

Modelación de oleaje en un canal bidimensional mediante OpenFOAM

Wave modeling on a two-dimensional flume using OpenFOAM

Fecha de entrega: 3 de noviembre 2022

Fecha de aceptación: 7 de agosto 2023

Carlos Contreras¹ y Patricio Winckler²

¹Departamento de Oceanografía, Walbusch S.A., Chile, ccontreras@walbusch.cl

²Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile, patricio.winckler@uv.cl

Los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) constituyen una buena herramienta para evaluar la interacción de flujos complejos con obras costeras. Estos modelos permiten reemplazar las fórmulas empíricas para la estimación del sobrepaso, cuya validez es limitada a las condiciones experimentales. Sin embargo, su uso es aún incipiente en el contexto chileno, planteando diversos desafíos a los usuarios. En este estudio se presenta la calibración y validación de un canal de olas numérico mediante el modelo CFD OpenFOAM con el solver olaFlow. Se analizan los casos de oleaje en régimen progresivo, cuasi-estacionario y estacionario. Se aplica además un análisis de sensibilidad a las principales variables y configuraciones del modelo entre las que destacan el tamaño del mallado, el tiempo de modelación, el intervalo temporal, los modelos de turbulencia y las condiciones de borde. Luego se modela un caso de oleaje en rompiente y se compara con los resultados de una modelación física desarrollada por Kamath et al. (2017). Finalmente se estudia la capacidad de OpenFOAM para representar la interacción del oleaje con un muelle, con particular foco en las presiones bajo el tablero.

Palabras clave: OpenFOAM, olaFlow, VARANS, canal de ondas

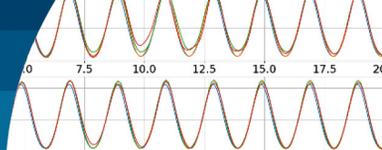
CFD models (Computational Fluid Dynamics) provide valuable tools to evaluate the interaction of complex flows with coastal works, beyond empirical formulas for overtopping, which are limited to the range of values used in the experiments. However, its use is still incipient in the Chilean context, thus posing various challenges to users. This study presents the calibration and validation of a numerical wave channel using the OpenFOAM CFD model with the olaFlow solver. Cases of waves in progressive, quasi-stationary and stationary regimes are analyzed. A sensitivity analysis is applied to the main variables and configurations of the model, among which the size of the mesh, the modeling time, the time interval, the turbulence models, and the boundary conditions are examined. Then breaking waves are modeled and compared with a physical model developed by Kamath et al. (2017). Finally, the ability of OpenFOAM to represent the interaction of waves with a pier, with particular focus on the pressures under the deck, is studied.

Keywords: OpenFOAM, olaFlow, VARANS, wave flume

Introducción

En las últimas décadas hemos presenciado un rápido progreso de los modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que permiten resolver la interacción de flujos en superficie libre con estructuras portuarias y costeras, entre otros complejos fenómenos en el medio marino. Este tipo de modelos ha cobrado peso en la medida que las universidades y empresas consultoras nacionales

capacitan a sus especialistas en su uso, promoviendo así el reemplazo de fórmulas empíricas de uso restringido para la estimación de variables de diseño como el sobrepaso, la estabilidad de defensas costeras o las cargas hidrodinámicas sobre elementos esbeltos. Sin embargo, su uso es aún incipiente, existiendo dudas sobre la sensibilidad de los resultados ante la configuración numérica (e.g., resolución espacial y temporal, tamaño del dominio y duración de la



simulación), el tipo de oleaje forzante (e.g., oleaje regular, irregular, generación de segundo orden) y los modelos de cierre turbulento, entre otros.

Dependiendo de los requerimientos, existen distintos modelos de oleaje entre los que destacan, en sentido creciente de complejidad, los modelos que promedian la fase mediante la ecuación de balance de acción (Holthuijsen, 2007, cap.9), los modelos que resuelven la fase mediante las ecuaciones tipo Boussinesq (Svendsen, 2006, cap.9; Dingemans, 1994, cap.4) y los modelos tipo CFD, que resuelven versiones promediadas de las ecuaciones de Navier Stokes tanto en dos como tres dimensiones (e.g., Higuera *et al.*, 2015). Para procesos de interacción del oleaje con estructuras costeras que se caracterizan por escalas espaciales del orden de decenas de metros y escalas temporales de segundos a minutos, es adecuado usar las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds en el Volumen VARANS (*volume-averaged Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*), pues caracterizan adecuadamente procesos no lineales en aguas someras y la rotura (Pedroso y Torres, 2011; Campos-Caba y Winckler, 2023).

Los modelos VARANS presentan un alto costo computacional para modelaciones en tres dimensiones y su uso en la actualidad requiere de computadores de alto rendimiento que no están siempre al alcance de las empresas consultoras. Los modelos bidimensionales, por otra parte, no representan los procesos reales que experimenta el oleaje al interactuar con estructuras, pero constituyen sin duda una mejor aproximación que el uso combinado de modelos que resuelven la fase y ecuaciones empíricas para calcular, por ejemplo, el caudal de sobrepaso o el patrón de reflexión de una estructura. Por otra parte, un modelo VARANS requiere de registros de oleaje y corrientes de alta resolución en las cercanías de la obra para lograr una buena calibración y validación de los parámetros físicos y las condiciones de contorno.

Dentro de los modelos que utilizan las VARANS, destaca *OpenFOAM* (Jasak *et al.*, 2004) por su licencia de código abierto, que permite un uso amplio de núcleos y rutinas según los requerimientos de la aplicación. Esto contrasta con software comerciales, que usualmente presentan restricciones al uso de rutinas y núcleos, dependiendo del tipo de licencia. Además, estudios basados en *OpenFOAM*

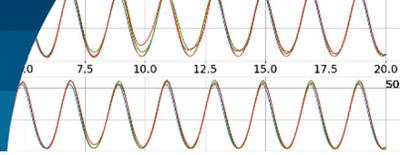
(e.g., Borges, 2013; Liu, 2017) presentan la configuración de sus casos paso a paso con el propósito de facilitar su uso a una comunidad creciente de usuarios, que se comunican en foros abiertos (www.cfd-online.com).

En un artículo que inspira el presente trabajo, Lambert (2012) desarrolló modelaciones de un canal numérico buscando demostrar la capacidad de *OpenFOAM* para el estudio de energías renovables en el mar. Para esto, evaluó el desempeño del modelo numérico en varios casos. El primer caso consideró un canal con un fondo plano y oleaje regular; el segundo comparó los resultados del modelo numérico con un estudio donde se generó oleaje en un canal físico; en el tercero se modelaron diferentes tipos de rotura en función de la pendiente del fondo; finalmente en el cuarto modeló un objeto flotante. En todos los casos utilizó la teoría de Stokes II con oleaje regular. Las mayores contribuciones del estudio fueron demostrar que *OpenFOAM* es una valiosa herramienta para evaluar la tecnología energía undimotriz.

