

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)

Assessment of wave overtopping in a coastal defense using a model based on the volume-averaged Reynolds averaged Navier-Stokes (VARANS)

Fecha de entrega: 15 de diciembre 2022

Fecha de aceptación: 21 de abril 2023

Rodrigo Campos-Caba¹ y Patricio Winckler^{2,3,4}

¹ Department of Physics and Astronomy Augusto Righi (DIFA), Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Bologna, Italia. rodrigo.camposcaba@unibo.it

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

³ Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), Santiago, Chile.

⁴ Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR), Valparaíso, Chile.

En este trabajo se expone el proceso de calibración del modelo numérico IH2VOF y un análisis de sensibilidad del caudal de sobrepaso en una defensa costera. Para efectuar estos trabajos, se replican los ensayos de un modelo físico a escala reducida de 1:50 en el rompeolas principal del puerto de Pòvoa de Varzim, Portugal (Neves et al., 2008). Los parámetros analizados en el proceso de calibración corresponden a la porosidad y los coeficientes de fricción lineal y no-lineal, que caracterizan a los medios porosos. Para ensayos con oleaje irregular y generación de oleaje de primer orden, que incorpora sólo la banda espectral asociada al oleaje como condición de borde, los parámetros de fricción no tienen una gran incidencia en el cálculo del sobrepaso, pues actúan sobre un volumen relativamente pequeño de defensa costera. La porosidad, en contraste, juega un rol no despreciable en los resultados. Una vez calibrados estos parámetros, se repiten los ensayos usando un forzamiento de segundo orden, que incorpora tanto la banda del oleaje como las ondas infragravitatorias asociadas a los grupos de olas. Los resultados muestran que la generación de primer orden sobrestima el caudal de sobrepaso, lo que se hace más evidente para condiciones de oleaje de mayor intensidad. Para el forzamiento de segundo orden, en contraste, se obtienen resultados cercanos a los reportados por Neves et al. (2008). Finalmente, se recomienda utilizar el forzamiento de segundo orden tanto en la modelación numérica como física del sobrepaso de oleaje para evitar el sobredimensionamiento injustificado de defensas costeras.

The calibration of the IH2VOF numerical model and a sensitivity analysis of wave overtopping in a coastal defense are presented in this study. Physical model tests are replicated at a reduced scale of 1:50 in the main breakwater of the port of Pòvoa de Varzim, Portugal (Neves et al., 2008). The parameters used in the calibration correspond to porosity, linear and non-linear friction coefficients characterizing a porous media, which in our model represent the defense's armor and filter. For irregular waves and first-order generation in the numerical wavemaker (i.e., considering only waves as a boundary condition), overtopping is practically insensitive to the range of values used for the friction parameters, due to the relatively small volume of coastal defense. Porosity, in contrast, plays a significant role in the computation of overtopping. Once these parameters have been calibrated, the tests are repeated using a second-order generation, which incorporates both waves and the infragravity waves accompanying the former. Results show that the first-order generation overestimates the overtopping, especially in more intense wave conditions. For the second-order generation, results correspond fairly well with those reported by Neves et al. (2008). Finally, we recommend the use of second-order generation both in the numerical and physical modelling of wave overtopping on coastal defenses to avoid unnecessarily conservative designs.

Palabras clave: modelo numérico CFD, condiciones de borde, ondas infragravitatorias, medio poroso

Keywords: CFD numerical model, boundary conditions, infragravity waves, porous media

Introducción

El sobrepaso de oleaje es uno de los parámetros fundamentales que se utilizan en el diseño de obras costeras. La forma tradicional de calcular el sobrepaso es utilizar fórmulas empíricas, basadas en el análisis dimensional, cuyos coeficientes se obtienen en ensayos en modelos físicos a escala reducida en laboratorio. En el proceso de diseño se busca limitar el sobrepaso a valores máximos admisibles que permitan el tránsito seguro de peatones y vehículos, controlen el daño del equipamiento urbano o el daño estructural de edificaciones, según sea el caso. Existen muchas formulaciones de uso común (e.g. Pedersen, 1996), disponibles en manuales de diseño como el Coastal Engineering Manual (USACE, 2011) y el Eurotop (Allsop *et al.*, 2016). El uso de ecuaciones empíricas, no obstante, está restringido a las condiciones experimentales utilizadas en su derivación, y que no necesariamente coinciden con las condiciones locales de un sitio de estudio.

En los últimos años se han desarrollado modelos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, del inglés *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), que permiten resolver, entre otros, los procesos de asomeramiento, reflexión y rotura del oleaje además de la interacción del oleaje con estructuras marítimas tanto a escala de prototipo o laboratorio. Este tipo de modelos han ido cobrando importancia en la medida que las empresas consultoras capacitan a sus especialistas. No obstante, a nivel nacional estamos aún en una etapa incipiente de uso, donde existen aún dudas sobre la sensibilidad de los resultados ante las diversas parametrizaciones de los fenómenos de disipación, turbulencia y las condiciones de borde. La Figura 1 presenta un ejemplo de resultados obtenidos mediante este tipo de modelos en la Avenida Perú, Viña del Mar, que en los últimos años ha sido afectada por marejadas intensas (Winckler *et al.*, 2019).

