

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-02-05

Artículo

## **Evaluación del coeficiente de reflexión en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S**

### **Numerical and experimental assessment of the reflection coefficient of rubble mound breakwaters with an "S" shaped profile**

Jair-del-Valle<sup>1</sup>

Edgar Mendoza<sup>2</sup>

Juan C. Alcérreca-Huerta<sup>3</sup>

Rodolfo Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [jdelvallem@iingen.unam.mx](mailto:jdelvallem@iingen.unam.mx)

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [emendozab@iingen.unam.mx](mailto:emendozab@iingen.unam.mx), ORCID: 0000-0002-1991-4721

<sup>3</sup>CONACYT/El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Quintana Roo, México, [jcalcerreca@conacyt.mx](mailto:jcalcerreca@conacyt.mx)

<sup>4</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [rsilvac@iingen.unam.mx](mailto:rsilvac@iingen.unam.mx), ORCID: 0000-0003-0064-9558

Autor para correspondencia: Edgar Mendoza, [emendozab@iingen.unam.mx](mailto:emendozab@iingen.unam.mx)

## **Resumen**

La reflexión debida a obras de abrigo es un fenómeno importante de cuantificar dado que, si no se controla, puede provocar problemas a la navegación, a la operación portuaria y, en casos extremos, a la estabilidad de la misma estructura.

Dada la forma en que interactúan los taludes de los rompeolas y el oleaje, el coeficiente de reflexión es prácticamente único para cada tipología y forma de dique, por lo que su cálculo depende, además de las condiciones de clima marítimo, de las propiedades geométricas de la estructura, así como de su porosidad. En este trabajo se presenta una evaluación del coeficiente de reflexión para diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en forma de "S" a partir de resultados obtenidos con el modelo OpenFOAM. Dicha información se comparó contra datos de laboratorio publicados en otras fuentes y contra algunas formulaciones disponibles en la literatura. Los resultados que ofrece el modelo numérico son muy parecidos a los reportados de manera experimental y, el modelo para el cálculo del coeficiente de reflexión obtenido mostró poca dispersión y buena precisión, en comparación con las formulaciones previas, por lo que puede emplearse en los rompeolas originales del estudio y también en otro tipo de estructuras.

**Palabras clave:** coeficiente de reflexión, diques con perfil en S, OpenFOAM.

## Abstract

Quantification of the wave reflection from breakwaters is important due to the problems to navigation, port operation and structure stability it may induce. Given the complex interaction between waves and rough slopes, the reflection coefficient is properly unique for each dike type and shape, thus, its estimation depends not only on the wave climate conditions but on the geometry of the structure and its porosity. In this paper a numerical estimation of the reflection coefficient from "S" shaped breakwaters is given from the hydrodynamic results obtained via OpenFoam numerical tool. This information was compared to that published elsewhere and against previous available formulations. The numerical results map well within the ranges experimentally reported, while the best fit model proposed herein showed low dispersion and good precision against the previous formulations. This means that the simple model developed can be used to estimate the reflection coefficient from the originally studied structures and from other several kind of structures as well.

**Keywords:** Reflection coefficient, dykes with S-profile, OpenFOAM.

Recibido: 07/07/2015

Aceptado: 30/07/18

## Introducción

La estimación y estudio de la reflexión debida a estructuras costeras es relevante debido a sus posibles efectos adversos a la navegación por la posible creación de estados de mar peligrosos o caóticos a la entrada de puertos, o por el incremento en la socavación, que puede llevar a la desestabilización y falla de la misma estructura (Zanuttigh & Lykke-Andersen, 2010).

En la práctica ingenieril es común caracterizar la magnitud de la reflexión por medio de un coeficiente de reflexión,  $K_r$ , el cual se define como la proporción de energía que representa el oleaje reflejado ( $H_r$ ), respecto del oleaje incidente ( $H_i$ ). Existen diversos estudios que abordan el tema de la reflexión en diques rompeolas; por ejemplo, Losada y Gimenez-Curto (1981) presentaron un modelo matemático tipo exponencial para evaluar  $K_r$ , considerando una sola pendiente rugosa y oleaje regular; Seelig y Ahrens (1981) integraron varios métodos para predecir la reflexión debida al oleaje, los cuales consideran ecuaciones sencillas para calcular el coeficiente de reflexión en condiciones de rotura y no rotura de las olas, así como en condiciones de oleaje regular e irregular; Davidson, Bird, Huntley y Bullock (1996) propusieron una fórmula para evaluar  $K_r$ , considerando cinco parámetros adimensionales (entre ellos el número de Iribarren,  $\xi$ ), a partir de un proceso de regresión múltiple de una base de datos, la cual está formada por datos de otros investigadores, como Seelig y Ahrens, 1981, Allsop y Channell (1989), Postma (1989), y de datos de una isla natural de roca que actúa como rompeolas; Zanuttigh y Van der Meer (2008) desarrollaron expresiones sencillas estimadas a partir del análisis de una extensa base de datos integrada por información de diferentes geometrías de piezas artificiales (como tetrápodos, *core-loc*, *xbloc*, antifer), el uso de roca permeable o impermeable, una o varias capas protectoras y pendientes lisas o con diferentes rugosidades, con lo cual lograron desarrollar una fórmula simple.

De los diferentes trabajos disponibles en la literatura (Postma, 1989; van der Meer, 1993; Sutherland y O'Donoghue, 1998; Clavero, 2007; Zanuttigh y van der Meer, 2008; Mendoza, Silva, Clavero, & Losada, 2010, entre muchos otros) se desprende

que cada tipología de dique, dada su interacción con el oleaje y desfase entre las ondas incidente y reflejada inducidas por la estructura requiere de un análisis específico, con el fin de proporcionar mejor estimación de la reflexión.

Ante las mejoras computacionales con las que hoy día se cuenta (incluso en una computadora de escritorio), se ha incorporado a las investigaciones de tipo físico el uso de herramientas numéricas para el mejor entendimiento de los fenómenos que ocurren en diferentes campos de la ingeniería. En particular, se pueden mencionar trabajos como los de Del Jesus, Lara y Losada (2012), y Lara, Del Jesus, y Losada (2012), quienes describen el modelo llamado IH-3VOF, el cual es capaz de realizar simulaciones numéricas de la interacción oleaje-estructura utilizando una aproximación tridimensional, considerando las estructuras porosas. Jensen Jacobsen y Christensen (2014) reexaminan las ecuaciones de flujo en medios porosos a través del modelo numérico basado en CFD (siglas en inglés de dinámica de flujos computacional) OpenFOAM. Sus resultados fueron validados para diferentes fenómenos de flujo (*run-up*, *run-down*, entre otros), para oleaje regular e irregular, y la evaluación de rebase.

A la luz de lo anterior, el presente estudio se centra en el análisis numérico de la reflexión generada por un dique rompeolas de piezas sueltas con perfil en S (en adelante nombrados como DRPS-S), que presenta la ventaja de ser un perfil que no se deforma más que con solicitaciones mayores a la de diseño (Mendoza *et al.*, 2010). Para ello, se evaluará el coeficiente de reflexión inducido por la presencia de un DRPS-S con la herramienta OpenFOAM. Para dicha valoración se consideró oleaje regular y los resultados se comparan con los obtenidos por Quiñones (2006), y parte de la información reunida en Zanuttigh y van de Meer (2008).

