



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**PROPUESTA DE UN ENROCADO DE PROTECCIÓN EN EL  
BORDE COSTERO DE HORCÓN Y VERIFICACIÓN DEL  
FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO MEDIANTE MODELACIÓN  
CFD**

**Felipe Alejandro Galaz Gallardo**

Enero 2020

**PROPUESTA DE UN ENROCADO DE PROTECCIÓN EN EL BORDE COSTERO DE HORCÓN Y  
VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO MEDIANTE MODELACIÓN CFD**  
Felipe Alejandro Galaz Gallardo

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

Matías Quezada Labra  
Profesor guía.  
Jefe del departamento de oceanografía  
física y modelamiento matemático.  
ECOTECNOS S.A.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Carlos Cárdenas Martínez  
Ingeniero de proyectos.  
GSI Ingeniería.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Francisco Molteni Pérez  
Ingeniero Civil Oceánico  
Docente.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## DECLARACIÓN

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado 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.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero, a mi familia por apoyarme y brindarme los recursos para estudiar mi carrera universitaria. A mi papá y a mis abuelos, que me enseñaron a esforzarme por conseguir todo lo que quiero, y que me brindaron su energía cuando la necesité.

A Francisca, mi compañera de vida, que me ha aguantado y apoyado a lo largo de la carrera, que estuvo en todos los momentos difíciles que he pasado, me cuidó en mis momentos de enfermedad (muchos) y que juntos construimos nuestra familia gatuna con el Guatón, la Negra y la Pimienta, que nos alegran día a día.

A mis compañeros Ariel y Cammas, por esos días de estudio y bromas, y por el apoyo en todo momento.

A Matías Quezada y José Ribba por sus respuestas ante todas mis dudas, y por guiarme en todo este proceso.

A Carlos Cárdenas, por sus recomendaciones de diseño, y buena disposición a responder a todas mis dudas.

A ECOTECNOS, por todas las facilidades prestadas.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO .....	3
2	OBJETIVOS:.....	5
2.1	OBJETIVO GENERAL: .....	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	5
3	ALCANCES Y LIMITACIONES .....	5
4	FUNDAMENTO TEÓRICO:.....	8
4.1	DEFINICIÓN DE ALGUNAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS .....	8
4.1.1	OLEAJE .....	8
4.1.1.1	OLEAJE REGULAR .....	9
4.1.1.2	OLEAJE IRREGULAR .....	9
4.1.2	MAREA .....	10
4.1.2.1	MAREA ASTRONÓMICA.....	10
4.1.2.2	MAREA METEOROLÓGICA.....	10
4.2	DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS .....	11
4.2.1	TIPOLOGÍAS DE DEFENSAS COSTERAS.....	11
4.2.2	BASES DE DISEÑO .....	12
4.2.3	INTERACCIÓN OLAJE-ESTRUCTURA.....	12
4.2.4	DISEÑO DE ESTABILIDAD .....	13
4.2.5	DISEÑO HIDRÁULICO .....	13
4.3	MODELOS NUMÉRICOS .....	14
4.3.1	MIKE 21 SW .....	14
4.3.2	MIKE 21 BW .....	15
4.3.3	REEF 3D.....	17
5	METODOLOGÍA .....	19
5.1	BASES DE DISEÑO .....	19
5.2	CARACTERIZACIÓN Y DEFINICIÓN DE LOS NIVELES DE DISEÑO .....	22
5.3	CARACTERIZACIÓN DE OLAJE.....	24
5.3.1	CLIMA DE OLAJE MEDIO EN AGUAS PROFUNDAS.....	24
5.3.2	TRANSFERENCIA DE OLAJE .....	24
5.3.2.1	GENERACIÓN DE MALLAS DE CÁLCULO.....	27
5.3.3	CLIMA MEDIO EN EL PIE DE LA ESTRUCTURA .....	31
5.3.4	CLIMA EXTREMO AL PIE DE LA ESTRUCTURA .....	31
5.4	DISEÑO DE ESTABILIDAD .....	32
5.5	DISEÑO HIDRÁULICO .....	32
5.6	MODELACIÓN EN REEF 3D .....	33
6	RESULTADOS.....	37