Este estudio se enmarca en el proceso de estudio asociado a la implementación de un canal numérico de oleaje, mediante ecuaciones VARANS (Contreras, 2020). Este trabajo complementa el de Lambert (2012) en algunos aspectos puntuales. Se presentan las ecuaciones de gobierno utilizadas para caracterizar el flujo. Luego, se presenta la metodología de modelación para casos de oleaje progresivo, cuasi-estacionario, estacionario y rompiente, además de un caso para evaluar la capacidad de *OpenFOAM* de representar las presiones en el tablero de un muelle. Se analizan diversas configuraciones del modelo entre las que destacan la resolución espacial del mallado, el tiempo de modelación, el intervalo temporal, los modelos de turbulencia y las condiciones de borde. Finalmente, se presentan los resultados de las modelaciones y las conclusiones del estudio.

Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones VARANS representan la conservación de la masa, la conservación de momentum y las ecuaciones de cierre turbulento. Estas ecuaciones han sido implementadas en el solver *olaFlow* por Higuera (2015) y se sintetizan a continuación.



Conservación de la masa

La ecuación de conservación de la masa para un fluido incompresible es:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \delta \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

donde t es el tiempo, x_i coordenadas en las dimensiones espaciales i , δ el volumen de agua por el volumen total (agua y aire), $\langle u_i \rangle$ la velocidad promediada en el volumen en la componente i , ϕ la porosidad definida como la fracción de volumen de fluido contenida en un volumen de control ($\phi = 1$ en el fluido y $0 < \phi < 1$ en una estructura) y $\langle \rangle$ el operador de promediado en el volumen.

Conservación del momentum

Las ecuaciones de momentum son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\phi} \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \right] = \\ -\phi \frac{\partial \langle p \rangle^f}{\partial x_i} + \phi \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right] \\ - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \langle u'_i u'_j \rangle] - \alpha \frac{(1-\phi)^3}{\phi^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} \langle u_i \rangle \\ - \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-\phi}{\phi^2} \frac{\rho}{D_{50}} |\langle \mathbf{u} \rangle| \langle u_i \rangle \\ - C \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del fluido, $\langle p \rangle^f$ la presión hidrostática en el volumen intrínseco promedio, g la aceleración de gravedad, μ la viscosidad dinámica del fluido, u'_i la fluctuación turbulenta de la velocidad u_i , $(-)$ es el operador que indica el promediado de Reynolds sobre una variable, el factor C corresponde a la masa añadida, α y β es la fricción lineal y no lineal de los materiales porosos emplazados en el dominio. Cuando no se aplica porosidad a los materiales estos tres parámetros deben definirse con el valor 0 en el modelo, KC es el número de Keulegan – Carpenter, y D_{50} es el tamaño medio de los elementos que conforman el medio poroso.

Además, las fluctuaciones turbulentas se relacionan con los gradientes de velocidad y una viscosidad turbulenta (ν_t) según la expresión:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

La viscosidad turbulenta (ν_t) se expresa en términos de la tasa de disipación de la energía turbulenta (ϵ), la energía cinética turbulenta $\langle k \rangle$ o la frecuencia de turbulencia (ω), todas ellas promediadas en el volumen. En este estudio se implementan los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$ SST.

Modelo $k - \epsilon$

El modelo es usado en gran variedad de flujos turbulentos debido a su bajo costo computacional y razonable precisión. No obstante, su rendimiento disminuye cuando se presentan grandes gradientes de presión. El modelo se define mediante las ecuaciones:

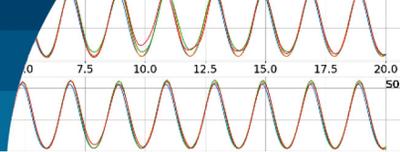
$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\langle k \rangle}{\phi} \langle \mathbf{u} \rangle \right) \\ - \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\langle \nu_t \rangle}{\phi \sigma_k} \right) \nabla \langle k \rangle \right] + \langle \epsilon \rangle = \\ \frac{2}{\phi^2} \langle \nu_t \rangle \left| \frac{\nabla \langle \mathbf{u} \rangle + (\nabla \langle \mathbf{u} \rangle)^T}{2} \right|^2 + [CT]_{kST} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \epsilon \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\langle \epsilon \rangle}{\phi} \langle \mathbf{u} \rangle \right) - \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\langle \nu_t \rangle}{\phi \sigma_k} \right) \nabla \langle \epsilon \rangle \right] \\ + C_{\epsilon_2} \frac{\langle \epsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} \\ = \frac{2C_{\epsilon_1}}{\phi^2} \langle \nu_t \rangle \frac{\langle \epsilon \rangle}{\langle k \rangle} \left| \frac{\nabla \langle \mathbf{u} \rangle + (\nabla \langle \mathbf{u} \rangle)^T}{2} \right|^2 \\ + [CT]_{\epsilon ST} \end{aligned} \quad (5)$$

donde \mathbf{u} es el vector velocidad, ν la viscosidad cinemática, $\sigma_k = 1.0$ una constante, D_{50} el diámetro nominal del material poroso, $(-)^T$ la traspuesta de una matriz, $C_{\epsilon_2} = 1.92$ y $C_{\epsilon_1} = 0.09$ constantes. La viscosidad cinemática turbulenta promediada en el volumen viene dada por:

$$\langle \nu_t \rangle = C_{\mu} \frac{\langle k \rangle^2}{\langle \epsilon \rangle} \quad (6)$$

El modelo de cierre propuesto por Nakayama y Kuwahara



en eje horizontal para oleaje no rompiente y 100 celdas si hay rotura. Además, considera la relación $dx < 2.5dz$, donde dx y dz son el ancho y alto de la celda, respectivamente. Un segundo criterio propuesto por Larsen *et al.* (2019) para interFOAM, considera una relación de aspecto $dx/dz = 1$, con al menos 12.5 celdas por altura de ola; y presentó también una configuración $dx/dz = 1$, con 25 celdas por altura de ola. Cabe notar que el criterio de Arjona (2016) se orienta a IH2VOF (que utiliza las mismas ecuaciones de *OpenFOAM – olaFlow*) y los criterios de Larsen *et al.* (2019) son directamente aplicables a *olaFlow*, por ser este una modificación de las VARANS de *OpenFOAM – interFoam*. La Tabla 1 ilustra la resolución espacial para los casos simulados.

En términos de duración, se deja pasar a lo menos unas 10 ondas por el dominio para alcanzar condiciones estadísticas estacionarias (Greenshields, 2017). Para ello en el caso CR01 se consideraron tiempos de 20, 100 y 200 s para oleaje progresivo y estacionario. Se analizó sólo el caso CR01 debido a que, en modelaciones preliminares, no se observaron diferencias significativas respecto a los casos CR02 y CR03. Además, el tiempo de modelación fue mucho menor que cuando se utilizó el criterio de Larsen *et al.* (2019) respecto de CR02 y CR03.