Este estudio se desarrolla en el marco del proyecto FONDEF IDeA I+D 2020 denominado “Desarrollo de una escala de impacto de marejadas para la comunicación efectiva y disminución del riesgo de desastre”. En la actualidad, el Sistema de Alerta de Marejadas¹ que da soporte al proyecto se basa en una combinación de un modelo numérico

¹ Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, marejadas.uv.cl

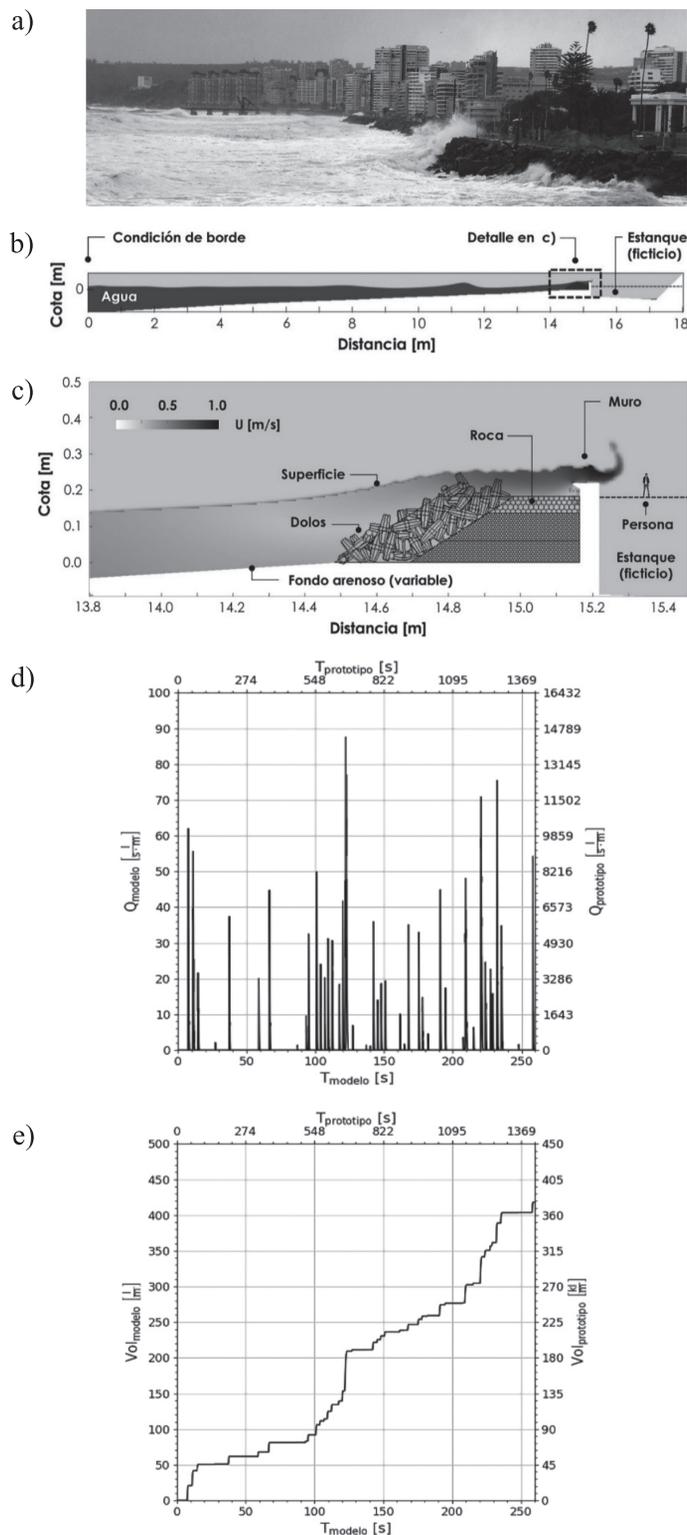
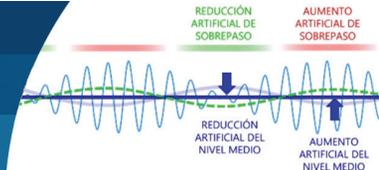


Figura 1: Modelos de sobrepaso para la marejada del 8 de agosto de 2015 en Avenida Perú. a) Fotografía tomada durante el peak de la tormenta desde el Restaurant Cap Ducal, b) modelo a escala 1:30 utilizado para el cálculo de sobrepaso en la defensa costera. El agua, el aire y el fondo marino se representan con negro, gris y blanco, respectivamente, c) Campo de velocidad en un instante donde se registra sobrepaso, d) Sobrepaso instantáneo y e) volumen acumulado de oleaje para dicha marejada (Winckler *et al.* (2017) a partir de los modelos de Fritz (2018)).



global (WWIII), un modelo a escala de bahía (SWAN), un pronóstico de la marea astronómica y fórmulas empíricas de sobrepaso desarrolladas en un modelo físico a escala bajo condiciones que no necesariamente representan a la Avenida Perú.

Para mejorar la estimación del sobrepaso, en el Laboratorio de Modelado Costero de la Universidad de Valparaíso (Labocéano²) se decidió invertir esfuerzos en desarrollar un modelo numérico implementado mediante el modelo IH2VOF del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria)³. Al objeto de calibrar el modelo, se replican los ensayos de sobrepaso en la defensa costera del puerto de Póvoa de Varzim (Portugal), llevados a cabo por Neves *et al.* (2008) mediante un modelo físico a escala reducida de 1:50. En el presente documento se expone la implementación y calibración del modelo numérico mediante parametrización del medio poroso (enrocado) y la incorporación de ondas infragravitatorias en la condición de borde.

Métodos de cálculo de sobrepaso Formulaciones empíricas

En los manuales de diseño existen muchas formulaciones de uso sencillo pero que responden a geometrías, materialidad y parámetros acotados a los ensayos a partir de las cuales fueron derivadas. La fórmula de Pedersen (USACE, 2011, Tabla VI-5-12), por ejemplo, representa la geometría y parámetros indicados en la Figura 2.