## Trabajo numérico

### Descripción del modelo

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) CFD-Toolbox (*Computational Fluid Dynamics*) es un *software* de uso libre, conformado por un conjunto de librerías que permite la resolución de diversos problemas relacionados con múltiples problemas, incluidos los de dinámica de fluidos (OpenFOAM, 2015).

Para la generación/absorción de ondas superficiales de agua, Jacobsen, Fuhrman, y Fredsøe (2012) desarrollaron una librería llamada *waves2Foam*, que emplea la técnica de zonas de relajación (capas activas tipo esponja) para la generación de oleaje a partir de diferentes teorías analíticas (p. ej., oleaje regular Stokes-I, Stokes -II, Stokes-V; función de flujo; c-noidal, y oleaje irregular). Las zonas de relajación son implementadas para evitar la reflexión de las ondas provenientes de las fronteras, e interferir con las fronteras en la zona de generación de las ondas (primera zona de relajación). Por otro lado, la librería *wavePorousFoam* desarrollada por Alcérreca-Huerta (2014), y aplicada a recubrimientos porosos de playa, permite considerar la propagación del oleaje al interior de uno o varios obstáculos porosos. Dicho modelo integra las capacidades de la librería *waves2foam* respecto de la generación/absorción de oleaje, y de simular el flujo a través de la definición explícita de estructuras porosas, considerando la interacción de dos fluidos (p. ej., agua y aire) no miscibles, isotérmicos e incompresibles. Para ello, *wavePorousFoam* resuelve las ecuaciones de gobierno VARANS (*Volume Average Reynolds Average Navier-Stokes*) y emplea la técnica VOF para la definición de interfaz entre fluidos. Sobre estas ecuaciones se pueden consultar los trabajos de Hsu, Sakakiyama y Liu (2002); Del Jesus *et al.* (2012), y Jensen *et al.* (2014). La forma matemática de las ecuaciones VARANS utilizadas en este trabajo es el esquema presentado en Alcérreca-Huerta y Oumeraci (2016):

Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento

$$\frac{\rho}{n} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\rho}{n^2} \nabla(UU) = -\nabla P + g \cdot X \nabla \rho + \frac{1}{n} \nabla \mu_{eff} \nabla U + \sigma_{eff} k \nabla \gamma - [CT] \quad (2)$$

Donde  $P$  es la presión;  $g$ , aceleración de la gravedad;  $n$ , porosidad;  $X$ , coordenadas cartesianas;  $\rho$ , densidad promedio ponderada de los fluidos de acuerdo con la fracción de volumen y ocupado por cada fase o fluido en una celda;  $U$ , velocidad. La viscosidad dinámica turbulenta  $\mu_{eff}$  se calcula como  $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$ , siendo  $\mu_t$  la viscosidad turbulenta dinámica estimada con ayuda del  $k-\epsilon$  modelo (Nakayama & Kuwahara, 1999) y  $\mu$  como la viscosidad dinámica media ponderada. El término  $\sigma_t \kappa \nabla \gamma$  representa la tensión superficial entre las dos fases, donde  $\sigma$  = superficial tensión y  $\kappa$  es la curvatura de la interface  $\kappa = \nabla \cdot (n / |n|)$  con  $n = \nabla \gamma$ .

El término  $CT$  se define (de acuerdo con Van Gent, 1995) como:

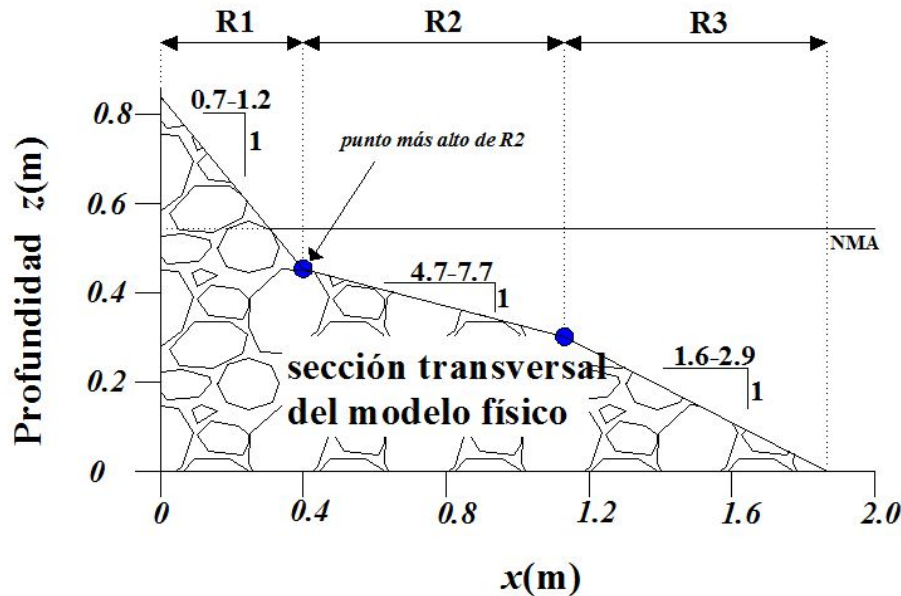
$$[CT] = \rho g \left( aU + b|U|U + C_A \frac{\partial}{\partial t} U \right) \quad (3)$$

Los coeficientes  $a$  y  $b$  se pueden estimar con diferentes formulaciones matemáticas. El coeficiente  $c_A$  es definido por Van Gent (1993) para flujo estacionario y oscilatorio a través de medios porosos, llegando a la ecuación (4), en la cual el coeficiente  $\gamma_{vG}$  vale 0.34.

$$C_A = \frac{1 + \gamma_{vG} \frac{(1-n)}{n}}{ng} \quad (4)$$

## Geometría de la sección transversal

El cálculo de las dimensiones de la sección transversal de un DRPS-S se realizó siguiendo la metodología propuesta por Mendoza *et al.* (2010), la cual se puede resumir como (Figura 1):