6.1	BASES DE DISEÑO .....	37
6.2	CARACTERIZACIÓN DE MAREA Y NIVEL DE DISEÑO.....	37
6.2.1	TRASLADO GEOMÉTRICO DE MAREA .....	37
6.2.2	MAREA ASTRONÓMICA.....	43
6.2.3	MAREA METEOROLÓGICA.....	44
6.2.4	WAVE SETUP .....	46
6.3	CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE.....	46
6.3.1	AGUAS PROFUNDAS .....	46
6.3.1.1	CLIMA MEDIO ENERGÍA COMPLETA.....	46
6.3.2	OLEAJE AL PIE DE LA ESTRUCTURA.....	50
6.3.2.1	PROPAGACIÓN .....	50
6.3.2.2	CLIMA MEDIO EN EL PIE DE LA ESTRUCTURA .....	54
6.3.2.3	CLIMA EXTREMO .....	56
6.4	DISEÑO DE ESTABILIDAD .....	59
6.5	DISEÑO HIDRÁULICO .....	61
6.6	SIMULACIÓN CON REEF 3D .....	65
7	CONCLUSIONES .....	71
7.1	RESPECTO A LAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS.....	71
7.2	RESPECTO AL DISEÑO .....	72
7.3	RESPECTO AL MODELO REEF 3D.....	73
8	REFERENCIAS.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1:	Identificación de la zona de estudio.....	2
Figura 1.2:	Fotos satelitales y ortomosaico del dron DOP. ....	3
Figura 1.3:	Foto en terreno 1.....	4
Figura 1.4:	Foto en terreno 2.....	4
Figura 1.5:	Foto de terreno 3.....	4
Figura 3.1:	Distribución espacial de la información recopilada, parte I.....	6
Figura 3.2:	Distribución espacial de la información recopilada, parte II.....	7
Figura 4.1:	Oleaje tipo <i>swell</i> . ....	8
Figura 4.2:	Oleaje tipo <i>sea</i> . ....	8
Figura 4.3:	Estructura del oleaje aleatorio. ....	9
Figura 4.4:	Espectro direccional de energía. ....	10
Figura 4.5:	Diagrama para una propuesta de enrocado. ....	11
Figura 4.6:	Interacción Oleaje - Estructura. ....	12
Figura 5.1:	Mapa conceptual de la metodología efectuada.....	19
Figura 5.2:	Bosquejo de definición del Wave Setup.....	23
Figura 5.3:	Dominios numéricos y acoples entre ellos.....	26
Figura 5.4:	Información batimétrica, empleada en la modelación numérica.....	28
Figura 5.5:	Dominio batimétrico, empleado en la modelación numérica. ....	29
Figura 5.6:	Dominio numérico para <i>Mike 21 BW</i> . ....	30
Figura 5.7:	Esquema de estimación del área del enrocado. ....	33

Figura 5.8: Perfil del caso modelado en REEF 3D, y puntos de extracción de datos.....	36
Figura 6.1: Puntos con datos de marea.....	38
Figura 6.2: Datos de Marea DOP vs Datos de Marea IOC. ....	40
Figura 6.3: Comparación de residuos (marea meteorológica) DOP vs IOC. ....	41
Figura 6.4: Data anual de Marea del IOC, trasladada a la zona de estudio. ....	42
Figura 6.5: Cotas de marea para Horcón. ....	44
Figura 6.6: Marea meteorológica y marejadas 2017.....	45
Figura 6.7: Valores de Marea Meteorológica para la localidad de Horcón. ....	45
Figura 6.8: Representación gráfica de los resultados Wave Setup.....	46
Figura 6.9: Rosas de oleaje 3D. Aguas Profundas. ....	49
Figura 6.10: Funciones de transferencia del oleaje ( <i>Mike 21 SW</i> ), en punto de acople a 50 m de profundidad. ....	50
Figura 6.11: Funciones de transferencia del oleaje ( <i>Mike 21 BW</i> ), hasta el punto de los 20 m. ....	51
Figura 6.12: Salida de un caso del modelo <i>Mike 21 SW</i> .....	52
Figura 6.13: Salidas del modelo <i>Mike 21 BW</i> . ....	53
Figura 6.14: Rosas de oleaje 3D, en el pie de la estructura.....	55
Figura 6.15: Probabilidad de excedencia de altura de ola, en el pie de la estructura.....	56
Figura 6.16: Identificación temporal de las tormentas.....	58
Figura 6.17: Duración tormentas. ....	58
Figura 6.18: Clima extremo al pie de la estructura.....	58
Figura 6.19: Permeabilidad del Enrocado.....	60
Figura 6.20: Ábacos de diseño hidráulico para el enrocado de protección. ....	61
Figura 6.21: Perfil Topobatimétrico del diseño.....	62
Figura 6.22: Francobordo vs probabilidad de excedencia de la altura de ola transferida. ....	63
Figura 6.23: Disposición general del diseño conceptual propuesto. ....	63
Figura 6.24: Geometría del diseño conceptual propuesto.....	64
Figura 6.25: Representación de la ola al pie de la estructura junto con la serie de tiempo de desnivelaciones.....	66
Figura 6.26: Instantes de tiempo de simulación con REEF 3D para la ola $H_{5\%}$ . ....	67
Figura 6.27: Instantes de tiempo de simulación con REEF 3D para la ola $H_{2\%}$ . ....	68
Figura 6.28: Instantes de tiempo de simulación con REEF 3D para la ola $H_{1\%}$ . ....	69
Figura 6.29: Instantes de tiempo de simulación con REEF 3D para la ola $H_{max}$ . ....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Vidas útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo (años). ....	20
Tabla 5.2: Riesgos máximos admisibles para la determinación, a partir de datos estadísticos, de valores característicos de cargas variables para fase de servicio y condiciones extremas. ....	21
Tabla 5.3: Cartas SHOA.....	27
Tabla 5.4: Distribuciones de probabilidades para clima extremo de oleaje.....	31
Tabla 5.5: Sobrepasos Admisibles .....	32
Tabla 5.6: Resumen del escalamiento para REEF 3D.....	34
Tabla 5.7: Resumen de la configuración del modelo REEF 3D. ....	35
Tabla 6.1: Amplitud y fase de las constantes armónicas. ....	43
Tabla 6.2: Cotas de marea para Horcón.....	44
Tabla 6.3: Valores de Marea Meteorológica para la localidad de Horcón. ....	45

