



FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

Evaluación de los parámetros de periodo y dirección que definen las tormentas extremas y comparación de métodos de estimación de cargas por oleaje en estructuras verticales en Chile. Caso de estudio tormenta julio 2013

RODRIGO DANILO LEAL CORNEJO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

PROFESOR GUÍA:

SR. PATRICIO MONÁRDEZ SANTANDER

SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

SANTIAGO

“Evaluación de los parámetros de periodo y dirección que definen las tormentas extremas y comparación de métodos de estimación de cargas por oleaje en estructuras verticales en Chile. Caso de estudio tormenta julio 2013”

Rodrigo Danilo Leal Cornejo

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Monárdez S.

José Beyá M.

Patricio Winckler G.

DECLARACIÓN

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.

PARA EL TREMENDO NILO

EN EL FIN DE ESTA ETAPA QUE TENÍA PENDIENTE, QUERÍA AGRADECER A TODAS LAS PERSONAS
QUE ME APOYARON A LO LARGO DE MI CARRERA.

QUIERO AGRADECER A MI PILAR FUNDAMENTAL, MI FAMILIA; A MI MADRE NANCY, MI PADRE
JAIME Y MI HERMANA NATALIA POR TODO SU ESFUERZO, PREOCUPACIÓN Y CONFIANZA EN ESTE
LARGO PROYECTO. SIN SU APOYO ESTO NO PODRÍA HABER SIDO POSIBLE.

AGRADEZCO A MI POLOLA DAIANA POR SER MI MOTIVACIÓN, DARME LA FUERZA Y LA ÚLTIMA
GOTA DE COMBUSTIBLE PARA DAR ESTE ÚLTIMO GRAN PASO.

A MIS TÍOS HUGO, SANTIAGO Y MAURICIO Y PRIMO ALEXIS, POR SU APOYO EN LOS MOMENTOS
COMPLEJOS DE MI CARRERA.

A MI PROFESOR GUÍA PATRICIO MONÁRDEZ, QUIEN SIN TENER NINGUNA OBLIGACIÓN CONMIGO
ME BRINDÓ APOYO Y DEDICACIÓN EN EL DESARROLLO DE ESTA MEMORIA.

A MIS GRANDES AMIGOS DE LA U, MIS AMISTAITAS; SEBASTIÁN CONTRERAS, EDUARDO
GONZÁLEZ, DANIEL ROJAS Y CÉSAR ESPARZA POR SU AMISTAD, COMPAÑERISMO Y
PREOCUPACIÓN.

AL TREMENDO GRUPO DE ESTUDIO CON LOS QUE COMPARTÍ EL ÚLTIMO PROCESO DE LA
CARRERA DONDE SE FORJARON GRANDES DISCUSIONES Y MUCHAS EXPERIENCIAS QUE ME
HICIERON CRECER PROFESIONALMENTE. GRACIAS BROCHAS; CLAUDIO MEZA, ARIEL GALLARDO
Y JANISSE FERRADA.

A MATÍAS QUEZADA POR SU PREOCUPACIÓN Y AYUDA EN EL DESARROLLO DE ESTA MEMORIA.

A BAIRD & ASSOCIATES S.A, POR FACILITAR EL USO DE DATOS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE
TRABAJO.

MUCHAS GRACIAS A TODAS LAS PERSONAS QUE COMPARTIERON CONMIGO EN LA UNIVERSIDAD
DE VALPARAÍSO Y FUERA DE ESTA, SIN DUDA TAMBIÉN SON PARTE DE ESTO.

SIN SACRIFICIO NO HAY VICTORIA...

ÍNDICE

1	Resumen	1
2	Introducción	2
3	Objetivos.....	3
3.1	Objetivo General.....	3
3.2	Objetivos Específicos.....	3
4	Alcances	4
5	Revisión bibliográfica	5
5.1	Oleaje	5
5.1.1	Teorías de Oleaje	7
5.1.2	Climatología del Oleaje en Chile.....	8
5.1.3	Rotura.....	11
5.1.4	Oleaje Extremo.....	15
5.1.5	Metodología de Valores Extremos – Alturas de Oleaje	15
5.2	Obras Marítimas.	22
5.2.1	Clasificación y Tipología de Obras Marítimas	22
5.3	Cargas de oleaje.....	27
5.3.1	Carga por Oleaje sobre Estructuras Verticales.	27
5.3.2	Formulaciones Utilizadas comunmente en el Diseño de Estructuras Verticales.....	30
5.4	Daños Producidos en Muros verticales.....	36
6	Caso de aplicación	38
6.1	Caracterización Zona de Estudio	41
6.1.1	Ubicación Puerto de Antofagasta.....	41
6.1.2	Batimetría Antofagasta	42
6.1.3	Oleaje Antofagasta Aguas profundas.....	44
6.1.4	Mareas Puerto de Antofagasta	47
6.2	Análisis Tormenta	47
6.2.1	Condiciones Meteorológicas.....	48
6.2.2	Condiciones de Oleaje.....	51
6.2.3	Evaluación periodo de retorno tormenta	55
6.3	Definición Altura de Ola de Diseño	56
6.3.1	Análisis de Olas Extremas en Aguas Profundas	57

