



Memoria del proyecto para optar al Título de

Ingeniero Civil Oceánico

METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA COTA DE INUNDACIÓN A LO LARGO DE UN MUELLE EN PENETRACIÓN

Jean Pierre Alexander Toledo Alvarado

Junio 2021

APROBACIÓN

METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA COTA DE INUNDACIÓN A LO LARGO DE UN MUELLE EN PENETRACIÓN

Jean Pierre Alexander Toledo Alvarado

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Winckler Grez

Profesor guía

Francisco Molteni Pérez

Revisor

Felipe Caselli Benavente

Revisor

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.

Jean Pierre Toledo Alvarado

Patricio Winckler Grez

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo incondicional de mi familia y amigos. Porque siempre creyeron en mí, gracias:

Padres

Roberto Y Leonor

Hermano

Roberto Toledo Alvarado

Amigos

Cristian Rojas - Alfredo Olivares - Claudio Carmona - Enzo Peirano y Germán Quiroz

Compañera de vida, un amor incondicional

Isabel González Reyes

Amor de mi vida

Sofía Amunet Toledo González



“La vida es y seguirá siendo una ecuación incapaz de solución, pero contiene ciertos factores conocidos” - Nikolas Tesla

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GENERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	ALCANCE Y LIMITACIONES	12
4	MARCO TEÓRICO	13
4.1	MUELLE EN PENETRACIÓN	13
4.2	COTA DE INUNDACIÓN	15
4.3	NIVEL MEDIO DEL MAR	17
4.3.1	Proyecciones a nivel mundial	17
4.3.2	Registros en Chile	18
4.3.3	Proyecciones en Chile	19
4.4	MAREA ASTRONÓMICA	19
4.5	MAREA METEREOLÓGICA	20
4.6	ZONA DE ROMPIENTE	21
4.6.1	Tipos de rompientes	22
4.7	ONDAS DE INFRAGRAVEDAD	24
4.7.1	Ondas largas forzadas	24
4.7.2	Ondas largas libres	26
4.7.2.1	Ondas de contorno progresivo	26
4.7.2.2	Surf beat	26
4.7.3	Procesos que experimentan las ondas	26
4.8	WAVE SETUP	27
4.9	MODELOS MATEMÁTICOS DE OLEAJE	27
4.9.1	Modelos que promedian la fase	28
4.9.2	Modelos que resuelven la fase	28
4.10	MODELO NÚMÉRICO XBEACH	29
4.10.1	Ecuaciones de gobierno	30

4.10.1.1	Módulo Hidrodinámico-----	30
4.10.1.2	Módulo morfodinámico -----	33
4.11	FENÓMENO ENOS -----	34
4.12	MOVIMIENTOS VERTICALES DEBIDO A SISMOS EN CHILE -----	38
5	METODOLOGÍA-----	43
5.1	FUENTES DE INFORMACIÓN-----	43
5.1.1	Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC)-----	44
5.2	METODOLOGÍA POR OBJETIVOS -----	44
5.2.1	Objetivo 1: Analizar el efecto de cambio climático en el NMM y oleaje en costas chilenas, entre la región de Arica y Parinacota, y la región de Los Ríos. -----	44
5.2.2	Objetivo 2: Analizar la subsidencia y sollevamiento en la costa respecto a los antecedentes históricos de sismos ocurridos en Chile, entre la región de Arica y Parinacota, y la región de Los Ríos.-----	45
5.2.3	Objetivo 3: Efectuar un análisis de sensibilidad de la cota de inundación ante variaciones de H, T, Θ , Za, Zm y pendiente de playa.-----	45
5.2.3.1	Objetivo 4: Proponer criterios para calcular la cota del diseño de la plataforma para un muelle en penetración -----	51
6	RESULTADOS POR OBJETIVOS -----	53
6.1	OE1: PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA COTA DE INUNDACIÓN -----	53
6.2	OE2: RANGO DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS REGISTRADOS POR EFECTOS SÍSMICOS EN CHILE -----	54
6.3	OE3: A) RESULTADOS DE CALIBRACIÓN -----	55
6.3.1.1	MODÚLO MORFODINÁMICO-----	55
6.3.1.2	MÓDULO HIDRODINÁMICO -----	57
6.4	OE3: B) RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD -----	60
6.5	OE4: A) PROPUESTA METODOLOGICA -----	64
6.5.1.1	Factores generales que se incluyen en el diseño de la cota de inundación de un muelle 64	
6.5.2	Metodología de cálculo-----	66
6.6	OE4: B) EJEMPLIFICACIÓN SIMPLIFICADA DE LA METODOLOGÍA -----	67
6.6.1	Resultados-----	68

