

## Malecón Tradicional de La Habana. Parte IV: Estudio de rompeolas para reducir el rebase promedio del oleaje.

Dr.C Luis Córdova López email: [cordova@tesla.cujae.edu.cu](mailto:cordova@tesla.cujae.edu.cu)  
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

Dr.C Mariano Buccino email: [buccino@unina.it](mailto:buccino@unina.it)  
Universidad de Nápoles Federico II, Nápoles, Italia.

### RESUMEN

Se presentan los resultados de una campaña experimental mediante modelación física de un conjunto de alternativas de rompeolas sumergidos y de baja cresta con el objetivo de reducir el rebase del oleaje a una tasa de rebase admisible en la zona conocida como malecón tradicional de La Habana, Cuba. Se describe la metodología seguida para la realización de los experimentos, se obtienen los coeficientes de transmisión, y la eficiencia en reducción de la altura de ola detrás de los rompeolas. Se estudian cuatro alternativas de rompeolas demostrándose que la variante de rompeolas de baja cresta con cota de coronación +3,28 m y longitud de cresta de 12,00 m combinada con un muro de simple curvatura con cota de coronación a +4.46 m es la más efectiva.

**Palabras clave:** modelación física, rompeolas de baja cresta, sobrepaso del oleaje.

## Malecón Tradicional in Havana: Part IV. Study of breakwaters to reduce the wave overtopping.

### ABSTRACT

The results of an experimental campaign are presented by means of physical modeling of a set of alternatives for submerged and low-crested breakwaters with the objective of reducing the wave overtopping to an admissible rate in the area known as the Malecón Traditional in Havana, Cuba. The methodology followed for carrying out the experiments is described, the transmission coefficients, and the reduction efficiency of the wave height behind the breakwaters are obtained. Four breakwater alternatives are studied, showing that the variant of low-crested breakwaters with a crest elevation of +3,28 meters and a crest length of 12,00 m combined with a simple curvature wall with a crest elevation of +4,46 meters is the more effective.

**Key words:** physical modeling, submerged and low crest breakwaters, wave overtopping.

## **INTRODUCCIÓN**

Para la defensa contra inundaciones en zonas costeras existen un conjunto de tipologías de obras de protección, las mismas se pueden clasificar de acuerdo con su colocación, un primer grupo las cuales se desarrollan en la orilla o soluciones en la línea de costa y un segundo grupo las denominadas soluciones en el mar. Para la protección del malecón habanero se seleccionaron, como tipologías a estudiar en la línea de costa: muro existente o muro de sección vertical, muro de simple curvatura, y la combinación de los mismos con berma al pie formada por rocas, y en el caso de las alternativas en el mar se seleccionaron los rompeolas a cierta distancia de la línea de costa.

De acuerdo con las exigencias estéticas se definió dentro de los rompeolas convencionales la aplicación de rompeolas paralelos a la costa, los mismos son construidos a cierta distancia del borde marítimo. La altura de ola hacia la tierra es reducida debido a los efectos de reflexión y transmisión, donde parte de la energía se disipa sobre la estructura. Para que sean más efectivos deben ser colocados paralelos a los frentes de ola que predominan. Los más comunes son los construidos de elementos sueltos, monolíticos y combinados. En este estudio una restricción es la aplicación de rompeolas emergidos para evitar su interferencia con las visuales hacia el mar.

## **CÁLCULOS PRELIMINARES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS ROMPEOLAS**

### **Lista de condiciones de frontera y demandas para el dimensionamiento**

La condición de diseño para el dimensionamiento de las posibles soluciones ingenieras será el escenario del huracán Wilma 2005. El fondo del mar y la tierra está constituido por roca. Las condiciones de aguas profundas se presentan cerca de la costa a profundidades de 400 m, aproximadamente a 1400 m. Las alternativas que se estudien para este tramo (Malecón Tradicional) debe ser posible aplicarlas a otros tramos del malecón de La Habana. En el caso de rompeolas paralelos a la costa, la cota de coronación no debe exceder el nivel medio del mar.