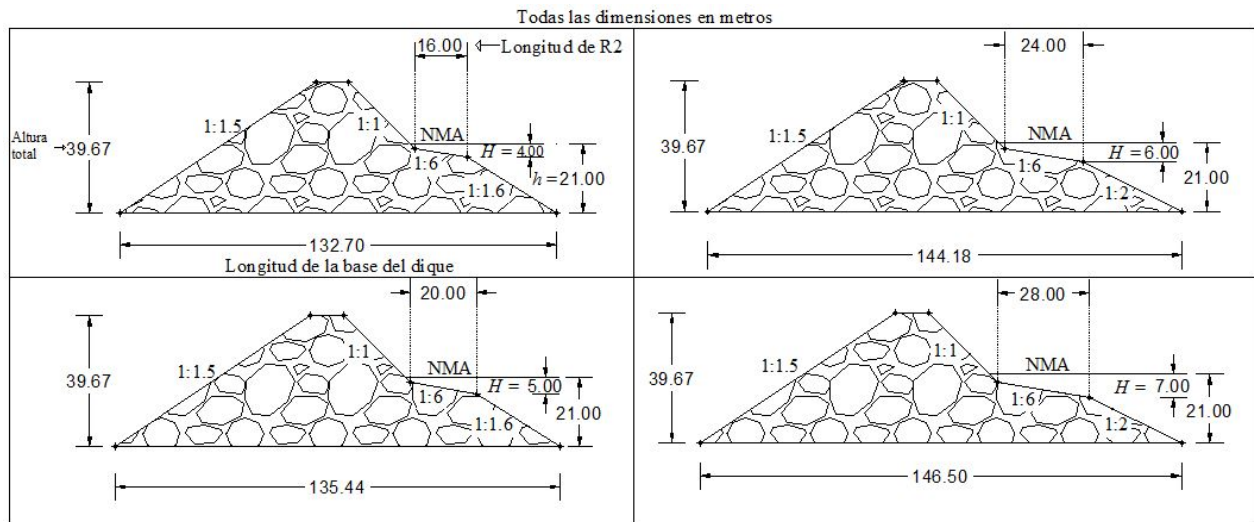
**Figura 1.** Valores propuestos por Mendoza *et al.* (2010) para cada una de las tres pendientes que conforman el perfil de un DRPS-S.

- Conocida la altura de ola de diseño ( $H$ ), se determina el punto más bajo de la zona R2, que tiene una profundidad igual a  $H$ . El cociente  $R2 / H$  debe encontrarse entre  $2 < R2 / H < 5$ . R2 no debe cruzar el nivel de agua en reposo.
- Desde el punto más alto de R2 se traza R1, y su cota máxima deberá asegurar que el dique no sea rebasable. El cociente  $R1 / H$  debe encontrarse entre  $2 < R1 / H < 4$ .
- Por último, desde el punto más bajo de la región R2, se traza la región R3. El cociente  $R3 / H$  debe encontrarse entre  $4 < R3 / H < 5$ .

Cabe destacar que en el inciso a), la restricción  $2 < R2 / H < 5$ , en conjunto con alguno de los valores de pendiente que se elija para la zona R2, se asegura que el punto más alto de R2 no cruce el nivel medio del agua.

A partir de esta metodología de diseño geométrico se propusieron cuatro alturas de ola de diseño ( $H = 4, 5, 6$  y  $7$  m), con lo que se obtuvieron las secciones transversales mostradas en la Figura 2. Además, en dicha figura también se pueden observar los valores elegidos para las pendientes de las tres regiones del DRPS-S, es decir R1, R2 y R3.





**Figura 2.** Dimensiones de las cuatro secciones transversales de los DRPS-S modeladas numéricamente.

## Porosidad

Se utilizaron diferentes valores de porosidad. En una primera etapa del trabajo numérico sólo se usó un único valor de porosidad  $n = 0.45$ , a fin de obtener diferentes valores del coeficiente de reflexión  $K_r$ , en función del número de Iribarren  $\xi$ , para después comparar dichos resultados con datos medidos disponibles. En una segunda etapa del trabajo numérico se emplearon diferentes valores de porosidad, incluido el valor de 0.45 mencionado antes; ello, con la finalidad de observar el efecto que tiene este parámetro sobre el valor del  $K_r$ . Más adelante se describe con detalle el trabajo llevado a cabo de estas dos etapas.

## Características del oleaje empleado



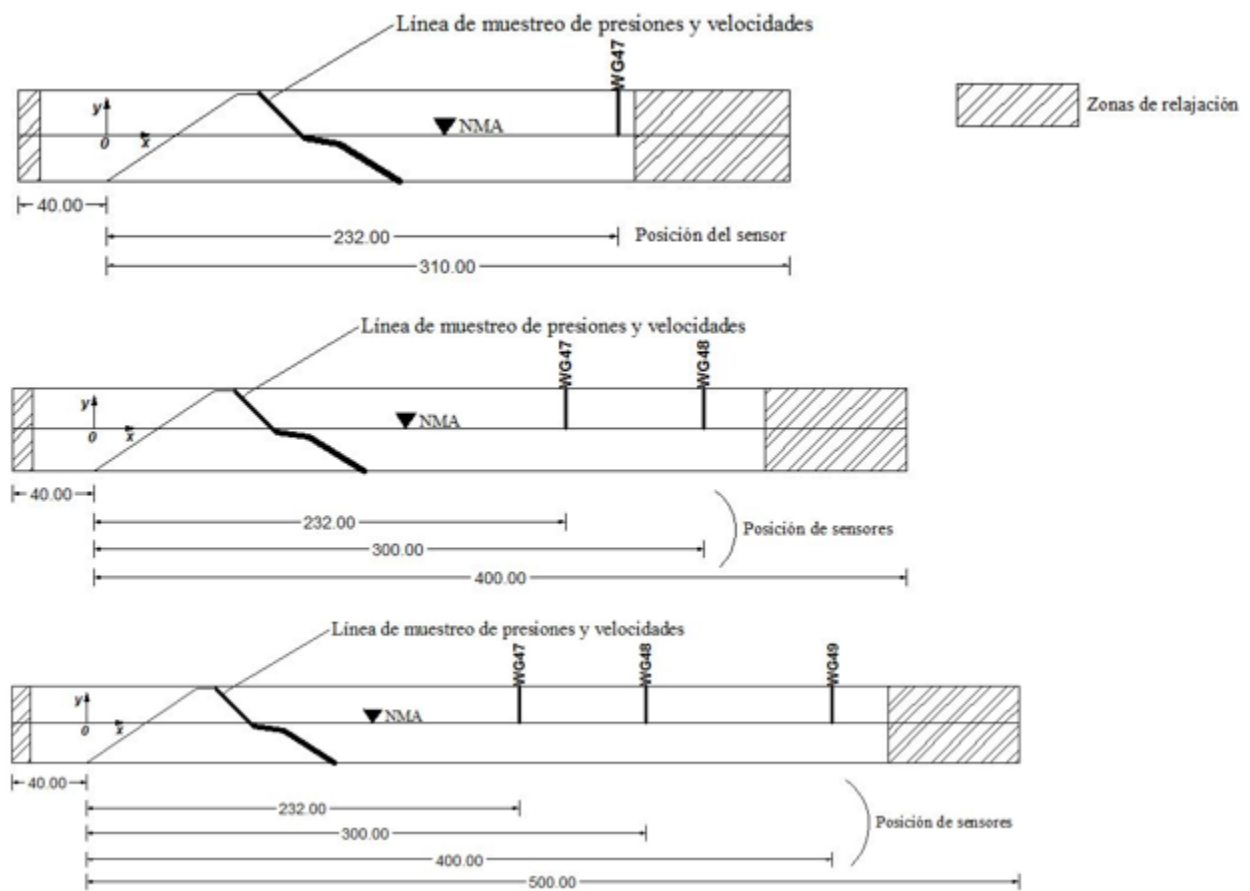
El oleaje empleado es regular, representado por los valores de altura de ola  $H = 4, 5, 6$  y  $7$  m. Se modelaron cuatro periodos de ola con valores  $T = 9, 10, 11$  y  $12$  s. Pero también se consideró el valor de  $T = 8$  s, en combinación sólo con el valor de  $H = 7$  m. Para todos los estados de mar, el tipo de representación analítica más adecuado para el oleaje fue el de Stokes de quinto orden.