6.3.2	Selección Periodo y Dirección	61
6.4	Estimación de Fuerzas	62
6.4.1	Propagación de Oleaje al Pie de la Estructura	63
6.4.2	Análisis de fuerzas.....	64
6.5	Análisis de Sensibilidad e Interpretación de Resultados	74
6.5.1	Sensibilidad Metodología Sainflou (1928).....	74
6.5.2	Sensibilidad Metodología Minikin (1963).....	75
6.5.3	Sensibilidad Metodología de Goda (1994)	76
6.6	Análisis de Estabilidad.....	78
7	Recomendaciones de uso formulaciones.....	80
8	Conclusiones finales	82
9	Bibliografía.....	84
10	Anexos	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5-1:	Clasificación de las ondas de superficie en función de la energía y frecuencia.	6
Figura 5-2:	Validez de diferentes teorías de olas.	7
Figura 5-3:	Espectro Bi-Dimensional costas chilenas (energía en m ² /s)	9
Figura 5-4:	Tipos de rotura.....	11
Figura 5-5:	Ilustración métodos de selección de tormentas.....	16
Figura 5-6 :	Diagrama de clasificación de obras marítimas.	22
Figura 5-7 :	Tipos de diques verticales.....	24
Figura 5-8:	Sección tipo dique vertical.	25
Figura 5-9:	Sección tipo dique vertical.	25
Figura 5-10:	Muro vertical con frente perforado.	25
Figura 5-11:	Pantalla de hormigón ranurada con pilotes de refuerzo.	26
Figura 5-12:	Pantallas de tablestacas.	26
Figura 5-13 :	Identificación de fuerzas sobre muros verticales, para olas rompientes y no rompientes.....	28
Figura 5-14 :	Mapa de identificación de cargas sobre estructuras verticales.....	29
Figura 5-15:	Distribución de presiones Sainflou (1928).....	31
Figura 5-16:	Diagrama de presiones Minikin (1963).....	32
Figura 5-17:	Esquema de aplicabilidad de formulaciones.	34

Figura 5-18 : Distribución de presiones Goda.	34
Figura 5-19: Falla típicas en muros verticales.	37
Figura 6-1: Características molo de abrigo Antofagasta. Adaptación Lira (1933).	39
Figura 6-2: Ubicación sectores dañados Puerto Antofagasta.	39
Figura 6-3: Arranque molo principal dañado por marejadas Puerto Antofagasta.	40
Figura 6-4: Pérdida bloques sector faro.	40
Figura 6-5 : Ubicación Puerto de Antofagasta.	41
Figura 6-6: Batimetría Puerto de Antofagasta.	42
Figura 6-7: Perfiles Antofagasta.	43
Figura 6-8: Perfiles Antofagasta.	43
Figura 6-9: Rosa de dispersión de periodos. Antofagasta.	46
Figura 6-10. Carta Sinóptica 01 y 02 de julio de 2013, respectivamente.	48
Figura 6-11. Carta de viento 1 y 2 de julio de 2013, respectivamente.	49
Figura 6-12: Presión atmosférica faro Punta Ángeles.	49
Figura 6-13: Intensidad de viento Punta Ángeles.	50
Figura 6-14. Carta de viento y sinóptica 14 de julio de 2013.	51
Figura 6-15: Ubicación geográfica boyas.	52
Figura 6-16: Comparación marejadas entre marejada julio 2013 versus mayor tormenta en 30 años y oleaje con 100 años de periodo de retorno para Antofagasta.	55
Figura 6-17: Puntos de extracción Antofagasta.	57
Figura 6-18: Ubicación nodos de extracción Antofagasta y Valparaíso.	57
Figura 6-19: Distribución de presiones Sainflou (1928).	66
Figura 6-20. Distribución de presiones Goda.	71
Figura 6-21: Ilustración de Presiones Totales sobre Muro.	72
Figura 6-22. Distribución de presiones Goda.	72
Figura 6-23: Ilustración dirección de incidencia.	76
Figura 6-24: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas que actúan sobre un muro.	79
Figura 10-1 : Gráfico para evaluar el coeficiente Ks.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1: Clasificación de ondas según periodo.	5
Tabla 5-2: Tipos de Rotura según número de Iribarren.	13
Tabla 5-3: Tipos de Rotura según número de Iribarren en rotura.	13
Tabla 5-4: Metodología de selección periodos y dirección.	21