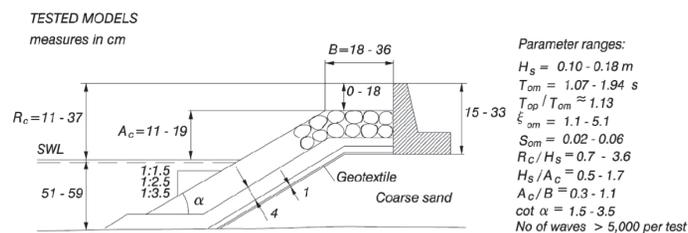


Figura 2: Geometría en la fórmula de Pedersen para el sobrepaso (adaptado de USACE (2011)).

En términos dimensionales, la fórmula de Pedersen define el caudal de sobrepaso medio por unidad de frente de obra

² Labocéano de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica <https://ingenieriaoceanica.uv.cl/laboceano>

³ Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, ih2vof.ihcantabria.com

Q , en $m^3/m/s$, mediante la expresión:

$$Q = f(H_s, T_{om}, L_{om}, R_c, A_c, B, \cot \alpha) \quad (1)$$

donde H_s es la altura significativa del oleaje, T_{om} y L_{om} son el período medio y la longitud del oleaje en aguas profundas, R_c es el francobordo (distancia entre el nivel del agua en reposo y el coronamiento de la defensa), A_c es la distancia vertical entre el nivel en reposo y la cota de la coraza, B es el ancho de la berma y $\cot \alpha$ es el talud (Figura 2). La Figura 3 ilustra un ejemplo sencillo de cómo esta fórmula puede utilizarse para definir variables de diseño de la defensa (R_c , B , α) cuando se han definido las condiciones de oleaje cerca de la obra (H_s , T_{om}). El uso de este tipo de análisis, no obstante, está restringido a las condiciones experimentales utilizadas en su derivación, y que no necesariamente coinciden con las condiciones locales del sitio de estudio.

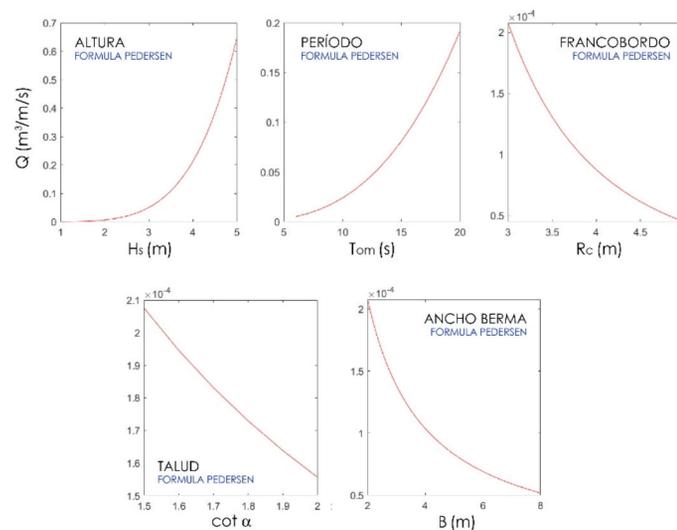
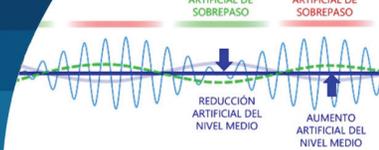


Figura 3: Análisis de sensibilidad del sobrepaso ante diferentes variables para la fórmula de Pedersen

Modelación numérica mediante ecuaciones tipo VARANS

Una herramienta mucho más poderosa para estimar caudales de sobrepaso lo constituyen los modelos basados en las ecuaciones tipo RANS (o adaptaciones de ellas) pues permiten evaluar condiciones locales y geometrías no contempladas en las fórmulas empíricas. En general, este tipo de modelos tiene la capacidad de: a) resolver los procesos de asomeramiento, reflexión y rotura del oleaje, b) resolver la interacción con estructuras marítimas, y



c) simular oleajes de tipo regular, irregular o de formas definidas por el usuario, todo ello a escala de prototipo o laboratorio. En la actualidad, estos modelos son capaces de simular dominios a escala de prototipo de hasta un kilómetro, por lo que deben nutrirse de condiciones de borde de modelos que resuelven la fase y/o modelos de tipo espectral.

El modelo IH2VOF, en particular, resuelve las ecuaciones VARANS (*Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), versión promediada en el volumen de las RANS para la resolución de los medios porosos, como las corazas y filtros de defensas costeras. El modelo ha sido validado con diversos ensayos de laboratorio (Di Lauro *et al.*, 2019; Guanche *et al.*, 2009; Lara *et al.*, 2006; Neves *et al.*, 2008; Losada *et al.*, 2005, 2008; Lara, 2005; García *et al.*, 2004). El modelo cuenta con un sistema de generación basado en una condición de borde de tipo Dirichlet en la que se prescriben las velocidades y la superficie libre, a partir de una serie de oleaje. Además, cuenta con una condición de frontera móvil que permite simular el movimiento de una pala generadora del oleaje y el ascenso/descenso del oleaje en una playa. Ambos sistemas de generación cuentan con un sistema de absorción activa que absorbe el oleaje reflejado dentro del dominio sin la necesidad de usar esponjas o zonas de fricción que conllevarían un mayor dominio espacial y costo computacional. Las ecuaciones de conservación de la masa (2) y de momentum (3) que permiten resolver el campo de velocidades \bar{u}_i y presión \bar{P} en un dominio bidimensional son:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{1 + c_A} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho(1 + c_A)} \left[-\frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right] - \frac{1}{1 + c_A} \left[\frac{\alpha \nu (1 - n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1 - n)}{n D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right] \quad (3)$$

donde $\langle \rangle$ representa una magnitud promediada en el volumen, x_i es una coordenada espacial, t es el tiempo, $c_A = 0.34(1 - n)/n$ es el coeficiente de masa añadida que depende de la porosidad n , $u_i' u_j'$ son los esfuerzos de Reynolds, $\bar{\tau}_{ij}$ son los esfuerzos de corte viscosos (considerados despreciables frente a los esfuerzos de Reynolds), ρ es la densidad y g_i es la aceleración de gravedad. El último término de la ecuación de momentum representa la fricción

