

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

EVALUACIÓN DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD) COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO PARA ESTIMAR SOBREPASO EN ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

TOMÁS CUEVAS LÓPEZ¹ JOSÉ GALLARDO CANABES²

RESUMEN

El sobrepaso en un rompeolas en talud es simulado mediante dinámica computacional de fluidos (CFD), validando los resultados obtenidos con ensayos de modelo físico. Se simularon casos con periodos de retorno (T_r) de 475 y 1,500 años, representando los estados de mar más extremos en el diseño del rompeolas. Para efectos de comparación con el modelo físico se adoptó el caudal promedio de sobrepaso, obteniendo diferencias relativas de 42% para el caso con T_r = 475 años, y 6% para el caso con T_r = 1,500 años, siendo un resultado satisfactorio tomando en cuenta la complejidad del flujo representado. Con esto, queda en evidencia el potencial de CFD como herramienta para verificar y optimizar el diseño de estructuras costeras, permitiendo complementar métodos que implican mayor costo y plazos, como los ensayos de modelo físico.

¹ Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University ² PRDW Consulting Port & Coastal Engineers



1 INTRODUCCIÓN

Existen diversas herramientas para la estimación de sobrepaso en estructuras costeras, que se utilizan en función del tamaño del proyecto y de la disponibilidad de tiempo y recursos. Formulaciones de EurOtop (EurOtop, 2018) permiten obtener rápidamente estimaciones iniciales en etapas de prediseño, mientras que, en fases más avanzadas de ingeniería, se realizan normalmente ensayos en modelo físico 2D o 3D con el fin de verificar y optimizar el diseño.

Los avances en capacidad computacional permiten hoy en día resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, siendo esta una herramienta que permite estudiar problemas que involucran flujos turbulentos en geometrías complejas con un alto nivel de fidelidad. Mediante una adecuada representación de las condiciones de borde para oleaje, del flujo en superficie libre y de la turbulencia, técnicas de dinámica computacional de fluidos (CFD) pueden ser aplicadas a la ingeniería costera; ver por ejemplo (Higuera, Lara, & Losada, 2014) y (Tomás, y otros, 2019).

En este trabajo se describe la validación de un modelo de CFD para estimación de sobrepaso, usando resultados disponibles de modelo físico 2D específicos para un proyecto de rompeolas en talud.

2 METODOLOGÍA

Se describen a continuación los principales aspectos de la metodología utilizada en el modelo CFD y otras herramientas para la estimación de sobrepaso.

2.1 Modelado numérico

Para la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes se utilizó OpenFOAM, que es una biblioteca multipropósito de código abierto, adecuada para resolver problemas multifísicos de CFD con una discretización de volúmenes finitos. No es un programa per se, sino una amplia colección de bibliotecas y programas que permite al usuario no solo simular la física del problema, sino también hacer el pre y post procesamiento de los datos. En ese sentido, OpenFOAM cubre todas las etapas del modelado CFD.

Para representar condiciones de oleaje se utilizó olaFlow, que es un proyecto de código abierto comprometido a llevar los últimos avances para la simulación de dinámicas de oleaje a OpenFOAM. Es un conjunto de solvers y condiciones de borde para generar y absorber activamente el oleaje en los contornos del dominio y simular su interacción con estructuras porosas e impermeables, proporcionando las siguientes tecnologías de vanguardia:

- Generación de oleaje de última generación y absorción activa en los contornos (sin aumentar el costo computacional).
- Diferentes teorías de oleaje (Stokes, cnoidal, irregular, etc).
- Generación simultánea de oleaje y corriente.
- Replicación de generadores de ondas tipo pistón y paleta, incluyendo absorción activa.



• Flujo bifásico a través de medios porosos (VARANS).