Tabla 5-5: Obras marítimas y objetivos.....	23
Tabla 5-6: Resumen formulaciones existentes para la determinación de fuerzas de oleaje en estructuras verticales.	30
Tabla 6-1: Tabla de incidencia dirección peak vs. Altura significativa en aguas profundas.	45
Tabla 6-2: Tabla de incidencia altura significativa vs. Periodo peak.	45
Tabla 6-3: Fechas de inicio y término de tormenta.....	54
Tabla 6-4: Valores máximos de tormenta en aguas profundas.....	54
Tabla 6-5 : Listado tormentas extremas Antofagasta en aguas profundas.	58
Tabla 6-6 : Correlación distribuciones de probabilidad Weibull y Gumbel.	59
Tabla 6-7 : Periodos de retorno Antofagasta aguas profundas.....	59
Tabla 6-8: Resumen periodos de retorno.	60
Tabla 6-9: Parámetros Caso A.....	61
Tabla 6-10: Parámetros Caso B.....	61
Tabla 6-11: Parámetros de evaluación de cargas.	62
Tabla 6-12: Parámetros de evaluación de cargas (peak tormenta julio 2013).	63
Tabla 6-13: Alturas de ola al pie de la obra frente al cabezo molo de abrigo puerto de Antofagasta.....	63
Tabla 6-14: Presiones obtenidas según altura de diseño. Promedio registro tormentas de aguas profundas.	66
Tabla 6-15: Presiones obtenidas según altura de diseño. Análisis de funciones de transferencia.	67
Tabla 6-16: Presiones totales método de Sainflou. Caso tormenta.	68
Tabla 6-17: Fuerzas y momentos totales. Promedio registro tormentas de aguas profundas.....	69
Tabla 6-18: Fuerzas y momentos totales. Análisis de funciones de transferencia.	70
Tabla 6-19: Presiones totales método de Minikin. Caso tormenta.....	70
Tabla 6-20: Presiones, fuerzas y momentos totales. Promedio registro tormentas de aguas profundas.....	72
Tabla 6-21: Presiones, fuerzas y momentos totales. Análisis de funciones de transferencia	72
Tabla 6-22: Presiones, fuerzas y momentos totales método de Goda extendido. Caso tormenta.	73
Tabla 6-23: Factores de seguridad según ROM 05/94.....	78
Tabla 6-24: Resumen factores de seguridad propuestos en la literatura.....	78
Tabla 6-25: Factores de seguridad casos analizados.	79
Tabla 7-1: Formulaciones propuestas en la literatura más reciente.	81

Tabla 10-1: Coeficientes empíricos de la formulación de desviación estándar para para eventos extremos (Goda 1988).....	89
Tabla 10-2: Niveles de confianza para valores de altura de olas extremas.	89

1 **RESUMEN**

Asumiendo que la altura de ola de diseño está condicionada por la correcta selección del periodo y dirección, se estudiaron dos escenarios para elegir estos parámetros; elección de acuerdo al promedio del registro de tormentas de aguas profundas y a partir del análisis de funciones de transferencia, encontrando que al propagar alturas de ola con periodos más largos existe mayores cargas sobre las estructuras, aumentando el fenómeno de asomeramiento.

Al comparar los escenarios descritos anteriormente, se obtuvieron diferencias hasta del 30%, siendo las más altas aquellas evaluadas con parámetros seleccionados a partir de las funciones de transferencia o periodos más largos.

En referencia a la tormenta de inicios de julio de 2013, ésta presentó alturas de ola con periodos de retorno inferiores a 100 años, considerando 30 años de datos de oleaje. Por lo tanto, los daños causados son principalmente por incrementos de fenómenos relacionados con el periodo. De acuerdo a lo anterior, se utilizó este evento para realizar los análisis.

Conocidas las diferencias existentes en la selección del periodo para escoger la altura de ola de diseño, se compararon las metodologías de determinación de cargas en estructuras verticales, verificando que existen aumentos en las en las solicitaciones de al menos un 30%, así como también cambios en los factores de seguridad (vuelco y deslizamiento). Por lo tanto, a mayor periodo mayor serán las fuerzas sobre la estructura.

Finalmente, se recomienda seleccionar los parámetros de periodo y dirección para determinar la ola de diseño a partir de las funciones de transferencia, ya que se pueden visualizar los efectos que causará en la costa al propagar el oleaje, en función al coeficiente de agitación.