



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

ESTUDIO DEL SOBREPASO EN AVENIDA PERÚ MEDIANTE EL SOFTWARE CFD - olaFOAM

Stephanie Carol Fritz Muscat

Octubre 2018

APROBACIÓN

ESTUDIO DEL SOBREPASO EN AVENIDA PERÚ MEDIANTE EL SOFTWARE CFD - olaFOAM

Stephanie Carol Fritz Muscat

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
PATRICIO WINCKLER GREZ Profesor Guía	_____	_____
IGNACIO BEYÁ MARSHALL Revisor 1	_____	_____
PABLO POZO ROJAS Revisor 2	_____	_____

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.

STEPHANIE FRITZ MUSCAT
Alumna Memorista

PATRICIO WINCKLER GREZ
Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi pololo Pablo Abarca, mi gran compañero de vida durante este largo camino. Muchas gracias por tu paciencia, tus retos y consejos, tu apoyo incondicional, tu sonrisa día a día, por amarme como lo haces.

A mis papás, Alfredo Fritz y Marianela Muscat, por su cariño y apoyo constante, por acompañarme siempre durante este largo proceso y ser más compañeros que padres. A mi hermana, Daryl Fritz, por ser mi partner día a día.

A mis abuelos, Carlos Muscat y Marianela Napis, por ser los mejores abuelos del mundo, por hacerme pasar rabias con sus porfías o, simplemente, sacarme una sonrisa con sus locuras. A toda mi familia, por su preocupación durante toda mi etapa estudiantil. A esas personas importantes, Nena, Yeya, Nino y tata Rodo, estoy segura de que guiaron mis pasos y que cuidan de mí desde donde estén; en especial a Mariluz, que estuvo apoyándome y alentándome durante todo el proceso, pero no está presencialmente conmigo para culminarlo. A mi segunda familia, Familia Abarca Reyes, por abrirme las puertas de su casa, por tanta preocupación y tantos lindos momentos vividos.

A mis amigos Leonardo Mascareño, Fernanda Perez y Felipe Maldonado por el apoyo brindado por cada uno de ustedes en momentos difíciles, por tantas sonrisas y abrazos en momentos alegres.

A la gente del kiosko, Erwin, tía Clari, Tía Sole y su familia, por brindarme “calor de hogar” dentro del día universitario, por sus palabras de aliento cuando llegaba abatida por un mal día, o por alegrarse con mis logros. A las tías de aseo, por su preocupación, sonrisas y abrazos en todo momento. Todos ustedes son lo más valioso que me llevo desde la UV.

A mi profesor guía, Dr. Patricio Winckler, por su paciencia al trabajar conmigo en este proyecto, por sus consejos y su ayuda cada vez que la necesité. A mis compañeros de carrera, con quienes se generó una red de apoyo y compañerismo.

Agradecer también a la Dirección de Obras Portuarias, en especial a la Sección de Ingeniería por la oportunidad de realizar mi Práctica Profesional. A Rodrigo Filippi por su apoyo como Encargado de Práctica, a Soledad Hidalgo y Pablo Pozo por su ayuda profesional en el desarrollo de este Proyecto de Título. A Daniela Arregui, Pablo Muñoz, don José González y Raúl Oberreuter por ser grandes personas, por hacer de mi estadía en la DOP un período inmensamente grato y entregarme hermosos recuerdos. A Ignacio Beyá del Instituto Nacional de Hidráulica por su ayuda técnica y profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3	ALCANCES Y LIMITACIONES	4
3.1	ALCANCES.....	4
3.2	LIMITACIONES.....	4
4	ANTECEDENTES	6
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	6
4.2	PROYECTO “DISEÑO CONSERVACIÓN DEFENSAS COSTERAS SECTORES AVENIDA PERÚ Y JUAN DE SAAVEDRA”.....	10
4.2.1	PERFIL TOPO - BATIMÉTRICO.....	11
4.2.2	CONDICIONES DE OLEAJE.....	12
4.2.3	NIVEL DE MAREA.....	13
4.2.4	MODELOS ENSAYADOS.....	14
4.2.5	MODELO FÍSICO BIDIMENSIONAL.....	17
4.2.6	CUANTIFICACIÓN DEL VOLÚMEN DE SOBREPASO.....	20
4.2.7	CAUDAL DE SOBREPASO ADMISIBLE.....	21
5	MARCO TEÓRICO	24
5.1	OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.....	24
5.1.1	TIPOLOGÍAS DE PROTECCIÓN.....	24
5.1.2	ELEMENTOS DE PROTECCIÓN COSTERA.....	25
5.1.3	SOBREPASO EN ESCOLLERAS TIPO TALUD.....	28
5.2	MODELACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA.....	33
5.2.1	MODELOS FÍSICOS.....	33
5.2.2	MODELOS NUMÉRICOS.....	36
5.3	OpenFOAM - SOLUCIONADOR olaFOAM.....	39
5.3.1	HIPÓTESIS DE VISCOSIDAD TURBULENTO Y ECUACIONES RANS.....	39
5.3.2	FLUJO EN MEDIOS POROSOS.....	41
5.3.3	ECUACIONES DE GOBIERNO DEL MODELO olaFOAM.....	43
5.3.4	MODELO DE TURBULENCIA $k-\epsilon$	45
5.3.5	GENERACIÓN DE OLEAJE.....	46
5.3.6	ANÁLISIS ESPECTRAL.....	49
6	METODOLOGÍA	51