Tabla 1: Definición de la resolución espacial en los casos de oleaje regular para oleaje progresivo y estacionario; y representan el ancho y alto de cada celda, respectivamente.

Caso	Criterio	dx , cm	dz , cm	Celdas por altura
CR01	Arjona (2016)	2.49	1.0	10.0
CR02	Larsen <i>et al.</i> (2019)	0.8	0.8	12.5
CR03	Larsen <i>et al.</i> (2019)	0.4	0.4	25.0

El número de Courant fue definido como un valor óptimo de 0.15 para modelar ondas con una resolución espacial de 12.5 celdas por altura de ola, generando así alturas constantes en el tiempo para oleaje regular utilizando el criterio propuesto Larsen *et al.* (2019). Este valor fue adecuado también para la configuración de Arjona (2016), ya que este criterio es menos restrictivo en términos de la densidad del malla.

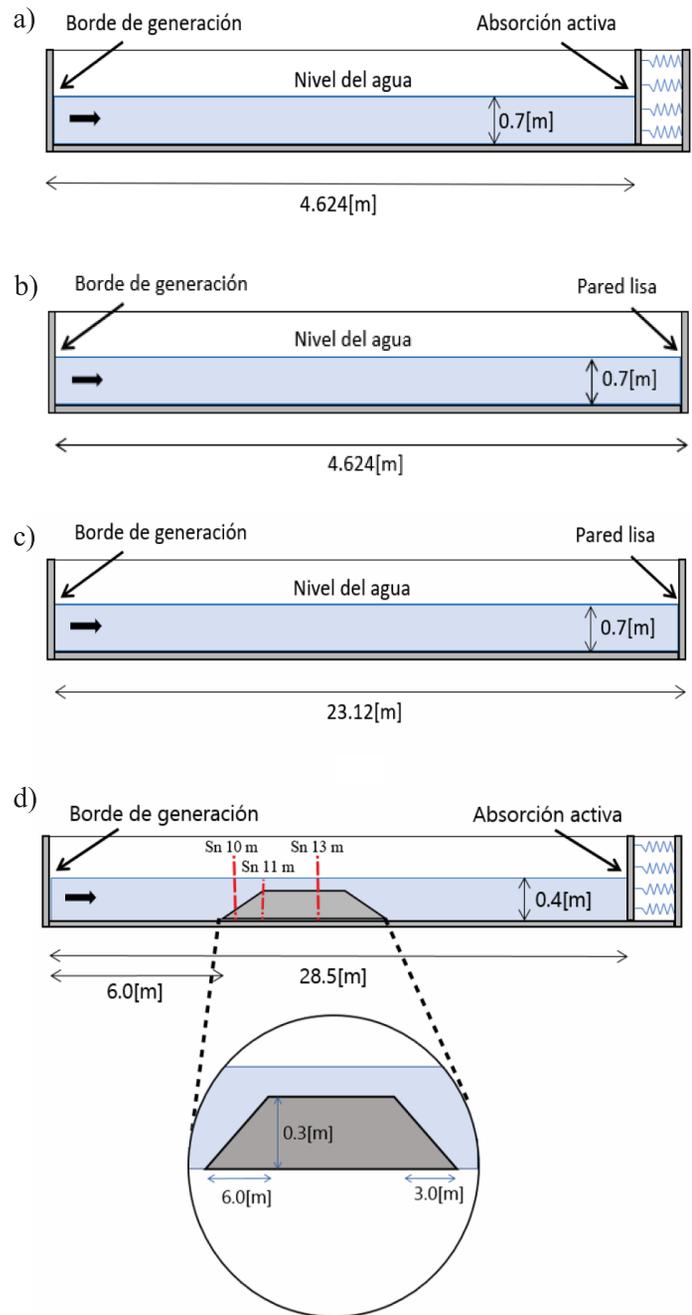
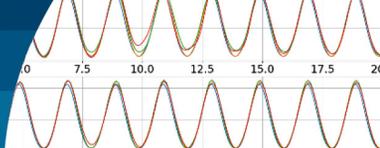


Ilustración 1: Configuración de: a) el modelo de oleaje progresivo, b) el modelo de oleaje estacionario, c) el modelo de dominio extendido y d) el modelo de dique sumergido, donde se ilustran los sensores de desnivelación (S_n). En todos los modelos, el alto del canal es 1 m.

Modelo de oleaje estacionario

Para analizar la reflexión en una pared vertical lisa, se cambiaron las condiciones de borde en la salida del canal (Ilustración 1b), simulando así una onda estacionaria. En la primera prueba no se utilizaron modelos de turbulencia,



en tanto que en la segunda y tercera prueba se activaron los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega SST$, respectivamente.

Modelo de dominio extendido

Se aumentó el tamaño del canal a 5.0 longitudes de onda (i.e., 23.12 m) para analizar la influencia de los bordes en los resultados (Ilustración 1c). Para esto se consideró la configuración CR01, con una duración de 100 s de modelado. La comparación entre la curva obtenida por el modelo y la teoría se efectuó descartando las primeras 10 olas en cada sensor, hasta alcanzar un régimen estadísticamente estacionario.

Modelo de dique sumergido

Se modeló un oleaje propagándose sobre un dique sumergido (Kamath *et al.*, 2017) para evaluar la exactitud con que *olaFlow* simula el fenómeno (Tabla 2 e Ilustración 1d). En dicho trabajo se analizó el modelo REEF3D para la formación y rotura de las olas al propagarse a lo largo de un canal de ondas (Ilustraciones 2a-c); los resultados del modelo fueron comparados con datos experimentales. La configuración del mallado estuvo dada por CR01 (Tabla 1), debido a que, cuando se realizó un análisis de sensibilidad a la malla, el costo computacional fue notablemente menor que los criterios CR02 y CR03.

Tabla 2: Parámetros para modelar los casos de Kamath *et al.* (2017), mediante la teoría de Stokes II, donde es la altura de ola regular, el periodo, el tiempo de simulación, y las dimensiones de cada celda.

Caso	H, m	T, s	t, s	dx, cm	dz, cm
A01	0.022	2.5	60	0.54	0.22
A02	0.042	2.5	60	1.04	0.42

Modelo de un muelle transparente

Se replicaron los ensayos propuestos por Kisacik *et al.* (2012), en los cuales se analizaron las cargas de oleaje sobre un muro vertical con una losa horizontal adyacente, mediante un modelo de oleaje regular a escala 1:20 del muelle de Blankenberge, en la Universidad de Ghent, Bélgica (Ilustración 2a). Las variables consideradas en dicho estudio fueron la altura, el periodo, la profundidad y la geometría de la estructura; mientras que los demás parámetros se mantuvieron constantes (i.e. oleaje regular,

generación con la teoría de Stokes II, dimensiones del muelle y pendiente de la rampa). Las pruebas se realizaron en un canal de $30 \times 1 \times 1.2 m^3$, con una rampa de pendiente 1:20 ubicada a 12.5 m de la paleta generadora. En el muro vertical se pusieron dos corridas de 7 sensores de presión, y en el tablero del muelle dos corridas de 3 sensores cada 1.5 cm.

