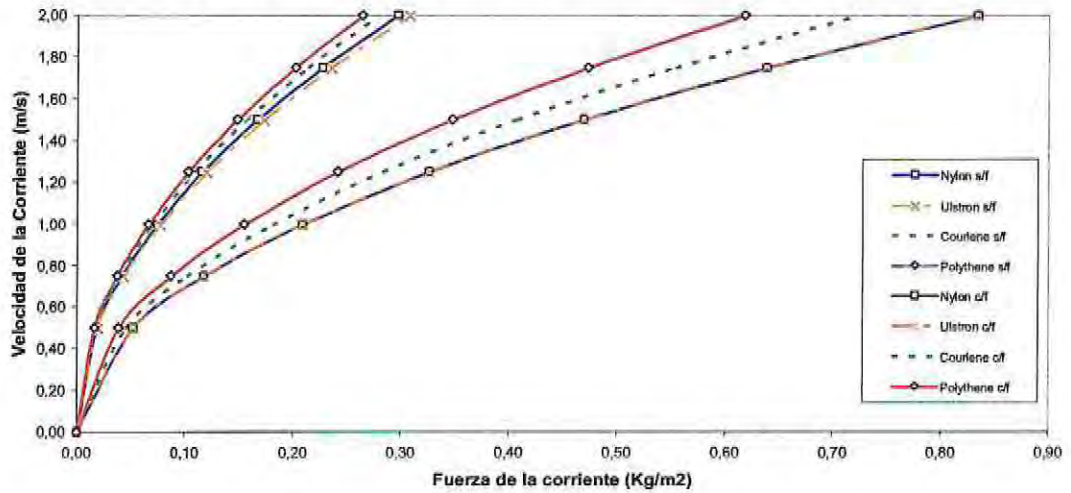
Figura 33: Factor de reducción para la velocidad de la corriente.



Fuente: Ref.17

Para tener una primera aproximación acerca de las fuerzas de la corriente sobre las redes, la Figura 34 muestra la fuerza sobre los distintos materiales que pueden componer un sistema de red. Tal como se detalla en la Figura 34, el cálculo se realizó para redes con y sin fouling.

Figura 34: Fuerza de la corriente con fouling y sin fouling.

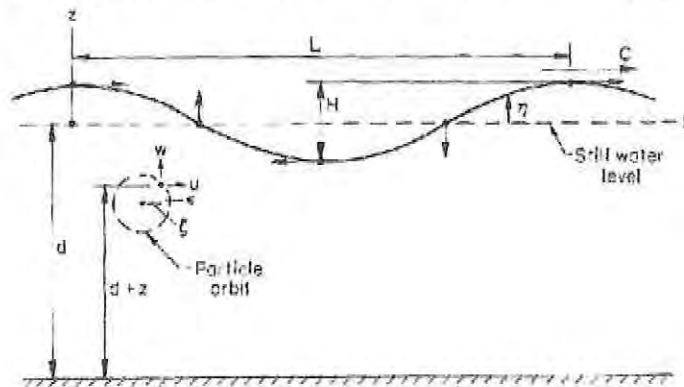


Fuente: Elaboración propia

4.3.4 OLAJE

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, que permiten determinar los parámetros necesarios para evaluar las fuerzas que actúan sobre las balsas-jaulas.

Figura 35: Definición de parámetros característicos del oleaje



Las definiciones comunes son:

Altura de ola (H): es la distancia vertical que existe entre una cresta y un valle sucesivos.

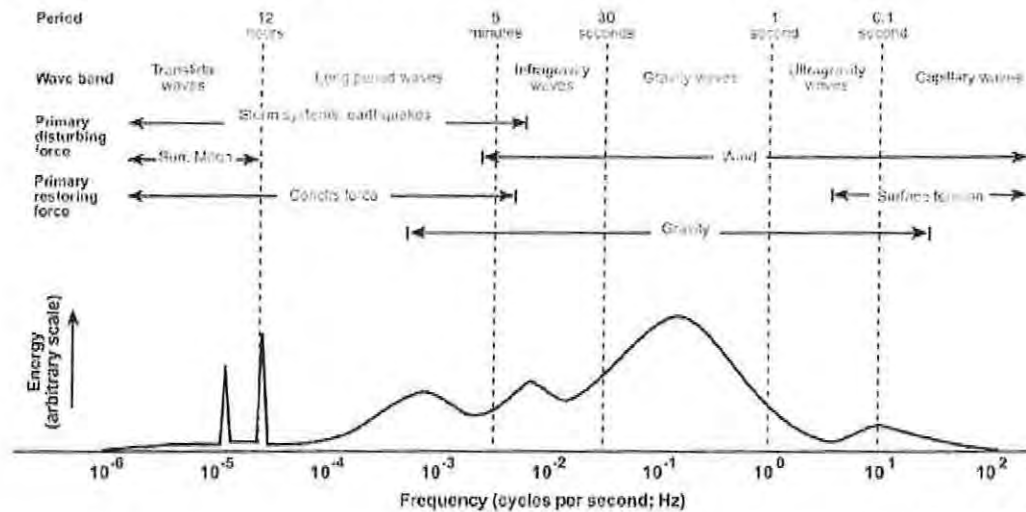
Longitud de la ola (L): es la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles sucesivos.

Periodo de la ola (T): tiempo que transcurre entre el paso consecutivo de dos crestas sucesivos.

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 mecanismo las ondas se comportan distintamente y principalmente sus características difieren unas con otras (períodos, longitud, etc). Para el caso de estudios, las ondas gravitacionales (3 a 30 s) serán utilizadas para los distintos análisis en el presente documento.

En la Figura 36 se presentan la clasificación de ondas según su período.

Figura 36: Clasificación de las ondas, según su período.



Fuente: PWG

Para determinar los parámetros característicos del oleaje o de las ondas se utilizan dos enfoques complementarios entre sí: oleaje regular y oleaje irregular.

El enfoque de oleaje irregular permite utilizar métodos espectrales y estadísticos para estimar la variabilidad de los parámetros del oleaje (Altura, Período y Dirección) que son utilizados para determinación la mecánica del oleaje. Para la determinación de los parámetros de oleajes, existe en la literatura especializadas variadas teorías con sus respectivas restricciones dentro de las cuales la más simplificada corresponde a la Teoría Lineal del Oleaje.

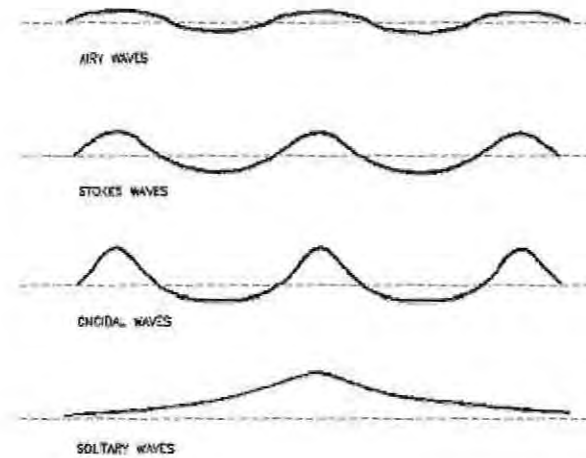
La Teoría Lineal del Oleaje o TLO (George Biddell Airy, astrónomo inglés – 1845 y George Gabriel Stokes, matemático irlandés - 1847) es la teoría más simple de todas y considera que los movimientos de las partículas de agua son órbitas cerradas, por lo que no existe transporte neto de agua. Cuando el oleaje es generado en el mar abierto se propaga hacia la costa con una dirección referencial sobre



aguas someras, la ola sufre deformaciones que transforman su forma de una sinusoidal a una asimétrica.

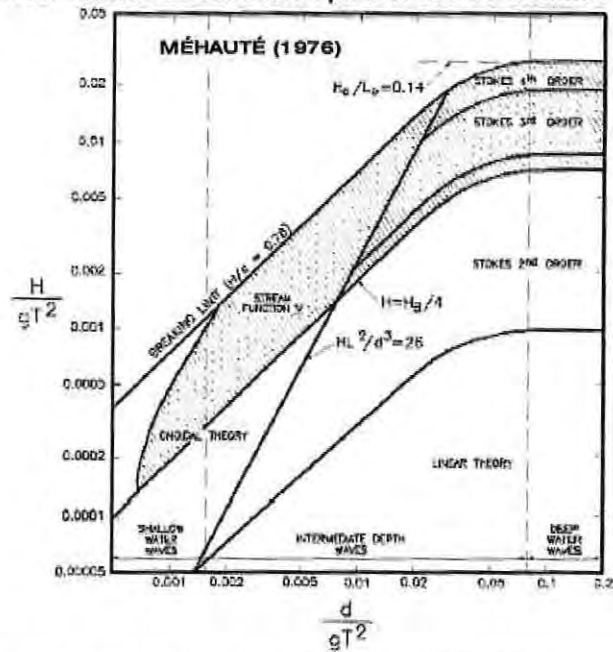
Este fenómeno escapa de los supuestos relacionados con la TLO, por lo que para ello existe otras teorías o aproximaciones (Figura 37). Estas se diferencian unas con otras especialmente con el campo de aplicación y algunas características propias de las ondas (Figura 38)

Figura 37: Teorías de oleaje



Fuente: Ref.18

Figura 38: Gráfico de validación para el uso de distintas teorías.



Fuente: COI 414 V.03 - Mecánica de olas [Oleaje regular].ppt (Clases PWG)

Los centros de cultivos ubicados en el sur de Chile, se localizan generalmente en entornos donde la influencia del oleaje generado en mar abierto es prácticamente nula. Por lo tanto estas estructuras están afecto a oleaje generado en sus proximidades u oleaje de generación local denominado seas.

Una de las particularidades de los estrechos, fiordos, estuarios y canales del sur de Chile, que sus profundidades son considerables, se recomienda el uso de teoría lineales para obtener los parámetros de oleaje. Las alturas y períodos generados en sistemas cerrados se encuentran bastantes limitados por lo que su propagación no se vería afectadas a fenómenos tales como la refracción, difracción, asomeramiento, etc.

4.3.4.1 FUERZAS DE IMPACTO SOBRE LA ESTRUCTURA

Las cargas por oleaje se cuantifican mediante distintos métodos en general todos derivados de la ecuación de Morison (1950) válida para estructuras esbeltas cuyo diámetro es bastante menor que la longitud de ondas de las olas (pilotes).

Las balsas-jaulas son estructuras cuya área de exposición a un frente de ondas es bastante mayor en comparación con lo pilotes, por lo que la implementación de la formulación de Morison se escapa de su validez. Hoy en día existe una metodología utilizada para determinar las fuerzas de impacto por oleaje sobre elementos, donde el área de exposición es muy superior a los pilotes.

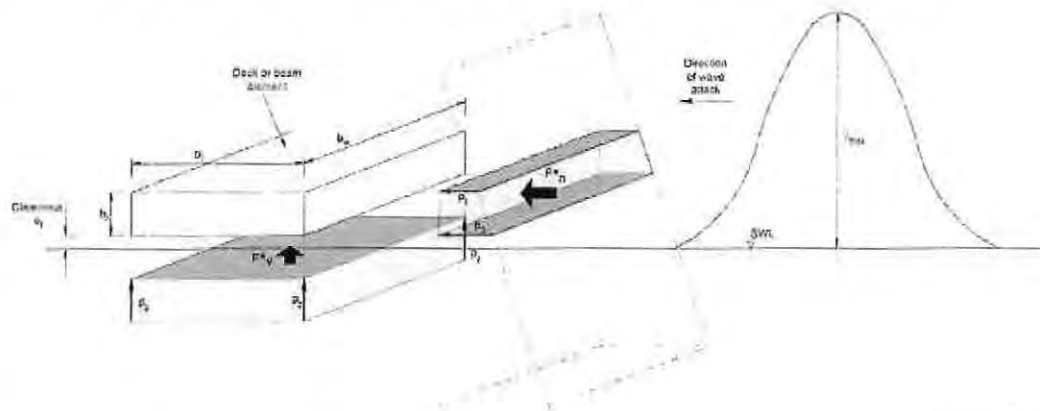
Para determinar dichas fuerzas se recurre al extracto del documento "Mcconnell, K; Allsop, W. y Cruickshank (2004). Piers, jetties and related structures exposed to waves – Guidelines for hydraulic loading" – Ref.19) que mediante ensayos de laboratorio determinan la relación entre las fuerzas básicas y la fuerzas reales que impactan al sistema.

A continuación se reproducen las expresiones para calcular las fuerzas de impacto sobre la estructura:

4.3.4.1.1 Definición de Fuerzas Básicas

La utilización de esta metodología define las condiciones de fuerzas básicas en sentido vertical y horizontal que sufre la estructura. Por lo tanto la Figura 39 presenta la definición de dichas fuerzas.

Figura 39: Definición de las fuerzas básicas, horizontales y verticales.



Fuente: Ref.19

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

$$F_v^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_1} p_{hyd} \cdot dA \cong b_w \times b_l \times p_2 \quad (12)$$

$$F_h^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_1} p_{hyd} \cdot dA \cong b_w (\eta_{max} - c_1) \cdot \frac{p_2}{2} \quad \text{para:} \quad \eta_{max} \leq c_1 + b_h \quad (13)$$

$$F_h^* = \int_{b_w}^{\eta_{max}} \int_{c_1} p_{hyd} \cdot dA \cong b_w b_h \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \quad \text{para:} \quad \eta_{max} > c_1 + b_h \quad (14)$$

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

Desnivelación 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):
$$H_{max} = H_s \times 0.706 \sqrt{\ln N_z}$$

Presión en la cara inferior del elemento:
$$p_1 = [\eta_{max} - (b_h + c_1)] \rho g$$

Presión en la cara superior del elemento:
$$p_2 = [\eta_{max} - c_1] \rho g$$

Donde:

- Hs : Altura significativa (m)
- Nz : Número de olas durante la tormenta
- Lm : Longitud de la onda
- ρ : Densidad del agua de mar (1025 Kg/m³)
- g : Aceleración de gravedad (9.8 m/s²)

Los parámetros b_w , b_h y c_1 corresponde a los indicados en la Figura 39.

4.3.4.1.2 Predicción de Fuerzas sobre la Estructura

La predicción de las fuerzas reales sobre la estructura, se presenta mediante la siguiente expresión:

$$\frac{F_{qr}}{F^*} = \frac{\theta}{\left[\frac{(\eta_{max} - c_1)}{H_s} \right]^5} \quad (15)$$

Donde:

- F_{qs} : Fuerzas cuasi-estáticas de interés (F_{vqs+} , F_{vqs-} , F_{hqs+} , F_{hqs-})
 F^* : Fuerza básica definidas en la sección 4.3.4.1.1
 c_l : Francobordo, definido en la Figura 39.
 η_{max} : Desnivelación máxima, respecto del Nivel estático al momento de la incidencia de la ola.
 a, b : Coeficientes definidos en la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10.

En la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 se presentan los coeficientes que se utilizan en la ecuación (15).

Tabla 4.9: Coeficientes para el cálculo de las fuerzas verticales

| 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 |

Fuente: Ref.19

Tabla 4.10: Coeficientes para el cálculo de las fuerzas horizontales

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

Fuente: Ref.19

5 MODELO ESTRUCTURAL

5.1 GENERALIDADES

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 este capítulo es proponer formulaciones matemáticas que describan los esfuerzos y deformaciones que se producen en las líneas de fondeo y la estructura cuando se encuentran sometidas a fuerzas externas.

Uno de los componentes fundamentales del sistema de estructural corresponde a los elementos de fondeo cuya función es mantener la estabilidad de la estructura. Esto resulta fundamental dentro de la producción de cosechas de peces, por que influye directamente en los costos finales.

Los sistemas de fondeo están condicionados por las características físicas del medio acuático y fondo marino (pendiente del lugar y tipo de fondo; roca, fango, etc.) donde se vayan a emplazar y del material del cuál se van construir.

Esto último tiene implicancia en el coeficiente de roce (μ) entre el muerto de hormigón y el suelo marino que sostendrá la estructura, para el caso de estructuras gravitacionales.

5.2 SISTEMAS DE FONDEO

El sistema de fondeo tiene por finalidad resistir las fuerzas estáticas y dinámicas que afectan a las estructuras de cultivos. Para cuantificarlas se proponen diferentes formulaciones que ayudan a comprender de una manera práctica su funcionamiento.

Dentro del análisis se definen dos tipos de configuraciones:

- Una primera configuración queda conformada con las líneas de fondeo directamente sujetadas desde el dispositivo de fondo hasta la estructura de acero (Figura 40)
- Una segunda configuración, analiza la línea de fondeo sujeta desde el dispositivo de fondo hasta una boya y luego otra extensión hasta la estructura de acero (Figura 44).