6.1	PRE - PROCESO	52
6.1.1	CONDICIONES DE OLEAJE.....	52
6.1.2	PROPIEDADES DE LAS ESCOLLERAS.....	53
6.1.3	CONDICIÓN INICIAL DEL NIVEL DE AGUA.....	55
6.1.4	ESCALADO DE LOS MODELOS	55
6.1.5	GENERACIÓN DEL MALLADO.....	59
6.1.6	CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.....	62
6.2	PROCESO.....	65
6.2.1	TIEMPO DE SIMULACIÓN DEL MODELO.....	65
6.2.2	EJECUCIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MALLADO.....	65
6.2.3	EJECUCIÓN DEL MODELO	66
6.3	POST - PROCESO.....	67
6.3.1	VALIDACIÓN DEL OLEAJE GENERADO	67
6.3.2	ESTABILIDAD DEL MODELO NUMÉRICO – SITUACIÓN DIAGNÓSTICO.....	70
6.3.3	CÁLCULO DEL SOBREPASO	71
6.3.4	TRANSFORMACIÓN DE RESULTADOS DE MODELO A PROTOTIPO	73
7	RESULTADOS.....	74
7.1	VELOCIDADES MÁXIMAS TOLERABLES.....	74
7.2	SIMULACIONES NUMÉRICAS DE OBRAS DE PROTECCIÓN	80
7.2.1	SITUACIÓN DIAGNÓSTICO - EB8	80
7.2.2	SITUACIÓN ALTERNATIVA 01 - EB8.....	84
7.2.3	SITUACIÓN ALTERNATIVA 02 - EB8.....	88
7.2.4	SITUACIÓN ALTERNATIVA 03 - EB8.....	92
7.2.5	SITUACIÓN ALTERNATIVA OPTIMIZADA - EB8.....	96
7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE ALTERNATIVAS	100
7.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELOS NUMÉRICOS CFD Y OTROS MÉTODOS	102
7.4.1	COMPARACIÓN ENTRE MODELOS NUMÉRICOS Y FÍSICOS	102
7.4.2	COMPARACIÓN ENTRE MODELOS NUMÉRICOS Y EUROTOP	105
8	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	107
8.1	CONCLUSIONES	107
8.2	TRABAJOS FUTUROS.....	112
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
10	ANEXOS.....	115
10.1	PROYECTO “DISEÑO CONSERVACIÓN DEFENSAS COSTERAS SECTORES AVENIDA PERÚ Y JUAN DE SAAVEDRA”	115
10.2	METODOLOGÍA.....	116

10.2.1	PRE - PROCESO.....	116
10.2.2	PROCESO.....	125
10.2.3	POST – PROCESO	129
11	APÉNDICE	131
11.1	APÉNDICE A: COMPARACIÓN DE VALORES DE POROSIDADES DE LA ESCOLLERA.....	131
11.2	APÉNDICE B: COMPARACIÓN ENTRE EB1 Y EB8 PARA SITUACIÓN ALTERNATIVA 03.....	133
11.2.1	SITUACIÓN ALTERNATIVA 03 - EB1.....	133
11.2.2	COMPARACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS.....	137

