

## **Rompeolas flotantes: revisión histórica y académica** ***Floating Breakwaters: historical and academic review***

Fecha de recepción: 2012-02-08 / Fecha de aceptación: 2012-08-15

**Alejandro Rueda** <sup>1</sup> y **Serguei Lonin** <sup>2</sup>

<sup>1</sup> **Departamento de Física**, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 - Las Palmas de Gran Canaria, España. Correo electrónico: alejandro\_rueda76@yahoo.com.

<sup>2</sup> **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)**, Barrio Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia. Correo electrónico: slonin@costa.net.co.

**Rueda, A. y Lonin, S. 2012.** Rompeolas flotantes: revisión histórica y académica. Bol. Cient. CIOH (30): 43-52.

### **RESUMEN**

En el presente documento se define el concepto de un rompeolas flotante, sus principales características, con una amplia reseña histórica, el desarrollo analítico de obras desde la perspectiva de su eficiencia en los problemas de Ingeniería Costera. Se hace énfasis en la posibilidad de aplicación de estas estructuras con el propósito de defensa costera, entre otros fines, tales como la generación de áreas de alivio para las operaciones navales y desembarque en los muelles costeros.

**Palabras clave:** rompeolas flotantes, atenuación de oleaje, obras de protección costera.

### **ABSTRACT**

The present paper defines a floating breakwater; its principal characteristics, a wide historical review, and an analytical development of structures, from the point of view of their efficiency in the coastal engineering, are provided. An emphasis is made in the possibility to apply those structures in coastal protection problems, among other uses, like for the generation of alleviated areas for naval operations and disembark on nautical wharfs.

**Key words:** floating breakwaters; wave attenuation; coastal protection structures.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad cada vez es más común en los proyectos de Ingeniería Costera el contemplar obras que generen un menor impacto a nivel ambiental, a la vez que presenten alternativas económicas y de diseño. Lo anterior ha generado la investigación y desarrollo de rompeolas flotantes (ROF) como una solución efectiva, ambientalmente viable y a menor coste que los métodos tradicionales, para la solución de problemas oceanográficos relacionados con la protección y abrigo de determinadas áreas sobre el impacto de oleaje de régimen y/o extremal.

## METODOLOGÍA

### Rompeolas flotantes (ROF)

Con el propósito de generar un mayor nivel de conocimiento y divulgación, en el texto se abordará en la sección segunda el funcionamiento hidrodinámico de los ROF en general, seguido de su evolución cronológica y académica, con el objeto de comprender como cada época y tendencia científica ha influido en su desarrollo actual. En la tercera parte se enunciarán de manera breve las características de las principales estructuras construidas y publicadas en revistas científicas. Finalmente, se especificarán algunas de sus ventajas, desventajas y las conclusiones de la presente revisión.

Una de las definiciones más específicas sobre lo que es un ROF se encuentra en el Technical Report No. 81-1 desarrollado por [1] para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (COE): "Es una estructura cuyo propósito es el de proteger la línea de costa, un puerto o cualquier facilidad portuaria de la acción directa del oleaje; y que aunque se encuentra sujeta firmemente al fondo su principal característica es que se mantiene flotando sin interrumpir completamente el flujo de agua bajo ella".

En general los ROF son estructuras que buscan atenuar el oleaje incidente a partir de la oposición de su geometría (forma, dimensiones y materiales de construcción) para generar una reducción del oleaje transmitido, en función de la reflexión, difracción, atenuación, interferencia y transmisión de su energía en movimiento oscilatorio. Su eficiencia se

determina comúnmente a partir de la relación entre la altura del oleaje incidente ( $H_i$ ) y la del oleaje transmitido ( $H_t$ ), lo que se conoce como Coeficiente de Transmisión ( $K_t$ ):

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

Para la comprensión del funcionamiento de un ROF se suele dividir su área de acción en tres partes: una antes de la estructura, una justo debajo y otra después, como se observa en la Figura 1. Para el caso de estudio se asume una forma simple (rectangular, tipo caja) para describir los componentes que actúan, donde,

$H_i$  y  $H_t$ , son las alturas de ola incidente y transmitidas, respectivamente.

$\lambda$ , es la longitud de onda.

$Z_r$ , es la altura del ROF

$D$ , es el calado.

$W$ , es el ancho.

$h$ , es la profundidad.