5.3 ANÁLISIS DE FONDEO

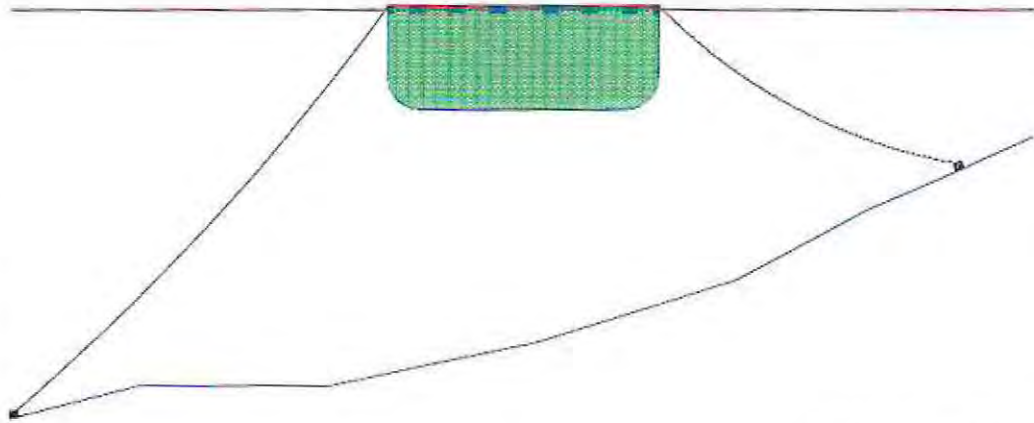
Para realizar el análisis del sistema de fondeo, se utiliza un diagrama de cuerpo libre, donde las fuerzas que solicitan a la estructura están descritas en el capítulo anterior (sección 4.3). Para ello se recurre a los apartados comunes dentro de estática de estructuras, donde el fenómeno que describe el sistema de fondeo se ajuste con un alto grado de satisfacción a la curva de la catenaria.

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. Por lo tanto, el análisis de los dos tipos de configuraciones se describe a continuación:

5.3.1 ELEMENTO TIPO 1

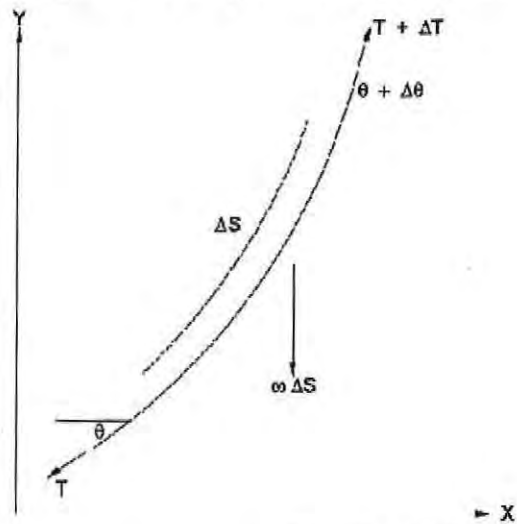
En la Figura 40 se observa la configuración tipo 1 que se analizará mediante el diagrama de cuerpo libre (Figura 41) que se presenta a continuación:

Figura 40: Configuración tipo 1.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 41: Diagrama de cuerpo libre de un elemento de cuerda.



Fuente: Elaboración Propia

Observando el esquema anterior se pueden desprender las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned} \sum F_h = 0 \quad & -T \cos(\theta) + (T + \Delta T) \cos(\theta + \Delta\theta) = 0 \\ & \frac{d(T \cos(\theta))}{ds} = \frac{d(T \cos(\theta))}{dx} = 0 \\ & T \cos(\theta) = \text{constante} = T_H \end{aligned} \quad (16)$$

Donde la tensión a lo largo del cable tiene la siguiente forma:

$$T = \frac{T_H}{\cos(\theta)} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum F_v = 0 \quad & -T \text{sen}(\theta) + (T + \Delta T) \text{sen}(\theta + \Delta\theta) - \omega \Delta S = 0 \\ & \frac{dT \text{sen}(\theta)}{ds} = \omega \\ & d(T \text{sen}(\theta)) = \omega ds \\ & \frac{d(T \text{sen}(\theta))}{d\theta} = \omega \frac{ds}{d\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

$$T_H \frac{d(\tan \theta)}{d\theta} = \omega \frac{ds}{d\theta} \quad (19)$$

Si se resuelve la ecuación (19) y se integra se obtiene que:

$$T_H \sec^2 \theta = \omega \frac{ds}{d\theta} \quad \Rightarrow \quad \int_0^{L_0} ds = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{T_H}{\omega} \sec^2 \theta d\theta \quad (20)$$

A través de la ecuación (20) se obtiene la longitud total del cable dependiente de los ángulos de inicio y final de la catenaria propuesta.

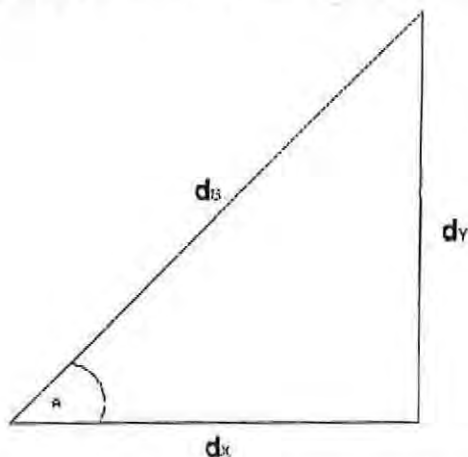
$$L_0 = \frac{T_H}{\omega} \tan \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad \Rightarrow \quad L_0 = \frac{T_H}{\omega} (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \quad (21)$$

Donde:

- θ_1 : Ángulo en el inicio de la catenaria.
- θ_2 : Ángulo al final de la catenaria.

En la Figura 42 se observa un elemento infinitesimal de cable, el cuál se presenta a continuación:

Figura 42: Elemento infinitesimal del cable.



Fuente: Elaboración Propia

Se pueden obtener las siguientes expresiones

$$\cos \theta = \frac{dx}{ds} \quad ; \quad \text{sen} \theta = \frac{dy}{ds}$$

Reescribiendo los términos anteriores, se obtiene lo siguiente

$$ds = \frac{1}{\cos \theta} dx \quad ; \quad ds = \frac{1}{\text{sen} \theta} dy$$

Estos términos se reemplazan en la ecuación (20), obteniendo así las siguientes expresiones:

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{T_H}{\omega} \sec \theta \quad ; \quad \frac{dy}{d\theta} = \frac{T_H}{\omega} \sec^2 \theta \text{ sen} \theta$$

Si se integra las ecuaciones anteriores

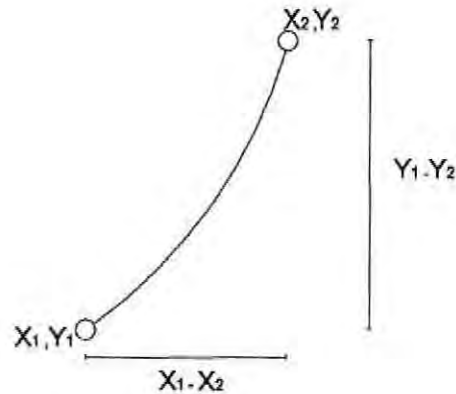
$$\int_{x_1}^{x_2} dx = \frac{T_H}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sec \theta d\theta \quad ; \quad \int_{y_1}^{y_2} dy = \frac{T_H}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sec^2 \theta \text{ sen} \theta d\theta$$

Se obtienen finalmente las proyecciones para "X" e "Y" del sistema propuesto, que serán reescritas para no provocar confusión por ΔR y ΔZ.

$$(x_2 - x_1) = \Delta x = \frac{T_H}{\omega} \ln(\sec \theta + \tan \theta) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (22)$$

$$(y_2 - y_1) = \Delta y = \frac{T_H}{\omega} \sec \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (23)$$

En forma de entender de mejor manera lo descrito anteriormente es necesario observar el siguiente esquema:



Finalmente en forma general Δx y Δy o ΔR y ΔZ representan las distancias horizontales y verticales entre el inicio y fin para cualquier tipo de catenaria descrita en el sistema.

$$\Delta R = \frac{T_H}{\omega} [\ln(\sec \theta_2 + \tan \theta_2) - \ln(\sec \theta_1 + \tan \theta_1)] \quad (24)$$

$$\Delta Z = \frac{T_H}{\omega} (\sec \theta_2 - \sec \theta_1) \quad (25)$$

Generalmente en los problemas de análisis de los sistemas de fondeo, se suele conocer algunos parámetros fundamentales, tales como los datos de las propiedades físicas del elemento analizado (cadena o cable).

En resumen ΔZ es un parámetro conocido que va a depender del sitio donde se requiere emplazar la estructura (batimetría), ω representa la densidad lineal del cable de fondeo que se requiere utilizar. Entonces el problema se traduce en encontrar ΔR en función de T_H y viceversa.

En forma general, los ángulos de inicio y fin de la catenaria (θ_1 y θ_2) no son conocidos, por lo tanto y mediante algunos manejos algebraicos (Ref.20) se reescribe el problema para obtener los ángulos en función de las propiedades físicas del cable.

Si aplicamos la función exponencial a la ecuación (22), se obtiene la siguiente expresión

$$e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} = \frac{\sec \theta_2 + \tan \theta_2}{\sec \theta_1 + \tan \theta_1} \quad (24)$$

Recurriendo a la siguiente identidad trigonométrica

$$\sec \theta_2 + \tan \theta_2 = \frac{1}{\sec \theta_2 - \tan \theta_2}$$

Si se invierte la ecuación (24) y se incorpora la identidad trigonométrica anterior, para obtener la siguiente ecuación:

$$e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} = \frac{\sec \theta_2 - \tan \theta_2}{\sec \theta_1 - \tan \theta_1} \quad (25)$$

Para una primera aproximación se suma la ecuación (24) y (25)

$$e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} + e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} = \frac{(\sec \theta_2 + \tan \theta_2)(\sec \theta_1 - \tan \theta_1) + (\sec \theta_1 + \tan \theta_1)(\sec \theta_2 - \tan \theta_2)}{(\sec \theta_1 + \tan \theta_1)(\sec \theta_1 - \tan \theta_1)}$$

Resultando así la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} \left(e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} + e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} \right) = \sec \theta_1 \sec \theta_2 - \tan \theta_1 \tan \theta_2 = \cosh \left(\frac{\Delta R_w}{T_H} \right) \quad (26)$$

En forma similar, se resta la ecuación (24) y (25), obteniendo así lo siguiente:

$$e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} - e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} = \frac{(\sec \theta_2 + \tan \theta_2)(\sec \theta_1 - \tan \theta_1) - (\sec \theta_1 + \tan \theta_1)(\sec \theta_2 - \tan \theta_2)}{(\sec \theta_1 + \tan \theta_1)(\sec \theta_1 - \tan \theta_1)}$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$\frac{1}{2} \left[e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} - e^{\frac{\Delta R_w}{T_H}} \right] = \sec \theta_1 \tan \theta_2 - \tan \theta_1 \sec \theta_2 = \sinh \left(\frac{\Delta R_w}{T_H} \right) \quad (27)$$

Finalmente de los manejos algebraicos anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones



$$\sec \theta_1 \sec \theta_2 - \tan \theta_1 \tan \theta_2 = \cosh\left(\frac{\Delta R \omega}{T_H}\right) \quad (28)$$

$$\sec \theta_1 \tan \theta_2 - \tan \theta_1 \sec \theta_2 = \sinh\left(\frac{\Delta R \omega}{T_H}\right) \quad (29)$$

$$\tan \theta_2 - \tan \theta_1 = \left(\frac{L_0 \omega}{T_H}\right) \quad (30)$$

$$\sec \theta_2 - \sec \theta_1 = \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right) \quad (31)$$

Las ecuaciones (28) y (29) son las ecuaciones (26) y (27) ordenadas respectivamente. En cuanto las ecuaciones (30) y (31) son las ecuaciones (21) y (23) también ordenadas respectivamente.

Para la resolución del sistema de ecuación anterior, se eleva al cuadrado las ecuaciones (30) y (31), obteniendo lo siguiente:

$$(\tan \theta_2 - \tan \theta_1)^2 = \left(\frac{L_0 \omega}{T_H}\right)^2$$

$$(\sec \theta_2 - \sec \theta_1)^2 = \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2$$

Desarrollando el cuadrado de binomio propuesto se obtienen las siguientes expresiones:

$$\tan \theta_2^2 - 2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 + \tan \theta_1^2 = \left(\frac{L_0 \omega}{T_H}\right)^2$$

$$\sec \theta_2^2 - 2 \sec \theta_1 \sec \theta_2 + \sec \theta_1^2 = \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2$$

Si se resta las dos expresiones anteriores, se obtiene lo siguiente:

$$2 + 2(\tan \theta_1 \tan \theta_2 - \sec \theta_1 \sec \theta_2) = \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - \left(\frac{L_0 \omega}{T_H}\right)^2 \quad (32)$$

Por lo tanto se reordena la ecuación (32), obteniendo así la siguiente expresión:

$$\cosh\left(\frac{\Delta R \omega}{T_H}\right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{T_H}\right)^2 [L_0^2 - \Delta Z^2] + 1 \quad (33)$$

Tal como se ha mencionado anteriormente, las variables que se desean obtener son T_H en función de ΔR o viceversa. Para ello se aplica la función \cosh^{-1} en la ecuación (33).

$$\frac{\Delta R \omega}{T_H} = \cosh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{T_H} \right)^2 [L_0^2 - \Delta Z^2] + 1 \right] \quad (34)$$

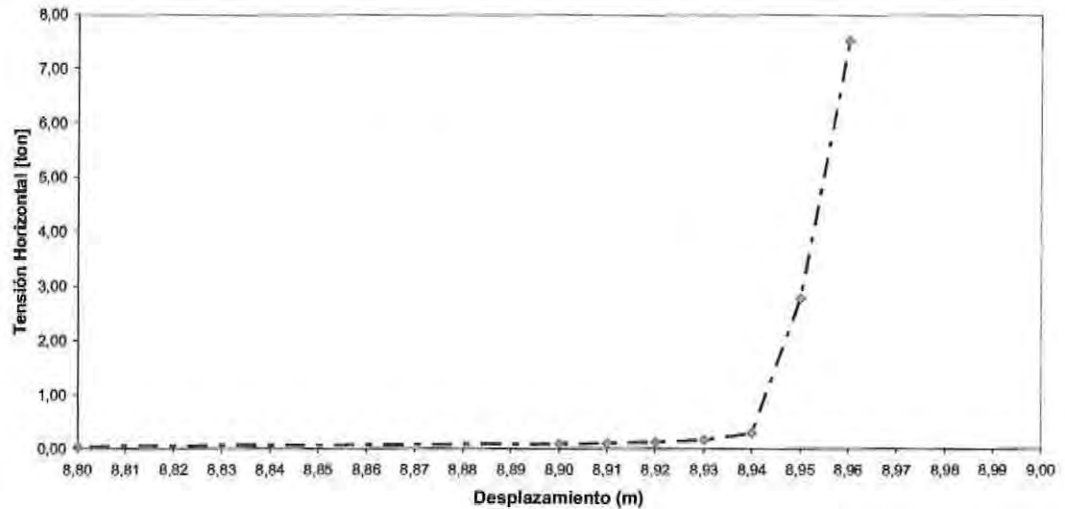
Ordenando la ecuación (34) se obtiene la tensión a lo largo del cable de fondeo en función de las propiedades físicas del cable, la longitud de éste, las coordenadas de posicionamiento de la estructura y del sector donde se emplazará la estructura (batimetría).

$$T_H = \frac{\Delta R \omega}{\cosh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{T_H} \right)^2 [L_0^2 - \Delta Z^2] + 1 \right]} \quad (35)$$

Es necesario conocer para un determinado distanciamiento entre los extremos del cable (ΔR) la tensión horizontal que se produce, para ello, dado un ΔR , se obtiene un T_H en forma implícita para algún método iterativo.

La reacción $T_H - \Delta R$ es no-lineal, un ejemplo se puede apreciar en la Figura 43.

Figura 43: Relación Tensión/Desplazamiento



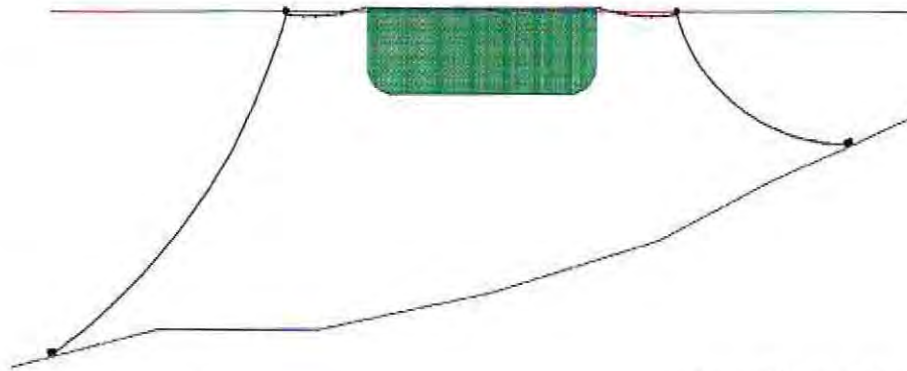
Fuente: Elaboración Propia

Es importante mencionar que la relación $T_H - \Delta R$ es debido a la deformación geométrica, es decir, considerar que el cable o cadena es inextensible. Por otra parte, para alto valores de T_H , esto no es cierto, por que existe una parte de la curva $T_H - \Delta R$ determinada por deformación geométrica y otra zona definida por la deformación mecánica del cable o cadena (ley constitutiva).