La suite olaFlow resuelve las ecuaciones 3D de la aproximación de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes, promediadas en volumen (VARANS), utilizando para ello la discretización de volúmenes finitos. Se representan dos fases incompresibles (agua y aire) utilizando la técnica de volumen de fluido (VOF) para representar la superficie libre. El modelado de la turbulencia se puede incluir mediante diferentes enfoques (RANS / LES) y varios modelos disponibles. Las ecuaciones de VARANS representan físicamente el flujo dentro de los medios porosos. Para definir la media (promedio en volumen) dentro de los materiales porosos, se requiere definir: porosidad (n) y diámetro nominal (D₅₀).

Los términos de cierre en las ecuaciones de Navier-Stokes se formulan en términos de componentes lineales, no lineales y transientes. Cada uno de estos depende de un factor de ajuste (α , β and C) que debe establecerse caso a caso. Generalmente, el usuario necesita seleccionar los valores más adecuados de acuerdo con sus datos experimentales o teóricos. Es importante destacar que las ecuaciones de VARANS se pueden aplicar simultáneamente dentro y fuera del medio poroso.

El acople presión-velocidad se resuelve mediante un método de dos pasos llamado PIMPLE, derivado de PISO (Presión implícita con separación de operadores) y SIMPLE (Método semiimplícito para ecuaciones acopladas con presión). La ecuación advección-difusión de la función VOF se resuelve con un método independiente llamado MULES (limitador multidimensional para solución explícita). Mayores detalles de la metodología se pueden consultar en (Higuera, 2015).

2.2 Aspectos claves del sobrepaso

Los parámetros más relevantes para el sobrepaso indicados por el manual de EurOtop (EurOtop, 2018) son:

- Altura de ola significativa incidente en el pie de la estructura, $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$.
- Período espectral del oleaje $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$, que permite mejor representación de períodos más largos. Para espectros de pico único $T_p = 1.1T_{m-1,0}$.
- La pendiente de ola, definida como la relación entre la altura de la ola y la longitud de ola $s_0 = H_{m0} / L_0$, y el parámetro de rotura o número de lribarren, definido como $\xi_{m-1,0} = tan(\alpha)/(H_{m0}/L_{m-1,0})^{\frac{1}{2}}$, con α la pendiente de la estructura en lado mar y $L_{m-1,0}$ la longitud de onda en aguas profundas $gT^2_{m-1,0}/(2\pi)$.
- Pie de la estructura.
- Longitud mínima de batimetría frente a la estructura igual a una longitud de onda L_{m-1,0}.
- Talud de la estructura.
- Berma, que en el presente caso es horizontal.
- Francobordo de coronamiento (R_c) , francobordo de la coraza (A_c) y ancho (G_c) .
- Permeabilidad, porosidad (porcentaje de huecos entre unidades de coraza, filtro o núcleo) y rugosidad producto de enrocados o elementos de hormigón colocados sobre el talud.
- Altura de remonte de la ola R_{u2%}, que es el nivel de remonte de la ola excedido por el 2% del número de olas incidentes.



- Descarga de sobrepaso (q) en m³/s o l/s, definida como la descarga promedio por metro lineal de ancho de estructura.
- Volúmenes de sobrepaso (V) sobre el coronamiento de la estructura en m³ por ola por m de ancho.

2.3 Formulaciones empíricas y otros métodos para estimar sobrepaso

2.3.1 Formulación del EurOtop

La formulación de EurOtop para las estimaciones de sobrepaso es (EurOtop, 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,09 \cdot \exp\left[-\left(1,5 \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)^{1,3}\right] para \ m = 1:2 - 1:4/3$$
(1)

Dónde

- q caudal de sobrepaso promedio [m³/s/m]
- g aceleración de gravedad [m/s²]
- H_{m0} altura ola significativa [m]
- R_c francobordo de coronamiento [m]
- γ_{β} factor de oblicuidad [-]
- Yf factor de permeabilidad y rugosidad [-].

Para efectos de comparación, se consideró el valor calibrado de γ_f para obtener una mejor estimación, con lo cual se aumentó el valor teórico de 0.47 a un valor de 0.58.

