



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE OPENFOAM PARA LA
MODELACIÓN DE UN CANAL DE ONDAS EN 2D

Carlos Contreras Ruiz

Octubre de 2020

Calibración y validación de OpenFOAM para la modelación de un canal de ondas en 2D

Carlos Contreras Ruiz

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Patricio Winckler Profesor guía	_____	_____
Matías Quezada Revisor	_____	_____
David Poblete 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.

CARLOS CONTRERAS RUIZ
Alumno Memorista

PATRICIO WINCKLER GREZ
Profesor Guía

A mis abuelos

Agradecimientos

Este documento es el resultado de muchas horas de investigación y esfuerzo por parte del autor. Pero nada de esto habría sido posible sin mi familia, que desde niño me ha dado apoyo, motivación y cariño para que pueda salir a descubrir el mundo. Agradezco especialmente a mis abuelos Luz y José por entregarme los valores y formarme como una persona que se esfuerza por hacer siempre lo correcto. Agradezco a Dios por darme la curiosidad y motivación por aprender. Agradezco a mis tíos y primos porque me han acompañado en los altos y bajos a lo largo de la vida.

Vanessa, te agradezco por escucharme con interés tantas horas hablar de ecuaciones, modelos numéricos y herramientas que no pertenecen a tu área de estudio. Eres uno de los tesoros más preciados que me ha presentado la vida. Te amo.

Agradezco a mi mamá por mostrarme que la motivación y el esfuerzo son la herramienta fundamental para traer los sueños a la realidad. Agradezco a mi papá por enseñarme lo difícil que es derrotar a una persona que no se rinde.

A lo largo de mis años de estudio he conocido a muchos profesores que me han inspirado y formado. Álvaro Valdivia ha sido uno de ellos, una persona brillante, que me mantuvo pegado a libros, guías y cuadernos mientras aprendía cálculo y ecuaciones diferenciales, ha sido un gusto conocerlo. También he tenido el placer de conocer a Patricio Winckler, una gran persona y gran profesional. Agradezco a Patricio por haberme acompañado en el aprendizaje de OpenFOAM, sin su ayuda esta memoria no habría sido posible.

Agradezco la dedicación, guía y apoyo de los profesores Matías Quezada y David Poblete, quienes participaron en la revisión de este documento. Contribuyeron en gran parte a la mejora en su calidad.

Índice general

1. Introducción	19
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivos	21
1.2.1. Objetivo general	21
1.2.2. Objetivos específicos	21
1.3. Alcances y limitaciones	21
2. Fundamento teórico	23
2.1. Estado del arte	23
2.1.1. Modelos numéricos para el estudio del oleaje	23
2.1.2. OpenFOAM	24
2.1.3. olaFlow	25
2.1.4. Python	25
2.1.5. Canales de ondas	28
2.2. Diagramas de flujo	30
2.3. El oleaje	31
2.4. Enfoques para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes	37
2.4.1. DNS	37
2.4.2. LES	38
2.4.3. RANS	38
2.4.4. DES	38
3. Materiales y métodos	39
3.1. Descripción general del modelo	39
3.1.1. Ecuaciones de gobierno de OpenFOAM	39
3.1.2. Modelos para la resolución de la turbulencia	41
3.1.3. Método de volumen finito	45
3.1.4. Método VOF	45
3.2. Configuración del modelo	45
3.2.1. Directorios del modelo	46
3.2.2. Condiciones de borde y propiedades físicas	48
3.2.3. Configuración del mallado	52
3.2.4. Tiempo de modelación	53
3.2.5. Descomposición del dominio	54
3.2.6. Esquemas de discretización	55
3.2.7. Esquemas de solución	58
3.2.8. Generación de ondas en OpenFOAM	58
3.3. Ensayos de calibración	60
3.3.1. Análisis de sensibilidad de la malla	61

