

Metodología para la simulación de las solicitaciones hidráulicas tridimensionales sobre diques verticales a lo largo de su ciclo de vida

A New Methodology to Simulate Three-Dimensional Hydraulic Loads on a Vertical Breakwater Along its Life Cycle

Antonio Tomás Sampedro^{*a}, María Fuentes Álvarez de Eulate^a, Gabriel Barajas Ojeda^a,
María Maza Fernández^a, Javier López Lara^a, Nuria Cotallo Angulo^b,
Íñigo Losada Rodríguez^a, Francisco Esteban Lefler^b

^a Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España

^b Área de Infraestructuras, FCC Servicios Ciudadanos, Madrid, España

Recibido el 7 de junio de 2019; aceptado el 14 de febrero de 2020

RESUMEN

Dentro del diseño de cajones de hormigón para la construcción de diques verticales, se ha definido una nueva metodología para el cálculo de las solicitaciones tridimensionales y la estabilidad hidráulica asociada para todas las fases constructivas de los mismos, basada en el modelado numérico CFD (Computational Fluid Dynamics) tridimensional y las técnicas estadísticas de Monte-Carlo que tienen en cuenta la variabilidad climática y la incertidumbre asociada a los procesos involucrados. Esta metodología se ha aplicado al caso real del dique de abrigo del puerto de Granadilla (Tenerife, España).

©2022 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad y ciclo de vida de las infraestructuras portuarias.

ABSTRACT

A new methodology has been defined to calculate three-dimensional loads and hydraulic stability on concrete caissons all along construction stages of their life cycle. The study of wave loading on the caisson has been simulated using three-dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) modeling. In order to take into account the wave climate variability and uncertainties associated with all processes involved, the Monte-Carlo statistical technique has been used. The application of this methodology in a real study case is shown in this paper: the main vertical breakwater of Granadilla Port (Tenerife, Spain).

©2022 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

KEYWORDS: Sustainability and port infrastructures life-cycle.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco de trabajo

En las últimas décadas, las metodologías para el estudio de las estructuras costeras han evolucionado de forma considerable

fundamentalmente gracias a la incorporación de herramientas numéricas avanzadas. El desarrollo de técnicas computacionales y la evolución de nuevos y más eficientes recursos informáticos han permitido el uso de estas herramientas como complemento o alternativa a los métodos tradicionales como el análisis con formulaciones semi-empíricas (SE) y el modelado físico en laboratorio. Paralelamente, en los últimos años

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / e-mail: antonio.tomas@unican.es (Antonio Tomás Sampedro).

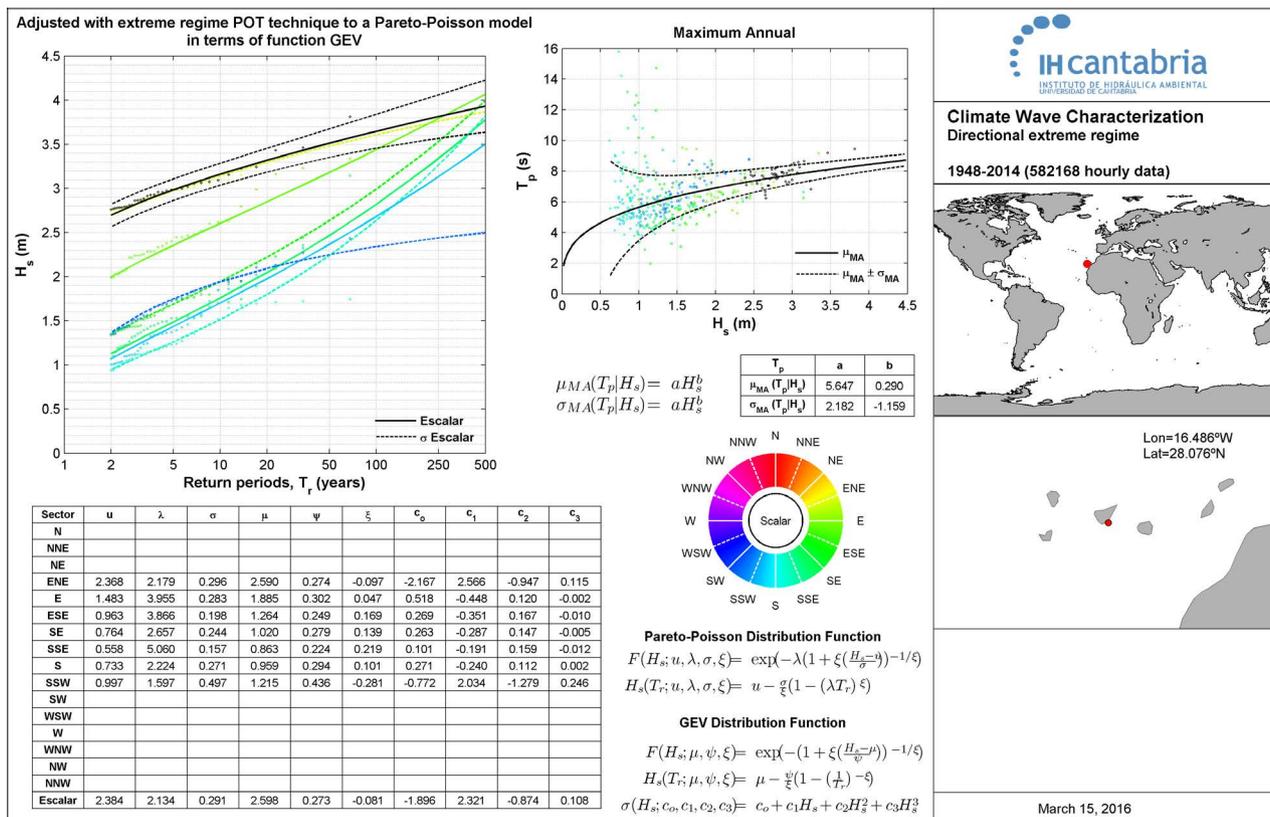


Figura 1. Régimen extremal direccional frente al puerto de Granadilla (Tenerife, España).