5.3.2 ELEMENTO TIPO 2

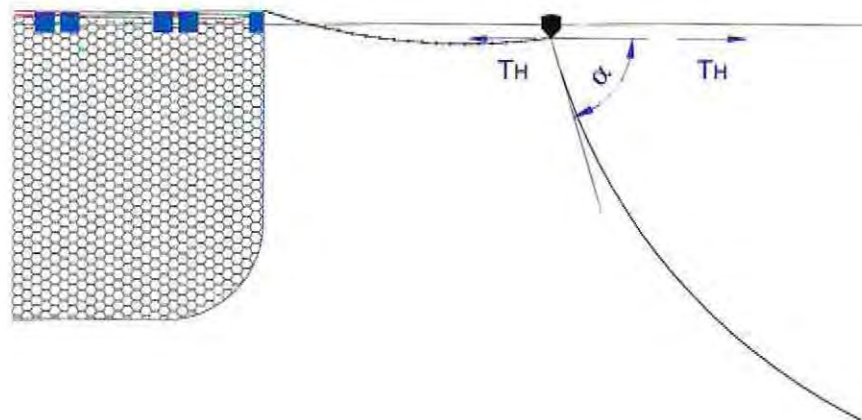
Dada la configuración tipo 2 (Figura 44), se obtiene las mismas ecuaciones de equilibrio que el sistema anterior con la salvedad de que se incorpora el elemento boya (Figura 45) para las modelaciones.

Figura 44: Configuración tipo 2



Fuente: Elaboración Propia

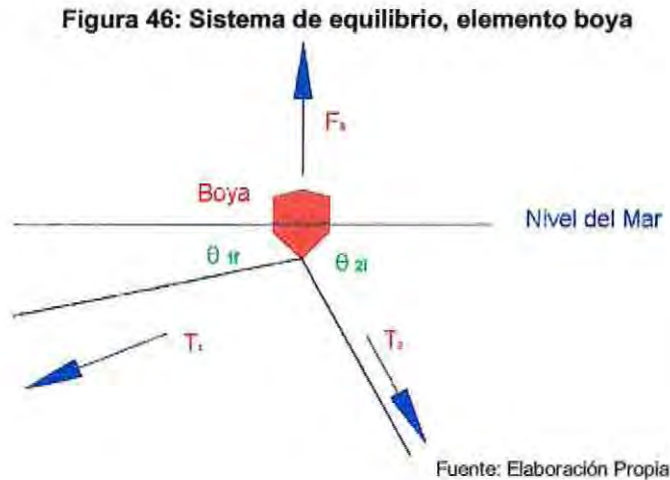
Figura 45: Elemento boya, incorporado en el análisis.



Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación de las tensiones en la configuración tipo 2 se debe tener en consideración que el sistema se compone de dos catenarias, una desde dispositivo de fondo a la boya y la otra, de la boya al sistema de amarre situado en la balsa-jaula. Dado el equilibrio que debe tener el subsistema (boya), las tensiones en ambas catenarias deben ser iguales ($T_{H1} = T_{H2}$).

Del siguiente sistema (Figura 46), se pueden desprender las ecuaciones de equilibrio, que satisfacen la condición de igualdad de las tensiones en ambas catenarias.



Donde:

- F_B : Fuerza de la boya
- θ_{1f} : Ángulo final de la primera catenaria (muerto hormigón-boya).
- θ_{2i} : Ángulo inicial de la segunda catenaria (boya – sistema de amarre).
- T_1 : Tensión en la primera catenaria.
- T_2 : Tensión en la segunda catenaria.

El equilibrio del sistema anterior viene dado por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \sum Fh = 0 & & -T_1 \cos(\theta_{1f}) + T_2 \cos(\theta_{2i}) = 0 \\ & & -T_{H1} + T_{H2} = 0 \\ & & T_{H2} = T_{H1} \end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned} \sum Fv = 0 & & F_B - T_1 \text{sen}(\theta_{1f}) - T_2 \text{sen}(-\theta_{2i}) = 0 \\ & & F_B = T_H (\tan(\theta_{1f}) - \tan(\theta_{2i})) \end{aligned} \tag{37}$$

Donde F_B representa la fuerza ejercida por la boya. Cabe mencionar que la fuerza de la boya es variable y tiende a mantener el equilibrio de las fuerzas. F_B tiene como máximo la boyantez, pero puede ser menor si ésta se encuentra en superficie.

Estas tensiones se encuentran en función del ΔR_1 y ΔR_2 los cuales sumados deben ser iguales al ΔR total del sistema (Distancia horizontal entre los dispositivos de fondo y las balsas-jaulas).

En estricto rigor y tal como se ha mencionado en reiteradas oportunidades, la tensión T_H es función de ΔR y del mismo T_H :

$$T_{H1} = f(\Delta R_1, T_{H1})$$

$$T_{H2} = f(\Delta R_2, T_{H2})$$

Lo anterior se traduce en:

$$T_{H1} = \frac{\Delta R_1}{\frac{1}{\omega_1} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{T_{H1}} \right)^2 (L_{o1}^2 - \Delta Z_{o1}^2) + 1 \right) \right]}$$

$$T_{H2} = \frac{\Delta R_2}{\frac{1}{\omega_2} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_2}{T_{H2}} \right)^2 (L_{o2}^2 - \Delta Z_{o2}^2) + 1 \right) \right]}$$

Donde:

ΔR_1 : Distancia horizontal entre el dispositivo de fondo y la boya

ΔR_2 : Distancia horizontal entre la boya y la balsa

Respecto de la ecuación (36) que $T_{H1} = T_{H2}$ entonces se puede escribir una ecuación incorporando los dos tramos.

$$T_H = \frac{\Delta R}{\frac{1}{\omega_1} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{T_H} \right)^2 (L_{o1}^2 - \Delta Z_{o1}^2) + 1 \right) \right] + \frac{1}{\omega_2} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_2}{T_H} \right)^2 (L_{o2}^2 - \Delta Z_{o2}^2) + 1 \right) \right]}$$

Estas tensiones (T_H) actúan en forma constante en la cadena y/o cable de fondeo que resuelve el primer problema que implica el diseño de los sistemas de fondeo, determinación de la tensión a lo largo del cable.

Finalmente se puede expresar la tensión horizontal en forma general definida para "n" tramos:

$$T_H = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{\frac{1}{\omega_i} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_i}{T_H} \right)^2 (L_{oi}^2 - \Delta Z_{oi}^2) + 1 \right) \right]} \quad (38)$$

5.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE INICIO Y FIN DE LA CATENARIA

Dentro de las formulaciones propuestas, es necesario conocer los ángulos al inicio y al fin de cada catenaria (dependiendo de los tramos), ya que estos condicionan en forma directa la boyantez de la boya, el peso de los dispositivos de fondo y en general otros parámetros que son de suma importancia para el análisis.

Los ángulos se pueden calcular de las ecuaciones (30) y (31) que tienen la siguiente forma:

$$\tan \theta_2 - \tan \theta_1 = \left(\frac{L_o \omega}{T_H} \right)$$

$$\sec \theta_2 - \sec \theta_1 = \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H} \right)$$

Si se utiliza la ecuación (31) se tiene lo siguiente:

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

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

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H} \right)} \right) \quad (39)$$

En forma de simplificar el razonamiento la ecuación (39) significa:

$$\theta_{if} = f(\theta_{i})$$

Si se maneja en forma trigonométrica la ecuación (39) se tiene lo siguiente:

$$\operatorname{sen} \theta_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - 1}}{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)}$$

Por lo tanto si:

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_2}{\cos \theta_2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - 1}}{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)} \times \frac{\frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)}{1} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - 1}$$

$$\tan \theta_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - 1} \quad (40)$$

Si la ecuación (40) se reemplaza en la ecuación (30) se tiene lo siguiente:

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

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

Por lo tanto θ_1 se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_1 = a \tan \left(\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta Z \omega}{T_H}\right)^2 - 1} - \left(\frac{L_0 \omega}{T_H}\right) \right) \quad (41)$$

$$\theta_{ij} = f(\theta_{ij})$$

Dados los resultados obtenidos en esta sección, la fuerza de la boya (F_B) viene expresado de la siguiente manera:

$$F_B = T_H \left(\tan \left(a \cos \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \theta_{1f}} + \left(\frac{\Delta Z_1 \omega}{T_H} \right)} \right) \right) - \tan \left(a \tan \left(\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \theta_{2i}} + \frac{\Delta Z_2 \omega}{T_H} \right)^2 - 1} - \left(\frac{L_{02} \omega}{T_H} \right) \right) \right) \right) \quad (42)$$

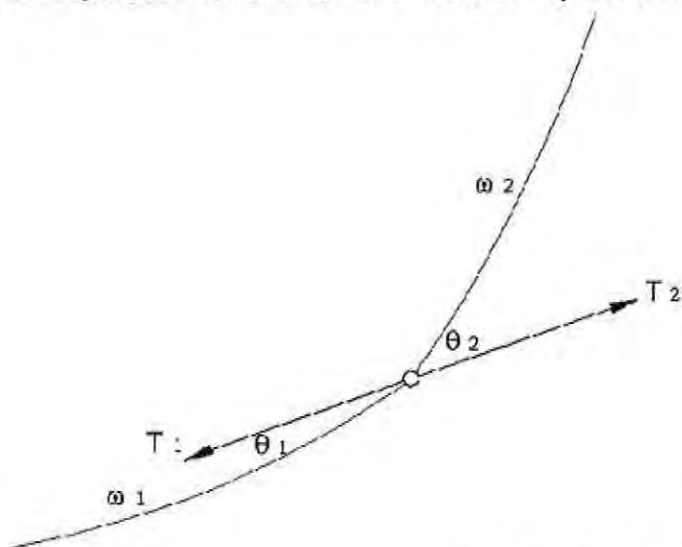
Donde:

- T_H : Tensión horizontal a lo largo de los dos cables (catenarias).
- θ_{1f} : Ángulo final de la primera catenaria.
- ΔZ_1 : Distancia vertical del primer tramo (muerto de hormigón – boya).
- θ_{2i} : Ángulo Inicial de la segunda catenaria.
- ΔZ_2 : Distancia vertical del segundo tramo (boya – sistema de amarre).
- L_{02} : Longitud inicial del segundo tramo.

5.3.4 LÍNEA DE FONDEO COMPUESTA POR DISTINTO MATERIAL

Dado que no necesariamente la línea de fondeo se compone de un solo material es que se deben analizar los puntos donde existe algún cambio de material (cadena a cable o viceversa). Este fenómeno se observa en la Figura 47.

Figura 47: Esquema de una línea de fondeo con dos tipos de materiales



Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 47 se obtienen las ecuaciones de equilibrio.

$$\sum F_H \quad T_1 \cos \theta_1 - T_2 \cos \theta_2 = 0 \quad T_1 \cos \theta_1 = T_2 \cos \theta_2 = T_H \quad (43)$$

$$\sum F_V \quad -T_1 \text{sen} \theta_1 + T_2 \text{sen} \theta_2 = 0 \quad T_1 \text{sen} \theta_1 = T_2 \text{sen} \theta_2 \quad (44)$$

Si se divide la ecuación (44) y la ecuación (43) se obtiene la siguiente expresión:

$$\text{Tan} \theta_1 = \text{Tan} \theta_2$$

El problema radica que dentro de las ecuaciones planteadas, el número de incógnitas aumenta a 5, por lo que su resolución estará dispuesta por métodos de resolución no lineales.

Por lo tanto se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (45)$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 \quad (46)$$

$$T_H = \frac{\Delta x_1}{\frac{1}{\omega_1} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{T_H} \right)^2 (L_{01}^2 - \Delta y_{01}^2) + 1 \right) \right]} \quad (47)$$

$$T_H = \frac{\Delta x_2}{\frac{1}{\omega_2} \left[\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_2}{T_H} \right)^2 (L_{02}^2 - \Delta y_{02}^2) + 1 \right) \right]} \quad (48)$$

$$\theta_{1r} = \theta_{2r} \quad (49)$$

Las expresiones planteadas anteriormente representan un sistema de ecuaciones no-lineal del cuál se existen 5 incógnitas para 5 ecuaciones. Donde ésta última se puede resolver mediante algún método iterativo.

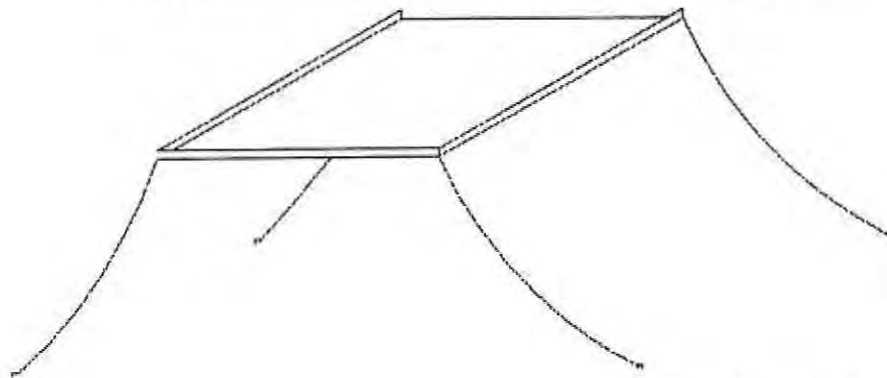
5.4 GENERACIÓN DEL MODELO EN 2D

La estructura en general depende de cada una de sus líneas de fondeo, por lo tanto, el sistema de cultivo funciona como una estructura rígida o semirrígida (articulada) que al encontrarse sometida a fuerzas externas sufre desplazamientos que condicionan finalmente la estabilidad de la estructura.

Estos desplazamientos en cualquier eje o los giros respecto de su centro de gravedad, generan aumentos en las tensiones de las líneas de fondeo que deben ser nuevamente calculadas para conocer la estabilidad final del sistema, por lo que se transforma en un proceso iterativo y de suma complejidad si se tienen demasiadas líneas de fondeo como sucede en la realidad.

En la Figura 48 se presenta el modelo propuesto para el análisis.

Figura 48: Esquema 3D del modelo estructural propuesto



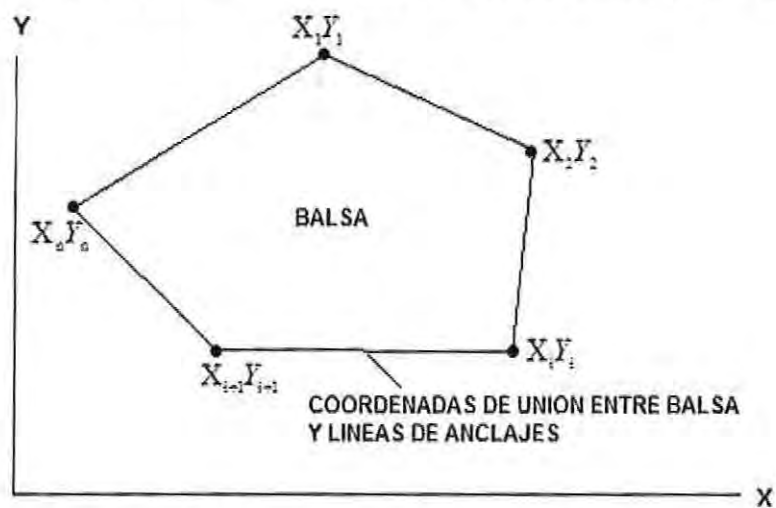
Fuente: Elaboración Propia

5.4.1 CENTRO DE GRAVEDAD

Se plantea una forma de abordar el problema en tres sentidos, en "x" e "y" y la rotación respecto al centro de gravedad de la estructura, expresando además en forma general el cálculo del centro de gravedad para cualquier tipo de estructura (tamaño, forma, dimensiones).

El centro de gravedad consiste en el punto de aplicación de todas las fuerzas resultantes que actúan de distinta manera sobre un cuerpo.

Figura 49: Esquema de determinación del centro de gravedad (Imagen en planta).