De esta forma se tienen un total de 17 estados de mar (como consecuencia de la combinación de las cuatro alturas de ola con los cuatro periodos, más el estado de mar adicional  $H = 7$  m,  $T = 8$  s). Cabe recordar que las cuatro alturas de ola dan las dimensiones de cada una de las secciones transversales mostradas en la Figura 2.

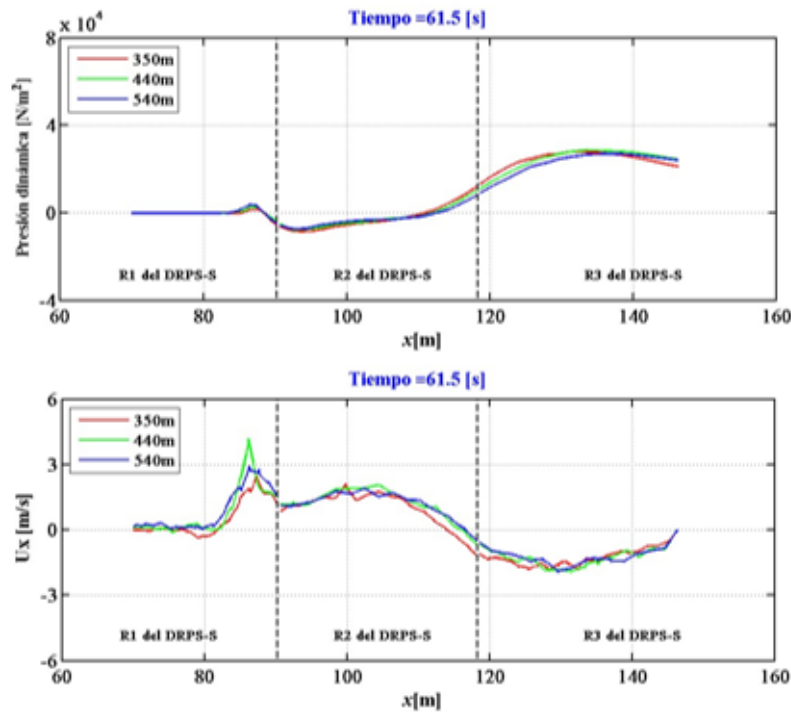
## Determinación de la longitud del dominio de cálculo

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad respecto de la longitud del dominio de cálculo, con el fin de optimizar el tiempo de simulación, en el entendido que a mayor longitud del dominio computacional, mayor será el tiempo requerido por la modelación. Se probaron diferentes longitudes del dominio de cálculo —310, 400 y 500 m—, con la condición de que al menos una longitud de onda fuera visible (esto es, que se viera una cresta y un valle por lo menos) en dicha zona. El caso elegido para este análisis fue el de 9 s (menor longitud de onda) y  $H = 7$  m (mayor altura de ola). Se añadieron 40 m más a barlomar del dique rompeolas, a fin de tener espacio para estimar el oleaje transmitido y para las zonas de relajación. El tiempo de simulación para cada caso fue de 120 segundos.

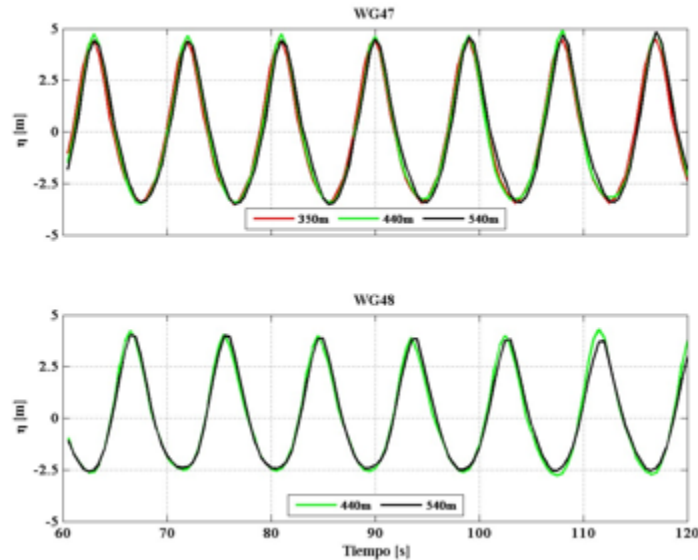
La comparación entre resultados se efectuó con base en los valores de presión dinámica, velocidad y nivel del agua sobre la cara del DRPS-S. La posición tanto de los sensores de nivel como de la línea de muestreo se señala en la Figura 3. La Figura 4 muestra los resultados de la presión dinámica y velocidad, mientras que los correspondientes para el nivel del agua se presentan en la Figura 5.



**Figura 3.** Longitudes de dominio de cálculo y posición de sensores de nivel.



**Figura 4.** En el panel superior, comparación de la presión dinámica para el instante de tiempo  $t = 61.5$  s a lo largo del perfil en S para las tres longitudes propuestas. En el panel inferior, comparación de la componente horizontal de la velocidad a lo largo del perfil en S.



**Figura 5.** Comparación de los resultados de los sensores de nivel comunes a las longitudes del dominio de cálculo propuestas.

Al revisar los resultados mostrados en la Figura 4 y Figura 5 no se observan variaciones significativas en los resultados de presión, velocidad y nivel de agua. Por ejemplo, los errores relativos al comparar los valores de superficie del agua de las longitudes de 440 y 540 m contra los valores de superficie de la longitud de 350 m se obtuvieron errores entre 8 y 20%. A partir de lo anterior, se decidió que la longitud final de cálculo fuera de 350 m. Es importante mencionar que el tamaño de celda se mantuvo constante para las tres longitudes analizadas. Los tamaños de celda fueron de 1 m al inicio del dominio y en las inmediaciones del dique 0.5 m.

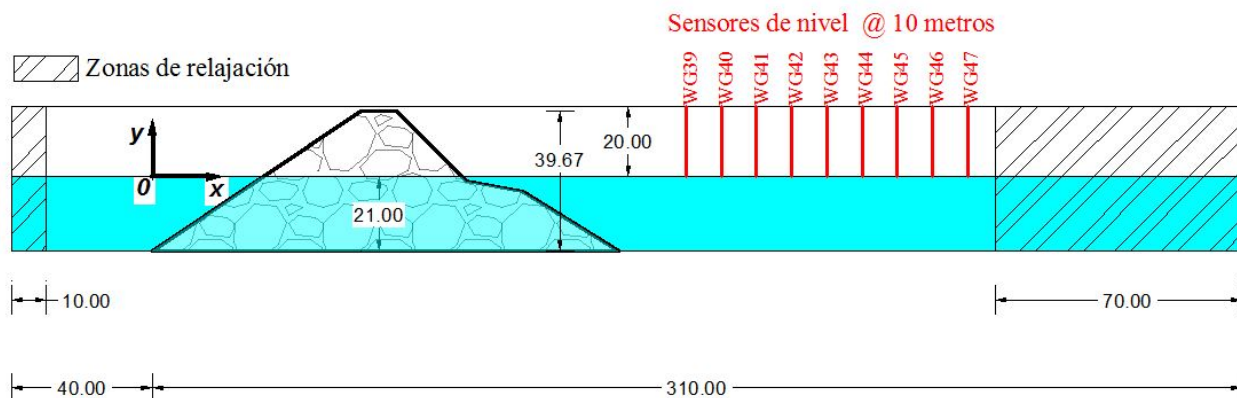
## Características del medio poroso

Para hacer la representación de un DRPS-S como un medio poroso continuo, se requiere conocer los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación (3). Existen en

la literatura algunas formulaciones para el cálculo de estos coeficientes (p. ej., Ergun, 1952; Engelund, 1953; Koenders, 1985; Shih, 1990). La versión 2.1.0 de OpenFOAM utiliza la formulación de Engelund (1953), lo cual se consideró aceptable para este trabajo.