se ha generalizado el uso de cajones de hormigón armado en diques verticales debido a que permite la reducción de plazos y costes en la construcción de los mismos.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es uno de los métodos más adecuados y utilizados en el ámbito de la ingeniería costera para determinar las sollicitaciones del oleaje sobre una estructura, gracias a su capacidad, versatilidad y precisión para resolver procesos físicos complejos. El uso de modelos CFD en otros campos de la ingeniería es bastante común, de cara a optimizar los diseños y métodos de construcción. Sin embargo, su uso en la ingeniería costera aún no se ha incorporado completamente a pesar de que ya existen modelos CFD en la literatura que reproducen la interacción oleaje-estructura tales como efectos tridimensionales y estructuras no convencionales de forma fiable [1, 2].

Por otro lado, en el proceso de diseño de un dique, existe incertidumbre en los resultados obtenidos, no sólo debido a las herramientas utilizadas, sino también a las metodologías, a la caracterización geométrica y de resistencia de los elementos del dique y sus etapas de construcción, a las batimetrías, al carácter estocástico del clima marítimo incidente en la estructura, los efectos del cambio climático, etc. Con todo esto, y dado que la vida útil de este tipo de estructuras suele ser de varias décadas, estas incertidumbres deben tenerse en cuenta y, por lo tanto, es importante utilizar metodologías probabilísticas que consideren dicha variabilidad en su diseño.

En la actualidad, para caracterizar las cargas hidráulicas 3D sobre un dique vertical a lo largo de su vida útil, no existen métodos probabilistas que hagan uso de los modelos CFD debido a los elevados tiempos de cómputo requeridos. Para las aplicacio-

nes de ingeniería costera (resolución de procesos costeros) existe un conjunto de metodologías, conocidas como metodologías híbridas, que combinan modelos numéricos con herramientas matemáticas o estadísticas con el objetivo de reducir el esfuerzo computacional [3, 4]. Para el caso de diques verticales ya se ha desarrollado una metodología híbrida para el cálculo de las cargas del oleaje sobre el mismo [5], basada en la selección de una serie de estados del mar, el cálculo de la estabilidad hidráulica del dique y, finalmente, su reconstrucción mediante técnicas estadísticas. Sin embargo, en esta metodología, el cálculo de la estabilidad hidráulica se basa en fórmulas SE, no en el uso de modelos CFD.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo consiste en el desarrollo de una metodología para determinar la máxima carga 3D del oleaje y la estabilidad hidráulica asociada, en cajones de hormigón armado a lo largo de su vida útil (incluyendo sus diferentes fases constructivas). A partir de estas se obtendrá la probabilidad de fallo, en términos de estabilidad hidráulica, a lo largo de la vida útil de un dique vertical.

Dentro de la metodología, las sollicitaciones del oleaje se simularán utilizando un modelo CFD 3D, y se comparará con los resultados de las fórmulas SE del estado del arte. Además, esta metodología permitirá evaluar la incertidumbre de los resultados, teniendo en cuenta las incertidumbres inherentes a la geometría del cajón, al cálculo de las cargas del oleaje, al oleaje incidente y a los efectos del cambio climático.

Finalmente, dicha metodología se aplicará a un caso real de estudio.

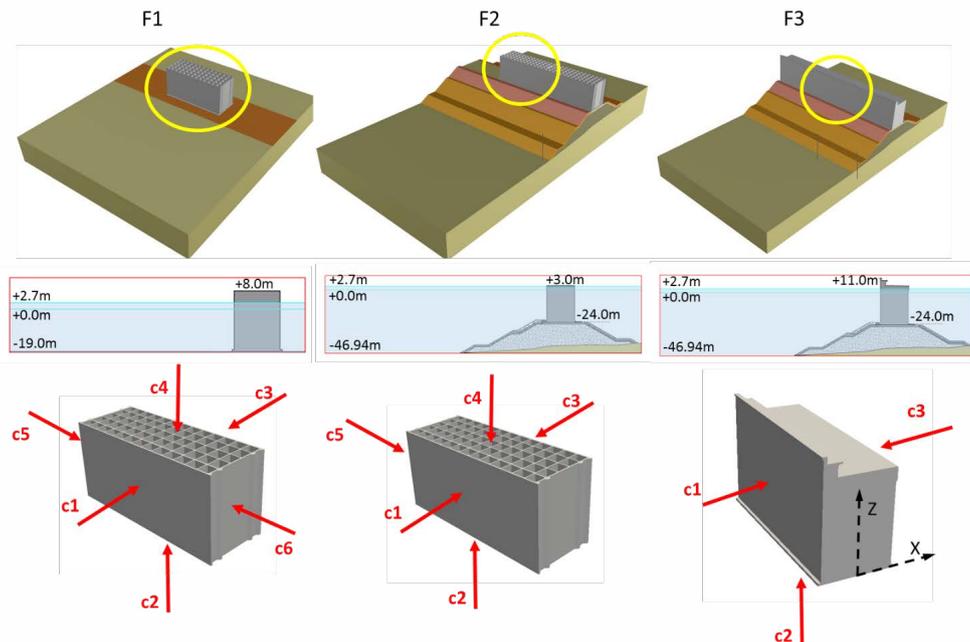


Figura 2. Configuración geométrica (panel superior) y de solicitaciones (panel inferior) de las tres fases constructivas del dique vertical de abrigo de Granadilla (F1, F2 y F3). F1: Acopio inicial de cajones. F2: Morro temporal del dique (cajones sin superestructura). F3: Fase de operación que incluye la subida del nivel del mar debido al cambio climático.