Fuente: Elaboración Propia

Es importante destacar que las coordenadas deben ser definidas en el sentido horario. Del sistema propuesto en la Figura 49, se desprenden las siguientes ecuaciones:

$$X_{cgl} = \frac{\left(\frac{(X_{i+1} - X_i)}{2} + X_i\right)A_{1i} + \left(\frac{2(X_{i+1} - X_i)}{3} + X_i\right)A_{2i}}{A_{1i} + A_{2i}} \quad (50)$$

$$Y_{cgl} = \frac{\frac{Y_i}{2}A_{1i} + \left(Y_i + \frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{3}\right)A_{2i}}{A_{1i} + A_{2i}} \quad (51)$$

Donde:

$$A_{1i} = (X_{i+1} - X_i)Y_i$$

$$A_{2i} = \frac{(X_{i+1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i)}{2}$$

Finalmente se obtiene las coordenadas del centro de gravedad del sistema con las siguientes expresiones:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_{cqi} (A_{1i} + A_{2i})}{\sum_{i=1}^n (A_{1i} + A_{2i})} \quad ; \quad Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{cqi} (A_{1i} + A_{2i})}{\sum_{i=1}^n (A_{1i} + A_{2i})}$$

Para definir la nomenclatura utilizada para los cálculos se definen las coordenadas en su posición original:

- (X_{Bi}, Y_{Bi}) : Coordenadas en su posición inicial de las líneas de fondeo en su posición "I".
 (X_{Mi}, Y_{Mi}) : Coordenadas en su posición inicial del muerto de hormigón en su posición "I".

De acuerdo a las expresiones propuestas anteriormente, las coordenadas se deben expresar en relación a su centro de gravedad, obteniendo así lo siguiente:

$$X'_{Bi} = X_{Bi} - X_0$$

$$Y'_{Bi} = Y_{Bi} - Y_0$$

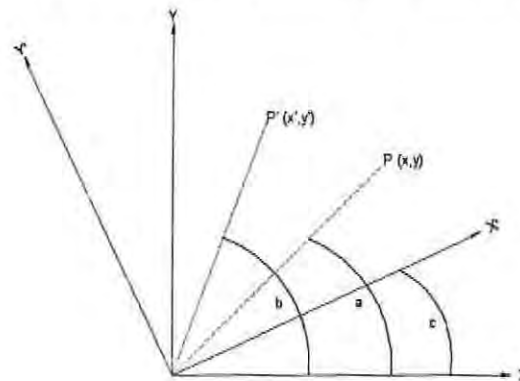
Donde:

- (X'_{Bi}, Y'_{Bi}) : Coordenadas respecto del centro de gravedad de la estructura.
 (X'_{Mi}, Y'_{Mi}) : Coordenadas respecto del centro de gravedad de los M. Hormigón.

5.4.2 ROTACIÓN DE LAS COORDENADAS EN 2D

Dado que el sistema propuesto corresponde a un cuerpo cuyo impacto de cargas genera un desplazamiento en ambos sentidos (x, y) y además una rotación respecto de su centro de gravedad, se tiene el siguiente esquema que permite definir las expresiones de las coordenadas después del impacto.

Figura 50: Esquema de rotación de coordenadas.



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la Figura 50 y a la rotación de un punto $P(x,y)$, en torno al origen y en sentido antihorario, donde "c" es el ángulo de rotación y $P'(x',y')$, es el punto después de la rotación. Por lo tanto del esquema anterior (Figura 50) desprenden las siguientes expresiones:

$$x = r \times \cos(a) \quad (52)$$

$$y = r \times \text{sen}(a) \quad (53)$$

Donde:

r : distancia desde el origen hasta el punto $P(x,y)$.
 a : Ángulo entre el eje "x" y el punto $P(x,y)$.

En cuanto las coordenadas de los puntos desplazados $P'(x',y')$, se pueden definir de la siguiente manera:

$$x' = r \times \cos(b) \quad (54)$$

$$y' = r \times \text{sen}(b) \quad (55)$$

Y si $b = a + c$, entonces se tiene que:

$$x' = r \times \cos(a + c) \quad (56)$$

$$y' = r \times \text{sen}(a + c) \quad (57)$$

Para expresar de manera distinta las expresiones anteriores se recurre a la siguiente identidad trigonométrica:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}(a+b) &= \operatorname{sen}(a) \times \cos(b) + \cos(a) \times \operatorname{sen}(b) \\ \cos(a+b) &= \cos(a) \times \cos(b) - \operatorname{sen}(a) \times \operatorname{sen}(b) \end{aligned}$$

Por lo tanto las ecuaciones (56) y (57) se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x' &= r \times (\cos(a) \times \cos(c) - \operatorname{sen}(a) \times \operatorname{sen}(c)) \\ y' &= r \times (\operatorname{sen}(a) \times \cos(c) + \cos(a) \times \operatorname{sen}(c)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x' &= r \times \cos(a) \times \cos(c) - r \times \operatorname{sen}(a) \times \operatorname{sen}(c) \\ y' &= r \times \operatorname{sen}(a) \times \cos(c) + r \times \cos(a) \times \operatorname{sen}(c) \end{aligned}$$

Reemplazando por $x = r \times \cos(a)$ y $y = r \times \operatorname{sen}(a)$, obtenemos finalmente las ecuaciones de rotación de un punto en el plano.

$$x' = x \times \cos(c) - y \times \operatorname{sen}(c) \quad (58)$$

$$y' = y \times \cos(c) + x \times \operatorname{sen}(c) \quad (59)$$

El sistema al ser solicitado por fuerzas externas ($\vec{F} = (F_x, F_y, M)$) generan desplazamientos ($\delta_x, \delta_y, \delta_\theta$) que pueden ser descritos de acuerdo a las ecuaciones (58) y (59).

$$X_{Bi}'' = \delta_x + X'_{Bi} \cos(\delta_\theta) - Y'_{Bi} \operatorname{sen}(\delta_\theta) \quad (60)$$

$$Y_{Bi}'' = \delta_y + X'_{Bi} \operatorname{sen}(\delta_\theta) + Y'_{Bi} \cos(\delta_\theta) \quad (61)$$

Donde:

- X_{Bi}'' : Coordenadas en "x" de la línea de fondeo en "i", después del desplazamiento.
- Y_{Bi}'' : Coordenadas en "y" de la línea de fondeo en "i", después del desplazamiento.
- δ_x : Desplazamiento respecto del centro de gravedad en "x".
- δ_y : Desplazamiento respecto del centro de gravedad en "y".
- δ_θ : Desplazamiento respecto del centro de gravedad (rotación).

Para que el sistema se encuentre estable, las fuerzas deben estar en equilibrio. Posteriormente se obtienen las distancias horizontales respecto del centro de gravedad entre los distintos puntos (estructura; dispositivo de fondo), que se encuentran definidos por la siguiente expresión:

$$\Delta R_i = \sqrt{(X_{Bi}'' - X_{Mi})^2 + (Y_{Bi}'' - Y_{Mi})^2} \quad (62)$$

Donde:

- X_M' : Coordenada en "x" del muerto de hormigón respecto del centro de gravedad.
- Y_M' : Coordenada en "y" del muerto de hormigón respecto del centro de gravedad.

En forma paralela, se obtienen los vectores unitarios donde se calcula las fuerzas producto del peso propio (fuerzas internas del sistema), en función de la tensión en los cables de fondeo. Esta tensión es obtenida de los algoritmos analizados y resueltos anteriormente.

Sea $\vec{U} = (X_u, Y_u)$ en donde:

$$X_u = \frac{X_{Bi}'' - X_{Mi}}{\Delta R} \quad ; \quad Y_u = \frac{Y_{Bi}'' - Y_{Mi}}{\Delta R}$$

Además se tiene que:

$$F_{Xi} = X_{ui} * T_{Hi} \quad ; \quad F_{Yi} = Y_{ui} * T_{Hi}$$

Por lo tanto y en forma general la suma total de las fuerzas se expresa de la siguiente forma:

$$F_{Xi} = \sum_{i=1}^n (X_{ui} * T_{Hi}) \quad ; \quad F_{Yi} = \sum_{i=1}^n (Y_{ui} * T_{Hi})$$

$$\vec{F}_{HXi} = (F_{Xi}, F_{Yi}) \quad (63)$$

Donde:

- X_u : Vector unitario en "x".
- Y_u : Vector unitario en "y"
- F_{Xi} : Fuerza interna de la estructura en "x", debida a las tensiones en las líneas.
- F_{Yi} : Fuerza interna de la estructura en "y", debida a las tensiones en las líneas.

Para cumplir con la estabilidad final del sistema, las fuerzas producidas tanto por las tensiones en las líneas de fondeo como las fuerzas externas, deben estar en equilibrio tal como se observa a continuación.

$$\sum_{i=1}^n F_{xi} + F_{Exi} = 0 \quad ; \quad \sum_{i=1}^n F_{yi} + F_{Eyi} = 0$$

El sistema también debe encontrarse en equilibrio en cuanto a la rotación que debe resistir producto de las fuerzas externas (momento). Para ello el sistema debe cumplir con la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^n M\theta_i = -\sum_{i=1}^n \delta_{yi} F_{xi} + \sum_{i=1}^n \delta_{xi} F_{yi} \quad (64)$$

En estricto rigor el momento se puede representar como:

$$M = \vec{r} \times \vec{F}$$

Donde:

- \vec{r} : Vector posición respecto del centro de gravedad.
- \vec{F} : Vector fuerzas que impacta a la estructura.

Por lo tanto

$$\vec{r} = (X_B'', Y_B'')$$

$$\vec{F} = (F_{Hxi}, F_{Hyi})$$

De acuerdo a la definición de centro de gravedad (5.4.1), las fuerzas externas actúan en el centro de gravedad de la estructura en consecuencia no produce momento externo, por lo tanto, $M_E = 0$. En general las ecuaciones de momento tanto externo como interno se expresa de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^n M\theta_i + M_E = 0 \quad (65)$$

Cada vez que se produzca un desequilibrio de la estructura producto de fuerzas externas o cualquier tipo de reacción que genere desplazamientos, se deberá recalcular nuevamente $(\delta_x, \delta_y, \delta_\theta)$, con tal de mantener el equilibrio y estabilidad final de la estructura.



5.5 FLOTABILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO

En la definición de la tensión horizontal a lo largo de la línea de fondeo, se deben especificar las fuerzas verticales que pueden influir de manera directa en la flotabilidad final del sistema, por lo tanto, se definirá la ecuación de la catenaria en forma discreta (Ref.21) con el fin de obtener las tensiones verticales para caracterizar mediante una expresión la flotabilidad final de la estructura de cultivo.

La flotabilidad se define cuando un cuerpo se encuentra en un fluido ya sea flotando o sumergido es empujado verticalmente por una fuerza de igual al peso del fluido desplazado, es lo que se denomina como fuerza boyante.

Para discretizar la línea de fondeo, es necesario observar la Figura 51.

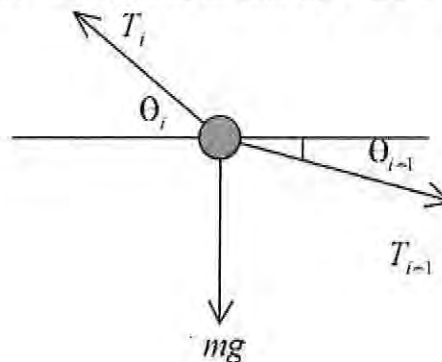
Figura 51: Formulación del sistema discreto de la catenaria.



Fuente: Elaboración Propia

Para realizar el análisis, se plantean las ecuaciones de equilibrio en los N puntos que conforman la longitud total de la línea de fondeo. La Figura 52 muestra el planeamiento de las ecuaciones:

Figura 52: Equilibrio de fuerzas en los N puntos



Fuente: Ref.21

Las ecuaciones de equilibrio dadas en la Figura 52 se presentan a continuación:

$$\sum F_H = 0 \quad T_i \cos \theta_i = T_{i+1} \cos \theta_{i+1} \quad (66)$$

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

$$\sum F_V = 0 \quad T_i \text{sen} \theta_i - T_{i+1} \text{sen} \theta_{i+1} = mg \quad (67)$$

Si la ecuación (67) se divide por T_H , se tiene lo siguiente:

$$\frac{T_i \text{sen} \theta_i}{T_H} - \frac{T_{i+1} \text{sen} \theta_{i+1}}{T_H} = \frac{mg}{T_H} \quad (68)$$

De acuerdo a la ecuación (68), se tiene la siguiente expresión:

$$\tan \theta_i = \tan \theta_{i+1} - \frac{mg}{T_H} \quad (69)$$

Si se define la λ , como:

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

La ecuación (69) queda de la siguiente manera:

$$\tan \theta_i = \tan \theta_{i+1} - N \times \lambda \quad (70)$$

A partir de lo anterior, se tienen las siguientes expresiones de recurrencia para calcular los ángulos en los distintos puntos que componen la catenaria.

$$\tan \theta_1 = \tan \theta_0 - \lambda$$

$$\tan \theta_2 = \tan \theta_1 - \lambda$$

$$\tan \theta_N = \tan \theta_{N-1} - \lambda$$

Donde:

- θ_0 : Ángulo al inicio de la catenaria
 θ_N : Ángulo al final de la catenaria

De acuerdo a la sumatoria de recurrencia propuesta anteriormente se obtiene el ángulo θ_N en función de θ_0 , quedando de la siguiente manera:

$$\tan \theta_N = \tan \theta_0 - N\lambda \quad (71)$$

Donde N, es el número total de elementos (bolitas verdes) que componen la catenaria. Por lo tanto el ángulo queda expresado de la siguiente manera:

$$\theta_N = \tan^{-1}(\tan \theta_0 - \lambda) \quad (72)$$

Finalmente se definen las coordenadas de proyección en "x" e "y" del sistema tanto para el origen como para el final de la catenaria. Dado algún problema en particular se puede escribir las coordenadas al final en función de las coordenadas de origen, dependiendo de la distancia que exista entre N elementos que componen el sistema. Además se puede calcular la longitud de deformación que provocará el desplazamiento del módulo.

Donde la longitud deformada se puede calcular, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^N L_d = \sum_{i=1}^n \left[1 + \frac{(T_i)}{E \times A} \right] \times \frac{L_i}{N} \quad (73)$$

Donde:

- T_i : Tensión calculada de acuerdo a la ecuación (66).
 E : Módulo de elasticidad.
 A : Área del material que compone la línea de fondeo.
 L_i : Longitud inicial de la línea de fondeo.
 N : Número de elementos.

El sistema discreto propuesto, tiene la ventaja de poder definir en forma clara todos los puntos que componen la catenaria en función de la longitud deformada definida anteriormente (L_d). La siguiente expresión muestra la coordenadas $i+1$ en cada elemento y en función de las coordenadas i .

$$X_{i+1} = X_i + L_d \times \cos \theta_i$$

$$Y_{i+1} = Y_i - L_d \times \text{sen} \theta_i$$

El cálculo de las tensiones verticales incorpora una nueva restricción al análisis de esfuerzos sobre las líneas de fondeo, ya que condicionan de manera directa la estabilidad final de la estructura. En resumen la tensión máxima vertical registradas en los N puntos debe ser igual a la flotabilidad total de la estructura de cultivo.

Donde T_v se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_v = T_H \times \tan(\theta_i)$$

Donde:

- T_H : Tensión horizontal calculada en la sección 5.3.1
 θ_i : Ángulo en el punto i (desde i =1 hasta N) calculado en la sección 5.3.3

Finalmente la flotabilidad final del sistema, estará sujeta a la siguiente restricción:

$$F_v = \text{Flotabilidad} \rightarrow F_v - \text{Flotabilidad} = 0 \quad (74)$$

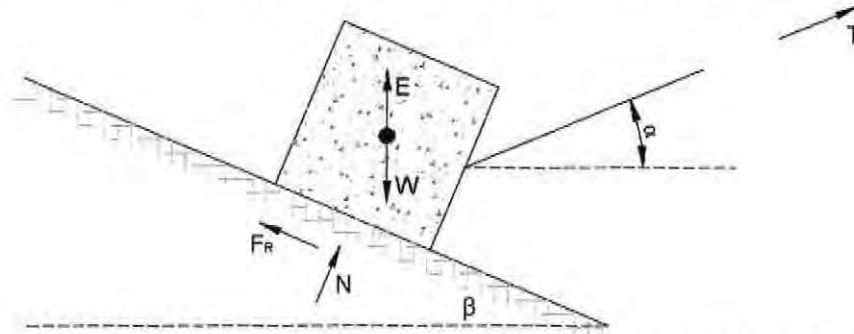
5.6 DETERMINACIÓN DE LOS PESOS DE LOS DISPOSITIVOS DE FONDO

Como se ha mencionado existen tres tipos utilizados comúnmente en el mercado como dispositivos de fondo que cumplen la función de llevar las cargas al fondo marino. En forma práctica se realiza un análisis tomando en consideración que los elementos analizados son muertos de hormigón. Estos deben tener las características físicas adecuadas para que cumplan su funcionamiento el tiempo que llevarán sumergido.