El propósito de un rompeolas paralelo a la costa es disminuir la energía del oleaje mediante la rotura sobre la estructura, logrando una ola transmitida que tenga una altura que ocasione un sobrepaso del oleaje igual o menor al establecido como admisible según la Tarea Técnica de 50 L/sm definido por los inversionistas de la obra Oficina del Historiador de La Habana en el año 2012. El tipo de rompeolas que se propone estará conformado por material de cantera (rocas), de sección trapecial conformado por coraza y núcleo. Córdova et al. (2016).

### **Definición de la altura de ola significativa que debe alcanzar el muro actual u ola transmitida por el rompeolas**

De acuerdo con estudios previos realizados el régimen de sobrepaso del oleaje es tipo “Impulsiva”, esto indica que las olas alcanzan la estructura después de haber ocurrido el fenómeno de rotura. La ecuación utilizada para el cálculo del rebase promedio específico se presenta a continuación según Eurotop (2007), la cual se recomienda para la muros de defensa costera de sección transversal vertical, sustituyendo los valores de diseño al pie de la estructura actual, (condición del huracán Wilma 2005, donde el rompeolas estará sumergido 2,28 m por debajo del N.M.M), la altura de ola significativa necesaria para obtener un valor de rebase promedio admisible de 50 L/sm es de 2,00 m.

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_s^3}} = 2.8 \times 10^{-4} \left( h_* \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-3.1} \quad \text{válida para } 0.03 < h_* \frac{R_c}{H_{m0}} < 1.0 \quad (1)$$

Dónde  $q$ : caudal de rebase promedio específico (L/sm),  $R_c$ : Bordo libre (m),  $g$ : Aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $h_s$ : profundidad al pie de la estructura (m),  $H_{m0}$ : Altura de ola al pie de la estructura (m)

### Definición de la posición del rompeolas

Los rompeolas son obras que necesitan grandes volúmenes de material, y generan altos costos de construcción. Un principio en el diseño será buscar la distancia mínima desde la línea de costa para disminuir costos, y que sea eficiente en la reducción de la altura de ola. En la figura 1, se presentan un conjunto de perfiles realizados hasta una profundidad de 20 m, y distancia de la línea de costa de 300 m, en los mismos se puede constatar la variabilidad de los mismos en el tramo de estudio que abarca 2,5 km de línea de costa, el perfil promedio indica que a partir de profundidades superiores a 5,0 m la pendiente se incrementa hasta la profundidad de 10,0 m.

Un punto de partida para su posicionamiento es asumir una distancia igual o mayor a la longitud de la ola incidente ( $H_{si}$ ) al muro actual, este valor está en el orden de los 50,00 m de acuerdo a las simulaciones realizadas con el modelo SWAN, Holthuijsen et al. (2004). Sin embargo, se considera que una distancia de 50,00 m no sería suficiente para lograr la disipación de la energía de la ola transmitida por el rompeolas, por lo que se asume una distancia de la colocación de la estructura de 70,00 m desde la línea de costa, considerando el análisis antes mencionado referente a los perfiles. Las profundidades de acuerdo con la información batimétrica oscilan entre los 6,00 m y 7,00 m, por lo que se toma un valor de 6,00 m para la colocación del rompeolas.