1.3 Estructura del documento

El presente documento se organiza de la siguiente manera: en el apartado 1 se presenta una introducción al problema y se definen los objetivos del trabajo. En el apartado 2 se describe el caso de estudio. La metodología propuesta se desarrolla en el apartado 3, y los resultados derivados de su aplicación al caso de estudio real se presentan en el apartado 4. Finalmente, las conclusiones del estudio se exponen en la sección 5, y en la sección 6 se propone una discusión basada en los resultados obtenidos y un posible procedimiento de optimización.

2.

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio, en el que se aplica la nueva metodología, es el dique vertical del Puerto de Granadilla (Tenerife, España), ver ubicación en la figura 1. Dicho dique tiene una longitud de 1.5 km, una profundidad máxima de 50 m y está compuesto por cajones de hormigón armado fondeados a -24 m de profundidad y coronado a +11 m de altura (ver F3 en la figura 2). El cajón tipo a estudiar tiene una eslora de 56.6 m, una manga de 20.85 m y un puntal de 27 m.

2.1 Clima marítimo

El clima marítimo incidente en el dique se ha definido gracias a las bases de datos generadas por IHCantabria (www.ihcantabria.com). Con base en la serie de reanálisis de escala global Global Ocean Waves (GOW, [6]) y la serie de reanálisis de escala regional Downscaled Ocean Waves (DOW, [7]), se ha caracterizado el oleaje frente al dique. La figura 1 muestra la

caracterización del régimen extremal direccional (H_s , altura de ola significativa y T_p , período de pico).

El nivel del mar local se obtiene a partir de la suma de la marea astronómica (MA), la marea meteorológica (MM) y la sobre-elevación del nivel del mar debido al cambio climático (SLR, Sea Level Rise). La marea astronómica se obtiene de la base de datos de escala global Global Ocean Tides (GOT, [8]), y la marea meteorológica a

partir de la base de datos de reanálisis Global Ocean Surge (GOS, [9]), ambas generadas en IHCantabria. En cuanto al aumento del nivel del mar, se define el asociado al escenario RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5), cuyo valor medio de SLR es de 0.29 m para el período comprendido entre 2046 y 2065 [10]. Este valor se regionaliza para el caso de estudio siguiendo el patrón espacial proporcionado por Slangen [11]. Nótese que para todas las variables de clima marítimo utilizadas (H_s , T_p , MA, MM & SLR), se caracterizan tanto la variabilidad como la incertidumbre (véase el ejemplo de media y desviación estándar de los valores extremos de H_s y T_p en la figura 1).

2.2 Geometría de las fases constructivas

Durante el proceso constructivo de un dique vertical, y a lo largo de la vida útil de un cajón, existen diferentes etapas constructivas. Para el dique de abrigo de Granadilla se han definido tres fases representativas (ver figura 2):

- F1: Acopio inicial de cajones. Después de la construcción del cajón en un dique flotante (o más comúnmente conocidos como Cajoneros), mientras espera a ser fondeado en su posición definitiva, es habitual fondear el cajón en una posición temporal, llenando las celdas con agua.
- F2: Morro temporal del dique (o de invernada). Después de la F1, el cajón es reflotado quitando el agua de las cel-

das y es fondeado en su posición definitiva, rellenando las celdas con arena. En esta situación aún no se ha construido la superestructura del dique.

- F3: Fase de explotación. Después de la F2, se fondean los cajones restantes y se construye la superestructura y espaldón. Esta es la configuración final, en la que el dique entra en funcionamiento y permanecerá durante toda su vida útil.

Con respecto al peso del cajón, este va variando según la fase constructiva en la que se esté (ver [tabla 1](#)).

TABLA 1.
Peso del cajón en las diferentes fases constructivas.

Variable	F1	F2	F3
Peso (kg)	36185850	67973680	76030350
X _{CG} (m)	0.00	0.00	-0.26
Y _{CG} (m)	11.61	13.41	15.05

*Se ha adoptado un coeficiente de variación del 5%.

2.3 Criterios de diseño

Las bases de diseño se definen de acuerdo con la ROM [12] y los condicionantes constructivos del dique de abrigo de Grana-

dilla. Para cada fase constructiva se ha definido la vida útil (V), siendo esta: V1 = 1 año, V2 = 1 año y V3 = 50 años.