2.3.2 Herramienta con redes neuronales

Deltares desarrolló una herramienta en base a redes neuronales (XGB-overtopping) para predecir el sobrepaso en estructuras costeras (Den Bieman, van Gent, & van den Boogaard, 2021). Esta herramienta es aplicable a rompeolas en talud, y los detalles de su implementación y tutoriales se pueden consultar en su sitio web: <u>https://www.deltares.nl/en/software/overtopping-xgb/</u>.

Las principales características de esta herramienta son:

- Es aplicable a un amplio rango de estructuras costeras.
- El modelo está basado en más de 10,000 resultados de modelo físico en importantes laboratorios a nivel internacional.
- El método de predicción está basado en el método Gradient Boosting Decision Trees (GBDT), que permite hacer frente a grandes diferencias de densidad en los resultados de rebase.
- Las predicciones de la herramienta pueden ser utilizadas en etapas tempranas de ingeniería a nivel conceptual. Sin embargo, las etapas finales de diseño deben ser validadas con modelo físico.



Las descargas promedio de rebase obtenidas con XGB-overtopping se incluyeron también en el presente análisis.

3 DESCRIPCIÓN DEL CASO Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para el presente estudio se consideró una sección transversal de rompeolas para la cual se realizaron ensayos 2D de modelo físico en un canal de oleaje a escala 1:40, que incluyeron la estimación de sobrepaso para distintos estados de mar. Las principales características de la sección tipo (Figura 1):

- Coraza con bi-capa de cubos de hormigón de 60 t con una pendiente de 1V: 1.8H.
- Filtro con doble de roca de 3-6 t sobre una capa de enrocado de 250-500 kg.
- Pie de la estructura con roca de 3-6t.
- Muro parapeto de hormigón en masa.



Figura 1: esquema del rompeolas en talud utilizado para la validación.

Todas las condiciones de los ensayos se definieron en un punto a -25 m NRS, a aproximadamente 120 m del pie del rompeolas. La batimetría representó aproximadamente 620 m del fondo marino y se instalaron un total de ocho sondas en la configuración mostrada en la Figura 2:

- Se colocó un grupo de cuatro sondas de oleaje (5 a 8) frente al rompeolas, que fue la ubicación de calibración para definir la altura de ola incidente.
- Otro grupo de cuatro sondas (1 a 4) se colocó a aproximadamente -35 m NRS, cerca de la paleta generadora de olas.



Figura 2: esquema de la batimetría y disposición de sondas en el modelo físico.

Los estados del mar ensayados se muestran en la Tabla 1. Los primeros tres estados de mar se utilizaron para determinar el sobrepaso operacional, por lo cual se ensayaron con el nivel medio del mar. Luego, los ensayos 4 a 10 corresponden a condiciones de oleaje de diseño, cuya energía es incrementada gradualmente a medida que transcurren los ensayos. Los ensayos 7 y 8 se utilizaron para evaluar el daño en el pie y por lo tanto no son relevantes para rebase. Se ensayó además con distintos periodos pico, sobre la base de que los periodos más cortos tienden a causar mayor nivel de daño en la estructura (pie y coraza), mientras que periodos más largos resultan en mayores volúmenes de sobrepaso.

Caso	Periodo de retorno	Nivel del mar	Hmo	Tp	Duración tormenta	
	Años	[m NRS]	[m]	[s]	[h]	
1	1	1.89	4.7	14.0	10	
2	1	1.89	4.7	17.0	10	
3	5	1.89	5.7	18.0	10	
4	5	2.69	5.7	18.0	10	
5	50	2.69	7.0	15.0	10	
6	50	2.69	7.0	19.0	10	
7	50	0.14	7.0	19.0	10	
8	475	0.14	8.1	20.0	10	
9	475	2.69	8.1	16.0	10	
10	1500	2.69	8.6	20.0	10	

Tabla 1: parámetros para los estados del mar ensayados en modelo físico 2D.

Una vista de la configuración de los ensayos en la



Figura 3, en la cual se muestra la coraza compuesta por cubos de hormigón y enrocado de pie (panel izquierdo), y el muro parapeto y protección del trasdós (panel derecho)



Figura 3: sección ensayada en modelo físico.