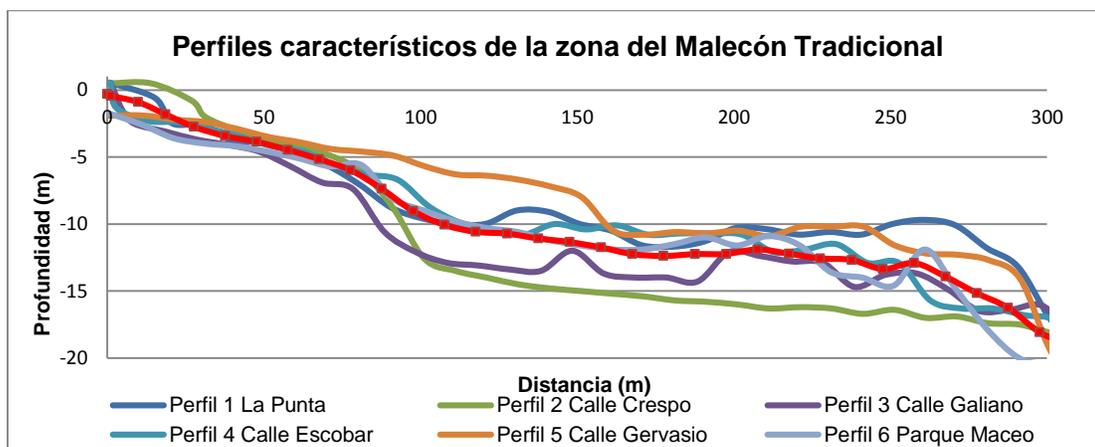


Figura 1. Perfiles característicos del malecón tradicional.

## Dimensiones generales

De acuerdo con los resultados de la simulación numérica la altura de ola significativa incidente para un rompeolas colocado a la profundidad antes definida es de 5,02 m, por tanto el rompeolas debe tener un coeficiente de transmisión  $Kt = 0,4$  para disminuir la altura de ola incidente 2,00 m.

Después de realizar una búsqueda de diferentes fórmulas para la determinación del coeficiente de transmisión, se aplica la propuesta por d'Angremond and van Roode (2002).

$$kt = a \cdot \frac{Rc}{d_{n50}} + b \quad (2)$$

$$\text{Con: } a = 0.031 \cdot \frac{H_i}{d_{n50}} - 0.24 \quad (3)$$

$$b = -5.24 \cdot S_{op} + 0.0323 \cdot \frac{H_i}{d_{n50}} - 0.017 \cdot \left(\frac{B}{d_{n50}}\right)^{1.84} + 0.51 \quad (4)$$

Donde:

$kt = \frac{H_{si}}{H_{st}}$ : Coeficiente de transmisión,  $H_{si}$ : Altura de la ola incidente (m),  $H_{st}$ : Altura de la ola transmitida (m),  $Rc$ : Bordo libre de la cresta relativo al nivel medio del mar (m),  $d_{n50}$ : Diámetro nominal 50 (m),  $B$ : Ancho de la cresta (m),  $S_{op}$ : Pendiente de la ola.

Tomando altura de ola significativa incidente ( $H_{si}$ ) = 5.02 m, longitud de la ola incidente ( $Lm$ ) = 77,00 m, diámetro nominal del elemento de la coraza ( $D_{n50}$ ) = 1,46 m de acuerdo con cálculos de estabilidad según Córdova et al. (2013), bordo libre ( $Rc$ ) = 2,28 m, coeficiente de transmisión ( $Kt$ ) = 0,40, definido anteriormente, se procede al cálculo de la longitud de la cresta del rompeolas, elemento de significativa influencia en el funcionamiento de la estructura, sustituyendo en las ecuaciones 2, 3 y 4, se obtiene en la ecuación 4 el valor de la longitud de la cresta del rompeolas  $B = 11.57$  m, fijándose la misma en 12,00 m.

## ESTUDIO DE LABORATORIO

La modelación física es una herramienta que permite avalar y/o corregir los diseños en ingeniería hidráulica. Para la realización de la modelación física se construyó un canal de 1,56 m de ancho por 18.37 m de largo, en el tanque de oleaje aleatorio Random wave TANK (RATA) en el Laboratorio de Ingeniería Costera y Marítima de la Universidad "Federico II", Nápoles, Italia. La escala seleccionada del modelo es 1:30. Se presenta en la figura 2 una vista en planta de la colocación del canal dentro del tanque de oleaje, señalando la forma en que se circula el agua desde el tanque de aforo para evitar cambios de nivel de agua en la paleta generadora, en la misma figura 2 se muestra el perfil reproducido teniendo en cuenta las características del perfil del fondo marino en el área de estudio. El mismo representa una longitud desde la línea de costa de 230 m, (7,67 m en modelo), con profundidad de 18,72 m en prototipo en la paleta generadora hasta 1,70 m al pie del muro del malecón (prototipo), después de 5,98 m de fondo plano (escala de modelo), la batimetría se reproduce con una pendiente de 4,1 %, seguida de una fuerte pendiente de 1:3 y una zona superior conformada de dos partes con pendientes de 8,6 % y 6 % respectivamente. Córdova et al. (2015).