La máxima probabilidad de fallo conjunta en la vida útil se establece en un 10%. En cuanto a los modos de fallo, en el presente trabajo únicamente se estudia la estabilidad hidráulica del cajón, analizándose el deslizamiento y vuelco del cajón, tanto hacia el lado mar como hacia el lado tierra, para cada una de las tres fases constructivas. Dichos modos de fallo se evalúan mediante coeficientes de seguridad hidráulicos (SF, Safety Factor):

- F1: Fallo si alguno de los SF ≤ 1.0
- F2: Fallo si alguno de los SF ≤ 1.5
- F3: Fallo si alguno de los SF ≤ 1.5

En la definición de los coeficientes de seguridad se ha adoptado un coeficiente de fricción igual a 0.65 (entre el cajón y la banqueta), con un coeficiente de variación del 10%.

3. METODOLOGÍA GENERAL

Con el fin de tener en cuenta la variabilidad del clima marítimo y las incertidumbres asociadas a todos los procesos impli-

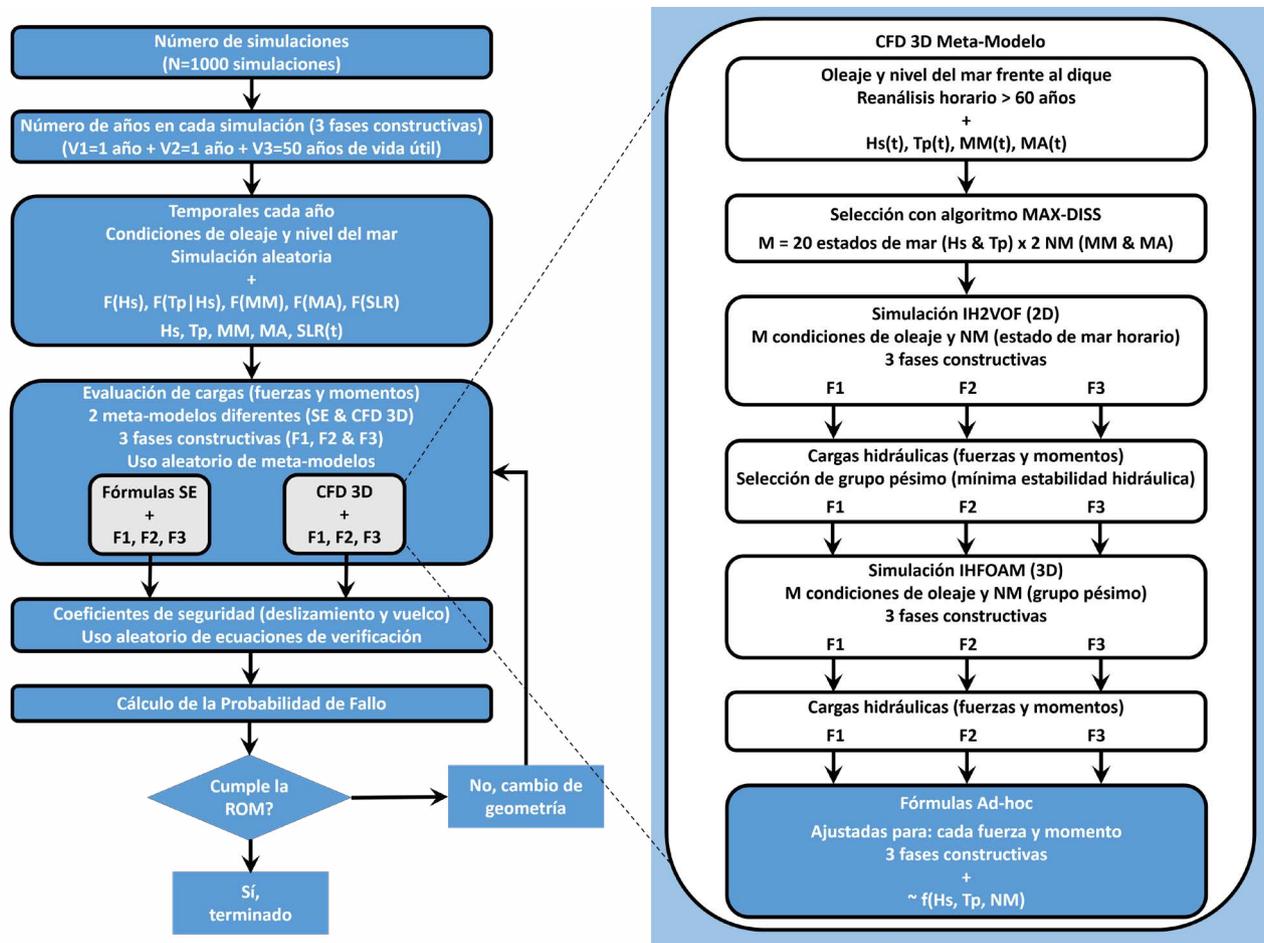


Figura 3. Panel izquierdo: Metodología general de simulación (y optimización hasta la verificación ROM) de la estabilidad hidráulica de un dique vertical a lo largo de su vida útil, evaluando tres etapas constructivas (F1, F2 y F3) y dos meta-modelos (Fórmulas SE y CFD 3D). Panel derecho: Metodología del meta-modelo CFD 3D.

cados en el cálculo de la estabilidad hidráulica de cajones de hormigón, se ha utilizado la técnica estadística de Monte-Carlo. Dicha técnica incorpora una metodología de modelado híbrido para verificar los criterios de diseño para el dique vertical durante todas las fases de construcción de su vida útil. Dicha metodología de simulación aleatoria, para cada una de las N simulaciones de ciclo de vida con $V=V1+V2+V3$ años, sigue el diagrama de flujo indicado en la [figura 3](#).