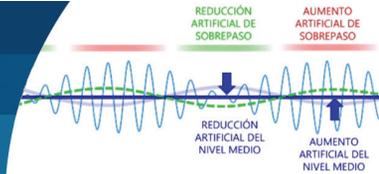
en un material poroso y se parametriza mediante los coeficientes de fricción lineal (α) y no-lineal (β), la mediana del tamaño de los elementos del enrocado (D_{50}) y la viscosidad molecular (ν). Las tensiones de Reynolds se resuelven a partir de un modelo de cierre tipo $k - \epsilon$, donde k es la energía cinética turbulenta y ϵ es el rango de disipación. Con esta parametrización, el modelo permite resolver la transmisión en el interior de medios porosos y los procesos de transferencia de energía entre las ondas infragravitatorias y el oleaje, que condicionan el run-up en playas. El modelo efectúa el seguimiento de la superficie libre mediante la técnica VOF (*Volume Of Fluid*).

Calibración del modelo IH2VOF

Para validar la capacidad de simular procesos como el sobrepaso de oleaje en defensas costeras mediante IH2VOF, se implementó un modelo numérico para replicar los ensayos de Neves *et al.* (2008). En dicho estudio se llevaron a cabo ensayos físicos a escala 1:50 para analizar el sobrepaso de oleaje en la obra de protección del puerto de Pòvoa de Varzim, en Portugal (Figura 4a). En la Figura 4b se muestra la sección de la obra en prototipo (escala 1:1), que consiste en un enrocado de protección con un parapeto en su parte posterior. La sección implementada mediante el modelo IH2VOF replica al modelo físico a escala 1:50 ilustrado en la Figura 4c. En ella se muestra el perfil de aproximación del fondo batimétrico y el parapeto en la parte posterior del enrocado, considerado como un medio poroso en el modelo IH2VOF. Estos son parametrizados mediante los coeficientes de fricción lineal (α) y no-lineal (β), además de la mediana de la granulometría del material D_{50} .

Condición de borde

Neves *et al.* (2008) considera cuatro ensayos con duración de 300 s indicados en la Tabla 1. Los ensayos se llevan a cabo con una profundidad de 0.39 m y oleaje irregular, caracterizado por un espectro JONSWAP, cuyos valores de altura significativa (H_{os}) y periodo peak (T_{op}) son medidos en el primer sensor de oleaje (*wave gauge*) de la Figura 4d. Como condición de borde, el proceso de calibración se realizó tanto con generación de oleaje de primer orden, que incorpora sólo la banda espectral asociada al oleaje, y generación de segundo orden, que incorpora tanto la banda



del oleaje como las ondas infragravatorias asociadas a los grupos de olas. Esto pues existen antecedentes que revelan una gran sensibilidad del sobrepaso ante este tipo de forzamiento. De hecho, Beyá (2017) demostró que el sobrepaso del oleaje en Av. Perú de Viña del Mar se sobreestima en hasta un 85% al usar teoría de primer orden, pues este método induce ondas largas ficticias que anulan a las ondas de grupo con que incide el oleaje en la realidad.

Tabla 1: Altura significativa (H_{os}) y periodo peak (T_{op}) medidos cerca de la paleta y caudal medio de sobrepaso por unidad de ancho de estructura (Q) utilizadas en los ensayos de modelo físico realizados por Neves *et al.* (2008).

Ensayo	H_{os} , m	T_{op} , s	Q , m ³ /s/m	Rango Q , m ³ /s/m
1	0.09	1.69	1.66×10^{-5}	0.90×10^{-5} a 2.83×10^{-5}
2	0.08	2.24	2.65×10^{-5}	2.65×10^{-5} a 8.44×10^{-5}
3	0.11	2.28	1.65×10^{-4}	1.15×10^{-4} a 2.02×10^{-4}
4	0.14	2.21	4.44×10^{-4}	3.43×10^{-4} a 4.69×10^{-4}

Con el fin de validar las condiciones de oleaje en el modelo IH2VOF, se incorporaron puntos de control siguiendo el esquema de la Figura 4d propuesto por Neves *et al.* (2008), agregando una sección de control adicional sobre el parapeto en la defensa, para obtener el caudal de sobrepaso. La Figura 5 muestra la comparación entre las condiciones de oleaje en el primer sensor de oleaje obtenidas del modelo físico (H_{os} y T_{op} en Tabla 1) y las obtenidas con el modelo IH2VOF, lo que constata la correcta incorporación de las condiciones de borde en el modelo numérico.