El peso de estos elementos de ser tal, que resista todas las fuerzas externas para que no sea levantado o desplazado y tampoco debe ser sobredimensionado para no caer en altos costos de construcción.

Para el análisis, se realizará un diagrama de cuerpo libre (Figura 53), donde la determinación de la variable T (tensión) fue resuelta en secciones anteriores.

Figura 53: Equilibrio de fuerzas para el cálculo del peso



Fuente: Elaboración Propia

Dentro del análisis los principales parámetros utilizados para el cálculo de pesos de los elementos de fondeo son:

- la tensión (T).
- la fuerza de roce (μ)
- la pendiente del fondo marino (β)
- ángulo de inclinación entre el muerto de hormigón y la línea de fondeo (α)

El coeficiente de roce entre el muerto y fondo marino puede ser obtenido las formulaciones clásicas de la mecánica de suelos, estimado de la siguiente manera:

$$\mu = \text{tag}\left(\frac{2}{3}\phi\right) \tag{75}$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna del material dominante en el fondeo marino, por ejemplo en la Figura 54 se presentan los distintos valores de ángulo de fricción interna dependiendo del tipo de fondo.

Figura 54: Ángulo de fricción interna de distintos materiales

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

Fuente: Ref.12

Por lo tanto las ecuaciones de equilibrio del muerto de hormigón, tiene la siguiente forma:

$$\sum F_H = 0 \quad N - (W - E)\cos(\beta) + T\sin(\alpha + \beta) \quad (76)$$

$$\sum F_V = 0 \quad -F_R + (W - E)\sin(\beta) + T\cos(\alpha + \beta) \quad (77)$$

Donde:

| | | |
|-------|---|-------------------------------|
| N | : | Fuerza normal |
| W | : | Peso del elemento de hormigón |
| F_R | : | Fuerza de roce |
| E | : | Empuje |

Donde la fuerza de empuje se describe de la siguiente forma:

$$E = \rho \times Vd \times g \quad (78)$$

Donde:

| | | |
|--------|---|--|
| ρ | : | Densidad del agua de mar (ton/m ³) |
| Vd | : | Volumen desplazado por el muerto de hormigón (m ³) |
| g | : | Aceleración de gravedad (9.8 m/s ²). |

Reordenando las variables, se generan las siguientes expresiones:

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

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

$$F_{Rm\acute{a}x} = \mu N$$

De la expresión anterior se desprende el factor de seguridad como la razón entre la fuerza de roce máxima y la fuerza necesaria para mantener el equilibrio, quedando de la siguiente manera:

$$FS = \frac{F_{Rm\acute{a}x}}{F_R} \Rightarrow FS = \frac{(W - E)\sin(\beta) + T\cos(\alpha + \beta)}{\mu((W - E)\cos(\beta) - T\sin(\alpha + \beta))} \quad (79)$$

Donde la tensión (T) está definido en secciones anteriores.

5.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite determinar si los resultados obtenidos siguen siendo apropiados dados algunos cambios que puedan transcurrir en el entorno o en el mismo sistema.

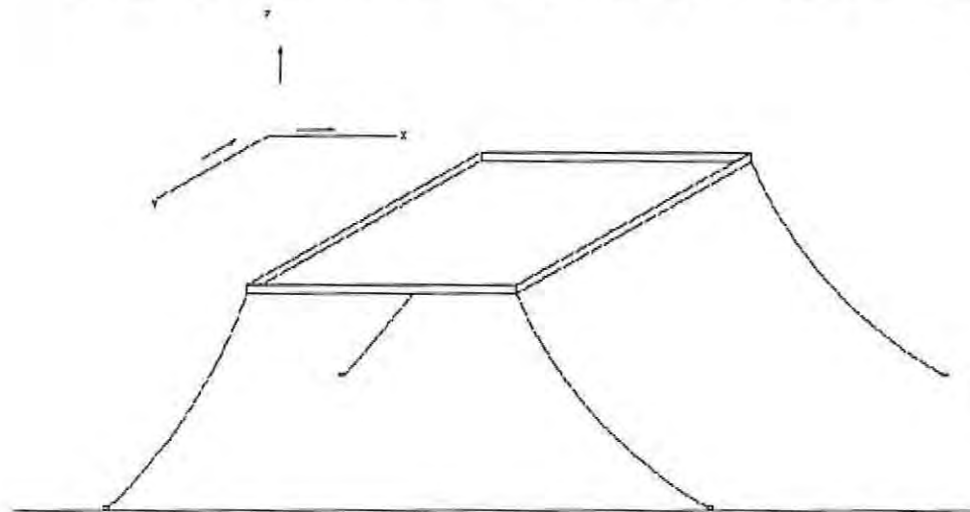
Esta técnica permite conocer los parámetros más importantes en el análisis y tiene directa implicancia con los factores de seguridad que el sistema requiere. Dentro del análisis de sensibilidad se consideran las siguientes modelaciones:

- Variación de la longitud inicial de las líneas de fondeo.
- Cálculo de las tensiones con batimetría irregular.
- Variación en el sentido de las fuerzas (cambios de dirección).
- Aumentos en la cantidad de líneas de fondeo.

Para realizar el análisis de sensibilidad se utilizará en forma arbitraria un módulo (Figura 55) similar a la configuración tipo 1 con la siguiente geometría y características:

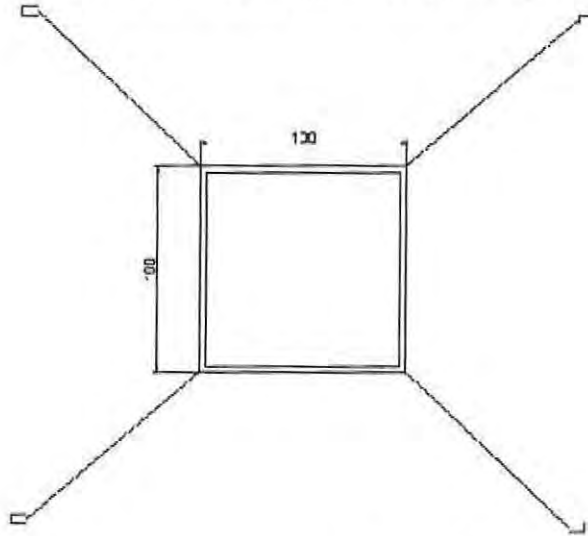
- Área de 100 m^2 (10×10)
- 4 líneas de fondeo, en cada una de sus aristas
- Fondeado a 8 m de profundidad (Batimetría regular)
- Longitud inicial de 11 m en cada línea de fondeo
- Distancia horizontal de 7,07 m, entre dispositivo de fondo y módulo de prueba.
- Fuerza externa = $F = (F_x, F_y) = (2,2)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

Figura 55: Geometría y características del módulo de prueba (vista lateral)



Fuente: Elaboración Propia

Figura 56: Dimensiones del modulo de prueba (planta).



Fuente: Elaboración Propia

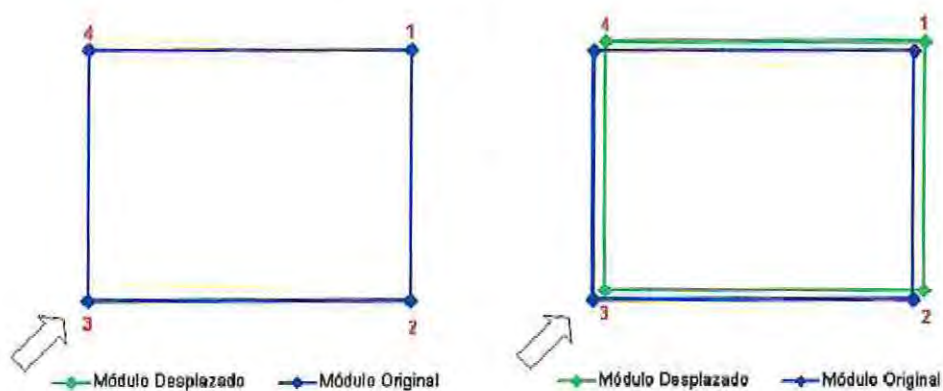
Dada las características y geometría del modelo propuesto, se calcula el desplazamiento de la estructura y la tensión en las 4 líneas de fondeo. Los resultados se presentan en la Tabla 5.11, mientras que los resultados en forma visual se presentan en la Figura 57.

Tabla 5.11: Tensiones y desplazamientos de 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 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | 0,00 |

Fuente: Elaboración Propia

Figura 57: Modelación de la configuración tipo 1

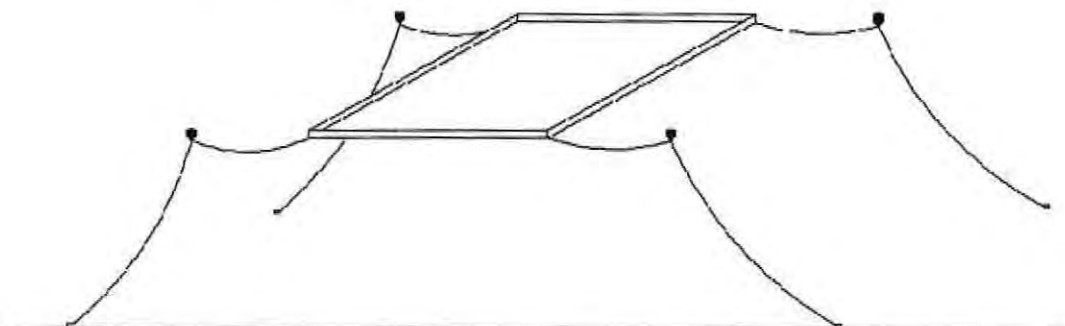


Fuente: Elaboración Propia

Los resultados muestran un desplazamiento similar para ambos ejes de la estructura (0,36 m) y una tensión máxima de 2,84 [ton] en la línea 3 debido a la dirección de las fuerzas externas y a la simetría del módulo de prueba. Para obtener la diferencia entre ambos tipos de configuración, se realiza una modelación con la incorporación de las boyas para las distintas líneas (Figura 58) bajo las mismas condiciones iniciales descritas en el comienzo de la sección.

Los resultados se presentan en la Tabla 5.12.

Figura 58: Módulo de prueba con la incorporación de boyas.



Fuente: Elaboración Propia

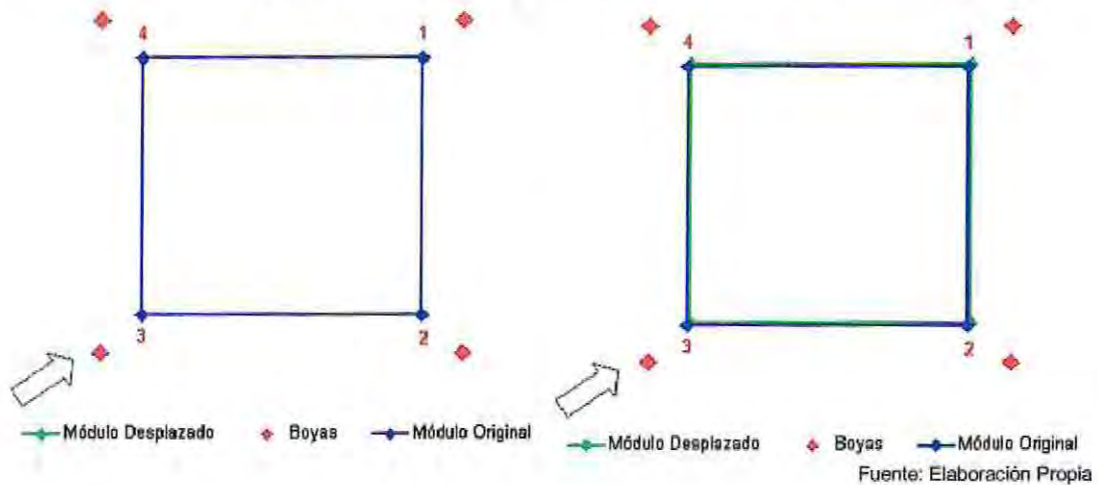
Tabla 5.12: Tensiones y desplazamientos de la configuración tipo 2.

| | 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 |

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados visuales de las modelaciones se presentan en la Figura 59.

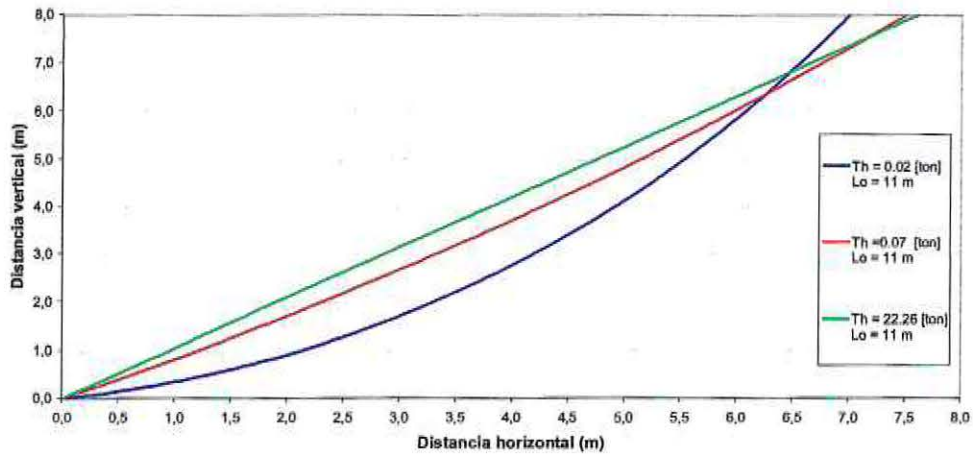
Figura 59: Modelación de la configuración tipo 2.



En condiciones similares los dos tipos de configuraciones registran tensiones similares y desplazamientos distintos. La tensión en las líneas de fondeo se encuentra en función de las fuerzas externas y tal como se puede apreciar en la Tabla 5.11 y la Tabla 5.12 la línea 3 registra una tensión mayor respecto de las otras, producto de la dirección de las solicitaciones externas. Además con la incorporación de las boyas, la estructura sufre un menor desplazamiento, lo que ayuda a la estabilidad final del sistema.

Otro factor importante a considerar y que influye en la tensión final de las líneas de fondeo, tiene relación con la distancia que existe entre los dispositivos de fondo y la estructura, ya que dependiendo de esto último, se determina las longitudes iniciales de cada línea. Desplazamientos de la estructura producen aumentos en la distancia horizontal entre los dispositivos de fondo y la estructura, lo que influyen en la tensión final de las líneas. En la Figura 60 se observa las tensiones para distintas distancias dadas y una misma longitud inicial.

Figura 60: Perfiles de distintas líneas para una misma longitud inicial.

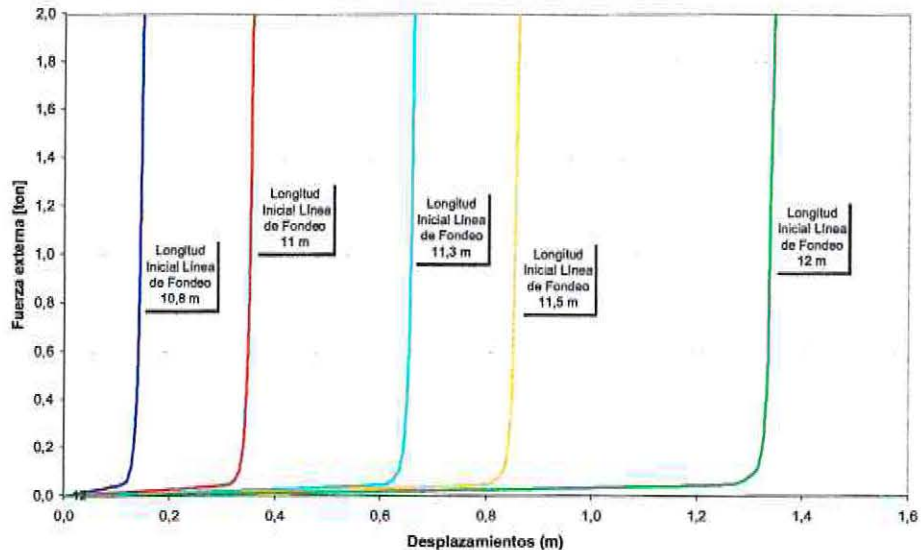


Fuente: Elaboración Propia

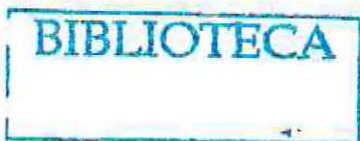
5.7.1 VARIACIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE LAS LÍNEAS DE FONDEO

La longitud inicial de las líneas de fondeo influye directamente en el análisis de los sistemas de fondeo para cualquier tipo de estructura flotante, por lo tanto se realizará una modelación considerando variaciones en la longitud inicial de cada una de las líneas de fondeo (en forma similar para las 4 líneas), para lo cual se utilizará la misma condición inicial definida en el comienzo de esta sección con la particularidad que se efectuará una variación gradual en las fuerzas externas que impactan el módulo, específicamente de 0 a 2 [ton].