La metodología de modelado híbrido se basa en la definición de un meta-modelo para evaluar las cargas hidráulicas tridimensionales sobre el cajón debidas a las dinámicas del oleaje. El meta-modelo se define de manera similar a [\[5\]](#), pero mejorando el cálculo de las cargas del oleaje

mediante el uso de un modelo CFD 3D, en lugar de las fórmulas SE tradicionales.

3.1 Definición de los meta-modelos

Se definen dos meta-modelos diferentes para evaluar las cargas del oleaje, Fórmulas SE y CFD 3D, para poder comparar sus resultados. Además, cada meta-modelo tiene tres ajustes diferentes, uno para cada fase constructiva (F1, F2 y F3).

El meta-modelo de formulas SE utiliza las clásicas herramientas (2D) para calcular las cargas del oleaje en el cajón, en función de las condiciones de oleaje y nivel del mar. Las cargas máximas del oleaje (en la cresta de la ola) se obtienen utilizando las fórmulas semi-empíricas de Goda [\[13\]](#) y Takahashi [\[14\]](#), mientras que las cargas mínimas (en el seno de la ola) se obtienen utilizando las fórmulas semi-empíricas de Sainflou [\[15\]](#). Ambos cálculos incorporan el sesgo y las incertidumbres determinadas en PROVERBS [\[16\]](#).

El meta-modelo CFD utiliza la metodología híbrida para calcular las cargas del oleaje sobre el cajón (ver panel derecho de la [figura 3](#)). El modelado híbrido toma como base una selección, hecha mediante la técnica Max-Diss [\[17\]](#) de un número representativo M de estados del mar de las series de reanálisis de oleaje frente al dique. Por otro lado, se selecciona un número NM de niveles del mar para cada uno de los M estados de mar. Estas condiciones de oleaje y de nivel del mar horarios, $M \times NM$, son modeladas numéricamente con el modelo CFD, obteniendo las cargas sobre el cajón. A partir de dichas

cargas (fuerzas y momentos, máximos y mínimos, lado mar y lado tierra), se aplican fórmulas ad-hoc para cada etapa de construcción, ajustadas a partir de las fórmulas SE con los resultados de CFD, incluyendo la incertidumbre de los resultados obtenidos por las simulaciones numéricas

Teniendo en cuenta que el coste computacional de las simulaciones 3D es muy elevado, para el cálculo de las cargas 3D sobre el cajón, se ha hecho uso de la metodología de acoplamiento entre los modelos CFD 2D y 3D desarrollada en IHCantabria. Esta metodología consiste en simular con CFD 3D únicamente el grupo de olas pésimo de cada estado de mar, seleccionado previamente, y que es aquél que proporciona el mínimo coeficiente de seguridad durante el estado de mar horario completo simulado con el modelo CFD 2D. Este enfoque permite obtener rápidamente las cargas del oleaje para cualquier condición de oleaje y nivel del mar.

En la [figura 4](#) se muestra el esquema del acoplamiento y los dominios computacionales de los modelos 2D (en rojo) y 3D (en verde). Para realizar el acoplamiento entre ambos, en las simulaciones CFD 2D se define un sensor de superficie libre en la posición de acoplamiento (sensor rojo en la [figura 4](#)), del cual se obtienen las series de superficie libre y velocidades en la columna de agua para el grupo de olas pésimo, que se utilizarán como forzamiento de las simulaciones CFD 3D.

En cuanto a los modelos, el modelo CFD 2D utilizado es el modelo IH2VOF (<http://ih2vof.ihcantabria.com>, [\[18, 19\]](#)). IH2VOF resuelve las ecuaciones bidimensionales de Navier-Stokes, con el promediado de Reynolds, para tener en cuenta el papel de los procesos turbulentos del flujo. Para la resolución de los medios porosos, como son los mantos de materiales sueltos, se realiza un promediado en un volumen de control. En esos casos por tanto el modelo resuelve las llamadas ecuaciones VARANS (Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes). El seguimiento de la superficie libre se resuelve mediante la técnica VOF (Volume Of Fluid). IH2VOF es uno de los modelos RANS más avanzados gracias a sus capacidades, robustez y extensa validación tanto para la hidrodinámica de la zona de rompientes como para la estabilidad y funcionalidad de estructuras costeras tanto convencionales como no convencionales. La generación de series realistas de oleaje, la generación de segundo orden y la absorción activa de

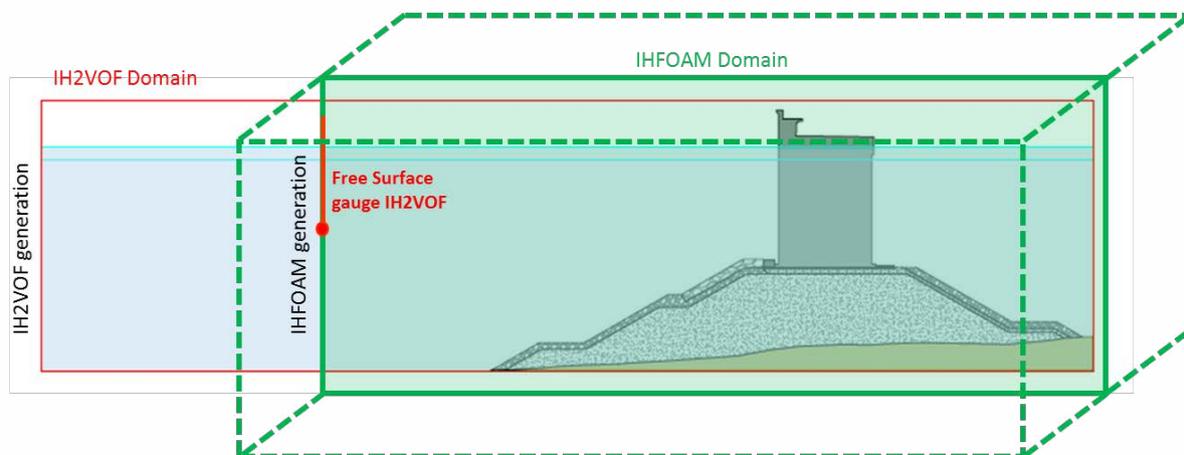


Figura 4. Esquema de acoplamiento entre los modelos CFD 2D (IH2VOF) y 3D (IHFOAM).

