

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016**

**APLICACIÓN DE MODELOS CFD PARA EL ESTUDIO DE TREPADA Y  
SOBREPASO EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS AL OLEAJE**

*Nicolás Tomazin<sup>1,2</sup>, Martín Sabarots Gerbec<sup>2,3</sup>, Roberto Castellano<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>) Programa de Hidráulica Marítima – LH-INA, <sup>2</sup>) Universidad de Buenos Aires, <sup>3</sup>) Programa de Hidráulica Computacional – LH-INA. Buenos Aires – Argentina  
ntomazin@ina.gob.ar; msgerbec@ina.gob.ar

**RESUMEN**

Este trabajo presenta la aplicación técnicas numéricas avanzadas, consistentes en modelos CFD (Computational Fluid Dynamics), con el propósito de simular procesos de transformación del oleaje y su interacción con estructuras marítimas. Se estudian en particular los fenómenos de terpada (run-up) y sobrepaso de una estructura sometida a la acción de las olas.

Los resultados de estudios desarrollados mediante modelación física bidimensional realizados para las mismas estructuras fueron utilizados como ejemplo de comparación para validar el modelo numérico.

El análisis presentado muestra las ventajas de la aplicación conjunta de ambas técnicas de modelación para el desarrollo de los estudios hidráulicos.

**ABSTRACT**

This paper presents the application of advanced numerical techniques consistent in CFD (Computational Fluid Dynamics) models, in order to simulate wave transformation processes and their interaction with marine structures. Run-up and overtopping of a structure subjected to the action of the waves are studied in particular.

The results of studies conducted by two-dimensional physical modeling performed to the same structures were used as comparison and example to validate the numerical model .

The analysis shows the advantages of the joint application of both modeling techniques for the development of hydraulic studies.

**PALABRAS CLAVES:** Trepada y sobrepaso; Modelos CFD; IHFOAM

## **INTRODUCCIÓN**

El estudio de la trepada de ola (run-up) y el sobrepaso en estructuras expuestas a la acción del oleaje resulta un factor determinante para el dimensionamiento de las mismas. Dado que este fenómeno puede generar riesgos estructurales y/o funcionales representan, en consecuencia, un aspecto fundamental del diseño.

Los avances recientes en el campo de la modelación numérica han permitido incorporar nuevas herramientas de análisis que constituyen un complemento valioso para este tipo de estudios encarados tradicionalmente mediante el desarrollo de modelos físicos.

Las nuevas técnicas de simulación utilizan modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), basados en ecuaciones que provienen de aplicar la descomposición de Reynolds a las ecuaciones de Navier-Stokes, por lo que consideran el fluido como un medio continuo y tienen la capacidad de reproducir correctamente los perfiles de presión y velocidad a lo largo de la columna de agua al carecer de hipótesis de partida simplificadas. Estos modelos están siendo ampliamente utilizados en la práctica de la ingeniería hidráulica en diferentes tipos de aplicaciones, como es el caso de diseño de estructuras de alivio (vertederos, cuencos de disipación), conducciones a presión como sistemas de esclusado, y otros.

Para el caso particular de la aplicación en estudios vinculados a la interacción de estructuras con olas se ha desarrollado el solver IHFOAM (Higuera, 2015), el cual utiliza la plataforma del código abierto OpenFOAM y permite reproducir un conjunto de condiciones de borde necesarias para representar los procesos físicos más comunes en las modelaciones de la hidráulica marítima.

Este trabajo presenta la aplicación de este modelo como complemento de un estudio realizado mediante un modelo físico bidimensional en escala reducida (escala 1:40) llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua de Argentina. El propósito de ese estudio consistió en definir la cota de coronamiento de un embalse sometido a la acción de olas generadas por vientos intensos en la región de la Patagonia, en el sur de la República Argentina.

Dados los requerimientos del proyecto en cuanto a la admisibilidad de los caudales de sobrepaso, los estudios contemplaron la evaluación en el modelo físico de distintos escenarios hidrodinámicos para diferentes configuraciones para la geometría del perfil de la represa. En ese contexto, la aplicación de IHFOAM se presenta como una herramienta alternativa para el análisis particular de algunos aspectos de interés para el estudio.