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Escenarios de diseño para el sobrepaso (EB).....	13
Tabla 5.1: Tipos de modelos numéricos de flujo potencial	36
Tabla 5.2: Tipos de modelos numéricos aplicados en la interacción oleaje - estructura ...	38
Tabla 5.3: Parámetros de fricción a y b recomendados para distintos materiales.....	43
Tabla 5.4: Parámetros de descripción espectral	50
Tabla 6.1: Parámetros espectrales de modelación física - Estado de mar v/s Registro....	52
Tabla 6.2: Valores de D_{50} para distintas capas de la escollera para prototipo y modelo ...	54
Tabla 6.3: Resumen condiciones iniciales y de borde de los modelos	64
Tabla 7.1: Constantes utilizadas en ecuación de balance de fuerzas	76
Tabla 7.2: Parámetros utilizados en los diferentes balances de fuerza	77
Tabla 7.3: Comparación de resultados - Modelos numéricos v/s Modelos físicos INH ...	102
Tabla 7.4: Comparación resultados de modelos numéricos con formulaciones EurOtop	105
Tabla 10.1: Valores de Hm0 asociados a distintos períodos de retorno (Pr).....	115
Tabla 11.1: Variación de caudal medio de sobrepaso respecto a $\phi = 0.5$	132

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4.1: Ubicación de Avenida Perú	6
Ilustración 4.2: Rocas de la escollera de protección - Avenida Perú	7
Ilustración 4.3: Talud de escollera de protección - Avenida Perú	8
Ilustración 4.4: Muro de contención - Avenida Perú	8
Ilustración 4.5: Miradores instalados en el paseo costero - Avenida Perú	9
Ilustración 4.6: Perfiles representativos de Avenida Perú.....	11
Ilustración 4.7: Perfil seleccionado para el estudio – Prototipo.....	12
Ilustración 4.8: Elevación media mundial del nivel del mar.....	14
Ilustración 4.9: Obra actual o situación de diagnóstico – Prototipo.....	15
Ilustración 4.10: Alternativa 01 (Alt 01) – Prototipo.....	15
Ilustración 4.11: Alternativa 02 (Alt 02) – Prototipo.....	16
Ilustración 4.12: Alternativa 03 (Alt 03) – Prototipo.....	16
Ilustración 4.13: Alternativa Optimizada (Alt Opt) – Prototipo.....	17
Ilustración 4.14: Canal de olas INH - Vista en dirección a la paleta generadora.....	17
Ilustración 4.15: Canal de olas INH - Vista en dirección a la obra	18
Ilustración 4.16: Paleta generadora de oleaje	18
Ilustración 4.17: Equipo generador de oleaje	19
Ilustración 4.18: Ordenador de control	19
Ilustración 4.19: Sonda de agitación	19
Ilustración 4.20: Plataforma de observación – Vistas frontal y posterior.....	20
Ilustración 4.21: Sistema recolector de agua de sobrepaso	21
Ilustración 4.22: Límites de sobrepaso para personas y vehículos.....	22
Ilustración 4.23: Límites generales de sobrepaso para bienes y propiedades detrás de una defensa costera	22
Ilustración 4.24: Límites de sobrepaso para diseño estructural de rompeolas, defensas costeras, diques y presas	23
Ilustración 5.1: Elementos prefabricados	26
Ilustración 5.2: Valores de porosidad para diferentes elementos	27
Ilustración 5.3: Especificaciones técnicas del dolo.....	28
Ilustración 5.4: Situación base de protección costera tipo talud	30
Ilustración 5.5: Valores para γf según elemento	31
Ilustración 5.6: Protección costera tipo talud con berma	32
Ilustración 5.7: Definición del promediado del volumen - VARANS	43
Ilustración 6.1: Esquema de metodología por etapas.....	51
Ilustración 6.2: Perfil batimétrico – Modelo numérico	56
Ilustración 6.3: Modelo situación Diagnóstico – Modelo numérico.....	56
Ilustración 6.4: Alternativa 1 (Alt 01) – Modelo numérico	57
Ilustración 6.5: Alternativa 2 (Alt 02) – Modelo numérico	57
Ilustración 6.6: Alternativa 3 (Alt 03) – Modelo numérico	58
Ilustración 6.7: Alternativa Optimizada (Alt Opt) – Modelo numérico.....	58
Ilustración 6.8: Capas del modelo Diagnóstico diseñadas en <i>Blender</i>	59
Ilustración 6.9: Ordenamiento de vértices del prisma generado por <i>blockMesh</i>	61
Ilustración 6.10: Comparación de señales de desnivelación del modelo físico y modelo numérico.....	67
Ilustración 6.11: Comparación espectral entre registros de modelo físico y modelo numérico	68