3.4.	Desarrollo de herramientas para el análisis de datos	62
3.5.	Casos de estudio	67
3.5.1.	Oleaje progresivo	67
3.5.2.	Oleaje estacionario	69
3.5.3.	Estabilidad temporal de los casos de estudio	69
3.5.4.	Análisis del dominio	70
3.5.5.	Asomeramiento del oleaje	70
3.5.6.	Comportamiento del oleaje en la interacción con estructuras	72
4.	Resultados	79
4.1.	Onda progresiva (P-1-2)	79
4.2.	Onda estacionaria (E-1-2)	82
4.3.	Resolución temporal (P-4)	84
4.4.	Análisis de sensibilidad del dominio (E-3)	86
4.5.	Análisis del comportamiento de OpenFOAM en asomeramiento (A)	87
4.6.	Interacción del oleaje con una estructura (M-1)	89
5.	Conclusiones y futuros trabajos	91
5.1.	Conclusiones	91
5.2.	Futuros trabajos	94
	Anexos	99
A.	Otras teorías de ondas	101
B.	Resultados para el análisis en asomeramiento	103
C.	Deducción de las ecuaciones de Navier-Stokes	111
C.1.	Teorema de transporte de Reynolds	111
C.2.	Teorema de la divergencia	112
C.3.	Ecuación de continuidad	112
C.4.	Ecuación de conservación de momento	113
C.5.	Fuerzas que actúan sobre un volumen de control	115
C.6.	Ecuaciones de Navier-Stokes	116
D.	Consideraciones en la calibración del modelo	119
D.1.	Porosidad de los materiales	119
D.2.	Métodos iterativos para resolver ecuaciones	120
D.2.1.	PBiCG	120
D.2.2.	Método GAMG	120
D.2.3.	Método Gauss-Siedel	121
D.2.4.	Método DILU	121
E.	Scripts para la automatización de procesos	123
E.1.	Scripts para el procesamiento de datos	123
E.1.1.	Script 01	123
E.1.2.	Script 02	128
E.2.	Scripts para el análisis de las presiones	137
E.2.1.	Script presiones.py	138
E.2.2.	Script spresiones.py	140
E.2.3.	Script desnivelaciones.py	144

E.2.4.	Script stokesII.py	147
E.2.5.	Script final.py	156
E.3.	Scripts para configurar OpenFOAM	166
E.3.1.	TLO	166
E.3.2.	Creador de sensores VOF	170
E.3.3.	Creador de blockMeshDict	172
E.3.4.	Generador del archivo blockMeshDict para dos parches laterales . . .	174

Índice de figuras

2.1.	entorno de desarrollo Spyder para Python.	26
2.2.	significado de los símbolos para la construcción de diagramas de flujo.	30
2.3.	clasificación de los distintos tipos de ondas presentes en el océano con respecto al periodo.	31
2.4.	movimiento orbital de las partículas de la onda para distintas condiciones de profundidad relativa.	32
2.5.	representación del oleaje en aguas profundas mediante la TLO; d corresponde a la profundidad con respecto al nivel medio, a es la amplitud y L es la longitud de onda.	33
2.6.	curva de alturas de ola en el espacio para una onda estacionaria según la TLO. L corresponde a la longitud de onda y H_i es la altura de onda incidente.	35
2.7.	rango de aplicabilidad de las teorías de onda.	37
3.1.	directorío principal de OpenFOAM, sus respectivos archivos y subcarpetas.	46
3.2.	subcarpeta 0.org de un caso en OpenFOAM.	46
3.3.	directorío que almacena las principales constantes del modelo.	47
3.4.	directorío system de OpenFOAM.	47
3.5.	ejemplo de una malla estructurada versus mallas no estructuradas.	52
3.6.	celda polihédrica.	53
3.7.	archivo para la configuración de descomposición del dominio.	54
3.8.	propiedades para configurar los esquemas de tiempo y gradientes en OpenFOAM.	55
3.9.	esquemas de divergencia presentes en los casos modelados.	57
3.10.	propiedades para la configuración de los esquemas de solución.	58
3.11.	pasos ascendentes por cero.	62
3.12.	diagrama de flujo del primer script.	63
3.13.	diagrama de flujo del segundo script.	64
3.14.	diagrama de flujo para el cálculo de la onda de Stokes II.	66
3.15.	dimensiones del canal de ondas modelado para oleaje progresivo, donde el NMA es el nivel medio del agua.	68
3.16.	configuración del canal de olas para analizar la reflexión mediante oleaje estacionario. NMA es el nivel medio del agua.	69
3.17.	configuración utilizada en el modelo numérico para analizar la convergencia temporal. a) se utiliza para oleaje progresivo y b) para oleaje estacionario.	69
3.18.	aumento de las dimensiones del canal para analizar el comportamiento de OpenFOAM.	70
3.19.	disposición de los principales sensores de desnivelación en el canal bidimensional modelado en OpenFOAM.	71