Por su condición de estructura flotante, los ROF están sometidos a las mismas consideraciones de una embarcación fondeada, por lo que en mayor o menor medida su eficiencia ya no solo depende de su geometría, sino también de las características de sus líneas de fondeo o anclaje, que la convierte en una estructura flotante semirígida, con hasta seis grados de libertad en su movimiento -balanceo (*roll*), cabeceo (*pitch*), rolido o guiñada (*yaw*), avance-retroceso (*surge*), desviación lateral (*sway*) y elevación-descenso (*heave*)- (Figura 2).

### Evolución histórica

El empleo de los ROF como obras de protección costera se remonta a 1811, cuando se instaló una estructura flotante para proteger la bahía de Plymouth (Massachusetts). En esa ocasión se empleó un rompeolas flotante con esqueletos o armazones de madera de 9 m de ancho y 6 m de altura, asegurado al fondo con anclas. Los materiales empleados eran hierro y madera, lo cual hacía que su tiempo de servicio fuese muy corto debido a la acción de la broma (gusano marino, equivalente al gorgojo) y a la corrosión sobre el hierro.

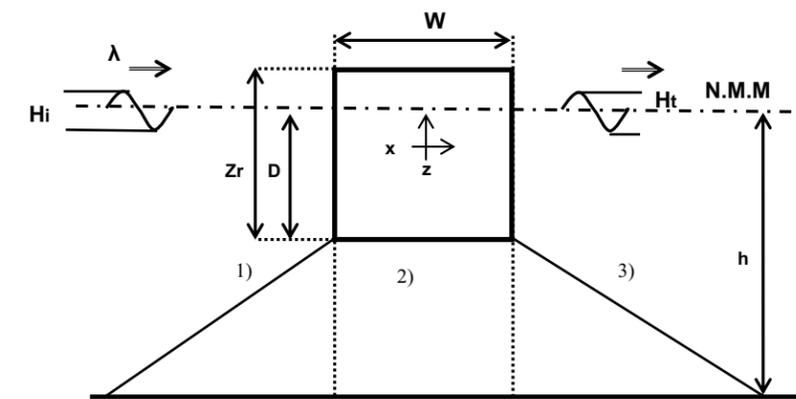


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un ROF.

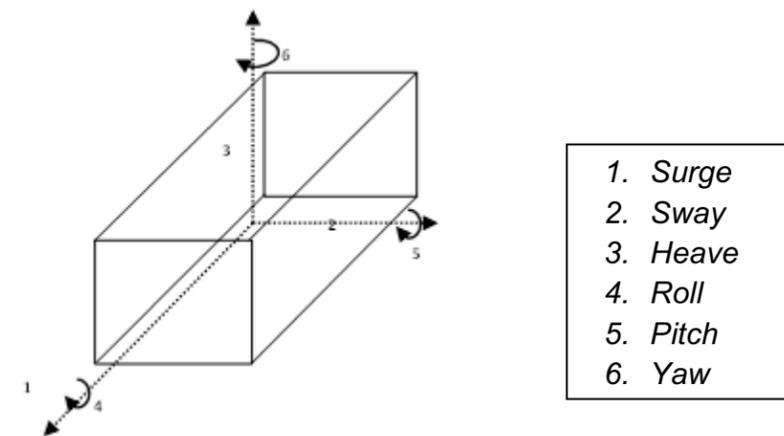


Figura 2. Grados de libertad de un cuerpo.

Existen registros que documentan por lo menos tres intentos de emplear este método de abrigo en las bahías de Plymouth y Brighton entre 1811 y 1844. Las formas empleadas eran muy diversas, pero todas tenían en común el empleo de marcos de hierro para contener cajones de

madera e incluso tubos de hierro dentro de cajas de madera (figuras 3 y 4), con lo que el resultado final no era distinto al de sus predecesores, [2].