Figura 61: Sensibilidad respecto a la longitud inicial



Fuente: Elaboración Propia



Los resultados obtenidos en la Figura 61 muestran un aumento progresivo en el desplazamiento a medida que aumenta las longitudes iniciales en las líneas. Esto da un indicio sobre la determinación de la longitud en función de los desplazamientos que el módulo puede aceptar de acuerdo a su operatividad. A su vez la longitud inicial depende de la distancia que tiene la estructura con los dispositivos de fondo, lo que induce que el análisis para la determinación de las tensiones en las líneas resulte un problema más complejo.

Para conocer de manera directa el comportamiento de las tensiones en las líneas de fondeo, se utilizan los resultados obtenidos en la modelación con la fuerza externa de 1 y 2 [ton]. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.13 y la Tabla 5.14.

Tabla 5.13: Tensiones registradas con 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] | | | | |
| Línea 1 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Línea 2 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Línea 3 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 2,85 | 2,84 | 2,83 | 2,83 | 2,83 |
| Línea 4 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.14: Tensiones registradas con una 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] | | | | |
| Línea 1 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Línea 2 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Línea 3 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 1,44 | 1,42 | 1,42 | 1,42 | 1,41 |
| Línea 4 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados presentan una disminución de la tensión para una misma fuerza externa dada (del orden de 20 Kg, para una variación de 1,2 m de longitud) esto no influye mayormente en la determinación de la tensión de diseño. Las tensiones registradas dependen en un menor porcentaje de la longitud inicial de las líneas de fondeo y en un mayor porcentaje de la magnitud de las fuerzas externas que dominan el sector de emplazamiento de la estructura de cultivo.

En general, para el análisis de los sistemas de fondeo (línea de fondeo) y su relación con los desplazamientos de la estructura, el usuario debe tener en cuenta los siguientes conceptos: operatividad (desplazamientos aceptados para que el módulo cumpla en forma satisfactoria con su funcionamiento) versus los costos de construcción e instalación (Aumentos en las tensiones que generan posteriormente elementos de hormigón de mayor volumen).

5.7.2 CÁLCULO DE LAS TENSIONES CON BATIMETRÍA IRREGULAR

Las tensiones se encuentran en función de la magnitud de las fuerzas externas y de las longitudes de inicio de las líneas de fondeo como se ha mencionado anteriormente. Para reforzar este concepto se realiza una modelación considerando las siguientes condiciones iniciales:

- Área de 100 m² (10x10)
- Batimetría 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 = $F = (F_x, F_y) = (2,2)[ton]$

Los resultados obtenidos de acuerdo al modelo propuesto con batimetría irregular se presentan en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15: Tensiones y desplazamientos con batimetría irregular.

| | 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 |
| Δ x (m) | -0,17 | 1,90 |
| Δ y (m) | 0,39 | 2,00 |
| Δ θ (°) | 0,00 | 0,35 |

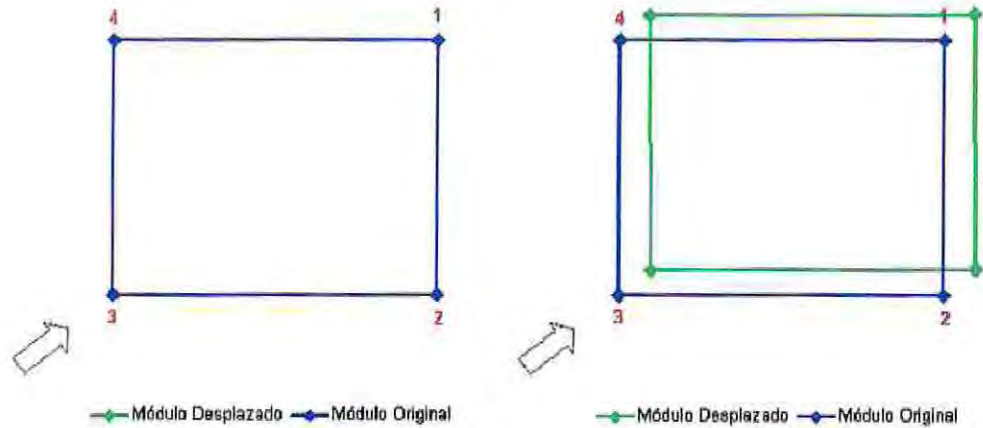
Fuente: Elaboración Propia

La línea 3 registra una tensión mayor en comparación con las otras líneas, debido a que nuevamente la dirección de las fuerzas externas sigue siendo la misma. Existe una pequeña disminución en la tensión de la línea 3, lo que se explica con las distintas longitudes de las líneas de fondeo que componen el módulo de prueba.

Los desplazamientos aumentan considerablemente, producto de que las líneas al tener una mayor longitud para una misma distancia horizontal tienen un mayor grado de libertad para desplazarse por lo que esto finalmente trasciende en estabilidad final del sistema.

Los resultados visuales de la modelación se presentan en la Figura 63.

Figura 62: Modelación con batimetría irregular.



Fuente: Elaboración Propia

Para obtener desplazamientos menores para ambos ejes de la estructura, se genera una tensión de inicio en cada una de las líneas de fondeo. Para ello se definen las siguientes longitudes de líneas de fondeo que satisfacen una tensión inicial de 0.01 [ton].

- Línea 1 fondeada a - 8 m, longitud inicial de 10,7 m
- Línea 2 fondeada a -6 m, longitud inicial de 9,3 m
- Línea 3 fondeada a -10 m, longitud inicial de 12,3 m
- Línea 4 fondeado a los -10 m, longitud inicial de 12,3 m

Los resultados obtenidos a partir de la modelación se presentan en la Tabla 5.16

Tabla 5.16: Tensiones y desplazamientos registrados con una tensión de inicio.

| | Condición Inicial | Condición Final |
|---------------------|-------------------|-----------------|
| | T_H [ton] | T_H [ton] |
| Línea 1 | 0,10 | 0,06 |
| Línea 2 | 0,10 | 0,10 |
| Línea 3 | 0,10 | 2,88 |
| Línea 4 | 0,10 | 0,10 |
| Δx (m) | 0,00 | 0,03 |
| Δy (m) | 0,00 | 0,03 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | 0,00 |

Fuente: Elaboración Propia

Los desplazamientos disminuyen considerablemente respecto de la modelación anterior (Tabla 5.15), en cambio la tensión máxima aumenta a 2,88 [ton] en la línea 3 (aumento de 0,06 [ton]). Este pequeño aumento viene dado por la tensión dada en un comienzo.



Por lo tanto las tensiones registradas en las líneas de fondeo, de cualquier tipo de estructuras, dependen principalmente de la caracterización de las condiciones naturales que dominan el sector (caracterización de los agentes: oleaje, corriente, vientos, etc.) y en un menor porcentaje de las condiciones iniciales de la estructura (longitud inicial de las líneas de fondeo, distancia horizontal).

5.7.3 VARIACIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LAS FUERZAS EXTERNAS

Este análisis representa la sensibilidad del modelo respecto a la variación en la dirección de las fuerzas externas que impactan al módulo. Esto tiene directa relación con los estudios oceanográficos ya que los agentes pueden impactar en distintas direcciones mientras se encuentre en operatividad.

Para realizar el análisis se considerarán las mismas condiciones iniciales descritas a comienzo en la sección 5.7, con la particularidad, que los casos a modelar se presentan en la Tabla 5.17.

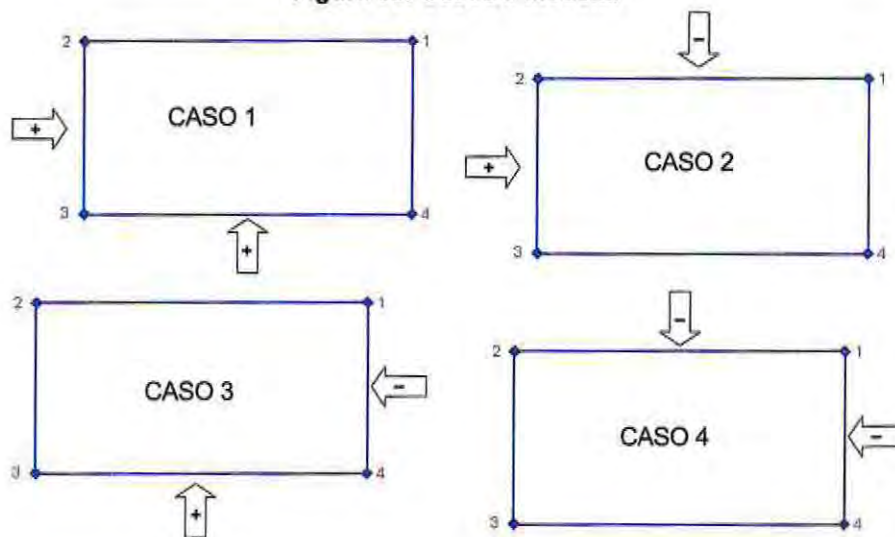
Tabla 5.17: Casos a modelar

| Casos | F_x | F_y |
|-------|-------|-------|
| 1 | + | + |
| 2 | + | - |
| 3 | - | + |
| 4 | - | - |

Fuente: Elaboración Propia

Para comprender de mejor manera la simulación de los casos, la Figura 63 explica en forma visual la forma vectorial que componen las fuerzas externas que impactan al módulo de prueba.

Figura 63: Casos a modelar



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos a partir de la modelación se presentan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Resultados de las tensiones en las líneas de fondeo, para todos los casos.

| | | 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 |

Fuente: Elaboración Propia

El módulo se desplaza en forma similar a los resultados obtenidos en la Tabla 5.11. Por lo tanto el sentido de las fuerzas externas entregan los lados más susceptibles y en consecuencia las líneas que se tensionarán más. De acuerdo a esto último, la dirección dominante de las condiciones naturales determinará las líneas que estarán sujetas a grandes esfuerzos.

Para comprender de mejor manera la implicancia de los diversos factores que influyen en la obtención de las tensiones utilizadas en el análisis, se realiza una modelación para una batimetría irregular (diferentes longitudes de líneas de fondeo) y distintas direcciones de impacto (fuerzas externas).

Los resultados de la modelación se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Tensiones y desplazamientos de los distintos casos propuestos.

| Caso 1 | | | Caso 2 | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| | Condición Inicial | Condición Final | | Condición Inicial | Condición Final |
| | TH [ton] | TH [ton] | | TH [ton] | TH [ton] |
| Línea 1 | 0,01 | 0,00 | Línea 1 | 0,01 | 0,05 |
| Línea 2 | 0,01 | 0,02 | Línea 2 | 0,01 | 2,82 |
| Línea 3 | 0,01 | 2,82 | Línea 3 | 0,01 | 0,01 |
| Línea 4 | 0,01 | 0,01 | Línea 4 | 0,01 | 0,01 |
| Δx (m) | -0,17 | 1,90 | Δx (m) | -0,17 | -0,34 |
| Δy (m) | 0,39 | 2,00 | Δy (m) | 0,39 | -1,60 |
| $\Delta \theta$ (m) | 0,00 | 0,35 | $\Delta \theta$ (m) | 0,00 | -5,39 |

| Caso 3 | | | Caso 4 | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| | Condición Inicial | Condición Final | | Condición Inicial | Condición Final |
| | TH [ton] | TH [ton] | | TH [ton] | TH [ton] |
| Línea 1 | 0,01 | 0,05 | Línea 1 | 0,01 | 2,82 |
| Línea 2 | 0,01 | 0,00 | Línea 2 | 0,01 | 0,04 |
| Línea 3 | 0,01 | 0,01 | Línea 3 | 0,01 | 0,00 |
| Línea 4 | 0,01 | 2,81 | Línea 4 | 0,01 | 0,01 |
| Δx (m) | -0,17 | -2,59 | Δx (m) | -0,17 | -1,08 |
| Δy (m) | 0,39 | 1,27 | Δy (m) | 0,39 | -1,60 |
| $\Delta \theta$ (m) | 0,00 | 3,48 | $\Delta \theta$ (m) | 0,00 | 1,39 |

Fuente: Elaboración Propia

Las tensiones registradas siguen siendo similares en comparación a los casos anteriores modelados (producto que la fuerza externa se mantiene en forma constante en la modelación, 2 [ton]). En cambio los desplazamientos son distintos en cada caso por lo que se asocia directamente a las distintas longitudes que componen las líneas de fondeo producto de lo irregular del fondo marino.

En resumen el comportamiento de una estructura depende fundamentalmente en el sitio en el cual se desea fondear y de las condiciones naturales que dominan el sector de emplazamiento, por lo tanto es importante conocer lo complejo que resulta el tema de la determinación de las tensiones.

5.7.4 AUMENTOS EN LA CANTIDAD DE LÍNEAS DE FONDEO

Se considera el mismo módulo con la instalación de dos líneas de fondeo situadas en los extremos superior e inferior (Figura 64) para conocer el comportamiento de la estructura.

La colocación de las nuevas líneas de fondeo se realiza en forma arbitraria, con la definición de las nuevas condiciones iniciales:

- 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 : $F = (F_x, F_y) = (2,2)[ton]$

Las tensiones y desplazamientos registrados se presentan en la Tabla 5.20



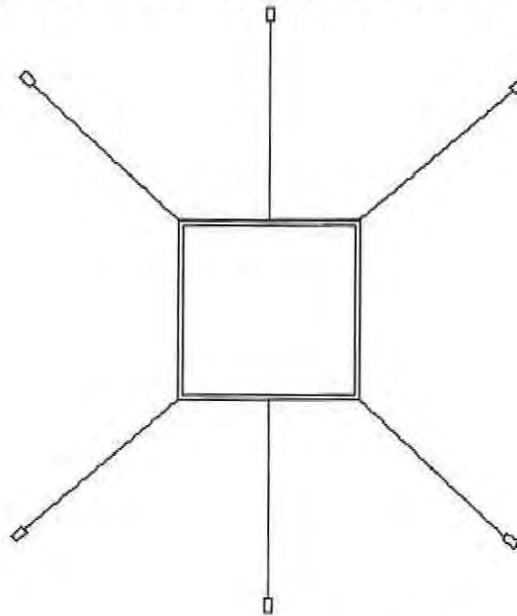
Tabla 5.20: Tensiones y desplazamientos con 6 líneas de fondeo.

| | 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 |
| Δx (m) | 0,00 | 0,41 |
| Δy (m) | 0,00 | 0,30 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | -0,66 |

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de las modelaciones en forma visual se presentan en la Figura 64.

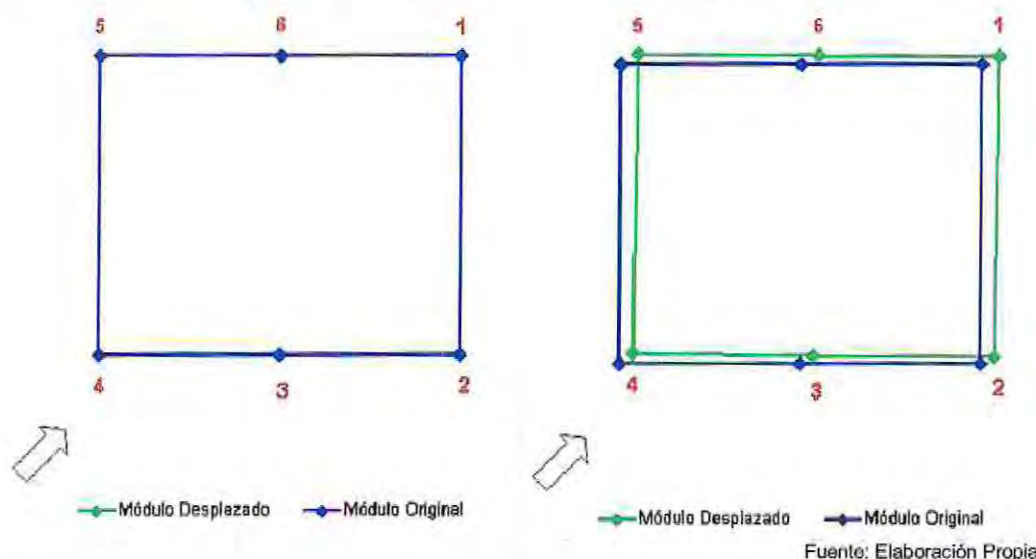
Figura 64: Módulo con la incorporación de 2 líneas.



Fuente: Elaboración Propia



Figura 65: Modelación con la incorporación de 2 líneas de fondeo.