Ilustración 6.12: Comparación de Hm0 según sensores para modelo físico y modelo numérico.....	68
Ilustración 6.13: Correlación entre desnivelaciones del modelo físico y modelo numérico	69
Ilustración 6.14: Cálculo de ventanas en modelo Diagnóstico.....	70
Ilustración 6.15: Estabilidad en paleta generadora – Análisis espectral y estadístico.....	71
Ilustración 6.16: Ubicación extracción de resultados de flujos.....	72
Ilustración 7.1: Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en una persona	74
Ilustración 7.2: Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en un auto	74
Ilustración 7.3: Comparación de velocidades máximas tolerables bajo situación de empuje	78
Ilustración 7.4: Velocidades críticas para personas con diversas masas	79
Ilustración 7.5: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Diagnóstico.....	80
Ilustración 7.6: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Diagnóstico.....	80
Ilustración 7.7: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Diagnóstico.....	81
Ilustración 7.8: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Situación Diagnóstico	83
Ilustración 7.9: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Alternativa 01	84
Ilustración 7.10: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Alternativa 01.....	84
Ilustración 7.11: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Alternativa 01.....	85
Ilustración 7.12: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Situación Alternativa 01	87
Ilustración 7.13: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Alternativa 02.....	88
Ilustración 7.14: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Alternativa 02.....	88
Ilustración 7.15: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Alternativa 02.....	89
Ilustración 7.16: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Situación Alternativa 02	91
Ilustración 7.17: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Alternativa 03.....	92
Ilustración 7.18: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Alternativa 03.....	92
Ilustración 7.19: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Alternativa 03.....	93
Ilustración 7.20: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Situación Alternativa 03	95
Ilustración 7.21: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Alternativa Optimizada..	96
Ilustración 7.22: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Alternativa Optimizada....	96
Ilustración 7.23: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Alternativa Optimizada	97
Ilustración 7.24: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Situación Alternativa Optimizada	99
Ilustración 7.25: Comparación de volumen acumulado en modelos estudiados.....	100
Ilustración 7.26: Comparación de velocidades máximas de sobrepaso de cada situación	101
Ilustración 7.27: Resultados porcentuales de variación de sobrepaso - Modelos numéricos v/s Modelos físicos INH	104
Ilustración 7.28: Comparación de resultados - Modelos numéricos v/s EurOtop	106
Ilustración 10.1: Resultados de propagación en nodo frente a Avenida Perú.....	115
Ilustración 10.2: Configuración de <i>waveDict</i>	116
Ilustración 10.3: Configuración de <i>porosityDict</i>	117
Ilustración 10.4: Configuración de <i>setFieldsDict</i>	117
Ilustración 10.5: Configuración de librería <i>blockMeshDict</i>	119
Ilustración 10.6: Configuración de parámetro de "alpha.water"	121
Ilustración 10.7: Configuración de parámetro " <i>U</i> "	122
Ilustración 10.8: Configuración de parámetro de presión	123
Ilustración 10.9: Configuración de parámetro de porosidad	124