oleaje son algunas de las características incluidas en el modelo.

El modelo CFD 3D utilizado es el modelo IHFOAM (<http://ihfoam.ihcantabria.com>, [20, 21]). IHFOAM es un modelo desarrollado en IHCantabria orientado al estudio tridimensional de la interacción flujo-estructura, es decir, al estudio de la acción del fluido con estructuras, tales como el efecto del oleaje sobre estructuras marítimas. Está basado en OpenFOAM® ESI-Group (<https://www.openfoam.com/>), una librería multifísica muy avanzada y robusta que actualmente tiene gran implantación en la industria. Lo que hace a IHFOAM diferente del resto de los solvers es una amplia colección de condiciones de contorno de generación de oleaje y absorción activa. Estas condiciones de contorno específicas permiten generar cualquier tipo de oleaje en un dominio 3D, desde oleaje regular hasta estados de mar direccionales complejos, reales y totalmente irregulares en 3D. IHFOAM también puede resolver flujos de dos fases dentro de medios porosos por medio de las ecuaciones de VARANS.

4. RESULTADOS

La metodología definida se ha aplicado al estudio del dique vertical del Puerto de Granadilla. Se han simulado con la técnica de Monte-Carlo $N=1000$ simulaciones aleatorias de $V=52$ años de vida útil para caracterizar la estabilidad hidráulica del cajón a lo largo de las tres fases constructivas de su vida útil (F1, F2 y F3), evaluando las cargas del oleaje a partir de dos meta-modelos diferentes (Fórmulas SE y CFD 3D). Así mismo, se ha utilizado una metodología de acoplamiento entre modelos CFD 2D y 3D con el fin de optimizar los altos tiempos de cómputo asociados al modelado 3D. Finalmente, se ha obtenido la distribución de probabilidad de los factores de seguridad del cajón, para cada etapa de construcción y meta-modelo.

El meta-modelo CFD ha sido ajustado con $M=20$ estados de mar, $NM=2$ niveles del mar (Pleamar y bajamar) y 3 configuraciones del dique (F1, F2 y F3); lo que resulta un total de 120 simulaciones CFD 3D (y otras 120 simulaciones previas de CFD 2D para el acoplamiento). La figura 5 muestra un ejemplo de los resultados de CFD 3D, en concreto para la fase constructiva F2.

Basado en los resultados de CFD 3D (fuerzas y momentos, máximo y mínimo, lado mar y lado tierra), se han ajustado las fórmulas ad-hoc ajustando las Fórmulas SE con los resultados de CFD 3D para cada etapa de construcción (F1, F2 y F3). En general se obtienen magnitudes menores en los resultados CFD 3D con respecto a las fórmulas SE clásicas.

A partir de los resultados de las $N=1000$ simulaciones de Monte-Carlo de los ciclos de vida útil completos, se obtiene la función de densidad de probabilidad (PDF) de los coeficientes de seguridad del cajón para cada fase constructiva y meta-modelo (ver figura 6), así como su media y desviación típica (ver tabla 2). Se puede observar que el cajón tiene un margen de seguridad considerable, con coeficientes de seguridad $SF > 1,5$ y que F2 tiene los SF más altos. Al comparar los resultados de los dos meta-modelos, el modelo CFD proporciona una PDF mayor que el SE. Esto se debe a que las cargas del oleaje SE son mayores que las del CFD. Por lo tanto, de acuerdo con

los resultados CFD, que representan de forma más realista el comportamiento hidráulico de los cajones, estos cajones tienen coeficientes de seguridad demasiado altos, por lo que podrían ser optimizados reduciendo sus dimensiones.

TABLA 2. Media (μ) y desviación típica (σ) del coeficiente de seguridad (SF) a vuelco y deslizamiento para las tres fases constructivas (F1, F2 y F3) y los dos meta-modelos (SE y CFD 3D).

SF	F1		F2		F3	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
SE	4.48	0.95	6.64	1.31	3.80	0.39
CFD 3D	5.92	0.97	10.31	1.31	7.22	0.50

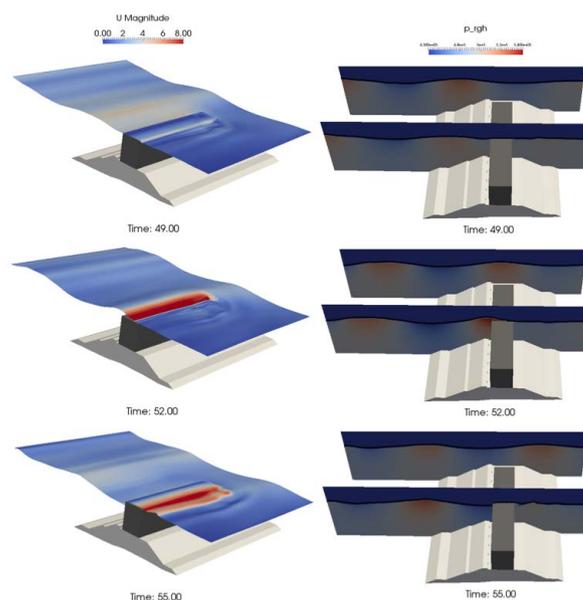


Figura 5. Mapas de velocidades horizontales (panel izquierdo) y presión dinámica (panel derecho) obtenidas con IHFOAM para la F2 del dique vertical de Granadilla. $H_s = 4.6$ m, $T_p = 9.6$ s, $NM = +2.7$ m (Pleamar).