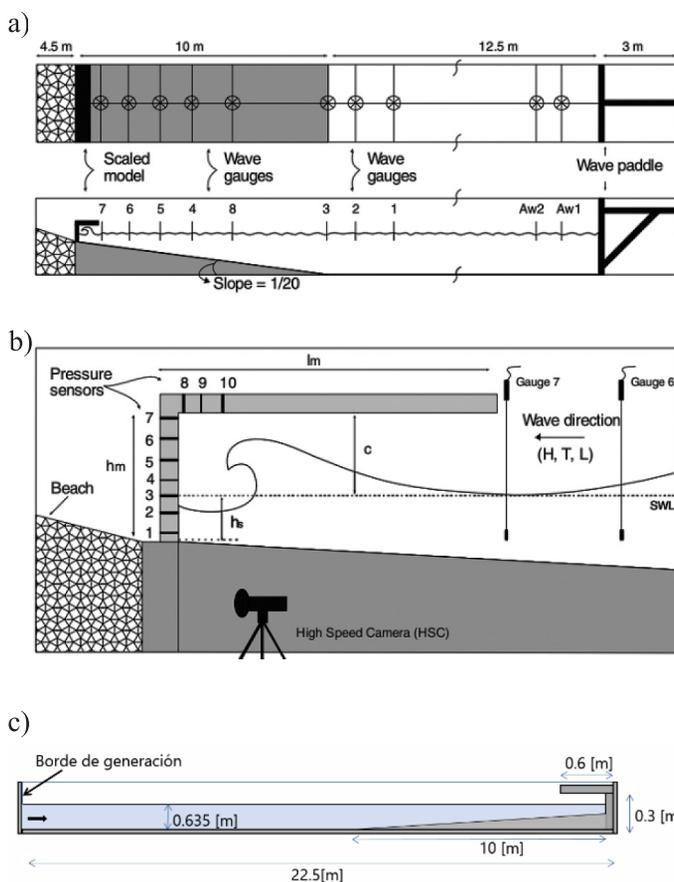
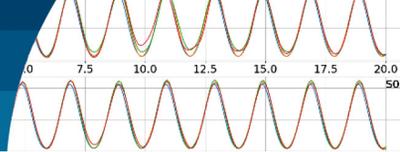


Ilustración 2: Configuración del modelo de un muelle transparente. Sensores de presión: a) en planta y elevación y b) bajo el tablero utilizados en el modelo físico del muelle de Blankenberge (Kisacik *et al.*, 2012). SWL corresponde a la superficie libre. c) Configuración del modelo numérico, con una profundidad en el muelle de $h_s = 0.135 m$, una longitud del muro vertical de $h_m = 0.3 m$ y una longitud de la losa de $l_m = 0.6 m$

En *olaFlow* se dispusieron 31 sensores sobre el muro vertical y 6 en el tablero para representar las curvas de presión. Adicionalmente, se ubicó un sensor de nivel al inicio de la rampa (*wave gauge* 3) para analizar el oleaje generado. Se configuró *olaFlow* considerando el criterio de mallado propuesto por Arjona (2016) para olas de $H_l = 0.095 m$ y periodo $T = 2.0 s$, ya que esta combinación presentó las mayores presiones sobre la losa del muelle



(Kisacik *et al.*, 2012). Como punto de partida, se consideró la serie de la Ilustración 3 (P01), y luego se volvieron a correr dos casos (P02 y P03 en Tabla 3 e Ilustración 3), donde se aumentó la densidad de la malla a costa de un incremento notorio en el tiempo de modelación. El objetivo de este análisis fue aumentar la exactitud de las alturas modeladas en el sensor 3, y analizar las presiones ejercidas por el oleaje en el muelle.

Tabla 3: Configuración de la malla del modelo de un muelle transparente para $H_i = 0.095$ m; dx corresponde al ancho y dz al alto de cada celda, y el tiempo corresponde al tiempo real de modelación para cada caso

Caso	dx , cm	dz , cm	Tiempo, h
P01	2.37	0.95	5.1
P02	1.185	0.475	21.525
P03	0.5925	0.2375	189.52

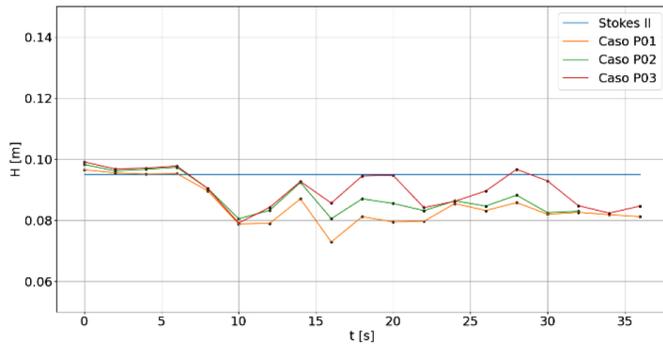


Ilustración 3: Comparación entre los casos P01, P02 y P03, asociados a mallas de distintas densidades en el dominio

Resultados

Modelo de oleaje progresivo

La Ilustración 4 muestra las modelaciones con los tres criterios (CR01, CR02 y CR03) presentados en la Tabla 1 y dos modelos de turbulencia ($k - \epsilon$ y $k - \omega SST$) y un modelo para simulación laminar. Los tres casos con el modelo laminar presentaron un comportamiento diferente a lo largo del canal (S01 en Ilustración 4a), pero solo los casos CR02 y CR03 mostraron un aumento en la altura a 2 m del contorno de generación. Luego, a 3.5 m desde del borde de generación de oleaje, el caso CR01 se alejó de la altura calculada por la teoría de Stokes II, en tanto que los casos CR02 y CR03 se mantuvieron más cerca del valor teórico. Cerca de los 4.6 m, los casos CR02 y CR03 presentaron valores sobre Stokes II, y el caso CR01 alcanzó una altura

significativa bajo la teoría, pero más cerca que los casos CR02 y CR03.

Se comparó la desnivelación a 1.0 m del contorno de generación de olas con las desnivelaciones proporcionadas por la teoría de Stokes II (S01 en Ilustración 4b). Inicialmente los tres casos se asemejan a la teoría de Stokes II, pero desde los 7.0 s se hace evidente la diferencia entre ellos. La resolución para la malla planteada por Arjona (2016) presentó un mejor desempeño que los casos CR02 y CR03 respecto a la teoría.