3.20.	configuración del canal de ondas utilizado por Kamath et al. (2017) en las simulaciones numéricas. NMA es el nivel medio del agua en el canal.	71
3.21.	esquema de la sección del muelle de Blankenberge (Bélgica).	72
3.22.	configuración experimental del caso de estudio.	73
3.23.	configuración utilizada en OpenFOAM para modelar la interacción del oleaje con una estructura.	73
3.24.	detalle de la distribución de los sensores de presión. SWL corresponde a la superficie libre.	74
3.25.	caso P01 (Tabla 3.17), desnivelaciones en el tiempo para el sensor al inicio de la rampa (a), alturas de ola en el sensor(b).	75
3.26.	caso P02 (Tabla 3.17), desnivelaciones en el tiempo para el sensor al inicio de la rampa (a), alturas de ola en el sensor(b).	75
3.27.	caso P03 (Tabla 3.17), desnivelaciones en el tiempo para el sensor al inicio de la rampa (a), alturas de ola en el sensor(b).	76
3.28.	diagrama de flujo de los scripts que calculan las presiones sobre el muelle. .	77
4.1.	comparación de los casos estudiados con la teoría de Stokes II; los puntos negros representan sensores puestos a lo largo del canal cada 0.1 m. La simulación sin modelo de turbulencia se presenta en la gráfica (a), en la gráfica (b) se presenta el modelo $k - \epsilon$, y finalmente en la gráfica de la letra (c) se presenta el modelo $k - \omega SST$. El mallado del caso CR01 está definido por el criterio de Arjona (2016), mientras que el mallado de los casos CR02 y CR03 está definido por el criterio de Larsen et al. (2018), tal como se indica en la Tabla 3.11.	80
4.2.	comparación de los casos modelados con la teoría de Stokes de segundo orden para oleaje progresivo a los $x = 1.0$ m (sin modelo de turbulencia (a), modelo $k - \epsilon$ (b), y (c) modelo $k - \omega SST$). En el caso CR01, el mallado se definió mediante el criterio de Arjona (2016), mientras que en los casos CR02 y CR03, el mallado se definió mediante el criterio de Larsen et al. (2018).	81
4.3.	altura de onda estacionaria para los tres casos analizados, comparados con la teoría de Stokes II (simulación sin modelo de turbulencia (a), modelo $k - \epsilon$ activado (b), y modelo $k - \omega SST$ (c)). En el caso CR01 se utilizó el criterio de Arjona (2016) para la definición del mallado, y en los casos CR02 y CR03 se utilizó el criterio de Larsen et al. (2018), tal como se observa en la Tabla 3.11.	82
4.4.	desnivelaciones en el tiempo para los casos de estudio, comparadas con la teoría de Stokes II en oleaje estacionario, $x = 2.31$ m (simulación sin modelo de turbulencia (a), modelo $k - \epsilon$ (b), y modelo $k - \omega SST$ (c)).	83
4.5.	desnivelaciones en el tiempo para los casos de estudio, comparadas con la teoría de Stokes II en oleaje estacionario, $x = 3.46$ m (simulación sin modelo de turbulencia (a), modelo $k - \epsilon$ activado (b), y modelo $k - \omega SST$ (c)).	83
4.6.	altura significativa del caso CR01 al aumentar el tiempo de simulación en 20, 100 y 200 s para oleaje progresivo.	84
4.7.	Altura significativa del caso CR01 al aumentar el tiempo de simulación en 20, 100 y 200 s para oleaje estacionario.	85
4.8.	comparación entre el caso CR01 y la teoría de Stokes II para un canal de 23.12 m de largo y un oleaje estacionario.	86
4.9.	desnivelaciones en el canal a los 10 m, caso A01 (Tabla 3.14).	87
4.10.	desnivelaciones en el canal a los 13 m, caso A01 (Tabla 3.14).	87