## Metodología y casos de estudio

Para evaluar el coeficiente de reflexión se consideró la expresión  $K_r = |H_r / H_i|$ . Las series de tiempo donde se registró la variación de la superficie libre se obtuvieron a partir de la ubicación de nueve sensores de nivel distribuidos cada 10 m desde de la posición  $x = 152$  m y en dirección hacia el DRPS-S (Figura 6).



**Figura 6.** Posición de los sensores de nivel.

Asimismo, se consideraron dos casos de estudio en función del coeficiente de reflexión y de su afectación por efecto de la porosidad. En el primer caso se evaluó el coeficiente de reflexión considerando un valor de porosidad  $n = 0.45$ . Para tal efecto se modelaron los 16 estados de mar ya mencionados, con el propósito de observar las variaciones de  $K_r$  debido a la presencia de la estructura. En el segundo caso se analizó  $K_r$ , tomando en cuenta diferentes valores de porosidad y considerando seis estados de mar ( $H$  (m),  $T$  (s)): (5, 9), (6, 9), (6, 10), (7, 8), (7,

9) y (7, 10). En cada estado de mar se modelaron 10 valores de porosidad, los cuales son  $n = 0.05, 0.35, 0.37, 0.40, 0.42, 0.45, 0.47, 0.50, 0.52$  y  $0.55$ .

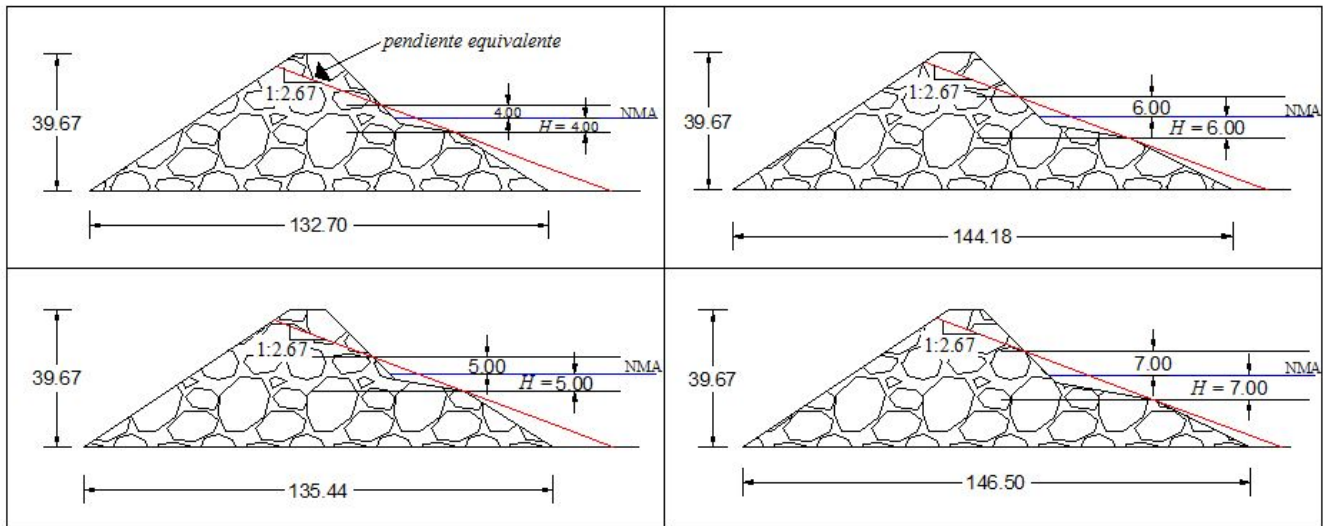
Para determinar el valor de la altura de ola reflejada ( $H_r$ ) y, por lo tanto, el valor de  $K_r$ , se empleó la metodología siguiente:

- Las simulaciones consideraron 120 s bajo las condiciones de oleaje regular antes mencionadas. Para el análisis de resultados se consideraron los últimos 60 segundos de la simulación ( $\sim 10$  periodos de ola como mínimo).
- Sin considerar los primeros segundos de simulación, se corrigió el nivel medio del agua por medio del método de corrección aritmética (Silva, 2005). La corrección se hizo obteniendo el promedio de la serie de tiempo de oleaje; a continuación se le restó este valor promedio a cada valor de la serie de tiempo, dando así la nueva serie de tiempo corregida.
- Considerando la nueva serie corregida y al tratarse de oleaje regular, existe una única altura de ola incidente ( $H_i$ ). Como consecuencia de ello, también se considera una única altura de ola reflejada ( $H_r$ ), aunque no necesariamente en la misma fase debido a la geometría del perfil en S. Matemáticamente esto se representa por la expresión  $H_T = H_i + H_r$ , en donde  $H_T$  es la altura de ola total.

## Pendiente equivalente

Por último, el parámetro adimensional que mejor describe el comportamiento del coeficiente de reflexión es el número de Iribarren o parámetro de surf  $\xi(-)$ . Para estimarlo, en el caso de los DRPS-S, es necesario definir un valor de una pendiente equivalente que represente la hidrodinámica del perfil. Para ello se empleó el procedimiento propuesto por van der Meer (1992), el cual toma como unidad de medida de referencia el valor de la altura de ola incidente ( $H_i$ ). Así, se determina una distancia igual a esta unidad tanto por arriba como por debajo del nivel medio del agua. Se trazan líneas paralelas al nivel medio del agua, las cuales cruzan el perfil en S. Los puntos de cruce sirven como referencia para trazar una línea cuya pendiente es la equivalente requerida. En la Figura 7 se ejemplifica este

procedimiento, obteniendo en las cuatro secciones transversales de DRPS-S a trabajar el valor de 1:2.67.