## **OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo consistió en evaluar las capacidades del modelo numérico utilizado para representar la interacción entre la estructura y las olas. Los estudios llevados a cabo permitieron generar información necesaria para validar el funcionamiento del mismo reproduciendo las mismas condiciones que fueron ensayadas en el modelo físico.

Se destacan, por otro lado, las ventajas que representa el desarrollo simultáneo de ambos tipos de modelación para una aplicación con estas características. Por otro lado, la posibilidad de generar información complementaria para el análisis aprovechando las facilidades que otorga el modelo numérico en la visualización y procedimientos para la adquisición de datos se presenta como una herramienta valiosa con un aporte significativo para los intereses del estudio.

## **CARACTERÍSTICAS DEL MOELO NUMÉRICO**

El *solver* IHFOAM fue desarrollado el fin de adaptar OpenFOAM para simular procesos de transformación del oleaje y su interacción con estructuras marítimas. OpenFOAM es un código de CFD (Computational Fluid Dynamics) universal, avanzado, robusto y cuyo uso se encuentra ampliamente instaurado en gran variedad de aplicaciones. Básicamente, consiste en una librería multipropósito con aplicaciones para mallar, resolver y analizar problemas complejos como la turbulencia y el movimiento de los fluidos. Presenta la ventaja de ser completamente gratuito y de código abierto, por lo que puede ser modificado. De este modo, y contrariamente a los códigos comerciales, dentro de OpenFOAM los usuarios pueden controlar y modificar todos y cada uno de los pasos del proceso de resolución.

IHFOAM resuelve las ecuaciones RANS en dominios tridimensionales para dos fases incompresibles (agua y aire) mediante la técnica VOF (Volume Of Fluid), aplicando una discretización en volúmenes finitos. El modelo se encuentra basado sobre ecuaciones altamente no lineales que pueden simular completamente los procesos que afectan al oleaje, como ser: refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, rotura, interacción no lineal entre olas, ascenso (run-up), y rotura del oleaje.

La formulación completa de expresiones de cálculo del modelo, basadas en las ecuaciones de continuidad y conservación de momento, junto con un importante cantidad de aplicaciones para la validación del mismo, pueden encontrarse en Higuera *et al.* (2014).

La principal característica distintiva de IHFOAM es el desarrollo de condiciones de contorno específicas para la generación y absorción activa tridimensional del oleaje. Puesto que el oleaje es la dinámica principal en las simulaciones de estructuras marítimas, estas técnicas resultan un elemento clave para la modelación. Con este procedimiento, absorción y generación se llevan a cabo únicamente en los contornos de la malla, por lo que no incrementan el costo computacional significativamente. Tampoco se necesita extender el dominio numérico como sucede en algunos modelos similares.

Dentro de las opciones que ofrece para la generación de las olas cuenta con una importante cantidad de teorías de oleaje que se pueden aplicar en 2D y 3D, mediante contornos estáticos o móviles. Esto incluye la generación de estados de mar irregulares, con teoría de segundo orden y dispersión direccional.

La absorción activa permite que las olas que inciden en un contorno, en muchos casos previamente reflejadas en las estructuras, desaparezcan con una reflexión mínima, como lo harían en mar abierto. Su funcionamiento es similar al de los sistemas de generación en laboratorio, midiendo la elevación de la superficie libre en el contorno para, mediante filtros digitales, generar una velocidad de corrección que absorbe el oleaje, tanto en dos como en tres dimensiones.

## **CARACTERÍSTICAS GENERALES Y ANTECEDENTES EN ESTUDIOS DE RUN-UP**

En la bibliografía especializada existen numerosos antecedentes sobre estudios de run-up para diferentes estructuras desarrollados mediante la modelación física bidimensional en escala reducida. En términos generales, los resultados de ensayos de run-up realizados en canales de olas se expresan mediante parámetros adimensionales que vinculan el run-up con las características del oleaje, y las propiedades del talud.