7	CONCLUSIONES	70
7.1	MORFODINÁMICA	70
7.2	HIDRODINÁMICA	70
7.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	71
7.4	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	71
8	REFERENCIAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Muelle caleta norte de Caleta Portales en penetración, Valparaíso, Chile.	13
Figura 2 - Modelo de cubierta con espacio de aire (air gap) respecto a la cresta de ola,	16
Figura 3 - Zona de rompientes	21
Figura 4 - Tipos de rompientes	23
Figura 9 - Régimen de Stokes y onda larga	29
Figura 5 - Región 3.4, área de medición de anomalías en la TSM,	35
Figura 6 - Modelo de propagación de ondas Kelvin y Rossby	37
Figura 7 - Patrón de movimientos cosísmicos verticales en un terremoto de subducción.	39
Figura 8 . Muelle Llico 1 mayo 2010 cubierto 1/3 de su longitud por el mar	42
Figura 10 - Perfil de playa analizado tras el temporal del 8 de agosto del 2015	43
Figura 11 - Evolución morfológica es la parte norte de Reñaca. La fotografía A fue tomada el 4 de agosto del 2015 y la B el 7 de agosto.	47
Figura 13 - Niveles de referencia de muelle Norte de Caleta Portales,	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - - Normativas chilenas comunes a utilizar para el diseño de un muelle	14
Tabla 2 - Fenómenos relacionados a inundaciones costeras	17
Tabla 3 - Estimación de aumento del NMM absoluto a nivel mundial debido a las emisiones de CO ₂ ,	18
Tabla 4 - Tipos de modelos para propagación de oleaje	28
<i>Tabla 5 - Influencia general del calentamiento global y ENOS en los parámetros de oleaje.</i>	38
Tabla 6 - Síntesis de cambios morfológicos y movimientos cosísmicos verticales, Quezada et al., 2010.	40
Tabla 7 - Análisis de sensibilidad para cada parámetro	49
Tabla 8 - Análisis de sensibilidad de nivel del mar respecto a fenómeno ENOS y cambios de fondo	50

Tabla 9 - Ondas de distintas frecuencias que afectan NMM	53
Tabla 10 - Rangos de cambios morfológicos en algunas regiones de Chile	54
<i>Tabla 11 – Resultados de calibración del modelo numérico Xbeach respecto a los parámetros facua y break.....</i>	<i>55</i>
Tabla 12 . Volúmenes de erosión modelados similares al medido	56
Tabla 13 - Relación entre Hrms de onda larga y onda corta para profundidades mayores y menores de 5 metros.....	58
Tabla 14 - Vida útil para tipos de obra, adaptado de ROM 0.2 - 90	65
Tabla 15 - Valores de diseño para determinar la cota de inundación de un muelle.....	66
Tabla 16 - Valores propuesto para análisis de metodología.....	68
Tabla 17 - Cota de inundación para cada periodo de retorno de muelle Caleta portales	68

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1 - Resumen modelo Xbeach	30
Esquema 2 . Metodología para proponer una metodología de cálculo de la cota de inundación	51
Esquema 3 . Análisis de cada parámetro respecto a la función objetivo	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1 – Índice ENOS</i>	<i>36</i>
<i>Gráfico 2 - Volumen erosionado en perfil de playa Reñaca.....</i>	<i>46</i>
<i>Gráfico 3 - Datos de salida de modelo SWAN a 20 metros de profundidad de playa Reñaca y datos del nivel del mar</i>	<i>48</i>
<i>Gráfico 4 - Perfil batimétrico ideal de playa con pendiente de 8°, representativa a Playa Reñaca</i>	<i>48</i>
<i>Gráfico 5 -Simulación perfil Playa Reñaca mejor ajustado con facua 0,425 y break Roelvink1</i>	<i>56</i>
<i>Gráfico 6 – Variación vertical entre perfil de arena inicial y erosionado. Perfil mejor ajustado con facua 0,425 y break Roelvink1.....</i>	<i>56</i>
<i>Gráfico 7 - Envoltente de ondas cortas del evento extremo de oleaje (05/08/15 – 07/08/15) calibrado.....</i>	<i>57</i>
<i>Gráfico 8 - Envoltente de ondas larga del evento extremo de oleaje (05/08/15 – 07/08/15) calibrado.....</i>	<i>57</i>
<i>Gráfico 9 – Relación de Hrms entre onda corta y larga del evento extremo de oleaje (05/08/15 – 07/08/15)</i>	<i>58</i>