3.1 Configuración del modelo

La ventaja de olaFlow es su capacidad para implementar condiciones de borde con oleaje regular e irregular, y la representación de medios porosos en estructuras costeras, pudiendo aplicarse a diversos problemas de ingeniería de costas. A continuación, se describen los parámetros más relevantes al implementar el modelo CFD.

3.1.1 Malla numérica

El dominio del modelo se configuró para que coincidiera con las dimensiones del canal a escala de prototipo. La malla se generó utilizando un método de dos pasos:

- Primero se definió un dominio rectangular con una longitud de 1,600 m y 70 m de altura. Se utilizó la resolución vertical de 1 m. La resolución horizontal se definió como variable. En los primeros 1,265 m se utilizó un factor de expansión de 0.25 (es decir, el tamaño del elemento varió de 4 m en el origen hasta 1 m). En los siguientes 200 m desde el pie de la estructura hasta su trasdós, el Δx tiene un valor constante de 1 m. En el trasdós de la estructura, se utilizó una relación de expansión de 3.
- Las capas de rompeolas y la pendiente de fondo se importaron directamente al código CFD desde un archivo CAD de sección transversal. Los elementos impermeables fueron extraídos del dominio. Se aplicaron refinamientos de malla a lo largo de un área que cubre las elevaciones de superficie libre esperadas y en los bordes del rompeolas.



3.1.2 Condiciones de borde

3.1.2.1 Oleaje

Se utilizó un estado de oleaje irregular generado a partir de un espectro JONSWAP. Los parámetros espectrales se definieron para que coincidieran con los escenarios del modelo físico.

Para asegurar resultados estadísticamente similares, los espectros JONSWAP se definieron utilizando la misma relación de H_{max} y H_{mo} (H_{max}/H_{m0}) que, en los espectros resultantes del modelo físico, utilizando aproximadamente 1,000 olas equivalente a un tiempo de simulación de 10,800 s.

3.1.2.2 Porosidad

Los parámetros de porosidad para las diferentes capas que conforman el rompeolas se obtuvieron de la literatura (Higuera, 2015). Las distintas porosidades en cada capa constituyen los principales parámetros de calibración.

3.1.3 Parámetros de la simulación

El modelo se ejecutó con un paso de tiempo variable que permite que el número máximo de Courant esté siempre por debajo de 0.45. Como las simulaciones con OpenFOAM pueden terminar en una cantidad masiva de datos (muchos GB), se tomaron registros de la simulación cada 1 s.

Las corridas se realizaron en una estación de trabajo utilizando hasta 12 núcleos físicos de cómputo, obteniendo tiempos de simulación de aproximadamente 36 h.

4 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

El modelo CFD descrito en §2.2 permite estimar descargas de sobrepaso (green water) en estructuras de muro vertical como el parapeto que se muestra en la Figura 1, sobre la cual habrá olas que impactarán el muro, enviando una lámina vertical de agua sobre el coronamiento de la estructura. Con este esquema también es posible capturar salpicaduras por efecto de olas que rompen en el lado del mar de la estructura.

Estos dos fenómenos, sobrepaso y salpicaduras, también se pueden predecir utilizando fórmulas empíricas de EurOtop (EurOtop, 2018). Por lo mismo, se utilizaron estas formulaciones, previamente calibradas a partir de los datos de modelo físico, para efectos de comparación. También se compararon resultados con herramientas basadas en redes neuronales (Den Bieman, van Gent, & van den Boogaard, 2021).

4.1 Resultados con el modelo CFD



En primer lugar, las alturas de ola incidentes obtenidas con el modelo CFD se comparan con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. En ambos casos, el oleaje incidente se estima con la estructura del rompeolas en su lugar, y la consiguiente reflexión. La comparación se realizó para sondas g₁ y g₈, es decir, las más cercanos a la paleta de olas y al rompeolas, respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4 y la Figura 5 para los casos 9 y 10, respectivamente.



Figura 4: comparación de H_{m0} para el caso 9, CFD vs experimentos.

Figura 5: comparación de H_{m0} para el caso 10, CFD vs experimentos.