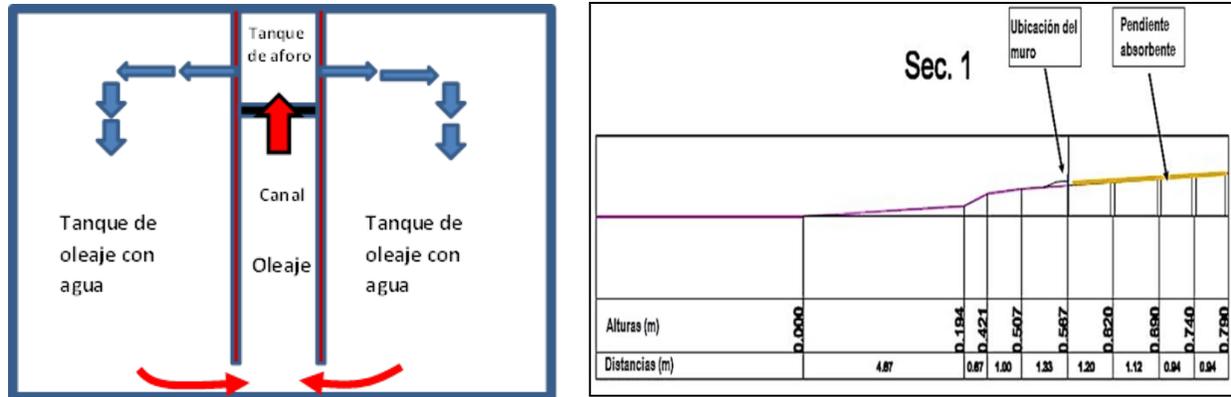


Figura 2. Vista en planta y sección del perfil reproducido en el canal

### Niveles del mar y condiciones de oleaje

Dos niveles del nivel del mar son considerados, uno corresponde al escenario del huracán Wilma 2005, y el otro al período de retorno 1 en 50 años (tabla 1). Para cada nivel se somete a 8 estados del mar con espectro del oleaje tipo JONSWAP con duración de 1000 olas, los valores de  $H_s$  en la paleta son 2,7 m, 4,0 m, 5,4 m y 6,5 m, con dos períodos picos  $T_p = 10$  s y 12 s.

Tabla 1. Datos de los escenarios seleccionados

Escenarios	Surgencia y/o sobreelevación (m)	Pleamar (m)	Cambio Climático (m)	Nivel del mar total (m)
Período de Retorno 50 años	1,06	0,40	0,27	1,73
Huracán Wilma	1,31	0,40	0,27	1,98

## MEDICIONES DEL REBASE PROMEDIO COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN Y EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DEL ALTURA DE OLA

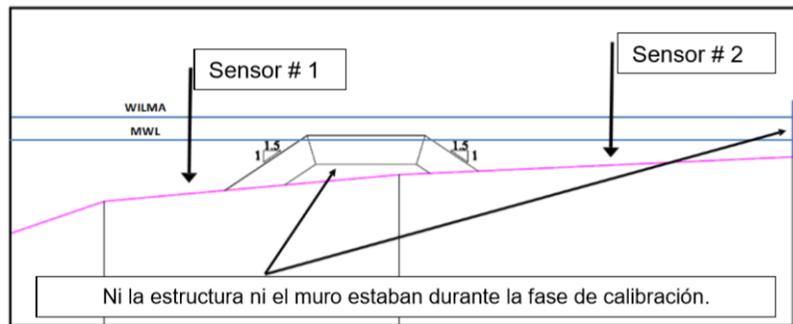
### Medición del rebase

Para medir el rebase promedio del oleaje  $q$ , se removió la pendiente colocada para el proceso de calibración dejando un reservorio de  $1\text{m}^3$  detrás de la posición donde se colocará la estructura a estudiar. El agua será colectada y retornada al tanque de oleaje mediante dos bombas de 800L/min, el flujo bombeado ( $V_{\text{bombeo}}$ ), será medido a través de flujómetro electromagnético, donde el flujo es medido. El agua que queda en el reservorio al inicio ( $V_{\text{inicial}}$ ) y al final ( $V_{\text{final}}$ ), serán controlados mediante aforo volumétrico aplicando la siguiente expresión, donde  $Dt$  es el tiempo de prueba.

$$q = \frac{V_{\text{bombeado}} + (V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}})}{Dt} \quad (5)$$

### Medición del oleaje transmitido.

Para determinar las alturas de ola incidente y transmitida se colocaron 2 sensores en las posiciones que se muestran en la figura 3. El sensor # 1 mide la altura de ola incidente, mientras que el sensor # 2 mide la ola transmitida. Las pruebas se hacen si la presencia de las estructuras para evitar el fenómeno de la reflexión del oleaje, y su efecto sobre la altura de ola que se propaga.



**Figura 3. Posición donde se colocan los sensores para medir oleaje incidente y transmitido.**

Para verificar tanto el grado de la transmisión como la eficiencia de los rompeolas, se aplican los conceptos de transmisión y eficiencia, los cuales se explican a continuación: La transmisión mide la reducción de las olas en la zona de sombra, comparado con las alturas de ola en frente de las estructuras. La eficiencia compara la altura de ola en la parte trasera del rompeolas, con la altura en la misma posición en ausencia de las estructuras.

### Estructuras a estudiar.

A partir del resultado de los cálculos a nivel de gabinete, se evalúan dos diseños de estructura en una prueba preliminar para dos sesiones de rompeolas. El primero se muestra en la figura 4 a la izquierda, es un rompeolas de cresta estrecha (12,00 m a 0,80 m por encima del nivel medio del mar), y un segundo de cresta ancha, (24,00 m colocada al N.M.M), en la parte derecha de la figura, éste último con el objetivo de probar el efecto disipador de la energía de la ola por el incremento de la longitud de la cresta.



**Figura 4. Rompeolas de cresta estrecha (izquierda). Rompeolas de cresta ancha a la derecha.**

## ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRASMISIÓN, EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DEL OLAJE Y SOBREELEVACIÓN DEL MAR PRODUCIDA POR LAS ESTRUCTURAS

### Análisis del coeficiente de transmisión y eficiencia en reducción del oleaje

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados experimentales del coeficiente de transmisión para ambos rompeolas, y los valores de eficiencia en reducción del oleaje incidente medidos para cada prueba realizada. Respecto al efecto de la presencia de rompeolas y el comportamiento de la altura de ola incidente se observa como incrementa su altura en algunos centímetros antes de romper contra el rompeolas con respecto a la que se genera a 20 m de profundidad, esto debido al efecto de asomeramiento generado de forma artificial por la presencia de la estructura. Referente al coeficiente de transmisión de forma general se observa que no existe un efecto significativo para los períodos pico del oleaje estudiados, sin embargo si se puede constatar el efecto de la sobreelevación del mar, siendo mayores para la sobreelevación del mar de 2,28 m.

**Tabla 2. Valores de  $K_t$  y Eficiencia para el rompeolas de cresta estrecha.**

Prueba	$H_s$ (m) 20 m prof.	$T_p$ (s)	Sobreelevación (m)	$H_s$ inc (m)	$H$ trans (m)	$K_t$	$H$ al pie (m)	$E_f$ (Tanto por uno)
1	2,7	12	2,28	2,87	1,48	0,52	2,51	0,41
2	4,0	12	2,28	4,1	1,87	0,46	2,99	0,37
3	5,4	12	2,28	5,64	2,15	0,38	3,24	0,34
4	6,5	12	2,28	7	2,47	0,35	3,55	0,30
5	2,7	10	2,28	2,76	1,28	0,46	2,44	0,48
6	4,0	10	2,28	3,78	1,55	0,41	2,75	0,44
7	5,4	10	2,28	5,51	1,98	0,36	3,04	0,35
8	6,5	10	2,28	6,89	2,28	0,33	3,26	0,30
9	2,7	12	1,73	2,88	1,26	0,44	1,82	0,31
10	4,0	12	1,73	4,28	1,65	0,39	2,09	0,21
11	5,4	12	1,73	5,78	2,01	0,35	2,32	0,13
12	6,5	12	1,73	7,28	2,45	0,34	2,63	0,07
13	2,7	10	1,73	2,87	1,13	0,39	1,65	0,32
14	4,0	10	1,73	4,18	1,42	0,34	1,8	0,21
15	5,4	10	1,73	5,66	1,78	0,31	2,11	0,16
16	6,5	10	1,73	6,75	1,88	0,28	2,28	0,18