4.11. desnivelaciones en el canal a los 10 m, caso A02 (Tabla 3.14).	88
4.12. desnivelaciones en el canal a los 11 m, caso A02 (Tabla 3.14).	88
4.13. comparación de las presiones en la vertical del muelle para los tres casos analizados (Tabla 3.17), con $H_0 = 0.095$ m.	89
4.14. resultados obtenidos por el artículo en base a datos experimentales para la parte vertical del muelle (Kisacik et al., 2012) (a), versus resultados obteni- dos por OpenFOAM con las dimensiones propuestas por Arjona (2016) para cada celda del dominio (b). SWL corresponde a la superficie libre.	90
B.1. desnivelaciones en el canal a los 11 m, caso A01 (Tabla 3.14).	103
B.2. desnivelaciones en el canal a los 12 m, caso A01 (Tabla 3.14).	104
B.3. desnivelaciones en el canal a los 14 m, caso A01 (Tabla 3.14).	104
B.4. desnivelaciones en el canal a los 15 m, caso A01 (Tabla 3.14).	105
B.5. desnivelaciones en el canal a los 16 m, caso A01 (Tabla 3.14).	105
B.6. desnivelaciones en el canal a los 17 m, caso A01 (Tabla 3.14).	106
B.7. desnivelaciones en el canal a los 12 m, caso A02 (Tabla 3.14).	106
B.8. desnivelaciones en el canal a los 13 m, caso A02 (Tabla 3.14).	107
B.9. desnivelaciones en el canal a los 14 m, caso A02 (Tabla 3.14).	107
B.10. desnivelaciones en el canal a los 15 m, caso A02 (Tabla 3.14).	108
B.11. desnivelaciones en el canal a los 16 m, caso A02 (Tabla 3.14).	108
B.12. desnivelaciones en el canal a los 17 m, caso A02 (Tabla 3.14).	109
C.1. volumen de control en el que actúan fuerzas de cuerpo y fuerzas de superficie.	115
C.2. componente de tensor de esfuerzos en coordenadas cartesianas, sobre la cara derecha, superior y del frente, las componentes solo se muestran en caras positivas.	116