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una nueva metodología para el cálculo de las cargas tridimensionales (fuerzas y momentos) y la estabilidad hidráulica (deslizamiento y vuelco) de cajones de hormigón armado a lo largo de todas las fases de su vida útil. Esto incluye desde los cajones en fase de acopio (F1), pasando por la posición de morro de invernada del dique (F2), hasta su fase final de operación (F3). Esta metodología tiene en cuenta las incertidumbres derivadas tanto de la geometría del cajón, del cálculo de las cargas del oleaje, del clima marítimo frente al dique y de los efectos del cambio climático; y gestiona toda la información utilizando la técnica estadística de Monte-Carlo.

El estudio de las cargas del oleaje sobre el cajón ha sido analizado utilizando dos herramientas diferentes: las fórmulas semi-empíricas clásicas (Fórmulas SE), y el modelo CFD

tridimensional IHFOAM. Para comparar los resultados de las Fórmulas SE y CFD 3D, se han definido dos meta-modelos diferentes con una metodología de simulación numérica híbrida.

En el meta-modelo CFD 3D se ha aplicado una eficiente metodología de acoplamiento entre los dos modelos CFD (IH2VOF e IHFOAM). Este método de acoplamiento da como resultado una optimización numérica de los tiempos de cómputo y proporciona resultados fiables.

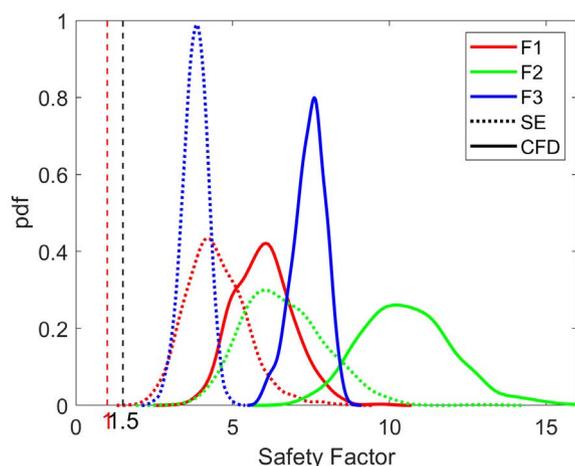


Figura 6. Función de densidad de probabilidad del coeficiente de seguridad hidráulico (deslizamiento y vuelco de cajón) para las tres fases constructivas (F1 rojo, F2 verde y F3 azul) y los dos meta-modelos para evaluar las cargas (Fórmulas SE y CFD 3D). Fórmulas semi-empíricas en líneas de puntos. CFD tridimensional en líneas sólidas. La línea de puntos rojos es SF = 1.0 (límite de equilibrio). La línea de puntos negros es SF = 1.5 (límite establecido).

La metodología ha permitido obtener las funciones de densidad de probabilidad de la estabilidad hidráulica de un dique vertical a lo largo de su vida útil, para cada fase constructiva y meta-modelo. Esta metodología también permite verificar probabilísticamente los criterios de diseño establecidos para el dique vertical.

La metodología, una vez desarrollada, se ha aplicado a un caso real de estudio, el dique vertical del Puerto de Granadilla (Tenerife, España). Se ha observado en los resultados que mediante el uso de los modelos CFD es posible reducir la incertidumbre y aumentar la precisión y fiabilidad de los resultados, permitiendo reducir las dimensiones de los cajones, pero manteniendo su condición de estabilidad.

6. DISCUSIÓN

Atendiendo a los resultados obtenidos para el caso de aplicación real y basándose en la metodología aquí presentada, se han llevado a cabo varias simulaciones de Monte-Carlo reduciendo de forma gradual el peso del cajón. El objetivo es comparar la variación de la probabilidad de fallo a medida que se reduce el peso de los cajones y así evaluar una posible optimización de los mismos.

En la figura 7 se muestran los cambios experimentados en la probabilidad de fallo debidos a dicha variación de la anchu-

ra, y en la tabla 3 se presentan los valores del 10% de probabilidad de fallo. Tal y como se observa en estos, desde el punto de vista de su estabilidad hidráulica, es posible optimizar la geometría del cajón y reducir su peso. En este caso de aplicación en concreto, el peso del cajón podría reducirse en un 8% (82.5%-74.8%, ver tabla 3), utilizando herramientas CFD y la metodología probabilística propuesta, lo que significaría una reducción considerable en el coste de construcción del dique analizado y justifica la aplicación general de la metodología presentada a otros casos.