El caso 9 exhibió mayores diferencias con respecto a los resultados experimentales, con diferencias de 9% cerca de la estructura. La calibración de algunos parámetros como el factor de fricción y la porosidad puede conducir a un mejor ajuste. Otra fuente de incertidumbre posible es la ubicación de las sondas, cuya ubicación precisa no estaba disponible. También se pueden producir diferencias debido a máximos puntuales que no son representados en la serie de olaje simulada.



En la serie 10 se producen además mayores eventos de rompimiento antes de que el oleaje alcance la estructura, debido a las mayores alturas de ola.

A continuación, se comparan los volúmenes de rebase acumulado en la Figura 6 y Figura 7 para los casos 9 y 10, respectivamente.



Figura 6: rebase acumulado para caso 9, CFD vs experimentos.

Figura 7: rebase acumulado para caso 10, CFD vs experimentos.



En el caso 9, la diferencia con respecto a los ensayos en modelo físico es relativamente alta, con 60 m³/ m vs 140 m³/ m. En parte, esta diferencia se puede atribuir a la menor altura de oleaje obtenida con el modelo CFD, como se ve en Figura 4, que a su vez puede deberse a un evento de máximo puntual que ocurrió pasados los 8,000 s en el modelo físico. Puesto que el caudal varía exponencialmente con la altura de la ola (EurOtop, 2018), la diferencia de volumen al final de



distintos ensayos puede ser bastante significativa. Adicionalmente, la calibración de los parámetros del modelo CFD puede conducir a una mejor predicción del sobrepaso.

Las simulaciones numéricas para el caso 10 dieron como resultado una menor diferencia relativa con respecto a los resultados del modelo físico, siendo el volumen acumulado del modelo CFD 200 m³/m menor que aquel obtenido en el modelo físico. Es importante tener en cuenta que los volúmenes máximos registrados en el laboratorio fueron bastante significativos, de hasta 125 m³/m. En contraste, el modelo CFD predijo menores volúmenes instantáneos y un mayor número de eventos de sobrepaso (ver Figura 7). En el modelo físico, el rebase se cuantificó recolectando el agua en un recipiente calibrado y midiendo los cambios de volumen durante un tiempo específico; esto explica las oscilaciones que se observan en la serie de tiempo del caso 10. Por lo tanto, algunos valores medidos en el laboratorio como volúmenes individuales podrían corresponder a una serie de eventos consecutivos, mientras que los volúmenes de sobrepaso en el modelo CFD se cuantifican con un sensor en la parte superior del coronamiento, que es capaz de identificar cada evento de sobrepaso.

La Figura 8 muestra una captura de un evento de rebase para el presente caso, en donde se puede observar la lámina de agua que sobrepasa el muro parapeto y cae sobre el trasdós del rompeolas. En ambos paneles, la escala de color indica la magnitud de la velocidad.



Figura 8: evento de rebase en el caso 10.

4.2 Análisis de resultados

En la Tabla 2 se resume el caudal de rebase promedio obtenido mediante distintas metodologías. Aunque no fueron simulados con el modelo CFD, también se incluyen en la comparación los casos 1 a 6.



Método	Símbolo	Unidad	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B9	B10
Modelo físico	qlab	l/s/m	0.001	0.37	0.91	1.2	3.2	5.3	10.5	60
EurOtop	q	l/s/m	1.84	3.84	6.95	7.95	6.97	13.39	11.13	21.37
EurOtop calibrado	q _{cal}	l/s/m	4.52	7.74	12.34	13.43	12.46	20.53	18.10	30.31
XGB	QхGв	l/s/m	0.17	0.35	1.29	1.17	3.11	5.24	19.61	58.13
CFD	qolaFlow	l/s/m	-	-	-	-	-	-	5.66	63.75

Tabla 2: caudal de rebase promedio.

La Figura 9 muestra la diferencia relativa para los casos 9 y 10.



Figura 9: diferencia relativa con respecto al modelo físico, casos 9 y 10.