Índice de tablas

3.1.	constantes en el modelo $k - \omega$ SST.	44
3.2.	distribución de los parámetros y condiciones de borde utilizados para definir el comportamiento del dominio en los casos modelados.	50
3.3.	parámetros físicos utilizados en todos los casos modelados.	51
3.4.	esquemas de discretización utilizados en los casos modelados.	56
3.5.	parámetros definidos en el borde de generación de oleaje.	59
3.6.	variables consideradas para los casos modelados. Las cruces representan los casos no modelados y los vistos buenos son los casos en que se utilizó OpenFOAM.	60
3.7.	parámetros de entrada para modelar los casos analizados, donde H es la altura de ola a propagar, T es el periodo de la ola y t es el tiempo modelado.	62
3.8.	descripción de los principales elementos presentes en el primer script.	64
3.9.	descripción de los principales elementos presentes en el segundo script.	65
3.10.	descripción de los elementos que componen el script para calcular la curva de Stokes II en el tiempo.	65
3.11.	resolución espacial para los casos simulados, donde dx y dz corresponden al ancho y alto de cada celda respectivamente.	67
3.12.	parámetros de entrada para modelar los casos analizados, donde H es la altura de ola a propagar, T es el periodo de la ola y t es el tiempo modelado.	68
3.13.	parámetros utilizados para modelar los casos de Kamath et al. (2017), donde H es la altura de ola regular a propagar, T es el periodo de onda y t es el tiempo simulado.	70
3.14.	configuración del mallado para modelar asomeramiento en OpenFOAM.	72
3.15.	parámetros utilizados para para el análisis del comportamiento de las presiones; h_s corresponde a la distancia entre la superficie libre y la rampa, h_m es la longitud de la pared vertical y l_m representa la longitud horizontal de la losa.	74
3.16.	valores tomados por H_1 para el caso analizado.	74
3.17.	configuración de la malla para $H_1 = 0.095$ m. Donde dx corresponde al ancho de cada celda y dz al alto, y el tiempo corresponde al tiempo real de modelación para cada caso.	75
D.1.	factores de fricción para distintos regímenes de flujo.	120

Resumen

En el presente estudio se desarrolló la calibración y validación de un canal de ondas bidimensional con el modelo numérico OpenFOAM (Jasak, 2009).

Para el mallado, se consideraron dos criterios de dimensionado; Arjona (2016) obtuvo resultados similares en todos los casos modelados con respecto a Larsen et al. (2018), sin embargo, al ser un criterio menos restrictivo, el costo computacional también fue inferior, dando resultados hasta en un cuarto de tiempo menos en comparación con el criterio de Larsen et al. (2018). Luego se compararon los modelos de cierre $k-\epsilon$, $k-\omega SST$ y simulación laminar, presentando marcadas diferencias; el modelo $k-\epsilon$ obtuvo mejores resultados para oleaje estacionario con respecto a la teoría, mientras que el modelo $k-\omega SST$ simuló mejor la turbulencia para oleaje progresivo, pero en ningún caso la simulación laminar presentó resultados competitivos.

Se analizó la estabilidad temporal del modelo, tanto para oleaje progresivo como para oleaje estacionario. Los desarrolladores de OpenFOAM sugieren que el fluido debe pasar a lo menos unas diez veces por el dominio para alcanzar estabilidad temporal; para oleaje progresivo este supuesto se cumplió, pero para oleaje estacionario fue necesario modelar el fluido durante más tiempo para lograr la convergencia en los resultados.

Se aumentó la longitud del canal numérico para analizar la influencia de los bordes del dominio en los resultados; en la zona de generación el desarrollador del solver olaFlow (Higuera, 2015) recomienda no quitar la absorción activa debido a que genera inestabilidad en el modelo, por lo que cuando se modeló oleaje estacionario, los resultados obtenidos se alejaron de la teoría a medida que se acercaban a la zona de generación.

Se analizó la capacidad de OpenFOAM para modelar oleaje en zona de rompiente mediante la comparación con los datos del modelo REEF3D y datos experimentales presentados en Kamath et al. (2017), obteniendo resultados similares.

Finalmente, se modeló la interacción del oleaje con una estructura en OpenFOAM, comparando los resultados de presiones peaks en la zona vertical de un muelle con los datos proporcionados por Kisacik et al. (2012). OpenFOAM no fue capaz de modelar las presiones peaks, debido a que estas ocurren en cortos periodos de tiempo. Por motivos de costo computacional y de limitación de espacio en el disco duro, para esta prueba la frecuencia de muestreo fue de solo de 10 Hz, mientras que Kisacik et al. (2012) utilizó una cámara de alta resolución (20 kHz).