Tabla 6.4: Resultados Wave Setup. ....	46
Tabla 6.5: Tabla de incidencia en aguas profundas, $D_p$ vs $H_{m0}$ .....	48
Tabla 6.6: Tabla de incidencia en aguas profundas, $T_p$ vs $H_{m0}$ . ....	48
Tabla 6.7: Tabla de incidencia en aguas profundas, $D_p$ vs $T_p$ .....	49
Tabla 6.8: Tabla de incidencia en el pie de la estructura, $D_p$ vs $H_{m0}$ . ....	54
Tabla 6.9: Tabla de incidencia en el pie de la estructura, $T_p$ vs $H_{m0}$ .....	54
Tabla 6.10: Tabla de incidencia en el pie de la estructura, $D_p$ vs $T_p$ .....	55
Tabla 6.11: Mayores alturas de ola con probabilidad de excedencia asociada, en el pie de la estructura. ....	56
Tabla 6.12: Listado de tormentas desde todos los frentes.....	57
Tabla 6.13: Ajustes de funciones de ploteo para el clima extremo. ....	57
Tabla 6.14: Clima extremo al pie de la estructura.....	58
Tabla 6.15: Parámetros utilizados en la formulación de Hudson para el diseño estructural..	59
Tabla 6.16: Parámetros utilizados en la formulación de Van der Meer para el diseño estructural. ....	59
Tabla 6.17: Nivel de daño de la estructura. ....	59
Tabla 6.18: Características de los elementos del enrocado.....	60
Tabla 6.19: Características de la ola de diseño. ....	61
Tabla 6.20: Francobordo (m) casos diseño hidráulico. ....	62
Tabla 6.21: Área ( $m^2$ ) casos diseño hidráulico.....	62
Tabla 6.22: Resultados de altura de la ola en el modelo. ....	65

## **RESUMEN**

Horcón es una localidad ubicada en la comuna de Puchuncaví, provincia y región de Valparaíso. Se caracteriza por tener una bahía orientada hacia el Norte, donde existe un grupo de viviendas que han sido afectadas por algunos eventos de marejadas, los cuales han generado daños en el frontis de sus casas junto con problemas de conexión vial y peatonal a las viviendas contiguas.

El objetivo del proyecto es proponer un enrocado de protección en el sector costero, y luego modelar con técnicas de *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, para comparar los valores de sobrepaso obtenidos numéricamente con aquellos obtenidos mediante la formulación del Manual Eurotop.

El estudio se realizó solo con datos públicos, como el Atlas de Oleaje (Universidad de Valparaíso, UV), las cartas náuticas de la zona (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA), junto con antecedentes obtenidos desde la Dirección de Obras Portuarias (DOP) y del *Sea Level Monitoring IOC*.