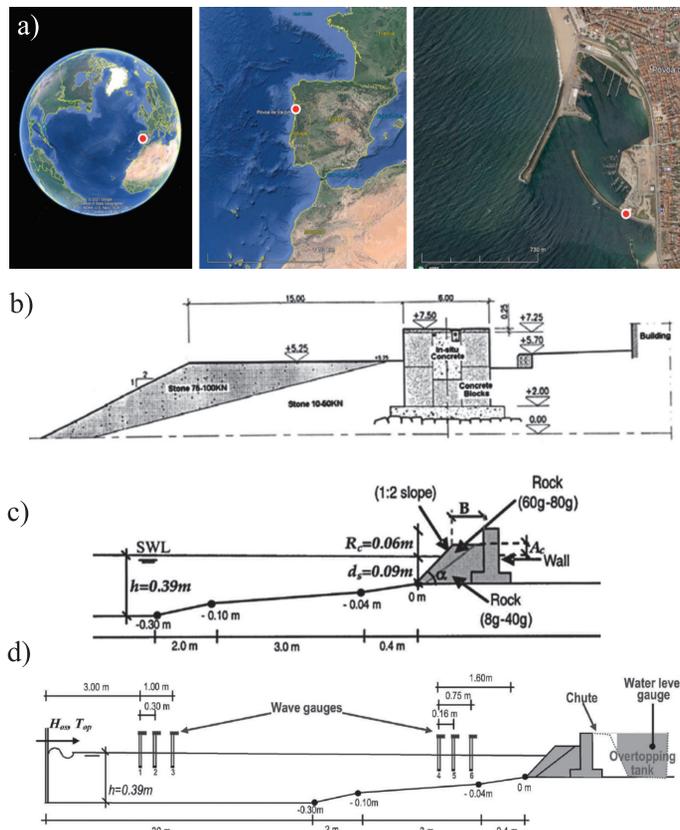


Figura 4: a) Ubicación de defensa costera del Póvoa de Varzim, en Portugal, b) en prototipo y c) en modelo físico a escala 1:50 y d) esquema de modelo físico y ubicación de puntos de control (wave gauges) para medición de condiciones de oleaje (adaptado de Neves *et al.* (2008)).

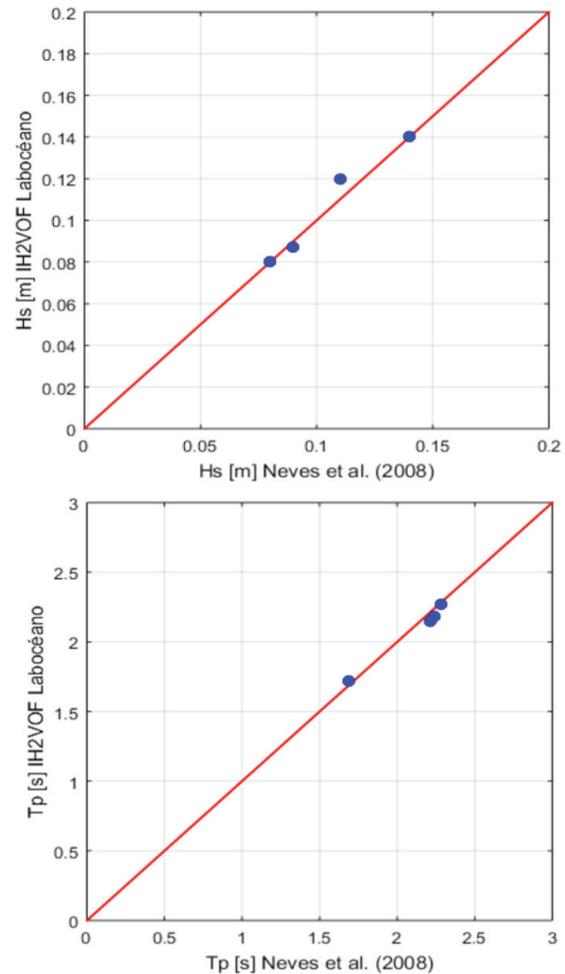
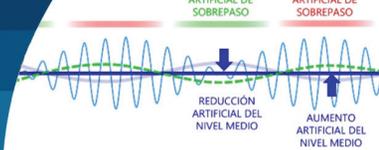


Figura 5: Diagramas de dispersión de altura significativa (H_{os}) y periodo peak (T_{op}) entre modelo físico de Neves *et al.* (2008) y modelo numérico IH2VOF

Dominio de integración y mallado numérico

En el dominio numérico (Figura 6a) se consideran mallas uniformes, con tamaños de celda constantes en las direcciones horizontal y vertical. En la Figura 6b se muestra una sección del dominio, en la que se ilustra el nivel de agua (línea azul), los obstáculos impermeables



(línea amarilla) y el enrocado de protección (línea roja) que se modela como un medio poroso. El tamaño vertical de celdas (Δy) se encuentra condicionado por la altura de ola a simular, la cual debe resolverse por una cantidad mínima de 10 celdas, *i.e.* $\Delta y < H_{os}/10$. Debido que la altura de ola significativa mínima de los ensayos ejecutados es de $H_{os} = 0.09$ m (Tabla 1), el tamaño de celda en vertical se ha establecido como $\Delta y = 0.01$ m. Adicionalmente, la relación entre los tamaños de celda de los ejes x e y debe cumplir con la relación $1 < \Delta x/\Delta y < 5$, utilizando $\Delta x = 0.015$ para las simulaciones. Adicionalmente, se consideró absorción activa de oleaje en lados izquierdo y derecho, reduciendo los posibles efectos de reflexión inexistentes en la realidad.

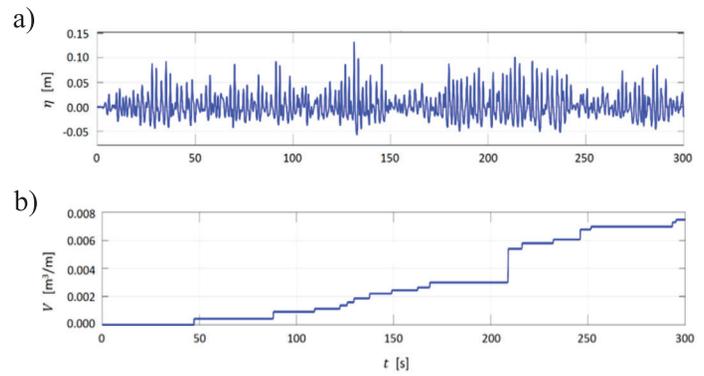


Figura 7: Resultados típicos de los ensayos utilizados en la calibración (Neves *et al.*, 2008). a) Desnivelación instantánea en el punto de control 1 y b) volumen de sobrepaso acumulado por unidad de frente de obra.