Ilustración 10.10: Configuración de librería de control del modelo <i>controlDict</i>	125
Ilustración 10.11: Configuración para la generación del mallado del modelo	126
Ilustración 10.12: Configuración para verificación de mallado y generación de condiciones iniciales del modelo.....	126
Ilustración 10.13: Verificación del mallado del modelo	127
Ilustración 10.14: Configuración de la ejecución del modelo	128
Ilustración 10.15: Posición sondas - Modelo numérico.....	129
Ilustración 10.16: Estabilidad en Sensor 02 – Análisis espectral y estadístico	129
Ilustración 10.17: Estabilidad en Sensor 03 – Análisis espectral y estadístico	130
Ilustración 10.18: Configuración de extracción de resultados <i>flowSobrepaso</i>	130
Ilustración 11.1: Comparación volumen acumulado modelos con distintas porosidades	131
Ilustración 11.2: Caudales medios en modelos con distintas porosidades	132
Ilustración 11.3: Volumen de sobrepaso acumulado - Situación Alternativa 03 Caso EB1	133
Ilustración 11.4: Caudal de sobrepaso instantáneo - Situación Alternativa 03 Caso EB1	134
Ilustración 11.5: Campos de velocidades peak de sobrepaso - Modelo Alternativa 03 Caso EB1.....	134
Ilustración 11.6: Velocidades de sobrepaso de eventos peaks - Modelo Alternativa 03 Caso EB1.....	136
Ilustración 11.7: Comparación de volumen acumulado – Caso EB1 y EB8.....	137
Ilustración 11.8: Comparación caudal de sobrepaso instantáneo – Caso EB1 y EB8	138
Ilustración 11.9: Comparación velocidades máximas de sobrepaso – Caso EB1 y EB8	138

RESUMEN

A raíz de los últimos eventos de marejadas que incidieron en las costas de Chile, se observaron daños considerables en las estructuras de protección costera de la comuna de Viña del Mar, específicamente en el tradicional paseo costero de la Avenida Perú. Estos daños se generaron por los altos flujos de sobrepaso, que ponen en riesgo la seguridad de peatones y de la infraestructura urbana (Municipio de Viña del Mar, 2015). Debido a esta problemática, la Dirección de Obras Portuarias (DOP) encargó al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) los estudios de alternativas de mejoramiento del borde costero de la Avenida Perú. Estos estudios son abordados en el proyecto "Diseño conservación defensas costeras sectores avenida Perú y Juan de Saavedra" (INH, 2016a), el cual contempló la modelación física de la situación actual, además de diferentes alternativas de mejoramiento de la protección costera de la Avenida Perú, y la determinación de una alternativa optimizada. A modo de complementar y comparar los resultados del estudio mencionado anteriormente, se generó el presente proyecto de investigación, que buscó realizar simulaciones numéricas de los escenarios modelados por el INH por medio del software OpenFOAM y su solver olaFOAM.

Al comparar los porcentajes de variación de sobrepaso de las diferentes alternativas de mejoramiento respecto a la situación Diagnóstico, se concluye que la situación con mayor eficiencia al momento de reducir el caudal de sobrepaso es la Alternativa 03 con un porcentaje de reducción de un 59% en el modelo numérico, y un 61.6% en el modelo físico.

De lo anteriormente mencionado, se infiere que al aumentar el ancho de la berma e implementar un medio poroso eficiente (Alternativa Optimizada), se genera una disminución importante del caudal de sobrepaso. Sin embargo, cualquier modificación en el muro de contención, ya sea aumento en la cota de coronamiento (60 [cm]) o instalación de verteolas, se pueden aplicar como medidas complementarias a la mejora realizada en la escollera (Alternativa 03). Por otro lado, los cambios de pendiente del talud generan un aporte marginal en la reducción del sobrepaso respecto a los aportes que entregan las dos mejoras indicadas previamente.

Del análisis realizado con los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas en el solver olaFOAM, se concluye que, desde el punto de vista numérico de la reducción del sobrepaso respecto a la situación Diagnóstico, se recomienda la Alternativa 03 como opción de mejoramiento para el borde costero de la Avenida Perú, ya que es la que presenta un mayor porcentaje de reducción de sobrepaso. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la modelación física por el INH.

Respecto a la utilización de ambos tipos de modelaciones, se concluyó que la modelación numérica es complementaria a la modelación física, ya que con la primera se obtiene una mayor variedad de resultados, producto del control temporal y espacial de la simulación. Esto se justifica por los altos costos de construcción y de equipos instrumentales a utilizar en la modelación física. Además, ambos tipos de modelos pueden utilizarse en conjunto como un modelo híbrido para aprovechar los beneficios de cada uno y generar una conectividad entre modelos, es decir, el modelo numérico se podría utilizar para proporcionar datos de entrada al modelo físico, y los datos de salida de este último modelo puede proporcionar una entrada al mismo u otro modelo numérico.