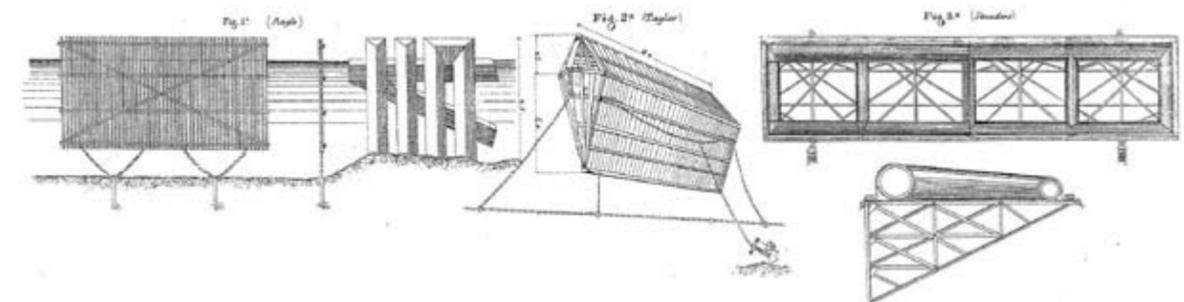
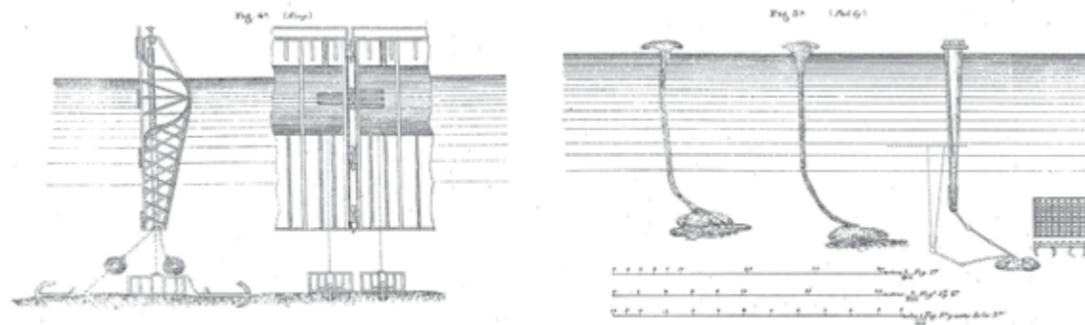


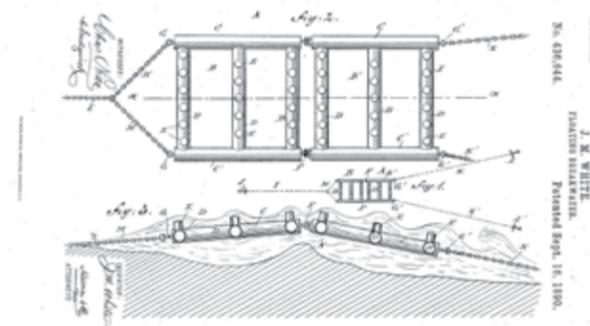
Figura 3. Primeros modelos de rompeolas flotantes.



**Figura 4.** Primeros anclajes para rompeolas flotantes.

El primer registro de su intención de empleo comercial se remonta a la Oficina de Patentes del Gobierno de los Estados Unidos, en donde reposa bajo la patente No. 436.644 del 16 de septiembre de 1890, la idea presentada por John

M. White, cuyo objeto era "la construcción de una estructura simple y durable para la protección de costas bajo el efecto de oleaje fuerte, fabricada solo con tubos de metal y sin el empleo de madera" (Figura 5).



**Figura 5.** Primera patente para la explotación comercial.

Pero sólo fue hasta la Segunda Guerra Mundial (II GM) cuando su uso se diversificó e inició su optimización real a partir de los modelos "Phoenix" y "Bombardón" (Figura 6), desarrollados por los aliados para el 'Desembarco de Normandía' y empleados como barreras de protección costera; aunque con muy malos resultados, ya que al

tener unas dimensiones (largo: 200 pies, ancho: 25 pies, altura: 25 pies) diseñadas para contener oleaje de una altura (H) de 10 pies y una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 150 pies, zozobraron al intentar proteger a la flota de una tormenta con oleaje de 15 pies de altura y 300 pies de longitud de onda.



**Figura 6.** Empleo en la II GM de los modelos Fénix y Bombardón.

El principal constructor de rompeolas flotantes durante el siglo XX fue el COE, el cual los lleva empleando desde finales de la II GM. Su empleo inicial se limitó a actividades netas de desembarco de tropa, tales como puentes flotantes, abrigo para las embarcaciones de apoyo logístico y como barreras de contención en las maniobras de trasiego de combustible en mar abierto.