Las características del oleaje vienen dadas básicamente por su altura  $H$ , su período  $T$  y su longitud  $L$ . Cuando se trata de olas aleatorias (conformadas por un conjunto infinito de ondas de distintos períodos y amplitudes), las propiedades del oleaje pueden derivarse del espectro de densidad de energía  $S(f)$ , donde la energía es proporcional a la amplitud al cuadrado de la onda en un intervalo de frecuencia de ancho infinitesimal  $\Delta f$ . Para la cuantificación de la altura del oleaje, se prefiere usar la denominación  $H_{m0}$ , altura de ola basada en el momento espectral de orden 0. La altura significativa  $H_s$  (definida como el promedio del tercio de olas más altas) y  $H_{m0}$  son aproximadamente coincidentes en aguas profundas o intermedias, pero no en aguas someras, donde el efecto del fondo puede ser significativo sobre la forma del perfil del oleaje. En el caso del presente estudio, dada la profundidad de los ensayos del modelo, es válido suponer  $H_s \cong H_{m0}$ .

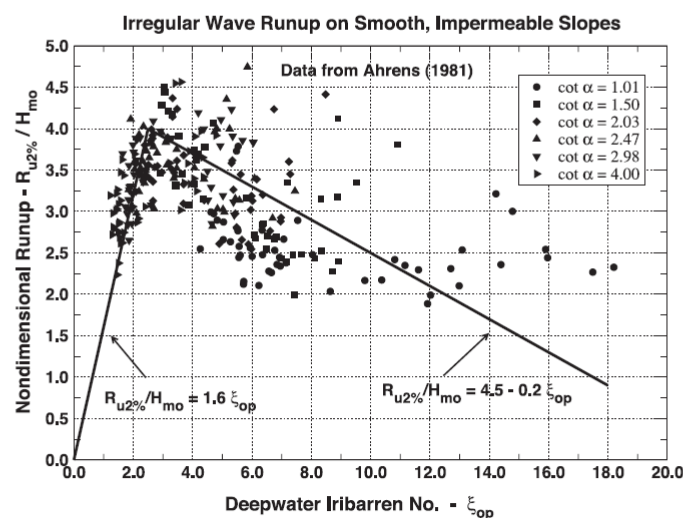
Se denomina parámetro de rotura  $\xi$  a la relación [1], en la cual  $\tan \alpha$  representa la pendiente del talud que se estudia.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad [1]$$

Puesto que las olas incidentes responden a una distribución aleatoria, la trepada de las olas (run-up) sobre el talud de la estructura también sigue el mismo comportamiento. A los efectos del diseño, resulta habitual caracterizarlo a partir de sus propiedades estadísticas, en cuyo caso se define el valor  $R_{u2\%}$  como aquél que es excedido el 2% de las veces durante los ensayos. También es habitual definirlo en forma adimensional, refiriéndolo a la altura de ola incidente, tal como se indica en la expresión [2].

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = f(\xi_0) \quad [2]$$

Dentro de los antecedentes más destacados en este tipo de estudios aparecen como referencia clásica los trabajos de Van Oorschot y d'Angremond (1968), quienes realizaron experiencias sobre taludes lisos e impermeables con pendientes 1:4 y 1:6 para  $\xi_0 < 1.2$ . Ahrens (1981) investigó posteriormente taludes de pendiente 1:1 a 1:4 para  $\xi_{0p} > 1.2$ . La Figura 1 muestra los resultados de esas investigaciones.



**Figura 1.-** Resultados de los ensayos publicados por Ahrens (1981). Fuente CEM

La formulación que surge de esos estudios es recomendada por el Coastal Engineering Manual (CEM) para taludes de fuerte pendiente (1:1 a 1:4). Para pendientes más suaves (1:3 a 1:8)

el CEM sugiere conveniente la aplicación de la formulación de De Waal y van der Meer (1992). Estos últimos datos corresponden a modelos físicos en escala reducida para pendientes 1:3, 1:4, 1:5 y 1:6 y experiencias en escalas mayores para pendientes 1:3, 1:6 y 1:8. En esos estudios, el parámetro de rotura estuvo comprendido en el rango  $0,6 < \xi_{op} < 3,4$  para ensayos en escala reducida y  $0,6 < \xi_{op} < 2,5$  para los ensayos en escala grande. Los resultados de los mismos se muestran en la Figura 2.