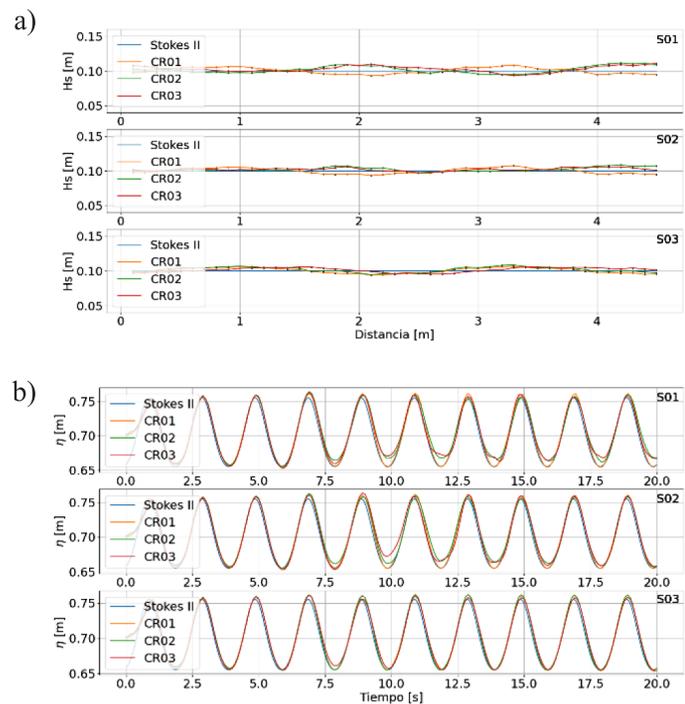


Ilustración 4: Resultado del modelo de oleaje progresivo. a) Alturas significativas modeladas. Los puntos negros representan sensores a lo largo del canal cada 0.1 m. Se presenta el modelo para simulación laminar (S01), el modelo (S02) y el modelo (S03) y b) comparación de los modelos con la teoría de Stokes II para oleaje progresivo a 1.0 m desde el origen.

En una segunda prueba se activó el modelo $k - \epsilon$ y se volvieron a correr los tres criterios con los demás parámetros constantes. En la Ilustración 4a se observa que las curvas de S02 tuvieron un mejor ajuste a la teoría de Stokes II en comparación con S01. En la Ilustración 4b se observan mejores resultados al usar el modelo $k - \epsilon$ por sobre la simulación laminar, aunque desde los 7.5 s las ondas comienzan a disminuir en amplitud alejándose de la teoría (CR02 y CR03); la excepción es el caso CR01 que

se ajusta bien a la teoría durante toda la modelación tanto en S01 como en S02 (Ilustración 4b). En la prueba S03 se utilizó el modelo $k - \omega SST$, dando resultados aún más cercanos a la teoría de Stokes II que en los casos anteriores (Ilustración 4a y 4b).

Respecto a la densidad en el mallado, no se obtuvo una mejora significativa en los resultados al disminuir el tamaño de las celdas. Sin embargo, al considerar los costos computacionales y el tiempo de modelación (Tabla 1), se hace evidente que el criterio CR01 presenta una demora inferior a CR02 y CR03 en las mismas condiciones.

Modelo de oleaje estacionario

Las pruebas S01 y S02 (Ilustración 5a) presentaron un similar comportamiento, sin embargo, es evidente que el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ generó curvas más suaves en S02. En la prueba S03 se observan resultados más sensibles a la densidad del mallado; los tres casos de la prueba S03 describen un comportamiento diferente a la teoría de Stokes II, principalmente cerca del contorno de generación (Ilustración 5a). A partir de los 5.0 s se observó un aumento de la amplitud en todas las pruebas producto de la superposición de las dos ondas progresivas con distinto sentido (Ilustración 5b); antes de este tiempo no hubo superposición debido a que la onda reflejada en la pared aún no había llegado hasta esa posición.

La Ilustración 5c muestra que las desnivelaciones comienzan a parecerse a la teoría a partir de los 5.0 s. Además, el modelo $k - \epsilon$ (S02) muestra un comportamiento más suave y cercano a la teoría en todas las curvas. En contraste, a mayor resolución de la malla (CR02 y CR03) los resultados con el modelo $k - \omega SST$ se alejaron de la teoría. Al aumentar la resolución de la malla (CR02 y CR03), el rendimiento del modelo $k - \omega SST$ fue más bajo que el modelo $k - \epsilon$ en oleaje estacionario. Finalmente, para oleaje progresivo, el modelo $k - \omega SST$ entregó resultados más cercanos a la teoría de Stokes II.

Respecto del tiempo de modelación, para el modelo con oleaje progresivo, la diferencia entre 20 s y 100 s para el caso CR01 es pequeño, y aún menor entre 100 s y 200 s. Además, todas las curvas convergen a un comportamiento oscilatorio en torno a los datos de Stokes II (Ilustración 6).