El enfoque metodológico a grandes rasgos fue, a partir de las características y necesidades de la zona definir las bases de diseño según el manual ROM (0.2-90, 1990), obteniendo un periodo de retorno de 50 años para el enrocado. Para la obtención del nivel de diseño, se hizo un traslado geométrico de la marea, desde Quintero a Horcón, para tener un año en la zona de estudio, permitiendo estimar la marea astronómica y meteorológica. Para el oleaje, se transfirieron las olas del Nudo Valparaíso (Atlas de Oleaje), utilizando *Mike 21 SW*, *Mike 21 BW* y la formulación de Goda (1985) hasta el pie de la estructura. Con la data del oleaje, se estimó el *Wave Setup* (para el nivel de diseño), clima medio en aguas profundas, clima medio en el pie del enrocado y clima extremo en el enrocado. Luego, se definieron las olas para el diseño de estabilidad y el hidráulico, las que junto con distintas pendientes analizadas, permitieron definir un perfil que cumpliera con el caudal admisible (tablas Eurotop), y que calzara con las características de la zona. Finalmente, con el perfil ya definido se ejecutaron casos en el modelo REEF 3D, que permite simular un canal de olas, por lo que se hizo un escalamiento espacial y temporal para obtener resultados, con el fin de comparar los caudales del modelo con los calculados con el Eurotop (Agency, 2018).

El oleaje en aguas profundas, con 35 años de data (Nudo Valparaíso, Atlas de oleaje de Chile, Universidad de Valparaíso), presentó una acumulación de datos en el tercer cuadrante, con periodos característicos del oleaje tipo *Swell* (mayores a 10 s), y alturas de olas predominantemente entre 2.0 m y 3.5 m.

El oleaje en el pie de la estructura, se presentó principalmente desde el WNW con alturas menores a los 1.10 m y con periodos del tipo *Swell*. Para el diseño hidráulico, se consideraron las olas transferidas  $H_{5\%}$  a la  $H_{1\%}$ . Respecto al clima extremo, se llevó a cabo con el Método POT (*Peak Over the Threshold*) y con distribuciones de ploteo de Weibull, dando una ola para el diseño de estabilidad con periodo de retorno de 50 años, igual a 1.60 m.

Con la altura de 1.60 m, junto con las 5 pendientes analizadas (de 1:1.50 a 1:2.50), se obtuvieron las características de la coraza,  $D_{n50} = 0.85$  m y de un  $M_{50} = 1.63$  T. Se escogió la

pendiente de 1:2.00 (V:H), porque calza de buena manera con las características topobatimétricas de la zona.

El diseño hidráulico, se llevó a cabo tomando el porcentaje del tiempo en que se supera el caudal admisible en el enrocado (obtenido de las tablas del Eurotop). Finalmente, se consideró la ola de diseño  $H_{2\%}$ , donde se propuso un enrocado con  $3 D_{n50}$  en la cresta, un muro de 1 m al final del enrocado y un francobordo de 1.69 m, que mantiene la cota en la que están las viviendas de la zona. Si bien, estadísticamente el 2% del tiempo se superara el caudal admisible (7 día al año aproximadamente), las casas están a 12 m del enrocado, por lo están no se verían afectadas en dichos casos.

Con el modelo REEF 3D, se ejecutaron casos considerando el diseño final calculado con Eurotop (Agency, 2018). Para la simulación con el modelo CFD, se realizó un escalamiento espacial ( $\lambda = 64$ ) y temporal ( $\tau = 8$ ), igualando el número de Reynolds real y el escalado, luego en el modelo se simulaban distintos casos de alturas de ola ( $H_{5\%}$ ,  $H_{2\%}$ ,  $H_{1\%}$  y  $H_{\max}$ ), los que fueron calibrados a través de un proceso iterativo. Con los casos calibrados, no se presentaron sobrepasos en la estructura, incluso para la simulación de  $H_{\max}$  (real = 1.534, escalada = 0.024 m), por lo que asumiendo que el modelo representa de buena manera, y al igual que un modelo físico, se podría inferir que la formulación de sobrepaso del Eurotop es conservadora, por lo que se recomendaría diseñar directamente con el caudal admisible. Cabe mencionar que el Manual Eurotop, debe ser el más utilizado para el diseño de enrocados, siendo esperable que sea conservador, y no proponga estructuras que no cumplan con el propósito de su diseño.

Como conclusión general, se podría decir que el enrocado propuesto cumple con los caudales admisibles del Manual Eurotop, solucionando la problemática generada por algunos eventos de marejadas sin un mayor impacto en el sitio, ya que se respetará el nivel de la calle y se aumentará su área útil para los peatones. Además, se podría decir que el manual Eurotop es conservador en sus formulaciones, ya que asumiendo que el modelo REEF 3D representa de buena manera la interacción ola-estructura, este no presentó sobrepaso alguno, incluso en la simulación de la máxima ola transferida.