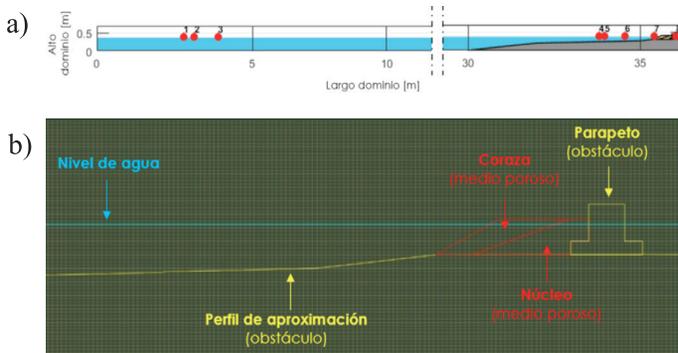


Figura 6: Mallado numérico IH2VOF para modelo de Neves *et al.* (2008): a) dominio numérico, incluyendo nodos numéricos donde se evalúan las propiedades del oleaje y b) acercamiento al mallado numérico en la defensa

Calibración del modelo Coeficientes de fricción del medio poroso

Los enrocados se consideraron como medios porosos en el modelo IH2VOF. Los parámetros a calibrar corresponden al coeficiente de fricción lineal (α) y al coeficiente de fricción no lineal (β), incluidos en las ecuaciones de momentum (3). Para definir el valor óptimo de cada parámetro se define a priori un rango o valores recomendados en la literatura. El coeficiente de fricción lineal se considera entre $200 \leq \alpha \leq 230$ y el coeficiente de fricción no-lineal en el rango $0.7 \leq \beta \leq 1.1$, dependiendo de la sección de la obra a parametrizar (Lara *et al.*, 2006; Losada *et al.*, 2008 y Guancho *et al.*, 2009). En esta evaluación se consideró una porosidad de $n = 0.6$ (USACE, 2011), un diámetro de $D_{50} = 0.22$ m para el filtro y $D_{50} = 0.33$ m para la coraza (Neves *et al.*, 2008) y un coeficiente de masa añadida de $C_A = 0.34$ (Lara *et al.*, 2006; Losada *et al.*, 2008). Esto entrega

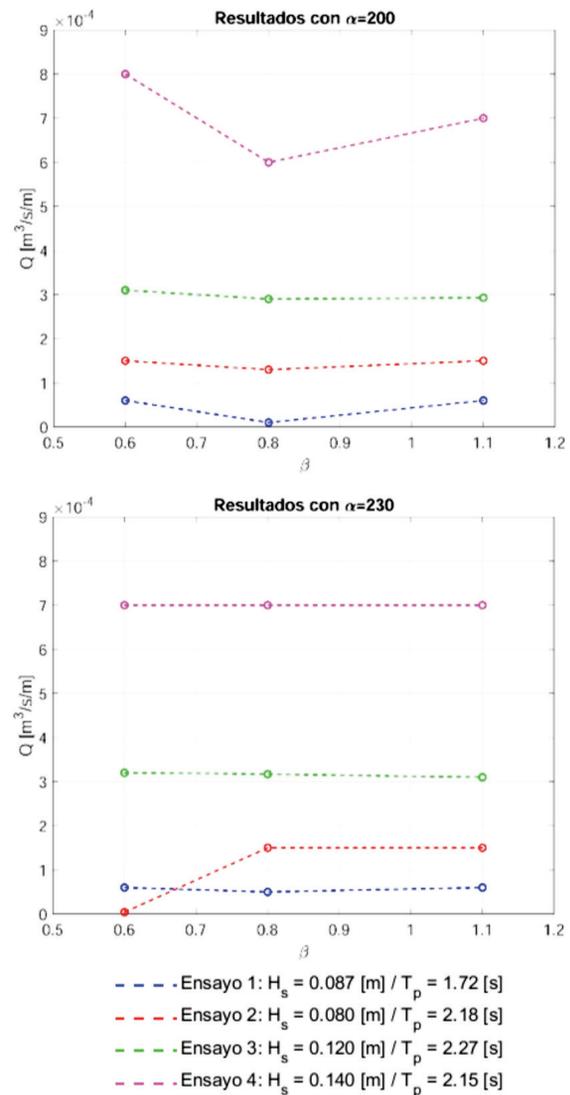
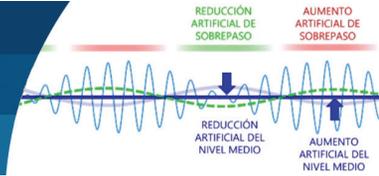


Figura 8: Caudal medio de sobrepaso por unidad de frente de obra (Q) para parametrización de α y β



un total de 24 casos para cubrir las combinaciones de α y β . Cabe destacar que este proceso se realizó sin considerar generación de segundo orden en la condición de borde.

La Figura 7 muestra la desnivelación instantánea (η) en el punto de control 1 (Figura 6a) y el volumen de sobrepaso acumulado por unidad de frente de obra, $V(t)$, obtenido al integrar el caudal instantáneo en una sección de control sobre el parapeto $Q_i(t)$ según la ecuación (4).

$$V(t) = \int_0^t Q_i(t) dt \quad (4)$$

A partir de $V(t)$ se obtiene el caudal medio de sobrepaso por unidad de frente de obra

$$Q = \frac{V(t_f)}{t_f} \quad (5)$$

donde $t_f = 300$ s corresponde a la duración del ensayo. El caudal Q obtenido para las combinaciones de α y β se exponen en la Figura 8. Salvo excepciones que especulamos devienen de la aproximación numérica, se observa que el sobrepaso es insensible a los valores de estos parámetros. Por esta razón, en adelante se utilizan valores de $\alpha = 200$ y $\beta = 0.8$, lo que concuerda con lo reportado en la evidencia científica consultada.