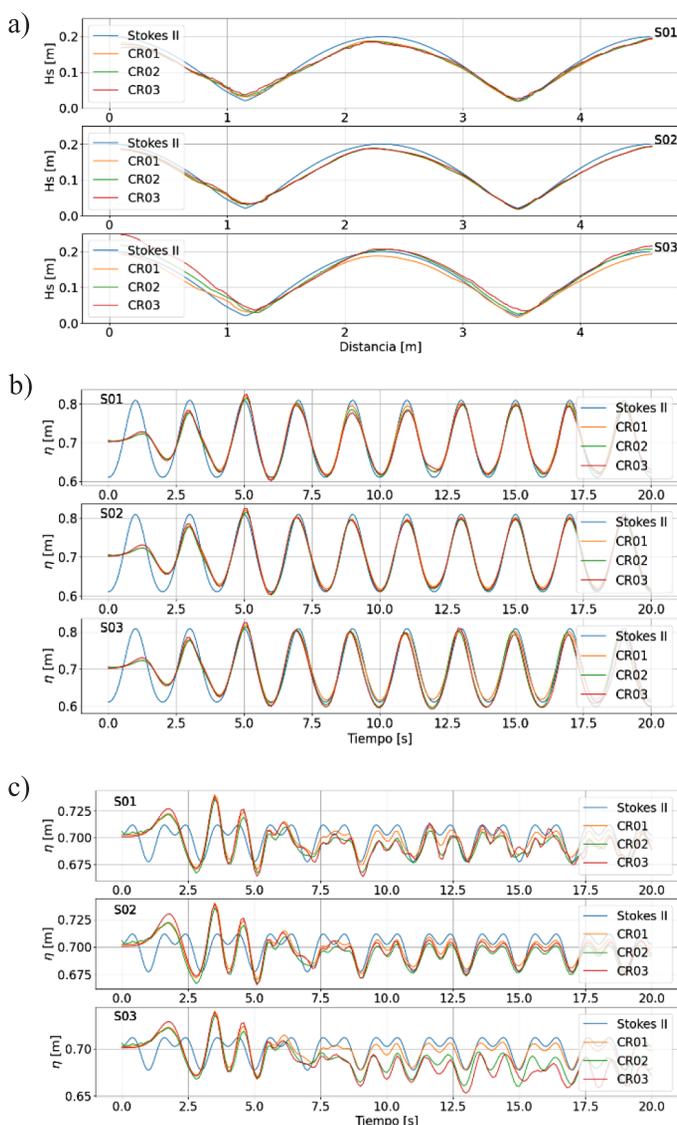


Ilustración 5: Resultado del modelo de oleaje estacionario. a) Altura comparada con la teoría de Stokes II mediante el modelo laminar (S01), modelo de turbulencia $k - \epsilon$ SST (S02) y modelo de turbulencia $k - \omega$ SST (S03). Desnivelaciones a b) 2.31 m y c) 3.46 m (donde se forman el nodo y antinodo de la onda estacionaria) del contorno de generación

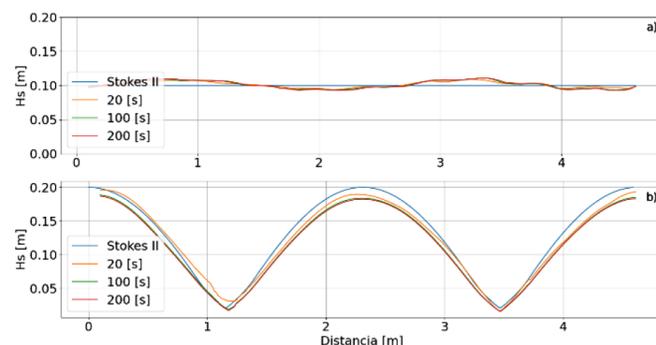
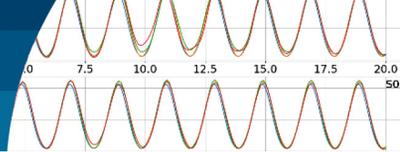


Ilustración 6: Resultado del tiempo de modelación para los modelos de a) oleaje progresivo y b) estacionario. Altura del caso CR01 aumentando para tiempos de simulación en 20, 100 y 200 s



Los resultados muestran que, para un canal de mayor extensión, a mayor distancia del borde de generación ($x = 0$) la altura significativa se acerca la teoría de Stokes II (Ilustración 7). Según Higuera (2015), en el borde de generación no es recomendable desactivar la absorción activa, ya que se genera un aumento del nivel medio del agua debido al desbalance entre la entrada y salida de agua en el canal. Ello impide generar oleaje estacionario similar a la teoría en un canal de ondas bidimensional.

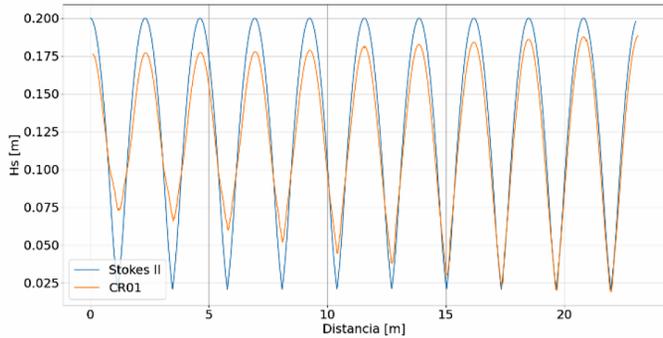


Ilustración 7: Resultado para un canal de mayor longitud. Comparación entre el caso CR01 y la teoría de Stokes II para un canal de 23.12 m de largo y un oleaje estacionario

Modelo de dique sumergido

En el caso A01 (Tabla 2) no se genera rotura debido a la configuración del canal. En las cercanías de la zona de generación, la superficie libre modelada por *olaFlow* presenta una sobreestimación en las crestas y valles respecto a los resultados del modelo *REEF3D* y los datos experimentales (Ilustración 8a). Sin embargo, a medida que la ola avanzaba a lo largo del canal, se genera una mejora sustancial en los resultados de *olaFlow* con respecto de los datos experimentales (Ilustración 8b).

En el caso A02 (Tabla 2), el comportamiento de *olaFlow* es similar al caso A01. En principio, las desnivelaciones a los 10 m (Ilustración 9a) distan de los datos teóricos y de *REEF3D*, pero desde los 11 m, *olaFlow* representa adecuadamente los datos experimentales (Ilustración 9b).

Modelo de muelle transparente

El análisis de sensibilidad de la malla para diferentes configuraciones (Tabla 3 e Ilustración 3) evidencia un aumento en la exactitud de las desnivelaciones obtenidas por el sensor a mayor densidad de las celdas. Sin

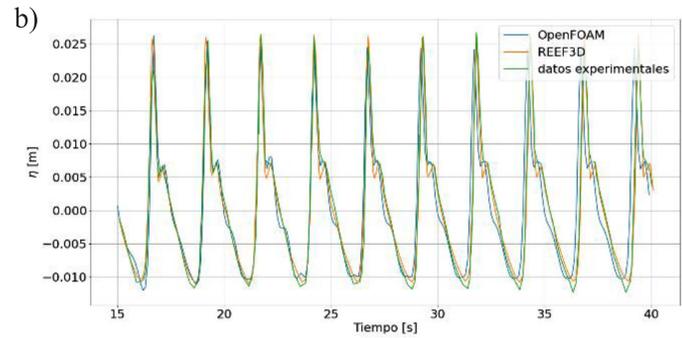
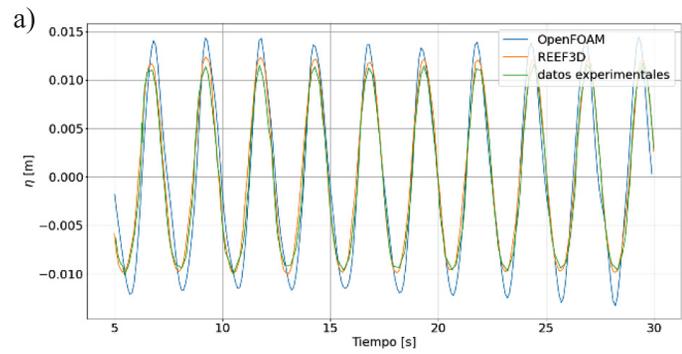


Ilustración 8: Comparación de resultados para el modelo de dique sumergido obtenidos con *olaflow* y *REEF3D*. Desnivelación instantánea para el caso A01 del dique sumergido a los a) 10 m y b) 13 m