<i>Grafico 10 - Velocidad orbital de la onda corta para el modo surfbeat en 1 y 2 dimensiones, y para el modo estacionario 1D</i>	<i>59</i>
<i>Grafico 11 - Velocidad orbital de la onda larga para el modo surfbeat en 1 y 2 dimensiones, y para el modo estacionario 1D</i>	<i>59</i>
<i>Gráfico 12 - Análisis de sensibilidad de nivel de marea astronómica en función objetivo.....</i>	<i>60</i>
<i>Gráfico 13 - Análisis de sensibilidad del periodo de ola en función objetivo</i>	<i>60</i>
<i>Gráfico 14 - Análisis de sensibilidad de dirección de ola en función objetivo.....</i>	<i>61</i>
<i>Gráfico 15- Análisis de sensibilidad de nivel de marea astronómica en función objetivo.....</i>	<i>61</i>
<i>Gráfico 16 - Análisis de sensibilidad de nivel marea meteorológica en función objetivo.....</i>	<i>62</i>
<i>Grafico 17 . Análisis de sensibilidad del fenómeno ENOS y cambios de fondo meteorológica en función objetivo.....</i>	<i>62</i>
<i>Grafico 18 - Análisis de sensibilidad de la pendiente del perfil en función objetivo.....</i>	<i>63</i>
<i>Gráfico 19 – Cota de inundación del muelle Caleta Portales, Valparaíso con la metodología propuesta.....</i>	<i>69</i>

RESUMEN

En el presente trabajo se propone una metodología de cálculo para determinar la cota de inundación a lo largo de un muelle en penetración, con el fin de realizar recomendaciones en el diseño hidráulico de estas estructuras costeras. Esta metodología contempla nivel medio del mar, ondas de infragravedad, ENOS, marea astronómica, marea meteorológica y cambios de fondo de origen sísmico. Se utilizó el modelo numérico Xbeach para caracterizar el evento extremo de oleaje entre el 5 y 7 de agosto del 2015 frente a las costas de playa Reñaca. Viña del Mar. Se analizó su comportamiento hidrodinámico y morfodinámico costero al validar el volumen de erosión simulado respecto al medido con GPS diferencial por Agredano et al., 2015 en un perfil batimétrico de la playa Reñaca.

El modelo numérico Xbeach se calibro con los parámetros *facua* y *break* en 119 simulaciones respecto a los resultados del GPS diferencial. Posteriormente un análisis de sensibilidad en los parámetros de altura, periodo y dirección de ola, niveles del mar por efecto ENOS y cambios de fondo, con el objetivo de comprender el nivel de importancia de sus efectos en la erosión.

Con la caracterización morfodinámica calibrada se analizó el comportamiento hidrodinámico del evento extremo, determinando que la envolvente de onda larga proveniente de aguas profundas hasta los 5 metros de profundidad resulto en promedio el 12% de la onda corta (Hrms), sin embargo, en menores profundidades la altura de la onda larga aumentó hasta un 60% debido a la disipación del oleaje. Posteriormente, en el análisis de sensibilidad se comprobó que la acción conjunta de la onda larga y oleaje en un perfil de playa es sumamente importante. La erosión en eventos extremos dependerá principalmente de los siguientes parámetros: a) Pendiente del perfil de playa, b) Altura y dirección de ola, y c) Acción de la onda larga que es parcialmente reflejada hacia aguas profundas. Finalmente, se propone una metodología basada en la superposición de las ondas que intervienen en las variaciones del nivel medio del mar, más un factor de seguridad asociado al espacio de aire entre la cresta máxima de ola y la plataforma de la estructura.