Generación de primer y segundo orden

Para mejorar los excesivos resultados del caudal de sobrepaso obtenidos mediante la generación de oleaje de primer orden (o generación lineal), se incorporó la generación de segundo orden (que incluye las ondas infragravitarias que acompañan al grupo), usando los valores de los parámetros obtenidos en la sección anterior ($\alpha = 200$, $\beta = 0.8$, $n = 0.6$, $C_A = 3.4$, $D_{50} = 0.22$ m para el filtro y $D_{50} = 0.33$ m para la coraza). Con estos valores, se obtuvo una sobreestimación del caudal medio de sobrepaso por unidad de frente de obra Q , por lo que se probaron diferentes valores de porosidad, hasta alcanzar un valor óptimo de $n = 0.4$, valor que concuerda con lo establecido para roca (USACE, 2011). El análisis de sensibilidad considerando una generación de segundo orden y diferentes valores de porosidad se muestran en la Figura 9.

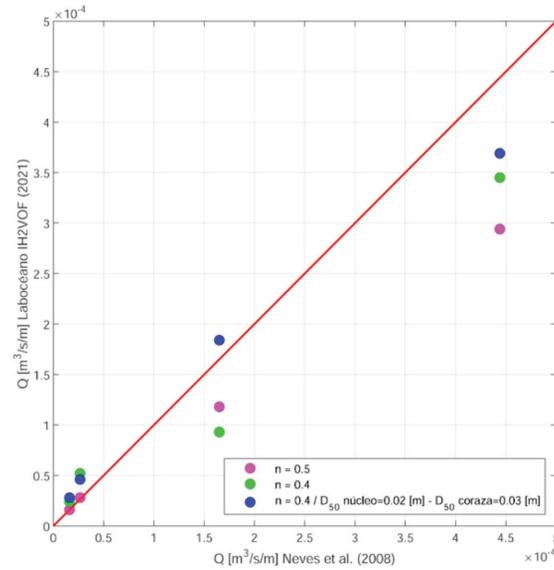


Figura 9: Comparación del caudal medio de sobrepaso por unidad de frente de obra Q en modelo físico Neves *et al.* (2008) y modelo numérico IH2VOF con generación de segundo orden y diferentes valores de porosidad. Los parámetros adoptan los siguientes valores: $\alpha = 200$, $\beta = 0.8$, $n = 0.6$, $C_A = 3.4$, $D_{50} = 0.22$ m para el filtro y $D_{50} = 0.33$ m para la coraza

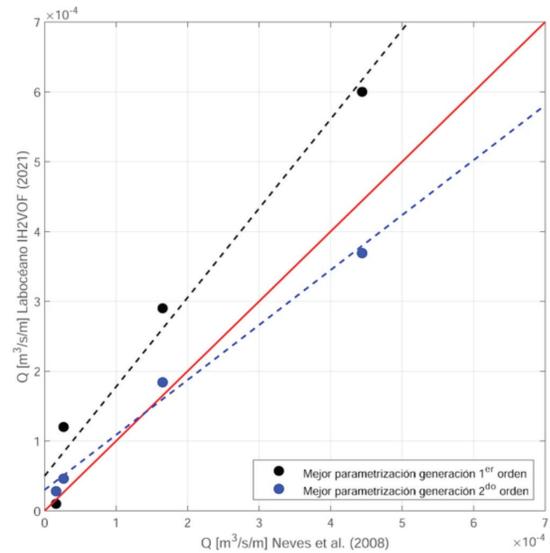
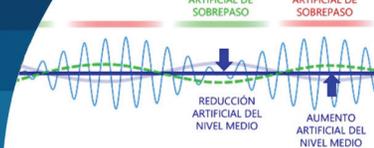


Figura 10: Comparación de caudal de sobrepaso instantáneo (Q) en el modelo físico Neves *et al.* (2008) y mejores ajustes del modelo numérico IH2VOF. Los parámetros adoptan los siguientes valores: $\alpha = 200$, $\beta = 0.8$, $n = 0.6$, $C_A = 3.4$, $D_{50} = 0.22$ m para el filtro y $D_{50} = 0.33$ m para la coraza.

La Figura 10 muestra los valores del caudal medio de sobrepaso por unidad de frente de obra (Q), considerando las mejores parametrizaciones de medio poroso para generación de oleaje de primer y segundo orden. El análisis evidencia la mejora de los resultados al incluir las ondas infragravitarias en la condición de borde, puesto que



los caudales de sobrepaso se acercan a los reportados por Neves *et al.* (2008). Por otra parte, los resultados sólo con forzamiento de primer orden muestran una sobrestimación considerable del sobrepaso, lo que se vuelve más evidente para condiciones de oleaje de mayor energía.

La Figura 11 corresponde a un modelo conceptual que explica la sobrestimación del sobrepaso cuando se utiliza generación de primer orden. De la teoría lineal del oleaje se sabe que cuando varios trenes de olas interactúan (Figura 11a) se genera un grupo que está en desfase con las olas de mayor altura (Figura 11b). Dentro del grupo, las olas resultantes de mayor altura tienen mayor energía cinética asociada que las de menor altura (la energía cinética se escala con el cuadrado de la velocidad, que a su vez se escala, en primer orden, con la altura de ola). Para conservar la energía mecánica del oleaje, el nivel medio del mar, asociado a la energía potencial, se reduce bajo las olas de mayor altura y aumenta para olas más bajas, generando así una variación del nivel medio del mar que se propaga en forma desfasada con el grupo (línea azul en la Figura 11b). Al omitir este cambio en el nivel medio con la generación de primer orden, se impone una onda infragravitatoria ficticia que está en fase con las olas de mayor altura (línea segmentada verde en la Figura 11c) y cuyo efecto es producir un nivel medio constante, reduciendo así el francobordo de la obra y aumentando el

sobrepaso. Al considerar la generación de segundo orden (Figura 11d), en contraste, se logra reproducir de manera más acertada la física del fenómeno real (Figura 11b). Al objeto de conservar la energía mecánica total, en la generación de segundo orden se impone una disminución (aumento) en el nivel medio del mar cuando las olas pertenecientes al grupo aumentan (disminuyen) su altura.