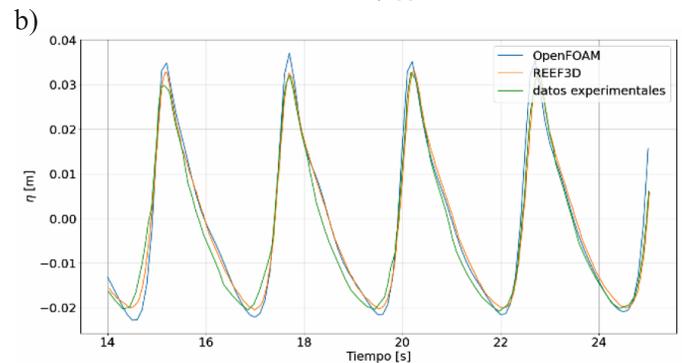
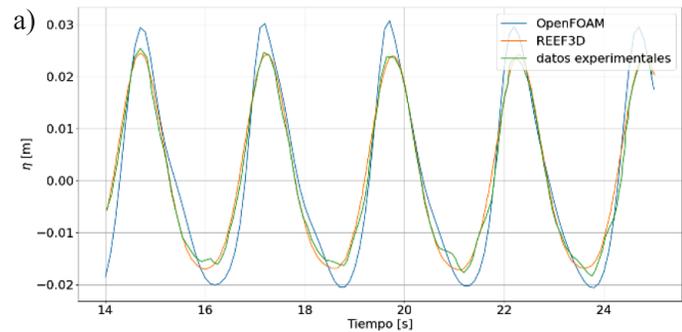


Ilustración 9: Comparación de resultados para el modelo de dique sumergido obtenidos con *olaflow* y *REEF3D*. a) Desnivelación instantánea para el caso A02 del dique sumergido a los a) 10 m y b) 13 m

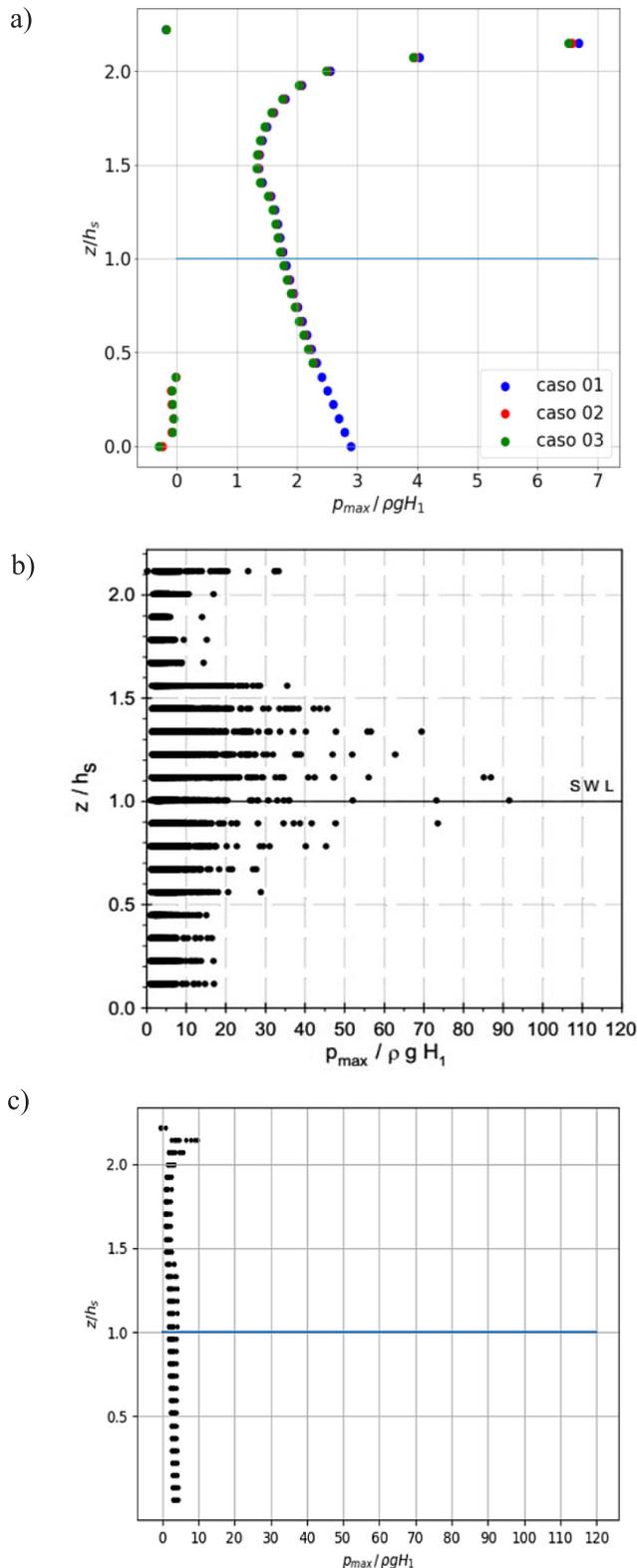
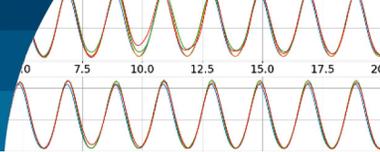


Ilustración 10: Resultados para el modelo del muelle transparente. a) Presiones en la pared vertical del muelle para los tres casos analizados con $H_1 = 0.095$ m, b) resultados obtenidos por Kisacik *et al.* (2012) en base a datos experimentales para la parte vertical del muelle y c) resultados obtenidos por *olaFlow* mediante la configuración de la malla P01. SWL corresponde al nivel medio del agua.

embargo, las presiones sobre el muelle para los tres casos analizados no presentaron una variación significativa (Ilustración 10a). Luego de observar que el aumento en la densidad del mallado en el dominio no presentó mejoras significativas en los resultados, y que además el tiempo de modelación aumentó notoriamente, se optó por mantener la configuración CR01 de Arjona (2016) y se corrieron los casos presentados en la Tabla 4, dando como resultado la Ilustración 10c.

Tabla 4: Valores de altura de oleaje para el modelo del muelle transparente

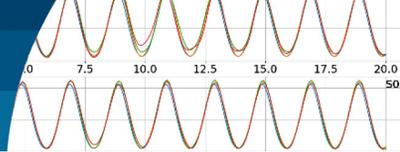
Caso	01	02	03	04	05
H_1 , m	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115
Caso	06	07	08	09	
H_1 , m	0.120	0.125	0.130	0.135	

La Ilustración 10c muestra que *olaFlow* no capta los *peaks* que obtuvo Kisacik *et al.* (2012), siendo las máximas presiones registradas de magnitud mucho mayor que las modeladas en *olaFlow* (Ilustración 10b). Cabe considerar que los *peaks* de presiones fueron registrados mediante sensores de presión con una frecuencia de muestreo de 20 kHz, mientras que en *olaFlow* la frecuencia de muestreo fue solo de 10 Hz por limitaciones de equipo computacional y espacio en el disco duro. Se observa, asimismo, un aumento de presiones máximas en la esquina entre el muro vertical y la losa del muelle (Ilustración 10a, cerca de $z/h_s = 2.0$), que también se observan en el modelo físico (Ilustración 10b).