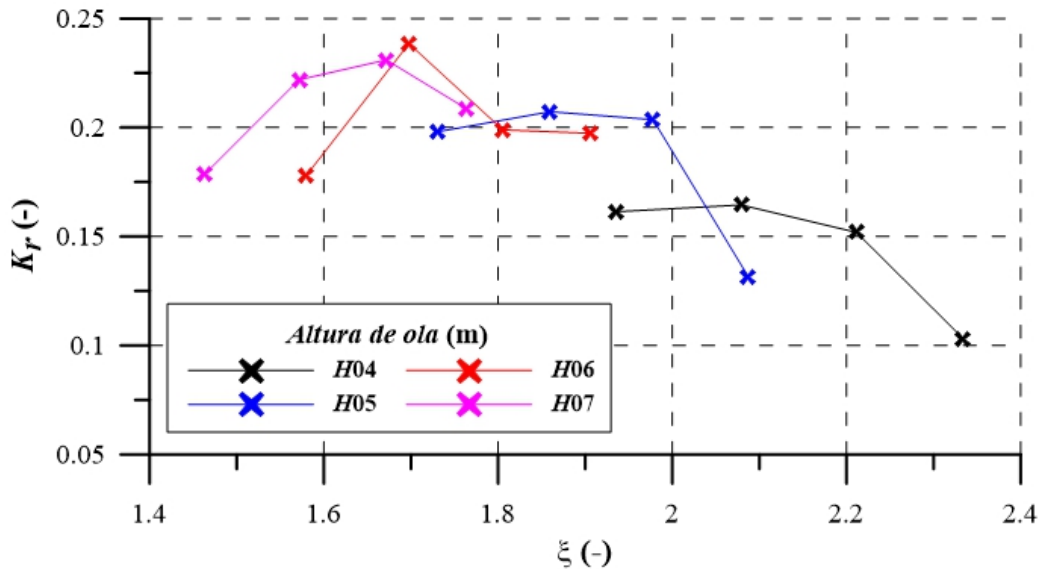
**Figura 7.** Definición de la pendiente equivalente para las cuatro secciones transversales planteadas.

## Resultados

### Coeficiente de reflexión como función del número de Iribarren

En la Figura 8 se muestran los valores de  $K_r$  en función del número de Iribarren.





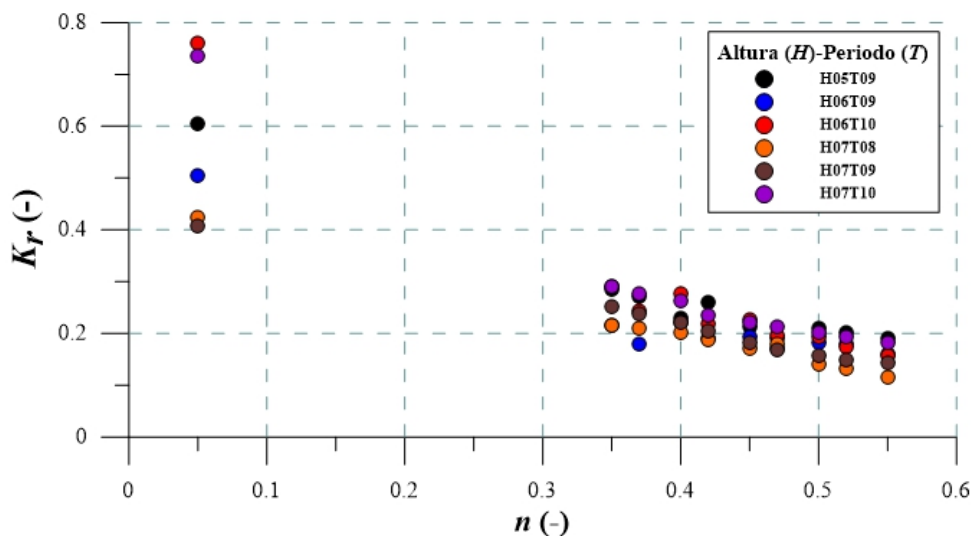
**Figura 8.** Coeficiente de reflexión como función del número de Iribarren.

De la Figura 8 se desprende lo siguiente:

- La magnitud del coeficiente de reflexión aumenta conforme la altura de ola se incrementa
- El comportamiento del coeficiente de reflexión para distintos números de Iribarren es congruente con la forma conocida.
- La rotura tipo voluta se da por lo general para números de Iribarren menores o iguales que 2. La mayoría de los resultados de  $K_r$  caen dentro de este rango y están asociados para las alturas de ola de 5, 6 y 7 m. Esto puede dar indicios de que el perfil en S propicie la rotura tipo voluta para altura de olas grandes, lo cual se puede considerar muy ventajoso, pues se busca la mayor disipación de energía del oleaje sobre el perfil en S.
- Los valores de reflexión obtenidos coinciden con los reportados por Quiñones (2006).

## Coeficiente de reflexión como función de la porosidad

En la Figura 9 se muestran los resultados de  $K_r$  en función de la porosidad. Es claro que a menor porosidad mayor será el valor de  $K_r$ . Asimismo, se presentan los valores de  $K_r$  cuando  $n$  toma un valor muy pequeño (en este caso, 0.05), a fin de mostrar el caso impermeable.