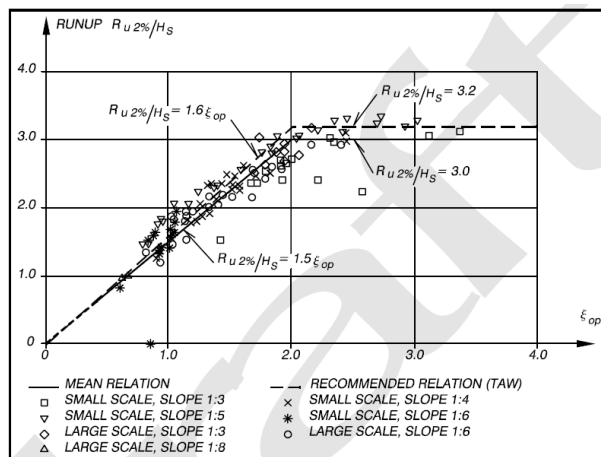


Figura 2.- Ensayos de Waal y van der Meer (1992). Fuente CEM

## MODELACIÓN FÍSICA EN LAS INSTALACIONES DEL INA

El estudio desarrollado en el modelo físico consistió en la ejecución de un conjunto de ensayos sobre un talud simple, de pendiente 1:1,5, en el curso de los cuales se realizaron determinaciones de las características del oleaje incidente sobre la estructura y de la trepada (run-up) que se desarrolla sobre el talud. Este análisis tuvo el propósito de validar el funcionamiento del sistema que incluye la generación, medición y procesamiento de datos, mediante la comparación de resultados obtenidos en la representación del run-up con los presentados por otros autores en la literatura específica, y en particular con las expresiones para diseño que propone el CEM.

La validación del modelo físico mediante este procedimiento permite asumir el correcto funcionamiento del sistema para estudiar posteriormente el sobrepaso de las estructuras evaluando diferentes alternativas en la configuración de perfil que resultan de interés para el proyecto.

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de olas de 28 m de largo, por 0.60 m de ancho y una profundidad de 1.0 m, equipado con un generador de olas oleohidráulico de alta presión controlado por una servoválvula que permite la generación de oleaje irregular.

La medición de alturas de ola se realizó mediante tres sensores de nivel de agua, mientras que un cuarto sensor ubicado sobre el talud de la estructura en estudio midió la trepada de la ola. La frecuencia de muestreo de la posición de la superficie libre del agua resultó un dato variable de acuerdo a las características de cada ensayo, abarcando un rango de valores entre 20 a 50 milisegundos, dependiendo fundamentalmente del período de pico del espectro analizado. La duración total de cada ensayo contempló un tiempo suficiente para registrar no menos de 300 olas.

El post-procesamiento de esos registros, utilizando un método propuesto por Goda y Suzuki (1976), permitió por una parte separar las ondas que viajan hacia el talud (olas incidentes) de las reflejadas por éste, y por la otra determinar el espectro de densidad de energía  $S(f)$  de las olas incidentes y reflejadas. A partir de ello se derivan las propiedades del oleaje representadas por  $H_{m0}$

(altura significativa) y  $T_p$  (período de pico) La extensión del registro debe permitir obtener un conjunto de espectros de densidad de energía que son promediados para estimar su valor final.

Consecuentemente, para cada ensayo resultó posible construir una relación funcional representando las propiedades de la estructura de la forma  $R_{u2\%} = f(\zeta_0)$ . Donde  $\zeta_0$  es el parámetro de rotura del oleaje:

$$\zeta_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad [3]$$

Siendo  $\tan \alpha$  la pendiente del talud, que en este caso resultó  $\tan \alpha = 1/1,5 = 0.667$ . La definición de la longitud de onda  $L_0$  se realizó a partir del período de pico del oleaje ( $L_0 = 1.56 * T_p^2$ ).

El conjunto de ensayos realizados en el modelo físico contempló una importante cantidad de escenarios hidrodinámicos de interés para el estudio de acuerdo con la escala adoptada para la modelación. Así, el rango de valores para las alturas de ola ensayados estuvo entre  $H_s = 0.06$  m y  $H_s = 0.15$  m, mientras que los períodos variaron entre  $T_p = 1$  s y  $T_p = 1.2$  s. El nivel estático (profundidad) que se utilizó fue de  $N = 0.55$  m a  $N = 0.65$  m.

Los resultados de estos ensayos se presentan más adelante (Figura 5) junto en la comparación de los obtenidos con la modelación numérica y las expresiones empíricas recomendadas en el CEM.

## **APLICACIÓN DE IHFOAM PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL RUN-UP**

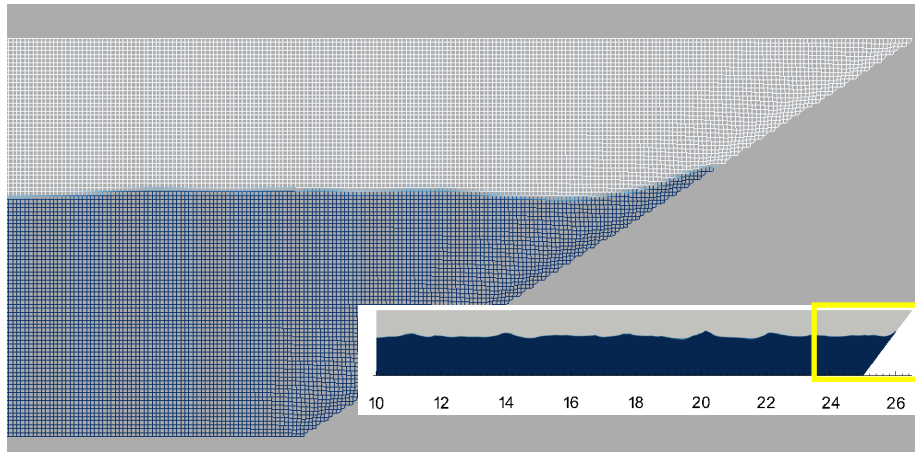
Para la modelación numérica se utilizó la misma estrategia de análisis que en el caso de la modelación física, es decir, se repitió la idea de validar el modelo reproduciendo inicialmente ensayos de run-up sobre un talud simple para estudiar posteriormente el sobrepaso del oleaje sobre una estructura que representara el perfil de la obra proyectada.

Las mismas condiciones de ensayo consideradas para la modelación física fueron replicadas mediante la implementación del modelo numérico IHFOAM, respetando las dimensiones de los ensayos con la misma escala geométrica y simulando idénticas condiciones de borde.

La aplicación del modelo demandó, en primera instancia, la búsqueda de una malla de cálculo adecuada para una representación eficiente del problema. Ello requirió una serie de ensayos orientados a obtener configuración que permitiera mantener acotados los tiempos de cálculo sin resignar la calidad del resultado.

En este procedimiento se evaluaron diferentes configuraciones para la discretización del modelo (mallas de cálculo), como es el caso de la Figura 3, donde se muestra un instante de una simulación sobre una malla con una discretización uniforme de 1cm.

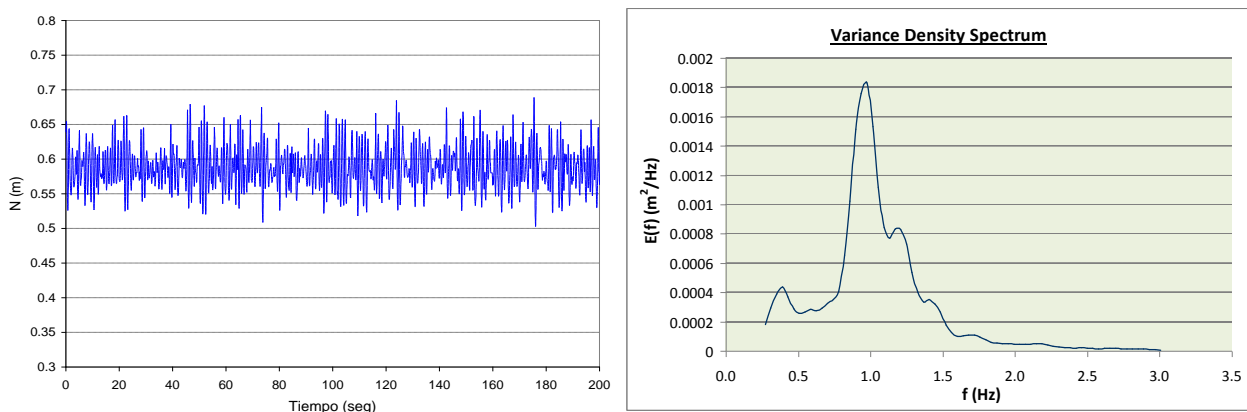
Como resultado de dicho procedimiento se seleccionaron, además de la malla señalada en la Figura 3, otras dos con discretizaciones de 0.5 cm x 1 cm, y de 0.5 cm x 0.5 cm, respectivamente, para la simulación de diferentes escenarios de interés para este estudio.



**Figura 3.-** Malla de la modelación con vista del campo de  $\alpha$  (relación agua/aire)

Para la representación de oleaje se simularon un conjunto de escenarios caracterizados en la mayoría de los casos por diferentes espectros de densidad de energía tipo JONSWAP. En dos casos particulares, con ondas de longitud reducida ( $T_p = 0.75$  seg) se consideró conveniente utilizar oleaje regular, para lo cual se emplearon las teorías de Stokes de orden dos y cinco.

Como resultado de las simulaciones se obtuvieron series temporales de la variación de la superficie libre a partir del procesamiento del registro del campo  $\alpha$  en ubicaciones especialmente seleccionadas. Se aplicaron las mismas técnicas de análisis descritas en la modelación física para la separación de las componentes de energía incidente y reflejante, y para la obtención de los parámetros que permiten la caracterización del oleaje. Un ejemplo que ilustra el resultado de este procedimiento se presenta en la Figura 4.



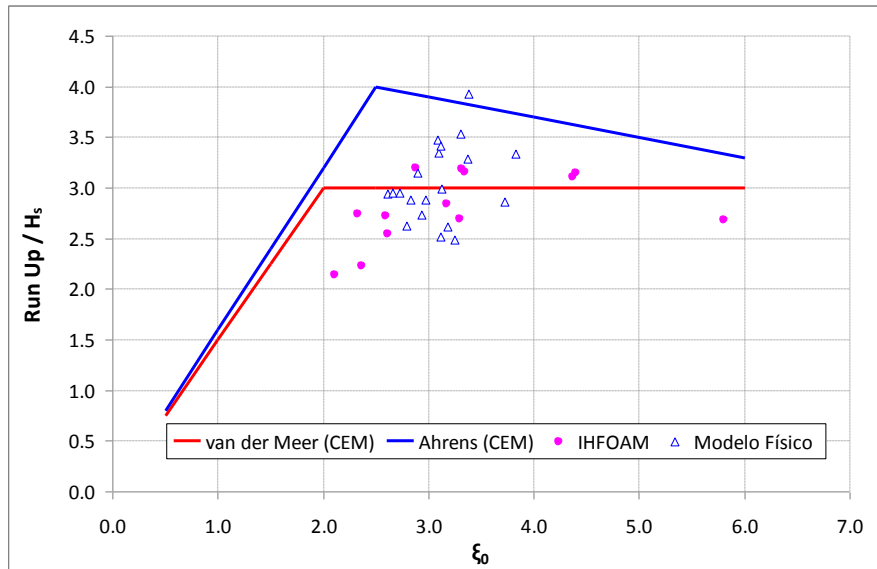
**Figura 4.-** Resultados de la modelación de IHFOAM: Serie de tiempo del campo  $\alpha$  para un punto de registro y espectro densidad de energía caracterizando un oleaje de  $H_s=0.12$  m y  $T_p=0.97$  s.

Asimismo, se calculó en cada ensayo el valor de  $run-up_{(2\%)}$  definido a partir del procesamiento estadístico de los valores de trepada de ola sobre el talud obtenidos mediante la integración de  $\alpha$  sobre dicha estructura.

A través de estos procedimientos se obtuvieron para cada ensayo los pares de valores que permiten construir la relación funcional que representa las propiedades de la estructura de la forma  $R_{u2\%} = f(\zeta_0)$ .

## Comparación de Resultados

Los resultados generados mediante la modelación numérica mostraron una concordancia satisfactoria con los valores de run-up representados en las formulaciones empíricas recomendadas por el CEM y los resultados obtenidos del modelo físico. La Figura 5 presenta la comparación de valores incorporando las tres fuentes de resultados.



