



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.