Conclusiones

Del análisis de sensibilidad del modelo numérico IH2VOF aplicado a los ensayos de Neves *et al.* (2008) se concluye que los coeficientes de fricción lineal (α) y no-lineal (β) no tienen una influencia considerable en la evaluación del caudal de sobrepaso. La porosidad de la coraza de la defensa costera (n), en contraste, juega un rol más relevante pero no primordial en los resultados. Se presume que esto se debe a que el volumen de la coraza porosa es relativamente pequeño en estos ensayos analizados. El mejor desempeño de los resultados utilizando la generación de segundo orden en la condición de borde demuestra la importancia de las ondas infragravitatorias en el cálculo del sobrepaso. En la física real, este tipo de ondas disminuyen el nivel medio del mar cuando inciden olas de gran altura, proceso que sólo se reproduce incorporando la generación de segundo orden en la modelación numérica. Por ende, recomendamos efectuar un análisis de sensibilidad de los parámetros que caracterizan los medios porosos en las ecuaciones VARANS y utilizar el forzamiento de segundo orden tanto en la modelación numérica como física del sobrepaso de oleaje sobre defensas costeras.

Referencias

- Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2016). *EurOtop II Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Second edition. HR Wallingford, UK
- Beyá, I. (2017). *Comparación del sobrepaso del oleaje en canales experimentales, utilizando teorías de generación de oleaje de 1er y 2do orden*. Caso de análisis: Av. Perú, Viña del Mar, Chile, en canal bidimensional del Instituto Nacional de Hidráulica. *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, Universidad Santa María, Valparaíso, Chile, artículo 52

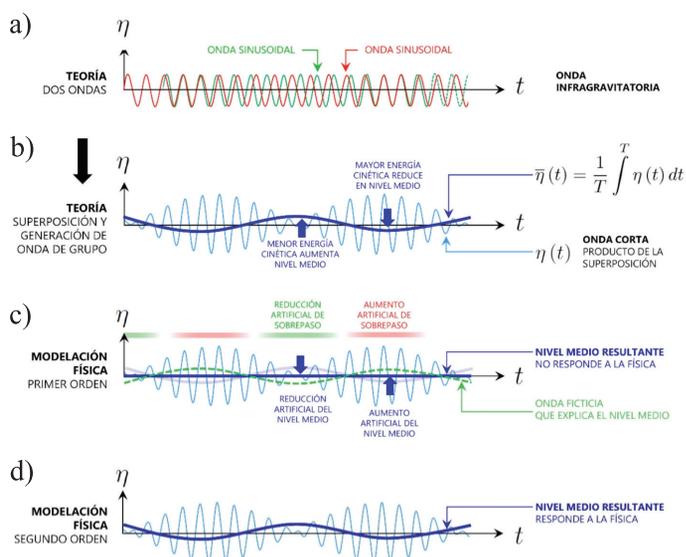
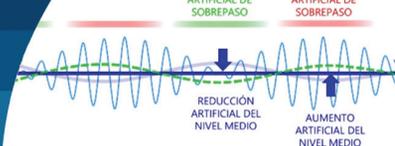


Figura 11: Teoría de superposición de ondas e implicancias en nivel medio del mar y sobrepaso al considerar forzamiento de primer y segundo orden.



- Di Lauro, E., Lara, J.L., Maza, M., Losada, I.J., Contestabile, P. and Vicinanza, D. (2019). Stability analysis of a non-conventional breakwater for wave energy conversion. *Coastal Engineering* **145**, 36-52
- Fritz, S. (2018). Estudio del sobrepaso en avenida Perú mediante el software CFD - olaFOAM. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso, Chile
- García, N., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2004). 2D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. *Coastal Engineering* **51**(10), 991-1020
- Guanche, R., Losada, I.J. and Lara, J.L. (2009). Numerical modelling of coastal structures stability. *Coastal Engineering* **56**(5-6), 543-558
- Lara, J.L. (2005). A numerical wave flume to study the functionality and stability of coastal structures. *Journal of the International Navigation Association (PIANC)* **121**: 5-29
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering* **53**(5-6), 395-417
- Losada I.J., Lara J.L., Christensen E.D. and Garcia, N. (2005). Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering* **52**(10-11), 887-913
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanache, R. and Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* **55**(1), 47-62
- Neves, M.G., Reis, M.T., Losada, I.J., Asce, M., Keming, H. (2008). Wave overtopping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering* **134**(4), 226-236
- Pedersen, J. (1996). Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters: an experimental study. Aalborg Universitetsforlag. Series paper No. 12, Denmark
- USACE (2011). Coastal engineering manual, part VI, chapter 5: Fundamentals of design. US Army Corps of Engineers. USA
- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beya, J. y Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research* **45**(4): 622-648
- Winckler, P., Esparza, C., Agredano, R. y Ibaceta, R. (2019). Nuevas metodologías para el estudio de marejadas en Chile. En Martínez, C., Hidalgo, R., Henríquez, C., Arenas, F., Rangel, N. y Contreras-López, M. (eds.). *La Zona Costera en Chile: Adaptación y Planificación para la Resiliencia*. Serie GEOlibro N° 31, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile