

Descenso máximo en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S

**Jair Del Valle Morales,
José Antonio González Vázquez,
Claudia Rojas Serna,
Erika Hernández Vivar**
**Departamento de Ingeniería de
Procesos e Hidráulica**
Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa

Resumen

El presente estudio está enfocado a la evaluación del descenso máximo (Rd/H) en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S (DRPS-S). Se plantea una metodología integral, la cual parte de la definición del perfil en S, posteriormente se describen los pasos que llevan al diseño geométrico de la sección transversal de un DRPS-S, donde dicha metodología se ha descrito en el artículo-par (*Evaluación del ascenso máximo, Ru*), el cual se enfoca únicamente en el análisis del ascenso máximo en DRPS-S (Del Valle y Gonzalez-Vazquez, 2018). A continuación se mencionan todas las variables que se ven involucradas en el modelado numérico el cual se lleva a cabo con ayuda del software OpenFOAM® para así obtener el valor del descenso máximo por cada estado de mar planteado. Además se hace un análisis estadístico de estos resultados y se le proporciona al lector una ecuación de ajuste estadístico que permite evaluar el Rd/H como función única del número de Iribarren, ξ . Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados numéricos y dos formulaciones matemáticas tomadas de la literatura especializada, llegando a proponer unos factores de ajuste que aplicados a dichas ecuaciones permiten al lector evaluar el descenso máximo para esta tipología especial de dique con un buen grado de confianza.

Palabras clave

Descenso máximo; DRPS-S; OpenFOAM; número de Iribarren.

Abstract

This paper focuses on the evaluation of the rundown (Rd/H) on the breakwaters

with “S” profile (DRPS-S). A complete integral methodology is proposed, that starts with the definition of the “S” profile. Afterwards the necessary steps to the geometric design of a DRPS-S are presented. This methodology is presented in the par-paper (*Evaluation of the runup, Ru*), which focuses only on the analysis of the runup. Later, all the variables involved in the numerical modelling are presented. The numerical calculations, made with the software OpenFOAM®, allow the evaluation of the rundown originated by each proposed sea state. A statistical analysis of the obtained results was made, and a statistical fitted function that allows the evaluation of Rd/H as a function of Iribarren number ξ , is proposed. Finally, a comparison between the numerical results, and two mathematical formulations from the literature is made. Adjustment numerical-factors to these equations are proposed, which allows the evaluation of the rundown with major confidence for these type of breakwaters.

Keywords

Rundown; DRPS-S; OpenFOAM; Iribarren number.

Introducción

Los fenómenos de flujo presentes en las estructuras de protección costera se pueden agrupar considerando dos puntos de vista: energético: fenómenos de reflexión, transmisión, difracción y disipación de la energía del oleaje; y de masa: ascenso máximo o *runup*, descenso máximo o *rundown* y el rebase del agua sobre las estructuras (*overtopping*).

En este trabajo se hablará exclusivamente del descenso máximo. No obstante, este parámetro se puede determinar conjunta-

mente con el ascenso máximo. Para que el lector se familiarice un poco más se definen ambos parámetros de la siguiente manera: el ascenso máximo es la elevación que alcanza el agua al incidir sobre el talud en los **Diques Rompeolas de Piezas Sueltas (DRPS)** sin que exista rebase. Dicha elevación se mide a partir del nivel medio del agua (NMA) en forma vertical (Figura 1A). En este sentido, el ascenso máximo es el punto más elevado que alcanza el agua sobre el talud. Por otra parte, el descenso máximo es la distancia vertical máxima medida a partir del nivel medio de agua hasta el punto más bajo que alcanza la lámina de agua al incidir sobre el talud del DRPS (Del Valle, 2017). En la Figura 1B se ilustra esta definición.

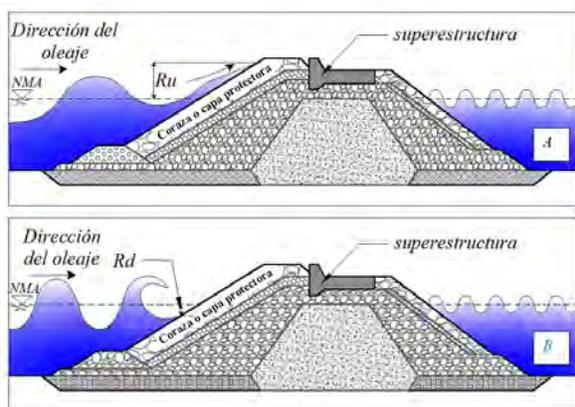


Figura 1. Definición del ascenso y descenso máximo en un DRPS.

Por otra parte, el número de Iribarren, que usualmente se denota con la letra griega ξ , es un parámetro adimensional que relaciona características geométricas e hidrodinámicas presentes en los DRPS. Más adelante se muestra una fórmula básica para su determinación.

En el diseño de estructuras de protección costera, las fuerzas más importantes a con-

siderar son su peso propio, viento y oleaje. El oleaje es la fuerza de mayor importancia, sus condiciones influyen en el secado y mojado, generando un campo de presiones interno en las diferentes capas que constituyen el DRPS. Dicho forzamiento es el que da la pauta para el diseño hidrodinámico y mecánico de las estructuras de protección costera, trabajos experimentales en torno al campo de presión internas y externas en DRPS, son menores que en diques en talud (Hall y Foster, 1990).

En este sentido, los DRPS son las obras civiles que más abundan como infraestructura de protección, cuya principal función consiste en disipar la energía del oleaje a través de la rotura de las olas y por la fricción generada a través de la coraza principal y como función secundaria, reflejar la energía del oleaje hacia mar abierto. Normalmente se aprovecha la cercanía de bancos de materiales para su construcción. Se diseñan y construyen este tipo de estructuras para evitar la acción severa del oleaje sobre las playas y los puertos. Tradicionalmente se construyen considerando un solo talud tanto del lado expuesto (*seaward*) como del lado protegido (*landward*).

En cuanto a su diseño mecánico, los DRPS pueden encontrarse contruidos considerando un solo tamaño de pieza, o en varias capas, teniendo así, en este último caso, diferentes tamaños de piezas que constituyen el rompeolas. Ya sea el primer caso o el segundo, cuando el talud expuesto a la acción del oleaje comienza a deformarse, la sección transversal del rompeolas tiende a la forma de la letra S estirada (o alargada). Se ha podido determinar que dicho perfil deformado es dinámicamente estable en condiciones ordinarias que dieron origen a tal deformación, otra investigación podría ser para

eventos extraordinarios en un estado de mar más energético. Si esta deformación no para, y es el caso de un rompeolas constituido por varias capas, comienza el movimiento de las piezas de las capas subyacentes hacia la capa principal. Dicho movimiento conlleva a la pérdida de las piezas que forman la coraza o capa protectora de la estructura, en ese momento el rompeolas se puede considerar en riesgo estructural. Sin embargo con la evaluación de las fuerzas involucradas se puede calcular una vida útil de la estructura con diferentes periodos de retorno que satisfagan la protección y que además tenga una factibilidad económica.

La siguiente comparación que se menciona sintetiza los aspectos de los DRPS tradicionales o en talud contra las características que ofrecen los DRPS con perfil en S:

- **Hidrodinámica:** los efectos adversos debido a los procesos de transformación del oleaje son menores comparados con los efectos presentes en los diques rompeolas en talud.
- **Geométrica:** la geometría del dique en S promueve una mayor estabilidad de las piezas protectoras.
- **Mecánica:** el tamaño de las piezas protectoras del dique pueden ser menores con respecto a las piezas usadas en un dique rompeolas en talud.
- **Constructiva:** al emplearse piezas protectoras de menor tamaño, por dar un ejemplo, el tamaño de las grúas que se utilicen para su colocación podrán ser de menores dimensiones.
- **Costos:** los costos totales de un dique en S a lo largo de su vida útil serán

menores, esto con base en que el perfil en S promueve una estabilidad alta.

Por otra parte, el uso de herramientas numéricas actualmente ha cobrado una relevancia bastante importante. Una de las razones de esto se debe al poder de las computadoras para realizar cálculos matemáticos, aun cuando se traten de computadoras de uso personal (computadoras de escritorio). La importancia del uso del software OpenFOAM en este trabajo radica en que, por medio de esta herramienta, es posible valorar parámetros o variables físicas en modelos a escala natural, evitando de esta manera el tema de los factores de escala tanto espaciales como temporales. Se resalta que, en este artículo, los resultados del descenso máximo corresponden a modelos numéricos de diques rompeolas a escala natural, lo cual hace valiosa la información que se presenta aquí, ya que se puede comparar con información medida de estructuras que ya estén operando, de ahí la justificación del uso de esta herramienta numérica.

Considerando lo antes expuesto, la importancia del presente trabajo reside en mostrarle tanto al lector especializado como no especializado, una parte de un análisis integral para caracterizar hidrodinámica y mecánicamente un DRPS con perfil en S (DRPS-S). Para llevar a cabo esta labor, a continuación se enuncia el siguiente objetivo.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es analizar uno de los fenómenos de flujo presentes en los DRPS-S, el descenso máximo (*rundown*, *Rd*), el cual permitirá la valoración y comparación entre las ecuaciones establecidas

y la aplicación de software OpenFOAM (solución numérica de acuerdo a la dinámica de fluidos), para finalmente llegar a un ajuste estadístico y proponer una nueva ecuación (de origen estadística) que permita determinar $Rd = f(\xi)$, donde ξ es el número de Iribarren, adimensional.

Trabajo numérico

Descripción del modelo

Actualmente existe una tendencia al uso más recurrente de modelos o herramientas numéricas que permiten coadyuvar en la solución de problemas de ingeniería. Siendo más específicos, el uso de *software* como es OpenFOAM en la ingeniería de costas resultan muy útiles. En particular, se han recurrido a módulos, los cuales se han diseñado para ejecutarse dentro de la arquitectura o composición de OpenFOAM. A continuación, se resaltan las características principales de cada una de las partes que integran el modelo numérico.

OpenFOAM® (*Open Field Operation And Manipulation*)

OpenFOAM® es un *software* de uso libre desarrollado por OpenCFD Ltd el cual está disponible para los sistemas operativos Windows®, Mac® y Linux®. Su sitio web oficial es: www.openfoam.com. También, es un software que permite la resolución de diversos problemas clasificados en los siguientes temas: dinámica de fluidos, dinámica de sólidos, fenómenos electromagnéticos y finanzas. Posee múltiples herramientas para el pre-proceso de la información, herramientas que se pueden ejecutar mientras la simulación numérica se está ejecutando, y herramientas de pos-proceso para gestionar los resultados. En esencia, OpenFOAM es una

librería de C++ empleada para crear *solvers* (Lambert, 2012).

Dentro del campo de la *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD por sus siglas en inglés), el software permite la resolución de las ecuaciones del modelo VARANS (*Volume-Average Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Sobre el modelo VARANS se puede consultar a Alcérreca-Huerta y Oumeraci (2016), Jensen et al. (2014) y Hsu et al. (2002). En Del Valle (2017) y Del Valle et al. (2018) se realizó una descripción a detalle de dicho modelo. Sobre “el procedimiento de promedio en un volumen (*volume averaging procedure*)”, que es la técnica para llegar al modelo VARANS, se pueden consultar referencias tales como Whitaker (1986a), Whitaker (1986b).

Librería *waves2Foam* y solver *wave-PorousFoam*

Jacobsen et al. (2012) desarrollaron una librería llamada *waves2Foam*, la cual es un conjunto de herramientas usadas para la generación/absorción de ondas superficiales de agua. Es un conjunto de herramientas perfectamente ideado para la resolución de problemas de ingeniería de costas. Esta librería aplica la técnica de zonas de relajación (capas activas tipo esponja) la cual permite evitar la reflexión en las fronteras de ondas provenientes del dominio computacional. La librería posee en su arquitectura diferentes teorías analíticas de oleaje: regular tipo Stokes-I, -II -V, función de flujo, c-noidal; e irregular basado en espectros de oleaje Jonswap y Pierson-Moskowitz. Además, las zonas de relajación pueden tener la forma geométrica que desee el usuario. Por defecto la librería permite que la forma geométrica de las zonas de relajación

sea rectangular, cilíndrica y semi-cilíndrica. Más información sobre este conjunto de herramientas, además de su artículo base, se puede consultar la página de internet: <https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/waves2Foam> (revisado en diciembre 2018). Actualmente, existe para su descarga gratuita un manual (Jacobsen, 2017) sobre la librería que complementa la información de la página web mencionada líneas arriba.

El solver *wavePorousFoam* fue desarrollado por Alcérreca-Huerta (2014) el cual posee la capacidad de propagar oleaje al interior de uno o varios medios porosos. Utiliza las capacidades de la librería *waves2Foam* y de OpenFOAM.

Metodología del diseño geométrico

La metodología llevada a cabo se resume de la siguiente manera:

- Definición del perfil en S y dimensionamiento de la sección transversal del DRPS-S.
- Caso de análisis. Definición de parámetros computacionales y físicos.

Definición del perfil en S y dimensionamiento de la sección transversal del DRPS-S

Para dimensionar la sección transversal del DRPS-S, en primer lugar se debe definir el perfil en S. En este trabajo el perfil real en S se aproxima mediante tres pendientes, de las cuales las pendientes de la zona baja e intermedia están bajo el nivel del agua, mientras que la pendiente de la zona alta está en su mayor parte por encima de dicho nivel medio (Figura 2).

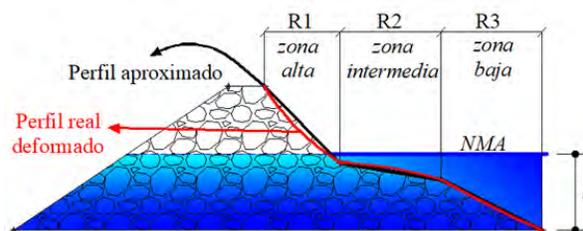


Figura 2. Definición del perfil en S. En la figura, *NMA* significa nivel medio del agua y *h* es la profundidad a pie de dique.

Una vez definido el perfil en S, el cálculo de las dimensiones de la sección transversal de un DRPS-S se ha determinado con base en la metodología de diseño geométrico propuesta por Mendoza et al. (2010), la cual se ha sintetizado en los siguientes tres puntos (ver Figura 3):

- *a*: al determinar la altura de ola de diseño (H), se establece el punto más bajo de la zona R2 la cual tendrá una profundidad igual a H medido a partir del nivel medio del agua. El cociente $R2/H$ debe estar en el intervalo $2 < R2/H < 5$. El punto más alto de R2 no debe cruzar el nivel del agua en reposo.
- *b*: desde el punto más alto de R2, se traza la pendiente de R1, y su cota máxima deberá de asegurar el no rebase del agua. El cociente $R1/H$ debe estar en el intervalo $2 < R1/H < 4$.
- *c*: finalmente, desde el punto más bajo de R2, se traza la pendiente de R3. El cociente $R3/H$ deberá estar en el intervalo $4 < R3/H < 5$.

Hay que recordar que R1, R2 y R3 son las distancias horizontales mostradas en la Figura 2.

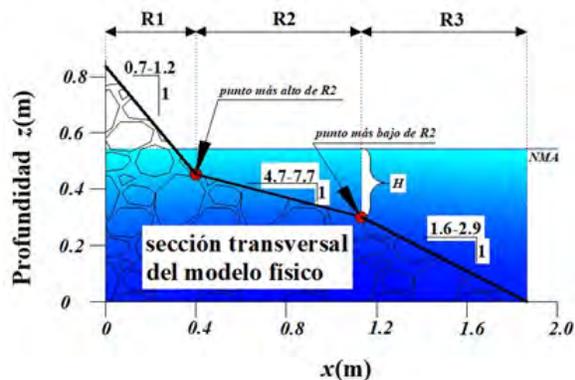


Figura 3. Diseño geométrico del perfil en S tomando en cuenta los valores de las pendientes propuestos por Mendoza et al. (2010).

El lector puede darse cuenta de que el diseño geométrico del perfil en S queda supeditado al valor únicamente de la altura de ola de diseño (H). En este sentido, se propusieron cuatro valores de altura de ola para realizar el análisis del descenso máximo (Rd): $H = 4, 5, 6$ y 7 metros. Estos valores de altura de ola se propusieron considerando que son cantidades usuales que se presentan y miden para tormenta, de ahí la razón del por qué son valores tan altos (Del Valle, 2017). Además de los valores de H , se propusieron 5 periodos de oleaje, definiendo así el tipo de oleaje usado (oleaje regular). Los valores de periodos de ola fueron: $T = 8, 9, 10, 11$ y 12 segundos. En la Figura 4 se muestran las dimensiones de las cuatro secciones transversales como resultado de proponer las cuatro alturas de ola de diseño referidas arriba. Además, para determinar las pendientes, fue necesario definir tanto la profundidad del rompeolas como la profundidad del agua tomando como referencia el NMA, como se observa en la figura mencionada.

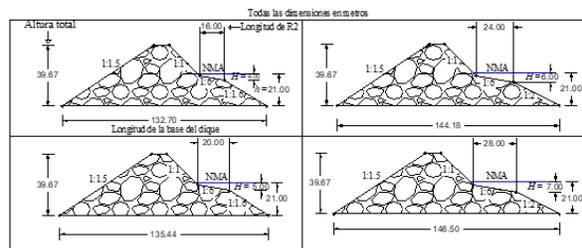


Figura 4. Dimensionamiento de las secciones transversales.

Para calcular las distancias horizontales se tomó como referencia la distancia horizontal $R2$ indicada en las cuatro secciones transversales de la Figura 4. Justo en este análisis se ha considerado como valor de referencia el cociente $R2/H = 4$. Entonces, al cambiar el valor de la altura de ola de diseño H , se va obteniendo la distancia $R2$, esto es: $R2_{H=4} = 16\text{m}$, $R2_{H=5} = 20\text{m}$, $R2_{H=6} = 24\text{m}$ y $R2_{H=7} = 28\text{m}$.

Además, considérese los siguientes dos puntos:

- El valor de la profundidad h del agua es igual a 21m para las cuatro secciones transversales.
- La altura total de los rompeolas se determinó y fijó con base en el valor más alto que alcanzó el ascenso máximo (*runup*) para el caso más desfavorable, que es cuando la altura de ola posee el valor de 7 metros.

Caso de análisis

Para facilitar la comprensión y asimilación de lo que es el descenso máximo, se presenta un caso de análisis, el cual reside en considerar al DRPS como una masa porosa en su totalidad. Las fronteras del rompeolas se consideran permeables, salvo la frontera de la base, que se fija como impermeable dentro

de OpenFOAM. En otras palabras, debe entender perfectamente que no existe ninguna rugosidad en las fronteras que delimitan el rompeolas, porque son permeables, son huecos. En OpenFOAM se designa con una palabra clave (keyword) *patch*, que en español y para fines de redacción en este trabajo se traduce como hueco. En otras palabras, son huecas las fronteras del rompeolas. Si no fuera así no hubiera ingreso de agua al medio poroso y pues no se podrían determinar muchos otros parámetros físicos. Dicho lo anterior, se ha fijado un valor de la porosidad (n) de 0.45 para las cuatro secciones transversales (Figura 5). Este valor de porosidad está en consonancia con valores de porosidad determinados tanto por trabajo experimental, así como por trabajo de campo para diques rompeolas constituidos o construidos por cubos de concreto. Un valor similar ($n = 0.47$) se reporta en Silva et al. (1998). Por lo tanto, se le aclara al lector que los resultados numéricos del descenso máximo que se presentarán más adelante serán comparables con información de campo proveniente de DRPS-S donde al menos su coraza este construida por cubos de concreto simple.

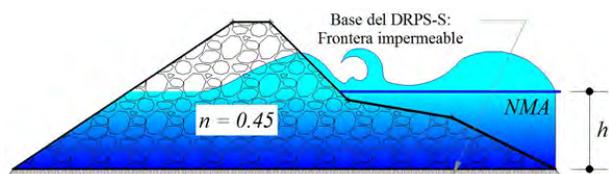


Figura 5. DRPS-S homogéneo.

Definición de parámetros computacionales y físicos.

- *Características del oleaje empleado.* La combinación de las cuatro alturas de ola con los periodos de 9, 10, 11 y 12 segundos dan un total de 16 estados de

mar. Para el caso del periodo de 8 segundos, únicamente se modeló con una altura de ola de 7 metros, dando así un total de 17 estados de mar. Finalmente, considerando los valores de las alturas, periodos y profundidad del agua a pie de dique, se determinó que la representación analítica para el oleaje más adecuada fuera un *Stokes V* (programada en la librería *waves2Foam*).

- *Longitud del dominio computacional.* La longitud óptima para este análisis fue de 350 metros (Figura 6). Las mallas computacionales fueron elaboradas utilizando el programa Gmsh® disponible en Linux. Sobre este programa se puede consultar a Geuzaine y Remacle (2014).
- *Zonas de relajación.* Se definieron dos zonas de relajación rectangulares, una a la entrada y la otra a la salida del dominio computacional (regiones achuradas de la Figura 6). La longitud de la zona de relajación a la entrada se fijó en 70 metros, mientras que la longitud de la zona de relajación a la salida se fijó en 10 metros. La razón de ello obedece a que en la entrada se generan ondas reflejadas con longitudes de onda mayores que a la salida, de ahí que sea necesario destinar una mayor longitud del dominio computacional a la zona de relajación a la entrada.
- *Pendiente equivalente.* El número de Iribarren o parámetro de surf (ξ) se calcula de la siguiente manera: $\xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H}{L}}}$, en donde α es el ángulo que forma el talud del rompeolas con la horizontal, H es la altura de ola de diseño y L es la longitud de onda, ambos parámetros en metros. Entonces, la tangente trigo-

nométrica del ángulo α es la pendiente del dique rompeolas expuesta a la acción del oleaje. Sin embargo, en los DRPS-S debe definirse algo que se conoce como pendiente equivalente, puesto que el perfil a barlovento (en dirección de donde sopla el viento) de los DRPS-S están compuestos por tres pendientes. En Del Valle y González-Vázquez (2018) así como en Del Valle (2017) se explica el procedimiento para su obtención. Aquí se hace mención a su valor, el cual fue el mismo para las cuatro secciones transversales. Dicho valor es 1:2.67 (ver Figura 7).

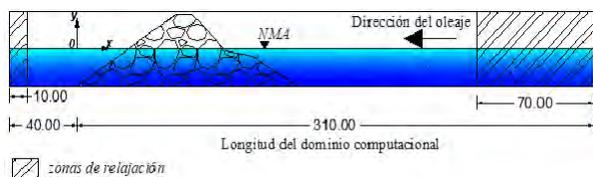


Figura 6. Longitud computacional de las zonas de relajación.

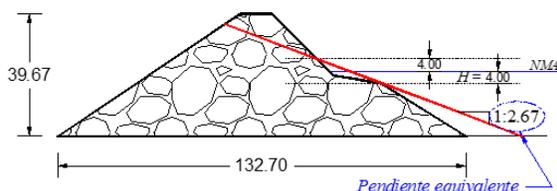


Figura 7. Pendiente equivalente en un DRPS-S.

Resultados

La evaluación del descenso máximo se obtiene de igual modo que el ascenso máximo, es decir, con la variación de la superficie libre del agua en función del tiempo. El procedimiento para determinar el descenso máximo se describe de la siguiente manera:

- Las simulaciones se hicieron sin incluir un campo de oleaje inicial. De ahí que

se pueda observar en las Figuras 8 a 12 que en los primeros segundos no haya una variación significativa de la superficie libre del agua.

- Se propuso realizar 120 segundos de simulación por caso, de los cuales los últimos 60 segundos son los que se utilizaron para obtener el Rd . Los resultados se obtuvieron cada 0.5 de segundo, de ahí que la información utilizada es a partir del segundo 60.5 y hasta los 120 segundos.
- Después de ello, se tuvo que corregir el nivel medio del agua de esta serie acotada. Para ello se consiguió el valor promedio de la serie y este fue restado a cada dato, dando así la nueva serie corregida. Este procedimiento se le conoce como corrección aritmética (Silva, 2005).

Más adelante se procedió a obtener la frontera entre los dos fluidos definidos en OpenFOAM: agua y aire. La frontera se puede determinar en cualquier punto del dominio computacional, en este caso en todo el perfil en S, pero solo las zonas R1 y R2 del perfil son las de mayor interés ya que se encuentran bajo el nivel medio del agua. Para este análisis se utilizó la versión 2.1.0 de OpenFOAM. En dicha versión, la variable alfa-1 (α_1) representa el contenido de agua y es el parámetro usado para obtener la frontera entre los fluidos agua-aire. Cuando $\alpha_1 = 0.5$ se define la frontera entre ambos fluidos, lo que determina la variación de la superficie libre del agua entre las zonas R1 y R2 del perfil en S, y con esto finalmente se obtiene el descenso máximo. En las Figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran los resultados del descenso máximo de los 17 estados de mar

analizados. Obsérvese muy bien que los valores del descenso máximo mostrados en las figuras 8 a 12 caen dentro del intervalo de tiempo de modelación 60.5 segundos a 120 segundos, tal como se indicó en el párrafos arriba. En la Figura 13 se muestran los resultados de Rd en función del número de Iribarren. En esta última, también se exhibe la ecuación que permite calcular el descenso máximo adimensional en función del número de Iribarren, esto como producto de realizar el ajuste estadístico correspondiente. Dicha ecuación permite calcular el *rundown* adimensional exclusivamente para DRPS que posean un perfil idealizado en S. En otras palabras, si se quisiera utilizar dicha ecuación para determinar este parámetro de flujo en otro tipo de dique se estaría cometiendo un error. La ecuación de ajuste estadístico mostrada en la Figura 13 es válida, por tanto, para el intervalo $1.3419 \leq \xi \leq 2.338$ del número de Iribarren y para DRPS-S.

Comparación y discusión de los resultados numéricos.

Los resultados presentados en la Figura 13 se comparan con formulaciones existentes en la literatura especializada las cuales permiten el cálculo del descenso máximo adimensional para DRPS. En este trabajo se han utilizado las ecuaciones de Ahrens (1981) y Losada y Gimenez-Curto (1981). Existe otra formulación de carácter empírico que presenta un esquema sencillo y que además cumple con la condición de que el descenso máximo dependa directamente del número de Iribarren, que es la ecuación de Brunn y Günbak (1976), no obstante en esta discusión la ecuación de Bruun y Günbak queda fuera del análisis de comparación, debido a que su comportamiento no es acorde con los resultados obtenidos en el presente traba-

jo. La Figura 14 muestra el comportamiento de las tres ecuaciones mencionadas antes. En la Tabla 1 se presentan estas ecuaciones empíricas.

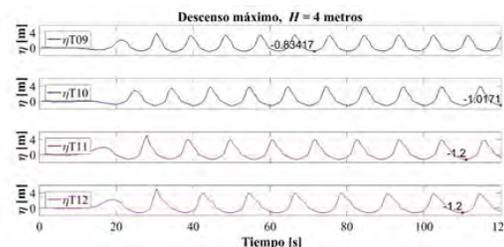


Figura 8. Variación de la superficie libre del agua (η) como función del tiempo, para los estados de mar (H, T): (4, 9), (4, 10), (4, 11), (4, 12)

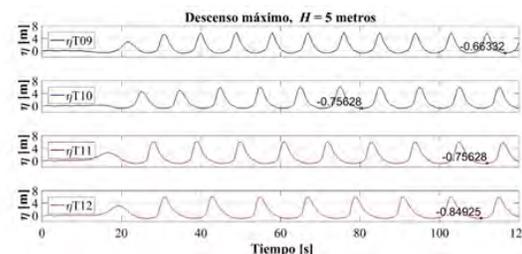


Figura 9.- Variación de la superficie libre del agua (η) como función del tiempo, para los estados de mar (H, T): (5, 9), (5, 10), (5, 11), (5, 12)

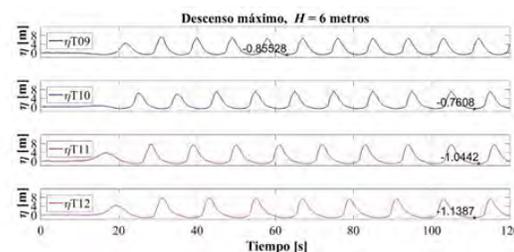


Figura 10.- Variación de la superficie libre del agua (η) como función del tiempo, para los estados de mar (H, T): (6, 9), (6, 10), (6, 11), (6, 12)

Tabla 1. Ecuaciones para evaluar el descenso máximo en DRPS.

Autores	Ecuación	
Bruun y Günbak (1976)	$\frac{Rd}{H} = \xi(1 - 0.45\xi)$	[1]
Ahrens (1981)	$\frac{Rd}{H} = -2.32exp(\frac{-2.46}{\xi})$	[2]
Losada y Gimenez-Curto (1981)	$\frac{Rd}{H} = -0.8523[1 - exp(-0.4256\xi)]$	[3]

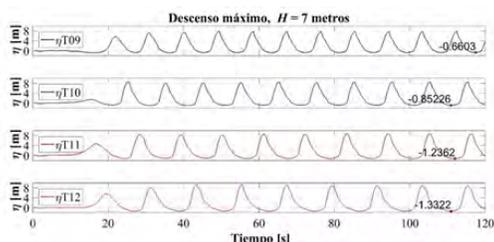


Figura 11.- Variación de la superficie libre del agua (η) como función del tiempo, para los estados de mar (H, T): (7, 9), (7, 10), (7, 11), (7, 12)

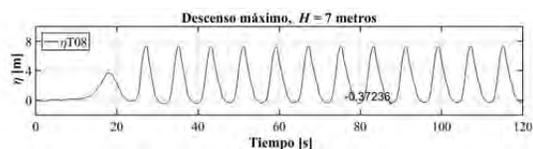


Figura 12.- Variación de la superficie libre del agua (η) como función del tiempo, para los estados de mar (H, T): (7, 8)

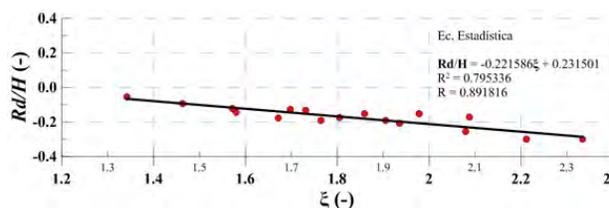


Figura 13.- Comportamiento del descenso máximo adimensional Rd/H en función del número de Iribarren ξ en los DRPS-S.

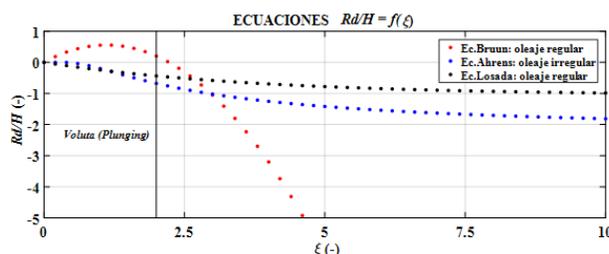


Figura 14.- Comportamiento del descenso máximo adimensional Rd/H en función del número de Iribarren ξ en los DRPS-S.

En la Figura 15 se presentan los resultados numéricos y los valores que se obtienen con las ecuaciones de Ahrens y de Losada-Gimenez Curto. Ambas fórmulas tienden a sobreestimar el valor del descenso máximo en comparación con los resultados numéricos.

Algunas razones del por qué las ecuaciones de los autores difieren de los resultados numéricos son, en primer lugar, que los DRPS aquí analizados poseen tres pendientes las cuales aproximan el perfil en S que se genera después de transcurrido cierto tiempo; en segundo lugar son pendientes finitas; y por último se ha obtenido el número de Iribarren considerando una pendiente equivalente y oleaje regular. Estas tres características se discuten y se comparan a continuación.

Para la ecuación del autor Ahrens (1981), existen diferencias con el estudio como que

su formulación es producto de analizar oleaje irregular, es para una sola pendiente y además, esta ecuación proporciona una valoración del límite inferior del descenso máximo. De ahí que al observar la Figura 15, sea esta ecuación la que sobreestime más el valor de Rd/H en comparación también con la ecuación de Losada y Gimenez-Curto.

Por otra parte, para la formulación de Losada y Gimenez-Curto (1981), la tendencia que siguen los valores del descenso máximo es similar al que se observa en la recta o función identidad, solo que desplazada un valor aproximado de 0.2 hacia la derecha de la gráfica de la Figura 15. Las razones probables de por qué esta formulación se ajusta de mejor manera con los resultados numéricos son las siguientes: como en el caso de los resultados numéricos presentados en este artículo, la formulación de Losada y Gimenez-Curto (1981) fue desarrollada usando oleaje regular, es para pendientes suaves y permeables, igual como las que se calcularon considerando los estados de mar propuestos en este análisis. La diferencia entre dicha ecuación y los resultados numéricos está en que tal fórmula es para una sola pendiente muy grande o infinita, mientras que los resultados provienen de un rompeolas con una pendiente compuesta (es decir, el perfil idealizado en S a través de las tres rectas, ver por ejemplo Figura 2) y finita (o pequeña).

En resumen, debe entenderse que las formulaciones de Ahrens y de Losada y Gimenez-Curto tienen sus restricciones. Los resultados aquí presentados son de modelos numéricos a escala natural, y si a las diferencias descritas en los párrafos anteriores se le suman los efectos de escala, hacen que surjan estas incompatibilidades entre los resultados. Sin embargo estos valores deben con-

siderarse como referencia dado que se busca ajustar las formulaciones empíricas con resultados que provengan de DRPS-S, dada la importancia de posteriores estudios de calibración.

No obstante después de esta breve discusión, el lector puede tener la certeza que tanto los resultados numéricos aquí expuestos y las dos formulaciones usadas como herramientas de comparación son buenos elementos para evaluar el descenso máximo en DRPS-S. Pero para que se tenga una certeza más de que las formulaciones cuando sean usadas estimen lo mejor posible el descenso máximo en DRPS-S, se presentan unos factores que se aplican directamente a ambas formulaciones las cuales hacen que los resultados obtenidos con éstas se aproximen a los valores esperados para esta tipología de dique. Se insiste que se está buscando ajustar estas dos formulaciones para evaluar el descenso máximo en DRPS-S. Estos factores fueron obtenidos en Del Valle (2017), aquí solo se enuncian dichos valores (Tabla 2). En este sentido, es posible recalculer los valores del Rd/H considerando estos factores, obteniéndose de esta manera un mejor ajuste de las ecuaciones de Ahrens (1981) y de Losada y Gimenez-Curto (1981). Esto se ilustra en la Figura 16 y Figura 17.

Finalmente, se presentan el error promedio y la desviación estándar que hay entre los resultados numéricos y los resultados de las dos formulaciones usadas en este análisis. Se muestran en la Tabla 3 el error promedio y su desviación estándar antes y después de aplicar los factores de ajuste indicados en la Tabla 2. De dicha tabla se puede concluir que los factores de ajuste hacen que ambas ecuaciones muestren errores promedio similares, con una dispersión de los valores de su media prácticamente igual, siempre que

Tabla 2. Ecuaciones $Rd/H = f(\xi)$ con los factores de ajuste calculados por Del Valle (2017).

Características	Autor	Ecuacion	Factores (-)
Aplicable a DRPS-S considerando pendientes rugosas y permeables	Ahrens (1981)	$\frac{Rd}{H} = -2.32exp(\frac{-2.46}{\xi})$	0.1546
	Losada y Gimenez-Curto (1981)	$\frac{Rd}{H} = -0.8523[1 - exp(-0.4256\xi)]$	0.2044

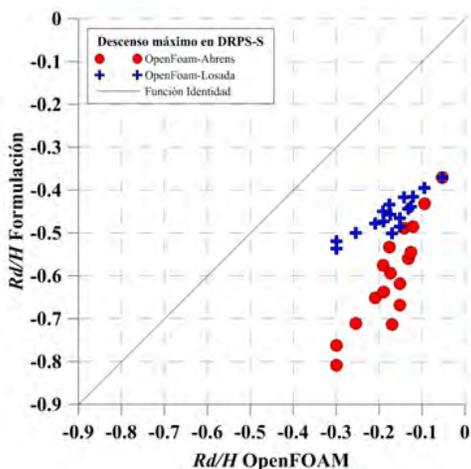


Figura 15. Comparación de los resultados numéricos con los que arrojan las formulaciones de Ahrens (1981) y Losada-Gimenez Curto (1981) mostradas en la Tabla 1.

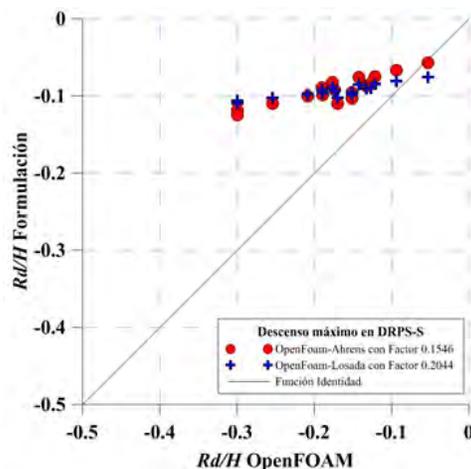


Figura 16. Comparación entre los resultados numéricos y las formulaciones de Ahrens (1981) y Losada-Gimenez Curto (1981) considerando los factores de ajuste de la Tabla 2.

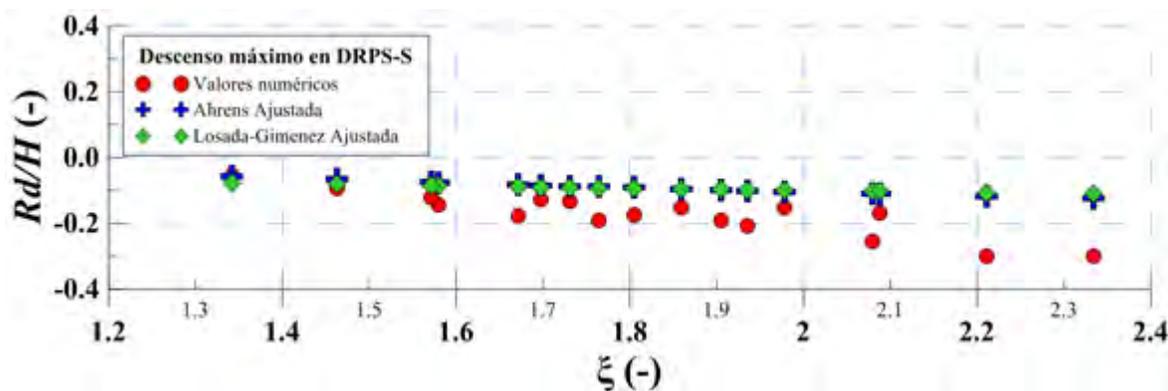


Figura 17. Comportamiento de las formulaciones de Ahrens (1981) y Losada-Gimenez Curto (1981) considerando los factores de ajuste de la Tabla 2.

se considere aplicar tales factores de ajuste a las formulaciones de Ahrens y de Losada y Gimenez-Curto. De no considerarse dichos factores de ajuste, se tendrán discrepancias bastante grandes como las mostradas en la Tabla 3.

Los resultados mostrados en la Tabla 3 pueden sugerir que el calcular el descenso máximo con alguna de las dos formulaciones llevaría a errores muy grandes cuando se llegue al diseño mecánico del dique rompeolas. Pero la valía de todo este esfuerzo es mostrar que aun cuando en el diseño de estas formulaciones no se consideraron DRPS que presentaran el perfil deformado en S, si se aplican los factores de ajuste de la Tabla 3, es posible tener una primera idea de cuál sería el valor esperado del descenso máximo en DRPS-S. Por supuesto, se propone este trabajo como punto inicial para considerar estudios posteriores con análisis experimental, el cual sustentará los resultados en los factores de corrección; por lo pronto estos resultados nos muestran que no se está tan alejada la posibilidad de la mejora. Se puede recurrir también para confirmar los resultados numéricos, a la modelación física, es decir, a realizar trabajo de laboratorio para así sustentar el trabajo numérico. Se resalta, como punto final de esta discusión, que no existe en la literatura especializada información numérica/de laboratorio/de mediciones de campo reportada del descenso máximo para este tipo de dique, es decir para DRPS-S. En general, el estudio del descenso máximo en diques rompeolas se trata poco, por lo cual debe considerarse como una oportunidad de trabajo. La finalidad de este tipo de estudios como el que se presenta aquí es de robustecer el entendimiento de estos procesos físicos que se manifiestan en los diques rompeolas.

Conclusiones

Se ha presentado una metodología para evaluar numéricamente, en DRPS-S el valor del descenso máximo adimensional utilizando el software OpenFOAM. El presente artículo complementa su par Del Valle y González-Vázquez (2018) el cual se enfocó en analizar el ascenso máximo para la misma tipología de dique.

Un primer aporte de este estudio es que se presenta una ecuación de origen estadístico (Figura 13) la cual permite evaluar el descenso máximo para los DRPS-S en función únicamente del número de Iribarren, dejando en claro que dicha ecuación se deberá de considerar válida para los intervalos del número de Iribarren que se ha mencionado antes, o que se puede visualizar perfectamente en la Figura 13. Fuera de ese intervalo dicha ecuación no es válida para su aplicación.

El segundo aporte de este artículo es que dentro de la comparativa entre los resultados numéricos obtenidos con OpenFOAM para DRPS-S y los resultados que arrojan las ecuaciones de Ahrens (1981) y de Losada y Gimenez-Curto (1981) ha tenido la finalidad de proporcionarle al lector más herramientas que le permitan calcular esta variable física presente en los DRPS-S. Aquí se reitera que se pueden aplicar estas dos ecuaciones tomando en cuenta los factores de ajuste presentados en la Tabla 2. En realidad, al aplicar estos factores directamente en las dos ecuaciones analizadas, se obtienen nuevas ecuaciones que permitirían calcular el descenso máximo de DRPS-S. Para que estos factores se refuercen o tengan una validez mayor, se tendría que realizar más trabajo numérico y confirmarlo con trabajo experimental. Pero con lo que se presenta en este artículo el lector podría usar estos

Tabla 3. Parámetros estadísticos al analizar las diferencias entre los resultados numéricos y los valores calculados con las formulaciones de Ahrens (1981) y Losada y Gimenez-Curto (1981)

	Sin factores de ajuste		Con factores de ajuste	
	Ahrens	Losada	Ahrens	Losada
Error promedio (%)	277.40	201.62	42.57	43.35
Desviación estándar (%)	105.25	121.11	13.51	13.37

factores para así tener una primera idea de cuál sería el valor esperado o posible del descenso máximo en DRPS-S, de ahí su valía e importancia de los resultados mostrados en la Tabla 2. Particularmente se hace énfasis en el uso de factores de ajuste previamente calculados en el estudio integral hecho por Del Valle (2017) en torno a esta tipología de dique, llegando a presentar los errores promedios acompañados de sus desviaciones estándar de las formulaciones de Ahrens (1981) y Losada y Gimenez-Curto (1981).

Agradecimientos

El primer autor desea extender un especial agradecimiento al Dr. Juan Carlos Alcérreca Huerta (Cátedra Conacyt-Ecosur Chetumal Q. Roo) por sus valiosos consejos para dominar el uso del software OpenFOAM, y también por permitir el uso de su solver *wavePorousFoam*.

El segundo autor extiende un agradecimiento especial al proyecto SEP.SES.DG.

Referencias

Ahrens, J.P. (1981). *Irregular Wave Runup on Smooth Slopes*. Coastal Engineering Technical Aid. No. 81-17. U.S. Army, Corps of Engineers: CERC, pp. 1-31.

Alcérreca-Huerta, J.C. (2014). *Process-based modelling of waves interacting with*

porous bonded revetments and their sand foundation. Technischen Universität Carolowilhelmina zu Braunschweig. Ph.D-thesis. pp. 202.

Alcérreca-Huerta, J.C. y Oumeraci, H. (2016). “Wave-induced pressures in porous bonded revetments. Part I: Pressures on the revetment”. *Coastal Engineering* 110, 87 – 101.

Bruun, P. y Günbak, A.R., (1976). “New Design Principles for Rubble Mound Structures”. *Coastal Engineering*, 2429-2473.

Del Valle, J. (2017). *Criterios para el diseño geométrico y mecánico de diques con sección en S. Evaluación de modos de falla*. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ph.D-thesis, pp. 181.

Del Valle, J., Mendoza, E., Alcérreca-Huerta, J.C., y Silva, R. (2018). “Evaluación del coeficiente de reflexión en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S”. *Tecnología y Ciencias del Agua*. (Aceptado 20/03/2018. En proceso de publicación)

Del Valle, J., y González-Vázquez, J.A. (2018). “Evaluación del ascenso máximo en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S”. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Buenos Aires,

Argentina. Septiembre, pp. 12.

Geuzaine, C. y Remacle, J.-F. (2014). *Gmsh Reference Manual*, pp. 257.

Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*, Singapore.

Hall, K. R. y Foster, D. N. (1990). “Internal and external pressure measurements in reshaped breakwaters”. *Coastal Engineering* 14, 215-232.

Hsu, T.-J. Sakakiyama, T. y 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. y Fredsøe, F.J. (2012). “A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®”. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 70, pp. 1073-1088.

Jacobsen, N.G. (2017). *Waves2Foam Manual, version 0.9. DRAFT* Deltares. The Netherlands, pp. 75.

Jensen, B. Jacobsen, N.G. y Christensen, E.D. (2014). “Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures”. *Coastal Engineering*, 84, pp. 56-72.

Losada, M.A. y 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. y Losada, M.A. (2010). “Evolución del comportamiento hidráulico y de la geometría de diques homogéneos al ser defor-

mados por el oleaje”. *Tecnología y Ciencias del Agua* 1, 21-35.

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje, SD/49*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, pp. 179.

Silva, R., Govaere, G., y Martin, F. (1998). “A statistical tool for breakwater design”. *Proceedings of the Conference American Society of Civil Engineers*. Copenhagen, Denmark.

Whitaker, S. (1986a). “Flow in porous media I: a theoretical derivation of Darcy’s law”. *Transport in porous Media* 1, 3-25.

Whitaker, S. (1986b). “Flow in Porous Media II: the governing equations for immiscible, two-phase flow”. *Transport in porous Media* 1, 105-125.