La descarga promedio para el caso 9 con el modelo CFD es aproximadamente la mitad de la obtenida en el laboratorio, siendo el único método que subestima la descarga. Las otras metodologías tienden a sobreestimar la descarga de sobrepaso en más del ~80%, excepto por la formulación de EurOtop sin calibrar, que difiere solo en un 6% con respecto a los experimentos. Teniendo en cuenta los resultados para otros estados de mar, este último resultado puede corresponder más bien a una compensación de errores.

La concordancia entre los resultados experimentales y el modelo CFD para el caso 10 es muy buena, con una diferencia relativa del 6.3%. En este caso, sólo el rebase estimado con XGB se acerca a los resultados experimentales en ese orden de magnitud. Las estimaciones con EurOtop subestiman el caudal de rebase en al menos 50% del valor obtenido en el modelo físico.

Como comentario adicional, para los casos 1 a 6, EurOtop sobreestima los resultados experimentales por un amplio margen, de hasta 21 veces el valor experimental para el caso 2. En cambio, las estimaciones con XGB se acercan bastante a los valores experimentales incluso para caudales bajos de sobrepaso, como por ejemplo el caso 2 en la Tabla 2.



5 CONCLUSIONES

Se simuló mediante CFD la respuesta de un rompeolas en talud a la acción de las olas, para lo cual se consideraron dos estados-mar que se esperaba que dieran grandes sobrepasos, con periodos de retorno de 475 y 1500 años, correspondientes a los casos 9 y 10, respectivamente. Los estados de mar simulados fueron ensayados en modelo físico, permitiendo la comparación directa para validación del modelo CFD.

Las principales conclusiones derivadas de este análisis son:

- La predicción de las alturas de ola incidentes con el modelo CFD fue prácticamente la misma cerca de la paleta de olas, mientras que frente al pie del rompeolas se desvió un 9,3% y un 6,2% de los resultados experimentales en los casos 9 y 10, respectivamente. La calibración de los parámetros del modelo, en particular el factor de fricción puede mejorar aún más la estimación de las alturas de ola.
- Para los estados de mar considerados, la capacidad del modelo de CFD para estimar el caudal de sobrepaso fue satisfactoria. Para el caso 10, con 1,500 años de periodo de retorno, se obtuvo una diferencia relativa del caudal de sobrepaso del 6,3% con respecto al modelo físico. En el caso 9, con 475 años de periodo de retorno, el modelo CFD predijo 5.7 l/s/m versus 10.5 l/s/m en el modelo físico, que si bien corresponde a una relativa aparentemente alta (46%), puede estar influenciada por eventos máximos puntuales que aumentan de forma abrupta el volumen de rebase.
- Aunque herramientas como XGB-overtopping y MIKE 3 WAVE FM son efectivas para predecir el sobrepaso en estructuras costeras convencionales, como rompeolas en talud, pueden tener limitaciones para aplicaciones en geometrías complejas como paredes verticales, curvatura en la sección transversal (verteolas) y geometrías con efectos 3D importantes.
- CFD es aplicable como herramienta de diseño tanto en las primeras etapas de ingeniería como durante las etapas más avanzadas, donde es necesario validar y optimizar los diseños propuestos. Esta técnica, si bien no reemplaza la aplicación de modelos físicos, permite llegar con un diseño más acabado a los ensayos, con el consiguiente ahorro en tiempo y costos.



6 REFERENCIAS

- Den Bieman, J., van Gent, M., & van den Boogaard, H. (2021). Wave overtopping predictions using an advanced machine learning technique. *Coastal Engineering*(103830).
- EurOtop. (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.
- Higuera, P. (2015). Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional a la Acción del Oleaje Sobre Estructuras. Tesis Doctoral.
- Higuera, P., Lara, J., & Losada, I. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and validation. *Coastal Engineering*, 243-258.
- Tomás, A., Álvarez de Eulate, M. F., Barajas, G., Lara, J. L., Losada, I. J., Rodriguez de Segovia, M. F., & Esteban, F. (2019). Coastal Structures. Karlsruhe.