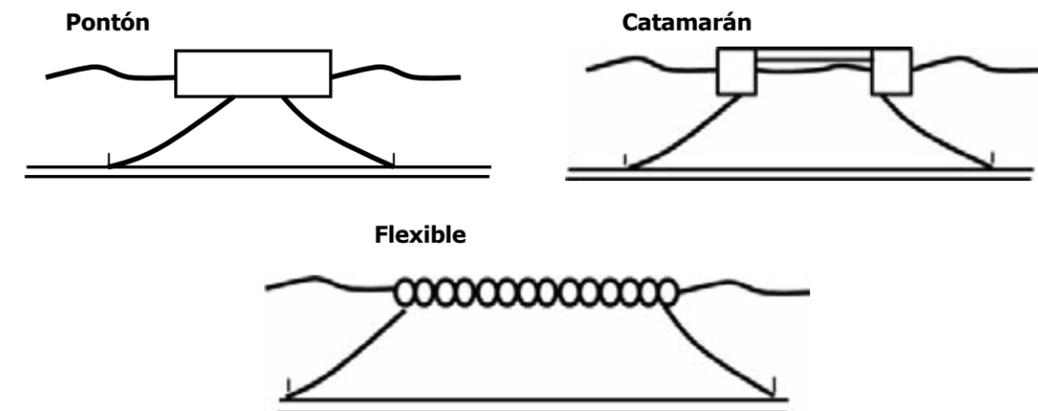
Pero a partir de finales de los años 50, con la creación del *U.S. Navy Civil Engineering Laboratory* (NCEL), el COE empezó a profundizar en el estudio de los diferentes parámetros y características de los ROF, llegando Jones [3], Richey y Nece [4] a clasificar hasta 60 diferentes tipos de ROF estudiados. Ya en 1980 el COE se había decantado por clasificar este tipo de estructuras en once categorías:

- i. Con pontones flotantes (simples, dobles y de formas rectangulares)
- ii. Con inclinación frontal (con ángulo respecto al fondo)
- iii. De cadenas de llantas (todas las combinaciones de formas y uniones)
- iv. Con pivote vertical central (tipo A-Frame)
- v. Conformados por cubos flotantes (tipo sembradío)
- vi. Con paredes porosas

- vii. Con mecanismos hidráulicos o neumáticos
- viii. De membranas flotantes (bolsas de aire-tuberías)
- ix. Con accesorios generadores de turbulencia (entramados laterales o frontales)
- x. Con generador de oleaje (refracción artificial)
- xi. Sistemas de almacenamiento flotante (VLS)

El empleo de los ROF de manera eficiente y efectiva se inicia con el uso de hormigón marino y de los nuevos polímeros plásticos de baja densidad y alta resistencia, que podían mantener a flote la estructura y que resistieran el impacto del oleaje.

Las primeras estructuras empleadas, como se observa en la Figura 7, eran pontones individuales, evolucionando al uso de estructuras dobles, del tipo catamarán, las cuales eran remolcadas desde un lugar a otro para su uso y re-empleo. A la par, con la evolución a estructuras más livianas y con polímeros para su flotación se implementaron estructuras flexibles o "pipelines", formados por una serie de tuberías recubiertas con caucho, las cuales pueden ser desensambladas y transportadas a bordo de buques de apoyo logístico, [3].



**Figura 7.** Tipos más comunes de estructuras de rompeolas flotantes.

Hoy en día existen empresas que por Internet promocionan diques y rompeolas flotantes de alta calidad, fabricados en hormigón, cuyo

interior está formado por bloques de poliestireno expandido de muy baja densidad.

**Evolución teórica**

La evolución teórica y académica de los ROF inicia posterior a la II GM, dada la posibilidad de comparar la eficiencia de las estructuras empleadas en el 'Desembarco de Normandía', [5], con modelos físicos de diferentes formas, tamaños y materiales de construcción.

A partir de los modelos empleados en la II GM algunos autores como Brebner [6] y Wehausen [7] profundizaron sobre la descripción y explicación matemática de las ecuaciones de gobierno para un cuerpo flotante con mayor o menor libertad de movimiento, principalmente empleando las ecuaciones de Navier y Stokes, y demostrando la conservación de la masa, del momento y de la conservación de la energía, a partir de su transmisión dividida en reflejada, disipada y transmitida; pero no incluyen el efecto que genera las variaciones geométricas en su comportamiento hidrodinámico, como si lo hace Stiassnie [8], éste incluye el estudio del efecto que presenta el oleaje en una estructura de forma simple contemplando la masa, el calado y las características de la tensión de las líneas de fondeo.

A la par con la definición del comportamiento hidrodinámico, se destaca el esfuerzo por caracterizar y agrupar las diferentes formas de estructuras diseñadas, bien en modelos físicos o bien en obras ya construidas; de donde se destacan el *Coastal Engineering Manual* [9] desarrollado por el COE y que sus diferentes versiones presentan una completa caracterización de las principales obras de protección costera, entre ellas los ROF; los estados del arte presentados por Hales [1] e Isaacson [10], los que ayudan a establecer las categorías de clasificación de los ROF y algunas de sus aplicaciones reales, pero no profundizan demasiado entre la comparación de eficiencias entre las diferentes formas, tamaños, materiales y condiciones oceanográficas, como si lo hacen Volker [11], Bruce [12] o Peña [13], quienes no solo presentan las características de las obras estudiadas, sino que las coparan tanto en función de sus coeficientes de transmisión  $K_t$ , reflexión  $K_r$  y disipación, como de la relación costo-beneficio al emplear llantas o modelos en hormigón marino.

La conexión que une la teoría con la práctica se termina de establecer con la implementación conjunta de modelos físicos y modelos numéricos.

El permanente desarrollo de las técnicas y herramientas computacionales, así como de la

tecnología empleada en los sensores de medición ha permitido realizar simulaciones cada vez más reales.

Los modelos físicos fueron la principal herramienta de simulación hasta los años 80, su metodología avanzó de simples simulaciones en canales de oleaje, [6] y [14], a la validación de modelos experimentales en 2D con resultados de mediciones en campo sobre obras ya construidas, como muestran Adde [15] y Yamamoto [16], quien avanza en la caracterización del efecto de las líneas de fondeo ante oleaje regular e irregular; o Bruce [12], que adicionalmente compara la eficiencia y costo de diferentes tipos de ROF experimentales y de obras ya construidas. La implementación de sensores de mayor precisión optimizó la forma de evaluar los parámetros de estudio, alcanzando mediciones de más de 1200 ondas en continuo, [17], o el empleo de sensores láser para llevar la precisión en la medición de turbulencia, presencia de vórtices, medición de los efectos de difracción y reflexión a un nivel más eficiente, [18].

Con el avance computacional de finales de los años 90 diferentes autores iniciaron la modelación numérica de los ROF, inicialmente en condiciones de oleaje lineal, posteriormente contemplando oleaje oblicuo, generalmente en 2D. Se destacan los esfuerzos de algunos autores por emplear los Métodos de Elementos Finitos (FEM) para reproducir la difracción y la reflexión, [19] [10], combinando adicionalmente la Función de Green para ver el comportamiento del oleaje ante diferentes tipos de estructuras, [20] [21]. Con el fortalecimiento de la comprensión que generó el 2D, otros autores desarrollaron modelos en 3D que permite apreciar adicionalmente la deformación a la que puede someterse una estructura ante oleaje oblicuo, o el efecto que tiene en la eficiencia el contemplar los seis grados de libertad, [22] [23] [24].

Adicional al empleo de los métodos más conocidos como lo son FEM, Diferencias Finitas o Volumen de Fluido se destaca el empleo del método de *Smoothed Particle Hydrodynamic* (SPH), el cual pasó de ser empleado en Astrofísica y Cosmología, [25], a reproducir el comportamiento de la dinámica de fluidos con diversas aplicaciones, [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32]; mejorando la representación de las superficies libres durante el proceso de modelado numérico, [33] [34] [35]; y de la interacción entre fluido y estructura, [36], quien aplica esta técnica validando su empleo para condiciones reales.

**Descripción de las principales obras construidas**

Aunque el número de ROF construidos e instalados en el mundo es cada vez más amplio, su divulgación documentada no es tan extensa, por lo que la relación que se presenta en la Tabla

I se limita a algunas de las obras con referencias disponibles en revistas indexadas y manuales técnicos publicados de libre consulta.

**Tabla I.** Listado de los principales rompeolas flotantes construidos.

Ubicación	Año de construcción	Tipo	Dimensiones (m)				Oleaje		Referencia
			Largo	ancho	altura	calado	Hi(m)	T(s)	
Lund, Columbia Británica	1966	Pontón	109,7	7,62	5,486	5,486	1,37	2,8	Bruce [12]
Tenekee, Alaska	1972	Pontón	91,44	6,401	1,524	1,128	0,91	4	Bruce [12]
Sitka, Alaska	1973	Pontón	292,6	6,401	1,524	1,067	1,22	3,5	Hales [1]
Pto. Orchard, Washington	1974	Caja	472,4	3,658	0,914	0,549	0,61	2,5	Bruce [12]
Bahía Friday, Washington	1978	Caja	118,9	4,572	1,372	1,067	0,91	3,5	Bruce [12]
Ketchikan, Alaska	1980	Pontón	640,1	6,401	1,829	1,433	0,98	3,5	Bruce [12]
Pto. Drayton, Washington	1981	Pontón	1067	4,572	1,372	0,914	0,61	2,5	Richey [4]
Bahía Olympia, Washington	1983	Caja	213,4	4,877	1,676	1,067	0,61	2,8	Bruce [12]
Pto. Brownsville, Washington	1999	Pontón	290	4,26	2,1	1,7	0,76	3,1	Allyn [37]
Neos Marmaras, Grecia	1999	Pontón	200	4	1,5	*	3	*	Loukogeorgaki [24]
Lago Polifito, Grecia	2003	Pontón	224	2,5	1	*	*	*	Loukogeorgaki [24]
Pto. Pirgadihia, Grecia	2004	Pontón	180	4	1,5	*	2	*	Loukogeorgaki [24]

\*Datos no disponibles

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Ventajas y desventajas**

\* Aunque inicialmente el principal empleo de este método de Ingeniería estaba destinado en a proteger exclusivamente pequeñas marinas deportivas, gracias al desarrollo de sus formas y de los materiales de construcción empleados su uso se ha extendido a:

- i. Defensa de la costa
- ii. Abrigo de embarcaciones
- iii. Producción de energías limpias
- iv. Acuicultura
- v. Recreo-turismo: generación de zonas de surf, PIANC [38].

\* En general, el empleo de ROF permite su uso en una variada cantidad de condiciones oceanográficas y geográficas, siendo sus principales ventajas:

i. Pueden ser empleados en cualquier tipo de fondo, incluso en condiciones de suelos poco consolidados, [39].

ii. Pueden ser empleados en aguas intermedias y profundas, a un costo menor que los rompeolas tradicionales.

iii. Por su condición de flotante, pueden ser fácilmente transportados e instalados en su área de empleo, así como reubicados o removidos.

iv. Permiten el flujo debajo de su estructura, afectando en menor medida los procesos de corrientes y transporte de sedimentos.

v. Presenta un menor impacto visual y paisajístico frente a las estructuras tradicionales, [40] [41].

\* Como toda estructura de protección costera presenta una serie de limitaciones que deben ser adecuadamente valoradas para determinar su rango de seguridad y eficiencia, entre las más importantes se encuentran:

i. Su eficiencia actual está ligada a periodos de oleaje que no superen los 8 segundos, [36] [42] [43] [44] [45].

ii. Es muy sensible a los cambios de profundidad, así como a las variaciones en la dirección del oleaje incidente, [46], [47].

iii. Tanto las líneas de fondeo como los elementos móviles pueden fallar ante la ocurrencia de temporales que superen las características del diseño, [48], [49], [50].

## CONCLUSIONES

\* La ventaja de menor afectación a la morfodinámica de la costa hace de los ROF una alternativa eficaz para resolver problemas de embarque/desembarque, protección costera y generación de áreas de alivio para operaciones marinas especiales.

\* La eficiencia de los ROF se mide por su capacidad de atenuación de la energía del oleaje y depende en gran medida de sus dimensiones (ancho de la obra y su calado). El ancho debe ser comparable (en orden de magnitud) con la longitud de ola, mientras que el calado con la relación entre la profundidad y el radio de movimientos orbitales de las olas. Por lo anterior, el diseño de cada estructura debe ser específico, correspondiendo a las condiciones de oleaje, morfología y morfodinámica costera de cada sitio en particular.

\* El interés que genera la posibilidad de empleo de ROF ha permitido que se desarrollen aplicaciones para los principales modelos numéricos y su eficiencia es cada vez más sencilla de validar, debido al creciente número de experimentos en tanques de prueba que ofrecen información científica sobre su desempeño ante diversas condiciones oceanográficas, geográficas y de diseño; facilitando el proceso de decisión y selección para futuras aplicaciones.

\* Teniendo en cuenta que, específicamente hablando, sobre las condiciones del Mar Caribe, la ola del régimen usualmente es la ola corta generada por mar de viento; bajo estas condiciones (sin importancia de olas de mar de fondo) los ROF pueden, hacia el futuro, reemplazar las obras tradicionales de protección costera.

## LITERATURA CITADA

- [1] Hales, Z.L. *Floating Breakwaters: State of the Art, U.S Army Corps of Engineers. Technical Report No 81-1 Cap. 1. pp. 23-45, 1981.*
- [2] De la Sala, P. *Revista de Obras Públicas. Rompeolas Flotantes. Vol. 14; pp. 165-167 and Vol.15, pp.178-181. 1873.*
- [3] Jones, D. *Transportable Breakwaters—A Survey of Concepts, Technical Report R-727, U.S. Navy Civil Engineering Laboratory, 1971.*
- [4] Richey, E.P. & Nece, R.E. "Floating Breakwaters: State-of-the-Art," *Proceedings of the Floating Breakwaters Conference, University of Rhode Island, Kingston, R.I., pp. 1-20. (1974).*
- [5] Carr, J. H. *Mobile Breakwater Studies: Hydrodynamics. Laboratory Report No. N-64.2, California Institute of Technology, 1950.*
- [6] Brebner, A. & Ofuya, A. *Floating Breakwaters, Proceeding of 11<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering, London, 1968, ASCE, 2, pp. 1055-1094, 1969.*
- [7] Wehausen, J. *Motion of Floating Bodies. Annual Review Of Fluid Mechanics, 3, pp. 237, 1971.*
- [8] Stiassnie, M. *A simple mathematical model of a floating breakwater, Applied Ocean Research, 2 (3), pp. 107-111, 1980.*
- [9] United State. *U.S Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual. EM 1110-2-1100, 3, pp. 1-36. 2002.*
- [10] Isaacson, M. & Sinha, S. *Directional Wave effects on Large Offshore Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 112 (4), pp. 482-497, 1986.*
- [11] Volker, W. *reakwater Performance Comparison. Coastal Engineering Proceedings, 17, pp. 2137-2158. 1980.*
- [12] Bruce, L. *Floating Breakwater Design, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. 111, pp. 304-318, 1985.*
- [13] Peña, E., Ferreras, J. and Sánchez-Tembleque, F. *Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters. Ocean Engineering, 38, pp.1150-1160, 2011.*
- [14] Torum, A., Stansberg, C.T., Otterá, G.O., Sláttelid, O.H. *Model tests on the CERC full scales test floating breakwater, final report, AD-A204 145. United States Army. 1987.*
- [15] Adee, B. *Floating Breakwater Performance. Coastal Engineering, 15, pp.2777-2791, 1976.*
- [16] Yamamoto, T. *Moored Floating Breakwater response to regular and Irregular Waves. Applied Ocean Research, 3, pp. 85-92, 1981.*
- [17] Murali, K., Amer, S.S. & Mani, J.S. *Dynamics of cage floating breakwater. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Transactions of the ASME, 127(4), pp. 331-339, 1997.*
- [18] Yoon, J. & Cho, S., *Experimental Research on Effective Floating Breakwaters. Journal of Coastal Research, Special Issue 64, pp. 631 - 635, 2011.*
- [19] Isaacson, M. & Nwogu, O.U. *Wave Loads and Motions of Long Structures in Directional Seas. Journal of Offshore Mechanics and arctic Engineering, 109, pp. 126-132, 1987.*
- [20] Sannasiraj, S.A., Sundar, V., Sundaravadivelu, R. *Mooring Forces and Motion Responses of Pontoon-Type Floating breakwaters. Ocean Engineering, 25(1), pp. 27-48, 1998.*
- [21] Sannasiraj, S.A., Sundaravadivelu, R., Sundar, V. *Diffraction-radiation of Multiple Floating Structures in Directional Waves. Ocean Engineering, 28(2), pp. 201-234, 2000.*
- [22] Koutandos, E., Karambas, Th., Koutitas, C., Prinos, P. *Floating Breakwaters Efficiency in Intermediate and Shallow Waters. Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Hydro-Science and Engineering, Portland, pp. 1-10, 2002.*
- [23] Koutandos, E., Prinos, P., Gironella, X. *Floating Breakwaters under Regular and Irregular Wave Forcing: Reflection and Transmission Characteristics. Journal of Hydraulic Research, 43(2), pp. 174-188, 2005.*
- [24] Loukogeorgaki, E., Michailides, C. & Angelides, C. *Hydroelastic Analysis of a Flexible Mat-Shaped Floating Breakwater under Oblique wave Action. Journal of Fluids and structures. 31, pp. 103-124, 2012.*
- [25] Gingold, R. & Monaghan, J. *Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars. Mon Not R Astr Soc, 181, pp. 375-389, 1977.*
- [26] Monaghan, J. *Smoothed Particle Hydrodynamics. Annual Rev Astron. Appl., 30, pp. 543-574, 1992.*
- [27] Monaghan, J. *Simulating free Surface Flows with SPH. Journal Computational Physics, 110, pp. 399-406, 1994.*
- [28] Gómez-Gesteira, M. & Dalrymple, R.A. *Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure, Journal of. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130(2), pp. 63-69, 2004.*
- [29] Gómez-Gesteira, M., Cerqueiro, D., Crespo, A. & Dalrymple, R. *Green water overtopping analyzed with a SPH model. Ocean Engineering, 32, pp. 223-238, 2005.*
- [30] Dalrymple, R.A. & Rogers, B. *Numerical modeling of water waves with the SPH method. Coastal Engineering, 53, pp. 141-147, 2006.*
- [31] Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M. & Dalrymple, R.A. *3D SPH simulation of large waves mitigation with a dike. Journal of Hydraulic Research, 45(5), pp. 631- 642, 2007a.*
- [32] Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M. & Dalrymple, R.A. *Modeling Dam Break Behavior over a Wet Bed by a SPH Technique. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 134(6), pp. 313-320, 2008.*
- [33] Lo, E. & Shao, S. *Simulations of Near-Shore solitary Wave Mechanics by an incompressible SPH Method. Applied Ocean research, 24, pp. 275-286, 2004.*