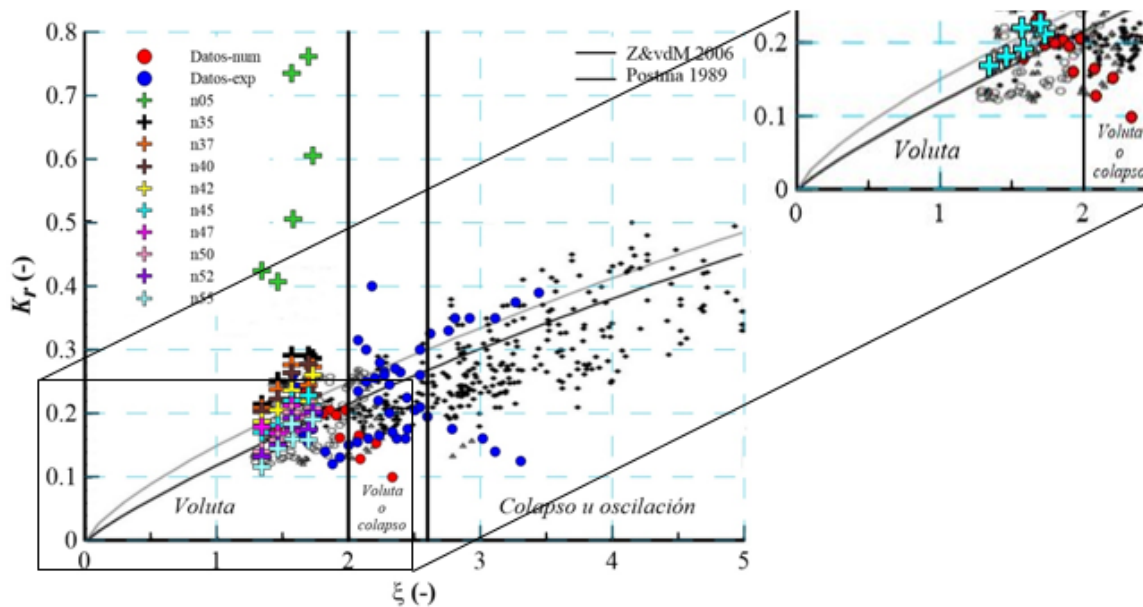


**Figura 9.** Coeficiente de reflexión como función de la porosidad.

## Comparación y discusión de los resultados numéricos

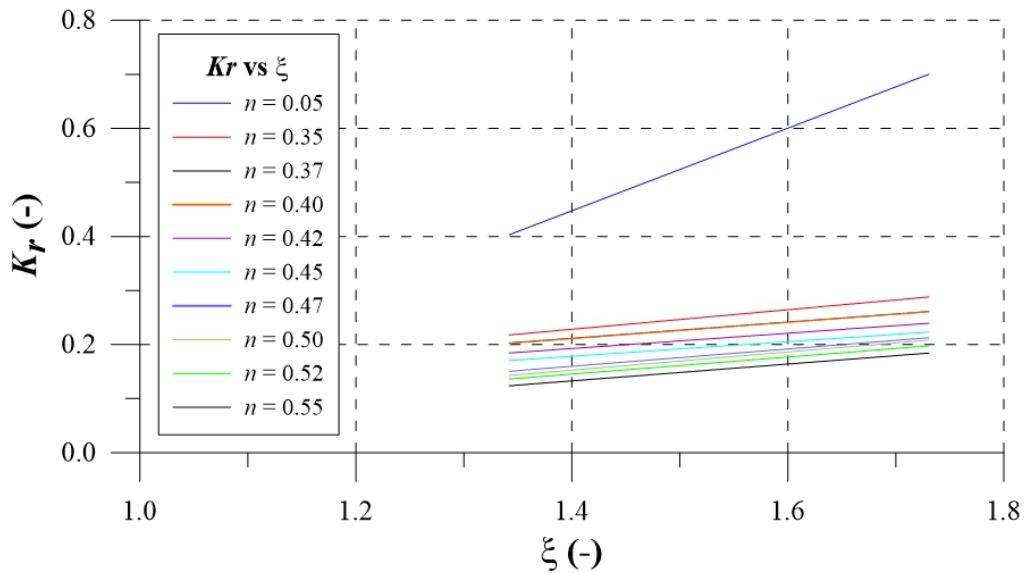
Se realizó una comparación entre los resultados numéricos obtenidos y datos de coeficientes de reflexión estimados en los trabajos experimentales de Quiñones (2006), y los presentados en Zanuttigh y van der Meer (2008); dicha comparación se muestra en la Figura 10. En ella se puede observar que los resultados numéricos están dentro del rango de variación de los obtenidos en el modelo físico. Cabe mencionar que el tipo de rotura es de tipo voluta para la mayoría de los datos numéricos, mientras que los datos experimentales, en su mayor parte, presentan

una rotura tipo colapso (*surging-waves*). Es importante señalar que los datos numéricos dibujados en la Figura 10 son los obtenidos para el valor de porosidad de 0.45.



**Figura 10.** En el panel de la izquierda, comparación de los resultados numéricos contra los del Quiñones (2006), y los presentados en Zanuttigh y van der Meer (2008). En el panel de la derecha, acercamiento a los números de Iribarren más bajos.

La combinación de los dos casos numéricos ejecutados permite incluir, en el cálculo del coeficiente de reflexión, la dependencia simultánea del número de Iribarren y de la porosidad. La consideración de la porosidad es importante, dado que dicho valor puede cambiar a lo largo de la vida útil de un rompeolas por movimiento de las piezas del manto principal o por colmatación de los intersticios con el material que viaja en suspensión. Es así que dibujando los resultados de la modelación se obtuvieron curvas de mejor ajuste (se eligieron ecuaciones lineales, ver Figura 11), con el fin de sentar las bases de una familia de ecuaciones que permita estimar el coeficiente de reflexión de DRPS-S como función del número de Iribarren y de la porosidad. Los valores de la pendiente y ordenada al origen de esta familia de rectas se resumen en la Tabla 1.



**Figura 11.** Curvas de ajuste:  $Kr = f(\xi)$ . Los coeficientes del modelo lineal se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de mejor ajuste (pendiente y ordenada al origen) de las curvas de coeficiente de reflexión como función de la porosidad.

$n$	$m$	$b$
0.05	0.7644	-0.6226
0.35	0.1809	-0.0249
0.37	0.1500	0.0017
0.40	0.1506	0.0000
0.42	0.1414	-0.0053
0.45	0.1356	-0.0116
0.47	0.1600	-0.6412
0.50	0.1678	-0.0822
0.52	0.1577	-0.0754
0.55	0.1557	-0.0852

Con el fin de evaluar el desempeño de las rectas propuestas, en la Figura 12 se muestra una comparación entre los resultados que ellas ofrecen con los resultados

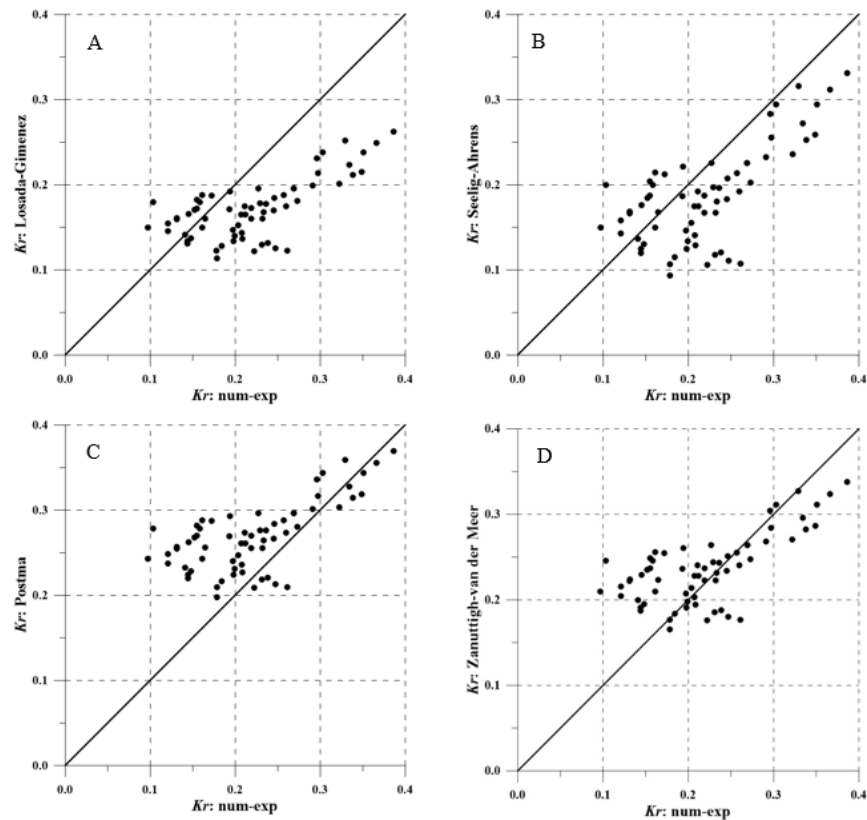
de expresiones disponibles en la literatura, a saber, Losada y Gimenez-Curto (1981) (ecuación (5)); Seelig y Ahrens (1981) (ecuación (6)); Postma (1989) (ecuación (7)), y Zanuttigh y van der Meer (2008) (ecuación (8)), las cuales se presentan a continuación:

$$K_r = 3.999 * [1 - \exp(-0.0197 * \xi)] \quad (5)$$

$$K_r = (0.75 * \xi^2) / (15 + \xi^2) \quad (6)$$

$$K_r = 0.15 * \xi_0^{0.73} \quad (7)$$

$$K_r = \tanh(0.12 * \xi_0^{0.87}) \quad (8)$$



**Figura 12.** Comparación entre los resultados con las ecuaciones lineales (Tabla 1) con los valores dados por panel A, ecuación (5); panel B, ecuación (6); panel C, ecuación (7), y panel D, ecuación (8).