**Figura 5.-** Comparación de resultados de la modelación con curvas experimentales de Run-up

El análisis de la Figura 5 indica, en primer lugar, que la dispersión de valores tanto en la modelación física como en la modelación numérica resulta del mismo orden, y al mismo tiempo, ambas se encuentran dentro de un rango de variación razonable, coincidente con los observados en los resultados experimentales de Ahrens y van der Meer (Figuras 1 y 2). Según se aprecia en esta figura, los resultados del modelo numérico parecen ajustarse mejor a la curva de van der Meer que a la de Ahrens.

Para el caso en estudio, la pendiente del talud (1:1.5) resulta ser significativamente superior a los valores ensayados por los autores mencionados. En efecto, este dato resulta relevante puesto que tanto en la modelación física como en la numérica se han medido coeficientes de reflexión elevados, superiores a  $K_r = 0.8$  en algunos casos, que podrían explicar en alguna medida diferencias en los resultados.

Por otra parte, la Figura 5 muestra que la nube de puntos representativa de los resultados generados por la modelación física se distribuye en un rango acotado de valores de  $\xi_0$  debido a las limitaciones que impone la elección de una escala geométrica para el modelo (en este caso 1:40) y la imposibilidad concreta de modificar las dimensiones del canal de ensayos y el rango de desplazamientos del generador de olas. En ese sentido, la modelación numérica presenta la ventaja de permitir la representación de un rango más amplio de valores, como se aprecia en la figura mencionada, pudiéndose modificar con mayor libertad la geometría del modelo a costa de un incremento en la demanda de los tiempos computacionales para el desarrollo de las simulaciones.

Otra consecuencia de la elevada pendiente del talud resulta ser la dificultad para realizar ensayos con valores del parámetro de rotura del orden de  $\xi_0 = 2$  y menores, recordando que la expresión [3] indica que para ello es necesario reducir significativamente las longitudes de onda. Mientras que en modelo físico resulta imposible para la escala de ensayos seleccionada, los resultados en el modelo numérico muestran valores de run-up por debajo de lo esperado. Esto se

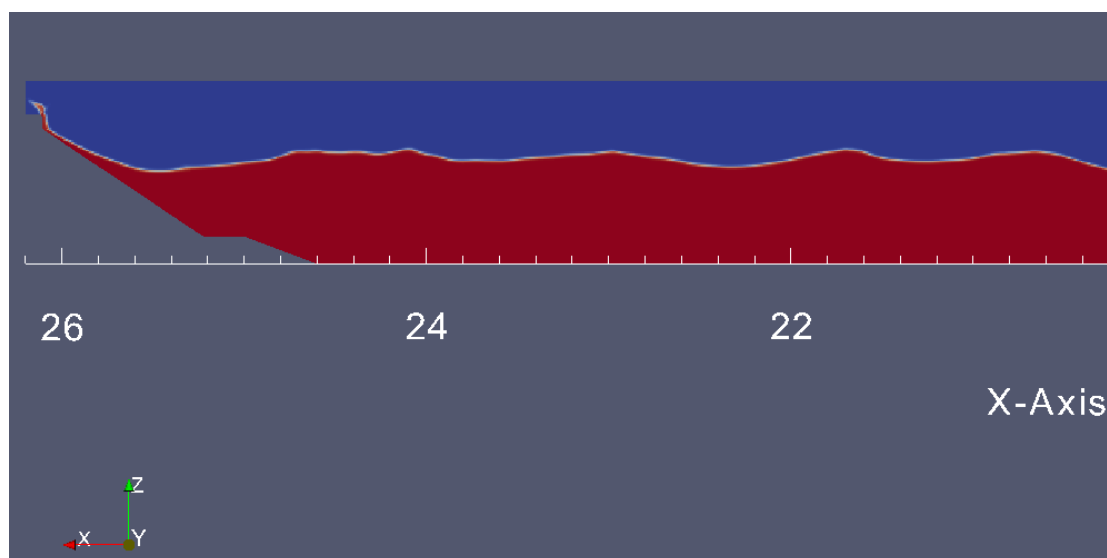
debe a la necesidad de aumentar la resolución de la malla de cálculo para mejorar la representación de las ondas más cortas que componen el espectro, situación que debido al elevado costo computacional que implica quedó fuera del alcance de los intereses de este estudio.