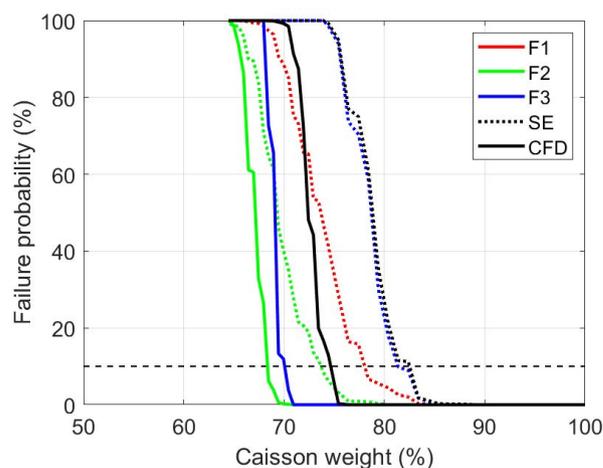


Figura 7. Porcentaje de probabilidad de fallo de la estabilidad hidráulica del cajón en función del porcentaje de peso del cajón. Resultados para las tres fases constructivas (F1 rojo, F2 verde y F3 azul) a lo largo de la vida útil (líneas negras), y dos meta-modelos: Fórmulas SE (líneas de puntos) y CFD 3D (líneas sólidas). La línea de puntos negros es el 10% de probabilidad de fallo.

TABLA 3. Porcentaje de peso del cajón que presenta una probabilidad de fallo inferior al 10%, para las tres fases de construcción (F1, F2 y F3) y la vida útil del cajón, y los dos meta-modelos (Fórmulas SE y CFD 3D).

% Peso para una probabilidad de fallo del 10%	F1	F2	F3	Vida útil
Fórmulas SE	77.9	73.8	81.5	82.5
CFD 3D	74.8	68.3	69.1	74.8

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación DOVICAIM (RTC-2014-3077-4), que ha contado con el apoyo financiero del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (MINECO) dentro del Programa Nacional de Investigación para los Retos de la Sociedad.

Referencias

- [1] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., (2013) Simulating Coastal Engineering Processes with OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, 71, 119-134. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.06.002.
- [2] González-Cao, J., Altomare, C., Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Gómez-Gesteira, Kisacik, M., (2019) On the accuracy of DualSPHysics to

- assess violent collisions with coastal structures. *Computers & Fluids*, 179, 604-612. doi: 10.1016/j.compfluid.2018.11.021
- [3] Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering, Elsevier*, 58(9), 851-862, doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007
- [4] Rueda, A.C., Cagigal, L., Pearson, S., Antolínez, J.A.A., Storlazzi, C., van Dongeren, A., Camus, P., Mendez, F.J., (2019) HyCReWW: A Hybrid Coral Reef Wave and Water level metamodel. *Computers & Geosciences*, 127, 85-90, doi: 10.1016/j.cageo.2019.03.004.
- [5] Guanche, Y., Camus, P., Guanche R., Méndez F.J., Medina, R., (2013). A simplified method to downscale wave dynamics on vertical breakwaters. *Coastal Engineering, Elsevier*, 71, 68-77.
- [6] Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R., Losada, I.J., (2012) A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering, Elsevier*, 65, 38-55, doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.03.003
- [7] Camus, P., Méndez, F.J., Medina, R., Tomás, A., Izaguirre, C. (2013) High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72, 56-68. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.09.002
- [8] Egbert, G.D. and Erofeeva, S.Y. (2002) Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183-204, doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- [9] Cid, A., Castanedo, S., Abascal, A.J., Menéndez, M., Medina, R.A. (2014) A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Clim. Dyn.* 43: 2167-2184. doi: 10.1007/s00382-013-2041-0
- [10] Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., & Sallenger, A. (2014). *Coastal systems and low-lying areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 361-409.
- [11] Slangen A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A. van de Wal, R.S.W., Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., & Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-014-1080-9.
- [12] ROM 1.0-09, 2009. Recommendations for the project design and construction of breakwaters – Part 1: Calculation and project factors. Climate Agents. Recommendations for maritime works. Puertos del Estado. ISBN 978-84-88975-75-1. www.puertos.es.
- [13] Goda, Y., (1985) Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering – Vol 15. World Scientific Publishing. ISBN 981-02-3256-X. 443 pp.
- [14] Takahashi, S., Shimosako, K., Kimura, K., Suzuki, K., (1994) Dynamic response and sliding of breakwater caissons against impulsive breaking wave forces. *Proceeding of the 27th International Conference Coastal Engineering ASCE*.
- [15] Sainflou, G. (1928) Essai sur les digues maritimes verticales. *Annales des Ponts et Chaussées*. Paris 98(11).
- [16] PROVERBS, 2001. Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters. Balkema Publishers. ISBN 9058092496. 373 pp.
- [17] Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering, Elsevier*, 58(6), 453-462, doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- [18] Lara, J.L., Losada, I.J., Guanche, R. (2008) Wave interaction with low mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering, Elsevier*, 35(13), 1388-1400.
- [19] Guanche, R., Losada, I.J., Lara, J.L. (2009) Numerical modelling of coastal structures stability. *Coastal Engineering, Elsevier*, 56(5-6), 543-558
- [20] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J. (2014). Three-Dimensional Interaction of Waves and Porous Coastal Structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and Validation. *Coastal Engineering, Elsevier*, 83, 243-258. doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.08.010
- [21] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J. (2014). Three-Dimensional Interaction of Waves and Porous Coastal Structures using OpenFOAM®. Part II: Application. *Coastal Engineering, Elsevier*, 83, 259-270. doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.09.002