- [34] Shao, S. SPH simulation of a solitary wave interaction with a curtain-type breakwater. *Journal of Hydraulic research*, 43 (4), pp. 366-375, 2005.
- [35] Najafi, A. & Mazyak, A. Numerical Investigation of Floating Breakwater Movement using SPH Method. *Inter J Nav Oc Engng*, 3, pp. 122-125, 2011.
- [36] Rueda, A., Crespo, A. & Rodríguez, G. Evaluation of wave energy transmission through a floating breakwater using a SPH method. *Fluid Structure Interaction VII*, pp.13-24, 2013.
- [37] Allyn, N., Watchorn, E., Jamieson, W. & Yang, G. Port of Brownsville Floating Breakwater. *Proc. Ports Conference*, 2001.
- Wang, H., and Sun, Z., Experimental Study of a Porous Floating Breakwater. *Ocean Engineering*, 37, pp. 520-527, 2010.
- [38] Permanent International Association of navigation Congress-PIANC. *Floating Breakwaters: A Practical Guide for Design and Construction. Report of working group No 13 of the permanent technical committee II*, 1994.
- [39] Wang, H. & Sun, Z. Experimental Study of a Porous Floating Breakwater. *Ocean Engineering*, 37, pp. 520-527, 2010.
- [40] Fousert, M. *Floating Breakwater: Theoretical Study of a Dynamic wave Attenuating System. Master Thesis, Delft University of Technology*, 2006.
- [41] Manuel, B. *Response of a Pile restrained Floating Breakwater. Master Thesis, University of British Columbia*, 1997.
- [42] Chen, k. & Wiegel, R.L. Floating breakwater for reservoir marines. *Proc. Of the 12<sup>th</sup> Coastal Engineer*. Pp. 487-506, 1970.
- [43] Batchelor, G. *Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press*, 1974.
- [44] Williams A.N. & Abul-Azm A.G. Dual pontoon floating breakwater. *Ocean Engineering*. 24(5), pp. 465-78, 1997.
- [45] Williams, A.N., Lee, H.S. & Huang, Z. Floating pontoon breakwaters. *Ocean Engineering*. 27, pp. 221-240, 2000.
- [46] Elchahal, G., Lafon, P. & Younes, R. Design Optimization of Floating Breakwaters with an interdisciplinary Fluid-Solid Structural Problem. *Can. J. Civ. Eng.*, 36, pp. 1732-1743, 2009.
- [47] He, F., Huang, Z. & Wing, A. Hydrodynamic Performance of a rectangular Floating Breakwater with and without Pneumatic Chambers: An Experimental Study. *Ocean Engineering*, 51, pp. 16-27, 2012.
- [48] Martinelli, L., Piero, R. & Zanuttigh, B. Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. *Applied Ocean research*, 30, pp. 199-207, 2008.
- [49] Tadayon, N. Effect of geometric dimensions on the transmission coefficient of floating breakwaters. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3), pp. 775-781, 2010.
- [50] Morris, J. & Kos, A. Solitary Waves on a Cretan Beach. *Journal of Computational Physics*, 136, pp. 214-226, 1997.