## ESTUDIO DE SOBREPASO PARA EL PERFIL DE LA REPRESA

El estudio de sobrepaso sobre la estructura del proyecto consideró un perfil con la misma pendiente (1:1.5) que el talud estudiado anteriormente, más la incorporación de una berma de fondo y un parapeto vertical en el extremo superior del mismo (Figura 6).

Las simulaciones numéricas tuvieron las mismas características que las que se utilizaron para el estudio de run-up, reproduciendo en este caso un conjunto de escenarios hidrodinámicos de interés para el proyecto caracterizados por un valor de referencia para el nivel estático  $N$  y un espectro de oleaje tipo JONSWAP con altura significativa de ola ( $H_s$ ) y periodo de pico ( $T_p$ ) determinados.

Para el cómputo del caudal de sobrepaso generado por el oleaje sobre la estructura se definió una sección de salida (condición de borde) encima del parapeto vertical en la cual se registró el valor de  $\alpha$  y la velocidad del flujo para cada instante de la simulación. Combinando estas dos variables se obtuvo un caudal instantáneo que permite conocer el volumen total erogado mediante una integración en el tiempo para la duración total de cada ensayo numérico.



**Figura 6.-** Simulación de sobrepaso mediante la aplicación de IHFOAM

La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de cinco simulaciones realizadas a modo de evaluación preliminar del proyecto. Los valores que caracterizan las condiciones hidrodinámicas en dicha tabla se encuentran referidos al modelo, mientras que los caudales de sobrepaso ( $m^3/s$ ) corresponden a valores medios por unidad de ancho asociados al prototipo (escala de modelo 1:40), permitiendo de esta manera tener una interpretación más apropiada de los resultados.

**Tabla 1.- Resultados de la simulación de sobrepaso**

Número de ensayo	Escenario Hidrodinámico			Q sobrepaso (m <sup>3</sup> /s/m)
	Hs (m)	Tp (s)	N (m)	
1	0.065	1.07	0.58	3.1
2	0.066	1.09	0.60	4.9
3	0.067	0.98	0.65	8.4
4	0.079	0.97	0.59	13.3
5	0.080	1.00	0.65	29.6

Los resultados señalan una importante sensibilidad en los caudales medios de sobrepaso sobre la estructura frente al incremento de las alturas de ola y los niveles estáticos utilizados en los diferentes ensayos. Este hecho justifica la necesidad de estudiar con mayor detenimiento las características del perfil de la estructura con el propósito de ajustar el sobrepaso a valores que resulten admisibles de acuerdo con los requerimientos del proyecto.

Una segunda etapa de los estudios vinculados al mencionado proyecto demandará la realización de ensayos de sobrepaso en un modelo físico, permitiendo comparar los resultados obtenidos en este análisis mediante la implementación de IHFOAM.

## CONCLUSIONES

El análisis presentado en este trabajo permitió comprobar la capacidad del modelo IHFOAM para la representación de un sistema de interacción ola-estructura que comprende la generación, propagación y absorción del oleaje dentro de un canal bidimensional.

Mediante la réplica de los ensayos realizados en un modelo físico se pudo profundizar la evaluación del modelo numérico. Al mismo tiempo, al ser validado mediante el contraste de las mediciones en ambos sistemas, el modelo numérico se presenta como una herramienta eficaz que amplía significativamente las posibilidades de análisis que conforman los alcances del estudio.

## REFERENCIAS

**De Waal, J.P. and J.W. van der Meer** (1992). Wave runup and overtopping on coastal dikes. ASCE, Proc. ICCE, Ch. 134, p. 1758-1771, Venice, Italy

**Goda, Y. and Suzuki, Y.** (1976). Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. Proc. 15th ICCE, Vol.1, pp. 828-845, Honolulu, USA.

**Higuera, P.** (2015). Aplicación de la dinámica de fluidos computacional a la acción del oleaje sobre estructuras. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente.

**Higuera, P., Lara, J. L., and Losada, I. J.** (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. Coastal Engineering, 83:243–258.

**U.S. Army Corps of Engineers** (2002). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).