Conclusiones

El modelo *OpenFOAM - olaFlow* permite simular el comportamiento de flujos complejos con un buen nivel de detalle, siendo una valiosa herramienta para estudiar la interacción del oleaje con estructuras complejas. Sin embargo, su aplicación requiere de hardware adecuado para realizar pruebas de calibración en un tiempo razonable, considerar el uso de lenguajes de programación especializados para la preparación de los datos, post-proceso y presentación de resultados y el uso del entorno Linux para configurar los casos de estudio.

En términos de la resolución espacial de la malla, tanto para oleaje progresivo como estacionario, el criterio de Arjona (2016) requirió un menor costo computacional que



los de Larsen *et al.* (2019), sin perder exactitud.

Para oleaje progresivo, se alcanzó una estabilidad temporal de los resultados a los 20 s (al pasar unas diez ondas por el dominio) y las simulaciones de 100 y 200 s no generaron mejoras en los resultados. En contraste, para oleaje estacionario, a los 20 s se obtuvieron diferencias importantes respecto de los resultados con 100 s y 200 s de simulación, indicando que la duración mínima de modelación sugerida por los desarrolladores de *OpenFOAM - interFoam* (Greenshields, 2017) fue insuficiente para alcanzar estabilidad temporal.

Tanto para oleaje progresivo como estacionario, se observaron resultados deficientes utilizando los tres criterios para el mallado cerca de los bordes de generación y absorción de oleaje. Al aumentar la longitud del dominio para un oleaje estacionario, los bordes también influyeron cerca de la zona de generación, debido a que no fue posible desactivar la absorción activa en ese borde por inestabilidad del modelo. A mayores distancias, los datos convergieron gradualmente a la teoría, coincidiendo con lo recomendado por Higuera (2015).

El modelo de turbulencia $k - \omega$ SST presentó resultados más cercanos a la teoría de Stokes de II orden que el modelo $k - \epsilon$ para oleaje progresivo. En contraste, para oleaje estacionario este último presentó mejores resultados. En ningún caso el modelo laminar destacó por sobre los modelos de turbulencia.

Para el dique sumergido afecto a oleaje progresivo, los resultados obtenidos mediante *olaFlow* (con una baja resolución debido a limitaciones de hardware), fueron similares a los obtenidos con REEF3D con 128 procesadores en una modelación que duró 40 horas (Kamath *et al.*, 2017).

Para oleaje interactuando con una estructura (Kisacik *et al.*, 2012), *olaFlow* mostró un bajo rendimiento en la captura de la presión; probablemente debido a la baja frecuencia de muestreo (10 Hz), comparada con los 20 kHz utilizados en los sensores de presión. Adicionalmente, esta resolución temporal generó un significativo aumento en el espacio del disco duro y del tiempo de modelación, que pudieren haber sido evitados con el uso de un *cluster* de alto rendimiento.

Finalmente, considerando todas las configuraciones, supuestos y limitaciones, concluimos que *olaFlow*

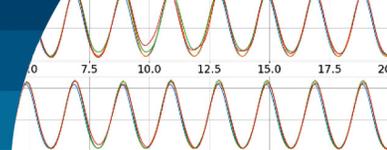
permite obtener resultados cercanos a la teoría cuando las limitaciones de hardware no son influyentes. Sin embargo, cuando fue necesario aumentar la resolución espacial o disminuir el paso de tiempo el costo computacional impidió que el computador de escritorio utilizado en este trabajo pudiera resolver en forma adecuada variables como la presión en el tablero de un muelle.

Agradecimientos

El segundo autor desea agradecer a los proyectos FONDEF ID23I10078, FONDEF ID23I10336 y al Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastre CIGIDEN ANID/1522A0005 FONDAP 2022.

Referencias

- Arjona, S. (2016). *Análisis funcional de un dissipador de oleaje pasivo basado en medios porosos*. Tesis de magister, Universidad de Cantabria, España
- Borges, P.M (2013). *Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM*. Doctoral thesis, Universidad de Coimbra, Portugal
- Campos-Caba, R. y Winckler, P. (2023). Evaluación de caudal de sobrepaso en una defensa costera mediante un modelo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds en el volumen (VARANS). *Obras y Proyectos* 33, 6-14
- Contreras, C. (2020). *Calibración y validación de OpenFOAM para la modelación de un canal de ondas en 2D*. Memoria de título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso, Chile
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. World Scientific, Singapore
- Dingemans, M.W. (1994). *Water wave propagation over uneven bottoms*. Advanced Series on Ocean Engineering 13, World Scientific, Singapore
- Greenshields, C.J. (2017). User guide for openFOAM. OpenFOAM Foundation Ltd., England
- Higuera, P. (2017). *olaflow: CFD for waves*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1297013>
- Higuera, P. (2015). *Aplicación de la dinámica de fluidos computacional a la acción del oleaje sobre estructuras*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España



- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering* **101**, 35–47
- Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, UK
- Jasak, H., Weller, H.G. and Nordin, N. (2004). In-cylinder CFD simulation using a C++ object-oriented toolkit. *SAE World Congress & Exhibition*, USA
- Kamath, A., Alagan Chella, M., Bihs, H. and Arntsen, Ø.A. (2017). Energy transfer due to shoaling and decomposition of breaking and non-breaking waves over a submerged bar. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* **11**(1), 450-466
- Kisacik, D., Troch, P. and van Bogaert, P. (2012). Description of loading conditions due to violent wave impacts on a vertical structure with an overhanging horizontal cantilever slab. *Coastal Engineering* **60**, 201-226
- Lambert, R.J. (2012). *Development of a numerical wave tank using OpenFOAM*. MSc thesis, Universidad de Coimbra, Portugal
- Larsen, B.E., Fuhrman, D.R. and Roenby, J. (2019). Performance of interFoam on the simulation of progressive waves. *Coastal Engineering Journal* **61**(3), 380-400
- Liu, S.N. (2017). Implementation of a complete wall function for the standard $k-\epsilon$ turbulence model in OpenFOAM 4.0. Technical report, University of Stavanger, Norway
- Nakayama, A. and Kuwahara, F. (1999). A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium. *Journal of Fluids Engineering* **121**(2), 427-433
- Pedroso, A. y Torres, A. (2011). Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas. *Tecnología y Ciencias del Agua* **2**(2), 54-67
- Svendsen, I.A. (2006). *Introduction to nearshore hydrodynamics*. Advanced Series on Ocean Engineering 24, World Scientific, Singapore