La instalación de 2 nuevas líneas en el módulo de prueba no mejora la estabilidad final del sistema, ya que los desplazamientos son similares a los observados en la Tabla 5.11. Las tensiones registradas son similares, siendo la línea 4 la que registra una mayor tensión en comparación de las otras líneas.

Para obtener un mayor detalle acerca del comportamiento de las líneas, específicamente en las redistribuciones de las tensiones por concepto de inclusión de líneas, se realizan nuevas modelaciones con una fuerza de impacto perpendicular al eje x.

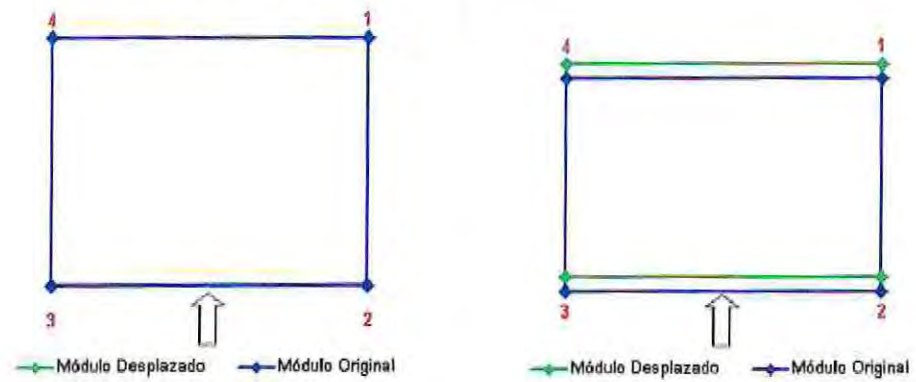
Bajo las mismas condiciones iniciales definidas a comienzo de la sección 5.7, se realizan dos modelaciones con módulos de 4 y 6 líneas. Las fuerzas externas actúan en forma perpendicular al eje x. Los resultados de las modelaciones se presentan a continuación:

Tabla 5.21: Tensiones y desplazamientos en 4 líneas y una fuerza en un sentido.

| | 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 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | 0,00 |

Fuente: Elaboración Propia

Figura 66: Modelación con 4 líneas de fondeo.



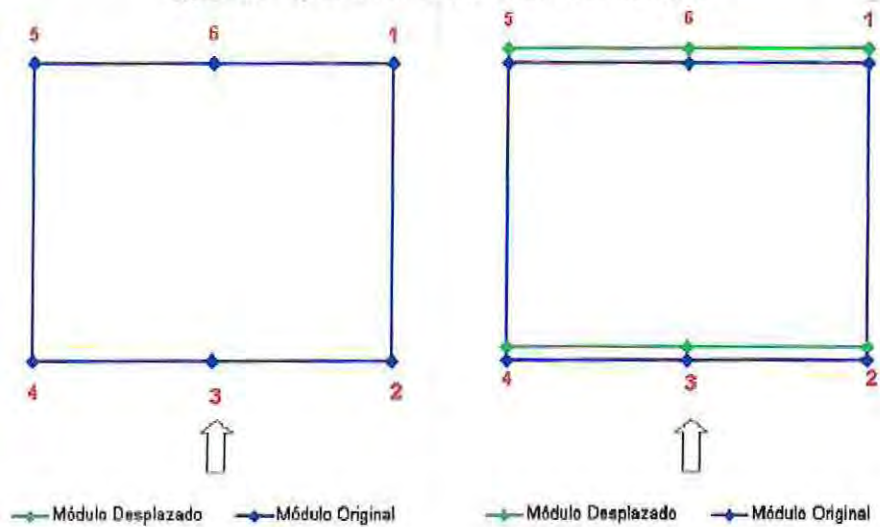
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.22: Tensiones y desplazamientos en 6 líneas de fondeo y una fuerza en un sentido.

| | 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 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | 0,00 |

Fuente: Elaboración Propia

Figura 67: Modelación con 6 líneas de fondeo.

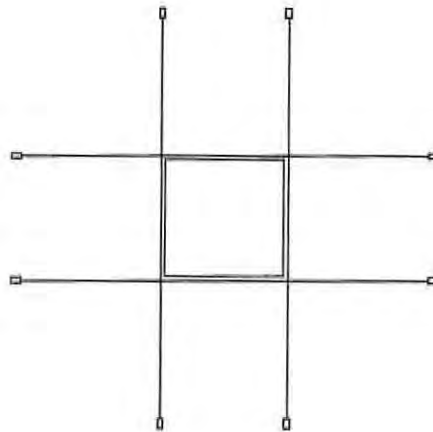


Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 5.21 se observa que la línea 2 y 3 se tensionan en forma similar por la dirección impuesta en las condiciones iniciales y por la simetría del módulo de prueba. Pero con la incorporación de 2 líneas, una en cada extremo, las tensiones se redistribuyen y generan el impacto solamente en la nueva línea 3. (Ver Tabla 5.22).

Paralelamente se observa un menor desplazamiento producto de la incorporación de estas dos líneas, por lo que se concluye que la incorporación de nuevas líneas depende exclusivamente de la dirección de las fuerzas externas dominante en los sitios de emplazamiento. Para reforzar el concepto anterior se realiza una nueva modelación con la incorporación de 4 líneas de fondeo ubicadas en las esquina del módulo. La Figura 68, muestra la configuración a analizar.

Figura 68: Módulo de prueba con la incorporación de 4 líneas.



Fuente: Elaboración Propia

La modelación se realiza dadas las mismas condiciones iniciales definidas a principio de la sección (5.7) y los resultados se presentan en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23: Tensiones y desplazamientos en las 8 líneas de fondeo.

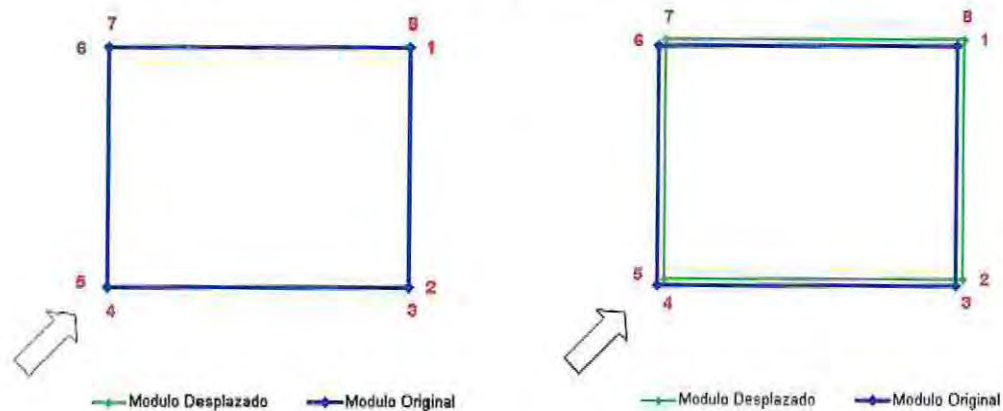
| | Condición Final | Condición Inicial |
|---------------------|-----------------|-------------------|
| | T_H [ton] | T_H [ton] |
| Línea 1 | 0,02 | 0,01 |
| Línea 2 | 0,02 | 0,01 |
| Línea 3 | 0,02 | 0,01 |
| Línea 4 | 0,02 | 1,84 |
| Línea 5 | 0,02 | 0,07 |
| Línea 6 | 0,02 | 1,36 |
| Línea 7 | 0,02 | 0,56 |
| Línea 8 | 0,02 | 0,01 |
| Δx (m) | 0,00 | 0,48 |
| Δy (m) | 0,00 | 0,48 |
| $\Delta \theta$ (°) | 0,00 | -0,03 |

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el modelo redistribuye las tensiones en las líneas que están mayormente expuestas a las solicitaciones externas. Estas tensiones permiten establecer las tensiones de diseño (T_V) que sirven para calcular los pesos de los elementos de hormigón en el caso que se utilice este tipo de dispositivo.

Los resultados visuales de la modelación se presentan en la Figura 69.

Figura 69: Módulo en su condición final con 8 líneas de fondeo



Fuente: Elaboración Propia

5.7.5 PESOS DE LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN

Un punto fundamental dentro del análisis viene dado por las distintas restricciones que se deben incorporar en el modelo. Una primera restricción tiene directa relación con la ecuación (77), en el cual se determina el factor de seguridad necesario para cumplir la razón entre la fuerza de roce máxima y la fuerza de roce.

$$FS = \frac{F_{Rmáx}}{F_R}$$

$$FS = \frac{(W - E)\text{sen}(\beta) + T \cos(\alpha + \beta)}{\mu((W - E)\cos(\beta) - T\text{sen}(\alpha + \beta))}$$

La expresión anterior tiene directa relación con el desplazamiento que puede tener el elemento de hormigón producto de las tensiones en las líneas de fondeo y la pendiente de fondo marino.

Una segunda restricción viene dada por la condición de que los elementos de hormigón deben estar completamente sumergidos. La condición más crítica viene dada cuando la fuerza normal es cercana a 0, lo que se traduce en un posible levantamiento del elemento. De acuerdo a lo expuesto anteriormente que calcula el factor de seguridad para este se presenta a continuación:

$$FS = \frac{W}{E + T \times \text{sen}\alpha}$$

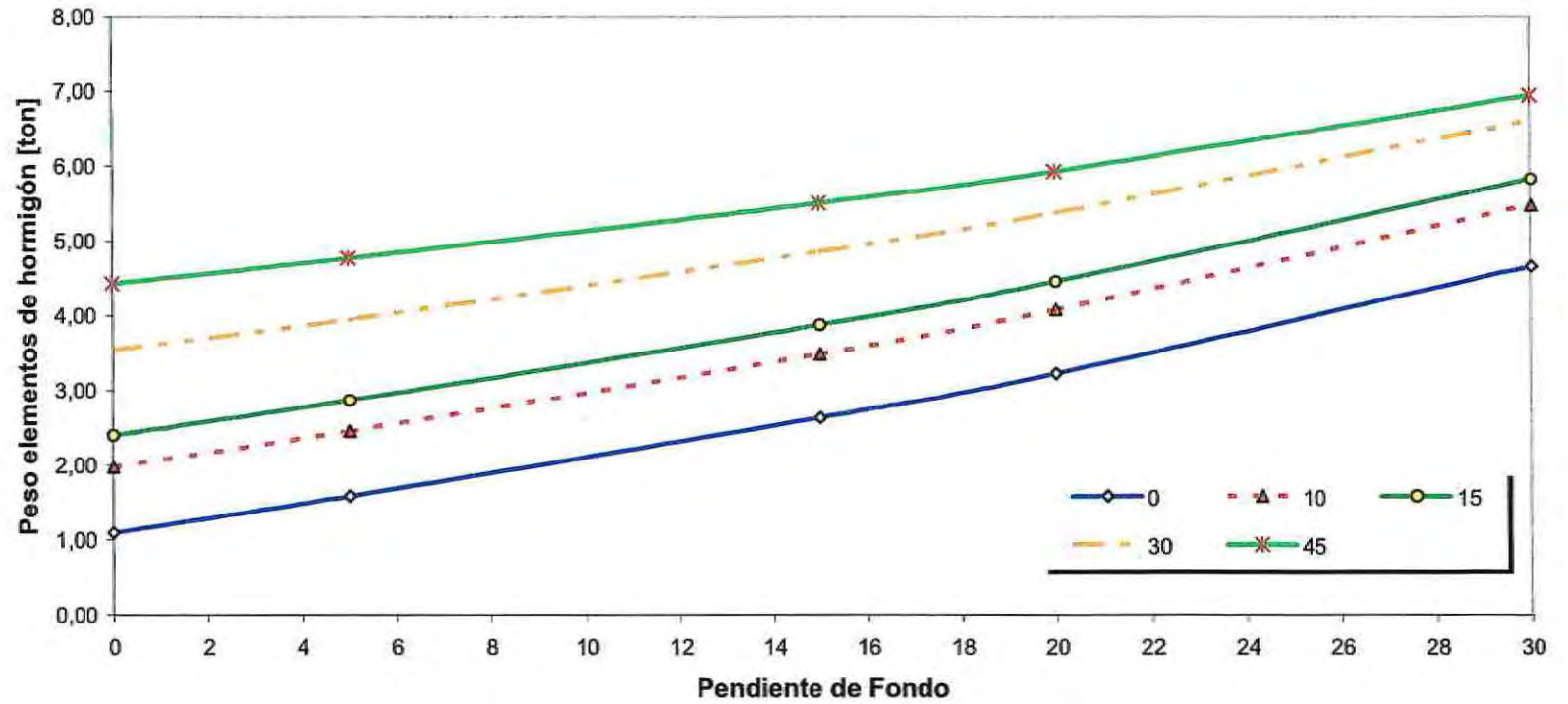
Para realizar el análisis de los elementos de hormigón se utilizarán las condiciones iniciales descritas en la sección 5.7. Además se utilizan los siguientes parámetros y características:

- T= 3,0 [ton]
- Arena bien graduada, $\phi = 30^\circ$ (Figura 54)
- Factor de seguridad de 1.7 (considerado suficiente para este tipo de diseño)

En la Figura 70 se muestran los distintos pesos de elementos de hormigón en función de las pendientes de fondo en el lugar de fondeo y el ángulo de inclinación entre las líneas de fondeo y el muerto de hormigón (los colores indican el ángulo de inclinación).



Figura 70: Pesos de los elementos de hormigón



Fuente: Elaboración Propia

Dado que en la sección 5.3.3 se calcula el ángulo de inicio y fin de la catenaria, en la Tabla 5.24 se presentan dichos ángulos según las condiciones iniciales dadas anteriormente.

Tabla 5.24: Ángulos de inicio y fin de la catenaria

| | Condición Inicial | | Condición Final | |
|---------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | θ_1 (°) | θ_2 (°) | θ_1 (°) | θ_2 (°) |
| Línea 1 | -17,0 | -66,2 | -0,6 | -72,2 |
| Línea 2 | -17,0 | -66,2 | -17,6 | -66,0 |
| Línea 3 | -17,0 | -66,2 | -46,5 | -46,6 |
| Línea 4 | -17,0 | -66,2 | -17,7 | -65,9 |

Fuente: Elaboración Propia

Considerando que el diseño debe realizarse en una condición desfavorable, los pesos de los muertos de hormigón vienen dados por la condición final del sistema. El ángulo de 46,5 ° entrega la condición más perjudicial para el diseño.

En el modelo propuesto el fondo es regular (pendiente = 0°) y el ángulo de inclinación entre la línea de fondeo y el muerto de hormigón viene en la línea 3, el peso de los elementos de hormigón para la estructura propuesta es de 4,5 [ton].

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La industria acuícola, se ha acrecentado en forma dinámica en los últimos años en Chile, especialmente en el sur del país donde el medio físico, otorgan las condiciones ideales para el cultivo de especies marinas.

Hoy en día existe la posibilidad que instalar estructuras de cultivos en costa abiertas (offshore) lo que implicaría el desarrollo de nuevas tecnologías para el diseño y protección de éstas. Además existe también la ambición de generar estructuras posicionadas en el fondo marino, para el cultivo de peces denominados planos (rodaballo), que hoy en día son fuertemente demandados en el norte del país.

Ante un mercado tan competitivo es necesario pensar en formas de desarrollar esta tecnología abarcando el mayor de los agentes involucrados para aumentar aún más el desarrollo en la industria de la acuicultura. El análisis propuesto en el documento, da un indicio de los lineamientos a seguir o simplemente de los pasos mínimos que se requieren para realizar diseño de este tipo.

Uno de los puntos fundamentales antes del análisis, es la buena ejecución de los estudios necesarios para representar la interacción que existe entre la estructura y el medio físico donde se encuentra. Por lo tanto es de suma importancia conocer e interpretar los resultados entregados por los estudios oceanográficos, para tener todas las consideraciones previas que se necesitan antes de realizar un análisis riguroso.

6.1 ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS

Las variables oceanográficas constituyen un punto fundamental para conocer y parametrizar las fuerzas externas a la que se encuentra sometida el sistema de cultivo en general. El estudio de estas variables debe estar acorde con las recomendaciones publicadas por el SHOA y cumplir con las consideraciones básicas para una buena ejecución.

Para tener una noción acerca de los estudios oceanográficos, se detalla algunos conceptos básicos que deben presentar dichos estudios:

- Descripción de la zona de emplazamiento.
- Descripción de los equipos utilizados durante el trabajo de terreno y sus rangos de operación y exactitud.
- Metodologías empleadas, clarificando las fuentes de información.
- Copia de las mediciones de terreno y de los post-procesos en formato digital.
- Los resultados deberán ser presentados en forma clara y de fácil revisión.

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

Esto se basa en el concepto de resonancia, si un sistema oscila por el impacto de fuerzas externas periódicas, entonces la amplitud de oscilación del sistema dependerá de la frecuencia de la fuerza externa.