La ecuación de Losada y Giménez-Curto (1981) ofrece valores de reflexión un poco menores que las estimadas en las rectas de la Tabla 1 (ver Figura 12, panel A) debido a que aunque dichos autores sí consideran la porosidad; el talud para el que aplica la expresión es recto y homogéneo. Se encontró el error promedio y desviación estándar: 26.1 y 13.5%, respectivamente. En el panel B de la Figura 12 se muestra la comparación entre la ecuación de Seelig y Ahrens (1981) y la familia de rectas de la Tabla 1; estas últimas ofrecen valores un poco mayores, pero el ajuste es aceptable; se calculó un error promedio de 24.6% y una desviación estándar de 16.3%. En el panel C se comparan la ecuación de Postma (1989) con la familia de rectas aquí propuesta; en este caso, el error promedio es de 34.7%, con una desviación estándar de 37%; aquí las rectas propuestas estiman mayores

valores del coeficiente de reflexión que la ecuación previa, sin que la dispersión sea demasiado alta. Por último, en el panel D, la ecuación de Zanuttigh y van der Meer (2008) se compara contra las rectas descritas en la Tabla 1; se obtuvo un error promedio de 24.3%, con una desviación estándar de 28.5%; es el caso con menor diferencia entre las expresiones comparadas.

De lo observado en la Figura 12 se puede decir que la familia de rectas resumida en la Tabla 1 es una herramienta útil para estimar el coeficiente de reflexión debido a un DPRS y también a otro tipo de rompeolas.

## Conclusiones

Se llevó a cabo un trabajo numérico para estimar las condiciones hidrodinámicas inducidas por la interacción entre oleaje y un dique rompeolas de perfil en S. A partir de ello se estimó el coeficiente de reflexión resultante de dicha interacción para el caso de ondas regulares (Stokes V). Se eligieron como grados de libertad en la modelación numérica las condiciones de oleaje incidente y la porosidad del rompeolas, lo que permitió desarrollar un modelo, conformado por una familia de rectas, para estimar de manera directa el coeficiente de reflexión como función de los valores de dichos grados de libertad. Los resultados de la modelación se compararon contra datos experimentales disponibles en la literatura, mostrando un mapeo dentro de los mismos rangos.

Una vez definido el modelo de estimación directa del coeficiente de reflexión, se comparó contra formulaciones previas para las mismas condiciones. Se encontró poca dispersión y errores bajos, por lo que se concluye que el modelo propuesto es capaz de estimar la reflexión debida a un DPRS, pero también la debida a otros tipos de rompeolas con precisión aceptable.

## Referencias



- Alcérreca-Huerta, J. C. (2014). *Process-based modelling of waves interacting with porous bonded revetments and their sand foundation* (Ph.D-thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Alemania.
- Alcérreca-Huerta, J. C., & Oumeraci, H. (2016). Wave-induced pressures in porous bonded revetments. Part I: Pressures on the revetment. *Coastal Engineering*, (110), 87-101.
- Allsop, W., & Channell, A. (1989). Wave reflection in harbours: Reflection performance of rock armoured slopes in random waves. *Hydraulic Research Report* (OD 102), Ed. HR Wallingford, Wallingford, Oxfordshire, Reino Unido.
- Clavero, M. (2007). *Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil* (Ph.D-thesis). Universidad de Granada, España.
- Davidson, M. A. Bird, P. A. Huntley, D. A., & Bullock, G. N. (1996). Prediction of wave reflection from rock structures: an integration of field & laboratory data (pp. 2077-2086). In: *Procedures 25<sup>th</sup> ICCE*, ASCE, Nueva York, EUA.
- Del Jesus, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part I: Numerical model formulation. *Coastal Engineering*, (64), 57-72.
- Engelund, F. (1953). *On the laminar and turbulent flow of groundwater through homogeneous sand*. Trans. Danish Academy of Technical Sciences, København, Dinamarca.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94.
- Hsu, T. J., Sakakiyama, T., & Liu, P. L. F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering*, 46, pp. 25-50.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., & Fredsøe, J. (2012). "A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70, 1073-1088.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G., & Christensen, E. D. (2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures. *Coastal Engineering*, 84, 56-72.

- Koenders, M. A. (1985). *Hydraulic criteria for filters*. London: Estuary Physics Publ., Londres, Reino Unido.
- Lara, J. L., Del Jesus, M., & Losada, I. J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part II: Experimental validation. *Coastal Engineering*, (64), 26-46.
- Losada, M., & Gimenez-Curto, L. A. (1981). Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering*, (4), 187-206.
- Mendoza, E., Silva, R., Clavero, M., & Losada, M. (2010). Evolución del comportamiento hidráulico y de la geometría de diques homogéneos al ser deformados por el oleaje. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(2), 21-35.
- Nakayama, A., & Kuwahara, F. (1999). A macroscopic turbulence model for flow in porous media. *J. Fluids Eng.*, (121), 427-433.
- OpenFOAM. (2015). *OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide. Version 3.0.1*. OpenFoam Foundation Ltd., Londres, Reino Unido.
- Postma, G. M. (1989). *Wave reflection from rock slopes under random wave attacks* (Ph.D-thesis). Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Quiñones, J. L. (2006). *Estabilidad de diques en talud* (Master thesis). Faculty of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Seelig, W. N., & Ahrens, J. P. (1981). *Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters*. CERC Tech. (paper 81-1). USACE, Vicksburg, EUA.
- Shih, R. W. K. (1990). *Permeability characteristics of rubble material, new formulae* (pp. 1499-1512). International Conference of Coastal Engineering, Delft, Holanda.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje* (Publication SD/49). Engineering Institute, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sutherland, J., & O'Donoghue, T. (1998). Characteristics of wave reflection spectra. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (124), 303-311.
- Van der Meer, J. W. (1992). Stability of the seaward slope of berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 16, 205-234.
- Van der Meer, J. W. (1993). *Conceptual design of rubble mound breakwaters* (publication number 483). Delft Hydraulics, Holanda.

- Van Gent, M. R. (1993). *Stationary and oscillatory flow through coarse porous media* (Ph.D-thesis). Communications on Hydraulic Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Van Gent, M. R. (1995). Porous flow through rubble-mound material. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (121), 176-181.
- Zanuttigh, B., & van der Meer, J. W. (2008). Wave reflection from coastal structures in design conditions. *Coastal Engineering*, 55, 771-779.
- Zanuttigh, B., & Lykke-Andersen, T. (2010). Wave reflection in 3D conditions. *Coastal Engineering*, 57, 531-538.