En simples palabras, si la frecuencia de las fuerzas externas es distinta de las frecuencias características del sistema, la amplitud de la oscilación resultante será pequeña. En cambio si la frecuencia de las fuerzas externas es cercana a algunas de las frecuencias características del sistema, la amplitud de oscilación resultante será muy grande, perdiendo así su posición original de equilibrio. Dado lo anterior, se concluye que las fuerzas externas han entrado en resonancia con el sistema.

En resumen, los análisis cuasi estáticos son aceptados en su gran mayoría por las distintas empresas relacionadas con la determinación de cargas hidrodinámicas sobre estructuras flotantes, pero este tipo de análisis está sujeto a probables fallos debido a la imprecisión y particularmente a la subestimación de las cargas dinámicas.

Hoy en el mercado existen software relacionados con el diseño de los elementos de fondeo que ayudan al usuario conocer el comportamiento de la estructura, tales como RIFLEX (Riser System Analysis Program), MIMOSA (Analyses mooring systems and moored vessels), entre otros. Por lo tanto es recomendable comparar y contrastar los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto con los obtenidos en los software para obtener coeficientes de seguridad aproximados para posteriores análisis.

6.2 SISTEMAS DE FONDEO

El diseño de los sistemas de fondeo implica la intervención de varios parámetros y/o agentes (condiciones naturales, estructurales, etc.) que definen finalmente la estabilidad del cualquier tipo de estructura flotante.

Considerando que la composición de los sistemas de fondeo implica una multiplicidad de componentes estructurales, en el presente documento se presentan en detalle para el análisis solamente las líneas de fondeo (cables, cadenas, etc.) y los dispositivos de fondo (muertos de homigón).

En el caso de las líneas de fondeo, éstas se componen de distintos materiales que influyen finalmente en la determinación de las tensiones registradas y en forma explícita en el desplazamiento que se genera en el módulo completo. La relación entre tensión/desplazamiento suele ser bastante compleja de analizar por la razón de que los componentes estructurales actúan de forma no-lineal, generando así una situación de inseguridad antes del análisis.

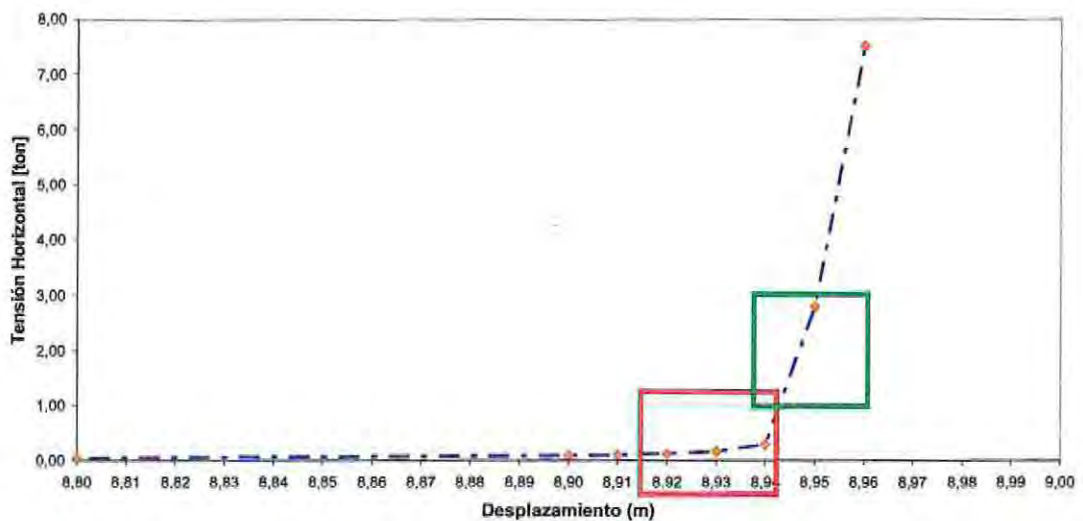
Tal como se observó en el análisis de sensibilidad (sección 5.7) las tensiones en las líneas de fondeo están en función principalmente de la magnitud de las sollicitaciones externas y en un menor grado de las longitudes iniciales de las líneas. En cambio los desplazamientos y giros que puede experimentar la estructura dependen exclusivamente de las longitudes iniciales de las distintas líneas de fondeo.

Dentro del documento se proponen dos metodologías para calcular la tensión a lo largo de las líneas de fondeo. Una primera aproximación (5.3.1) calcula la tensión en función de las propiedades físicas del material que compone las líneas de fondeo, su resolución es mediante métodos de iterativos. En una segunda aproximación (5.5) la tensión se calcula mediante la discretización de la catenaria en N elementos.

La Figura 43, muestra la relación tensión/desplazamiento es no-lineal por que se esperan que las tensiones aumenten en forma considerable ante desplazamientos mínimos.

La elasticidad del material que compone la línea de fondeo comienza hacer relevante en el tramo demarcado con recuadro rojo de la Figura 39, dado que en ese punto las propiedades físicas del material comienza a tener importancia para el cálculo de las tensiones, en relación que la elasticidad funciona como un amortiguador contra los pequeños desplazamientos que comienza a experimentar la línea de fondeo.

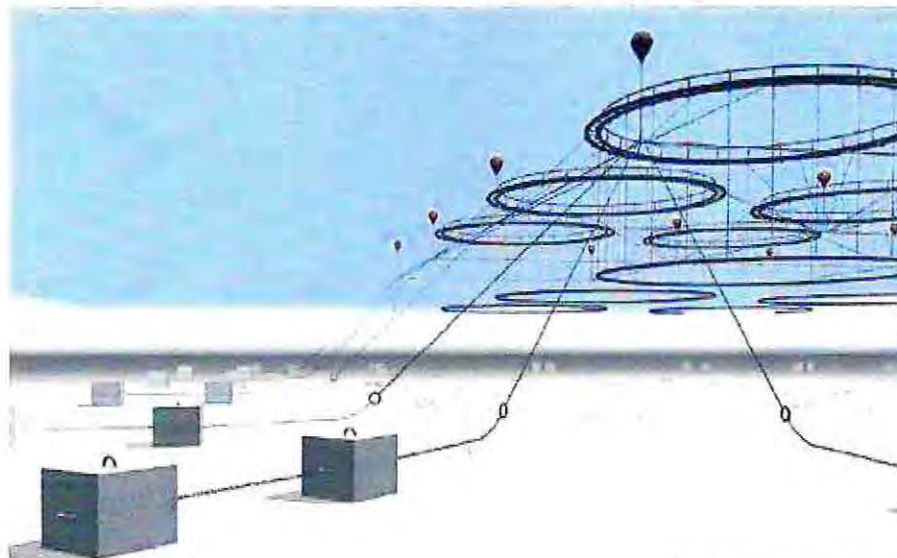
Para efectos de diseño, las tensiones utilizadas para el cálculo están representadas por el cuadro verde de la Figura 43. Esto significa que la caracterización de las tensiones en las líneas de fondeo deben ser estudiadas en forma conciente ya que tal como se observa, pequeños aumentos genera aumentos en las tensiones considerables que determina finalmente el dimensionamientos de los dispositivos de fondo.



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a los dispositivos de fondo, los muertos de hormigón resultan ser uno de los sistemas más utilizados para el fondeo de estructuras flotantes (balsas-jaulas, pontones, etc.) y su diseño queda limitado por las condiciones batimétricas en el sitio de emplazamiento. Estos deben ser capaz de mantener la rigidez en las líneas para que puedan mantener la posición del módulo y al mismo tiempo debe mantener una respuesta aceptable bajo condiciones naturales extremas.

Por tal motivo el estudio batimétrico y de calidad de fondo debe ser detallado y preciso con tal de conocer los principales parámetros utilizados en el diseño. Para obtener una mayor estabilidad algunos diseños consideran la incorporación de 2 muertos de hormigón alineados por cada línea de fondeo (Figura 72).

Figura 71: Dos elementos de hormigón por línea de fondeo

Fuente: Elaboración Propia

En teoría se puede interpretar que los muertos de hormigón son ineficientes en comparación con las anclas, por tener un bajo poder de agarre (casi nulo). Pero en determinadas ocasiones y cuando la composición del lecho marino es de tipo fangoso o rocoso, los muertos de hormigón tienden a enterrarse y así aumentar su poder de agarre, siendo muy útiles.

6.3 COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Los resultados obtenidos en la sensibilidad del modelo estructural son a partir de un módulo que tiene 100 m^2 y que sirve para simplificar la obtención en forma rápida y clara los resultados. Esto entrega en forma preliminar el comportamiento de una estructura rígida y/o semirrígida interactuando con su entorno, lo que ayudaría a comprender las falencias de la estructura al encontrarse sometida a la acción agentes externos.

Ante el incremento de las fuerzas externas en un sentido, la estructura tiende a utilizar en forma máxima una sola línea, producto de la dirección de las fuerzas externas y la simetría del módulo. Por lo tanto las modelaciones posteriores permitieron comprobar que ante distintas longitudes de líneas de fondeo (producto de la irregularidad de la batimetría – distancia entre la estructura y los dispositivos de fondo) y el impacto de las fuerzas externas en distintas direcciones, el módulo redistribuye las cargas dentro del sistema disminuyendo la tensión en éstas pero en algunos casos generando desplazamientos considerables.

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 (Tabla 5.11).
2. Torsión de la plataforma, que en condiciones extremas llevaría a inoperatividad.
3. Desplazamiento de los dispositivos de fondo.

6.4 LINEAMIENTOS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

El análisis de los sistemas de fondeo es un problema complejo de abordar ya que involucra una multiplicidad de variables que finalmente entregan un desplazamiento total que debe soportar la estructura. La Figura 43 entrega la curva de rigidez total del sistema considerando distintas condiciones iniciales, pero cabe mencionar que cada componente actúa en forma distinta, por lo que es común utilizar en Ingeniería sísmica el análisis "pushover" (Ref.22) que involucra analizar la estructura por componente y obtener la deformación límite y en su defecto la falla total de cada elemento.

El análisis pushover en sus inicios fue considerado para observar la vulnerabilidad sísmica de los edificios donde mediante las curvas de fuerzas versus desplazamiento conociendo así el estado límite de la estructura. Por ello es recomendable conocer el comportamiento de cada componente estructural del sistema de fondeo para así comprobar mediante las curvas de deformación el estado límite de cada componente y de la estructural en forma total. Resulta importante poder predecir el mecanismo de falla del sistema, a modo de tomar acciones preventivas frente a sollicitaciones extremas, controlando el daño esperado.

6.4.1 MODELACIÓN EN LABORATORIOS (3D)

Colocar todas las herramientas en el modelado estructural (modelo numérico) considera ciertas ventajas y desventajas que a simple vista se pueden desglosar. Los análisis en el modelo numérico (software) en algunos casos no considera algunos efectos locales que suelen tomar importancia al momento de evaluar un diseño y en algunos casos la idealización de las condiciones iniciales por parte del usuario.

En su contraparte, los modelos numéricos dan la oportunidad de someter las estructuras a distintas pruebas que finalmente entregan el comportamiento de ésta bajo distintos escenarios.

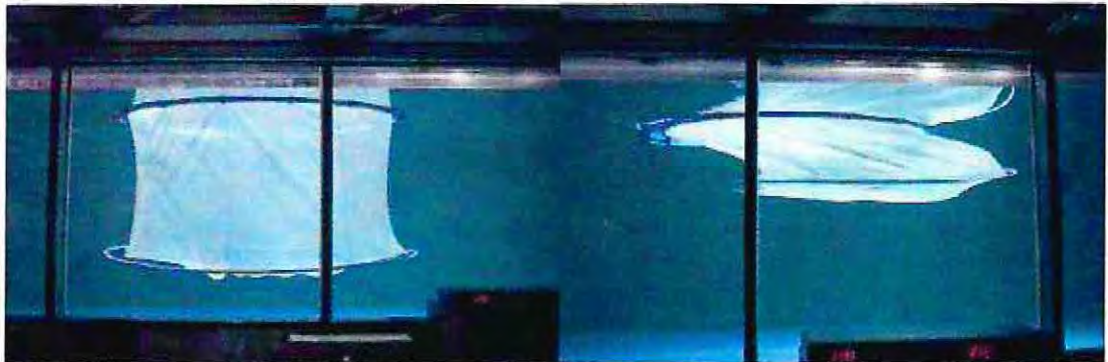
Ante un avance tecnológico inminente es recomendable para futuras investigaciones desarrollar técnicas complementarias tal como generar un modelo a escala (modelo físico) para conocer la forma detallada y descripción en forma visual de las distintas interacciones que la estructura tiene al momento de entrar en funcionamiento. Estos tipos de modelo pueden describir fenómenos la modelación numérica no especifica en su totalidad y que sólo se pueden representar en una modelación 3D.

Figura 72: Modelo a escala de una estructura de cultivo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 73: Comportamiento de una balsa circular ante condiciones extremas



Fuente: Elaboración Propia

6.4.2 INSTALACIÓN DE ESTRUCTURAS OFFSHORE

En el caso de la instalación de estructuras en mar abierto (offshore) la complejidad del problema aumenta considerablemente. Las estructuras alejadas de la costa se encuentran diseñadas para que se adapten mejor a las condiciones en mar abierto: olas más grandes, fuertes corrientes, viento, etc. (dependiendo del lugar de emplazamiento).

Las jaulas flexibles son las que proporcionan las mejores características para afrontar estas condiciones, ofreciendo un comportamiento óptimo dentro de la gama de jaulas existentes hoy en día en el mercado; pero en su defecto son difíciles plataforma para trabajar por lo que los tiempos de mantención y producción se verían altamente reducidos.

Figura 74: Comportamiento de jaulas flexibles en condiciones de mar abierto



Fuente: Elaboración Propia

En resumen todo proyecto análisis debe contener en forma clara y precisa las tres fases explícitamente descritas en el documento.

- Cálculos de fuerzas externas que dominan el sector de emplazamiento del sistema de cultivo
- Cálculos de esfuerzos sobre las líneas de fondeo (tensiones)
- Dimensionamiento de los dispositivos de fondo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ref.3 SALMON CHILE 2007: Perfil de la Industria del Salmón. Julio
- Ref.4 MARQUEZ DE LA PLATA, Alfonso. Emprender para Avanzar. EN: Industria del Salmón. Viernes 29 de Junio 2007.
- Ref.5 BS 6349-6. British Standard. Part 6: Design of inshore moorings and floating structures. Maritime Structures. 1989
- Ref.6 SHOA. 2003: Instrucciones Oceanográficas N°1 : Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Publicación 3201. Valparaíso. Chile.
- Ref.7 JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. Global Sea Level Rise. Vol.96 No.C4. Pages 6981-6992, April 15, 1991. Bruce C. Douglas.
- Ref.8 USACE. 2003. Coastal Engineering Manual. Vol. V - Meteorology and wave climate. EEUU.
- Ref.9 OCDI. 2002. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan.
- Ref.10 SHOA. 1992. Glosario de mareas y corriente. Publicación 3013. Valparaíso. Chile.
- Ref.11 USACE. 1984. Shore Protection Manual. Volumen I. EEUU.
- Ref.12 LAMBE, T William. Mecánica de Suelos 2ª Edición - 1998 (Editorial Limusa, S.A de C.V).
- Ref.13 ROM. 0.2-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. España.
- Ref.14 MARINE RESEARCH (Department of Agriculture and Fisheries for Scotland), Fish Farming: A guide to the design and construction of net enclosures. P. H. MILNE, B.Sc., Ph.D.
- Ref.15 INN. 1971. Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones. Norma chilena oficial. Chile.
- Ref.16 API (2000). "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design". EEUU
- Ref.17 MARINTEK (1988). Environmental Forces on a floating cage system, mooring considerations. H. Rudi, J.V Aarsnes and L.A. Dahle. Trondheim. Noruega
- Ref.18 UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. 2000. Documentos de referencias. Dinámicas Volumen I. Grupo de Ingeniería Oceanográficas y de Costas. GIOC. España.
- Ref.19 COPEDEC VI. 2003. New guidance for wave forces on jetties in exposed locations. K.J. McConnell, N.W.H. Allsop, G. Cuomo, I.C. Cruickshank. Colombo. Sri Lanka.
- Ref.20 McCORMAC, Nelson: "Análisis de Estructuras Métodos clásicos y matricial" 3ª Edición (Alfaomega)

- Ref.21 POZO, Julio, CHORBADJIAN, Rosa María, MONTERO, Esteban. Formalismo discreto y continuo para sistemas suspendidos por sus extremos (un problema de estática). SANTIAGO, CHILE, UNIVERSIDAD DIEGO PORTALES.
- Ref.22 REVISTA DE INGENIERIA SISMICA "Respuesta torsional de edificios en el marco del análisis pushover", Jaime de la Colina Martínez. No. 75 47-67 (2006).