Un elemento importante a destacar es el comportamiento del coeficiente de transmisión con el incremento de la altura de ola para las condiciones de estudio, donde se puede constatar que con el aumento de la altura de ola incidente disminuye el coeficiente de transmisión. Lo que significa una disminución mayor de la altura de ola transmitida. De acuerdo con las observaciones realizadas durante la realización de las pruebas, se pudo constatar que para las alturas de olas mayores estudiadas, dentro del espectro generado, las de mayor altura comienzan su proceso de rotura instantes antes de llegar a la estructura, esto hace que el efecto del rompeolas este más dirigido a reducir la altura de la ola pro efecto de fricción, ya que de forma natural comenzó o se produjo la rotura del oleaje antes de hacer contacto con la obra. La combinación de ambos fenómenos da como resultado alturas de olas menores, y por tanto coeficientes de transmisión menores. Desde el punto de vista cuantitativo el coeficiente de transmisión promedio para el

rompeolas de cresta estrecha tiene un valor de 0,38, siendo ligeramente mayor que el de cresta ancha con un valor de 0,34, no es significativa la diferencia teniendo en cuenta que se duplica la longitud de la cresta.

**Tabla 3. Valores de  $K_t$  y Eficiencia para el rompeola de cresta ancha.**

Prueba	$H_s$ (m) 20 m prof.	$T_p$ (s)	Sobreelevación (m)	$H_s$ inc (m)	$H$ trans (m)	$K_t$	$H$ al pie (m)	$Ef$ (Tanto por uno)
1	2,7	12	2,28	2,87	1,2	0,42	2,51	0,52
2	4,0	12	2,28	4,1	1,52	0,37	2,99	0,49
3	5,4	12	2,28	5,64	1,93	0,34	3,24	0,40
4	6,5	12	2,28	7	2,18	0,31	3,55	0,39
5	2,7	10	2,28	2,76	1,1	0,40	2,44	0,55
6	4,0	10	2,28	3,78	1,33	0,35	2,75	0,52
7	5,4	10	2,28	5,51	1,72	0,31	3,04	0,43
8	6,5	10	2,28	6,89	2,05	0,30	3,26	0,37
9	2,7	12	1,73	2,88	1,11	0,39	1,82	0,39
10	4,0	12	1,73	4,28	1,46	0,34	2,09	0,30
11	5,4	12	1,73	5,78	1,81	0,31	2,32	0,22
12	6,5	12	1,73	7,28	2,2	0,30	2,63	0,16
13	2,7	10	1,73	2,87	0,98	0,34	1,65	0,41
14	4,0	10	1,73	4,18	1,3	0,31	1,8	0,28
15	5,4	10	1,73	5,66	1,69	0,30	2,11	0,20
16	6,5	10	1,73	6,75	2	0,30	2,28	0,12

Referente a la eficiencia en reducción de altura de ola detrás del rompeolas, donde se realiza la comparación de la ola existente antes de la presencia de la estructura y con la presencia de la misma, se puede observar, tomando como ejemplo las pruebas 1; 2; 3 y 4 de la tabla 2, para el rompeolas de cresta estrecha, que no obstante la disminución del coeficiente de transmisión con el aumento de la altura de ola, la eficiencia en reducción disminuye, demostrando la reducción de la efectividad de las estructuras para los escalones de olas mayores estudiados. Desde el punto de vista cuantitativo el rompeolas de cresta estrecha tiene un valor de 28 % de eficiencia, y el de cresta ancha de 36 %, confirmando la afirmación anterior respecto al poco incremento de eficiencia a pesar de un incremento sustancial de la longitud de la cresta.

### **Sobreelevación del nivel del mar debido a la presencia de la estructura.**

Para el análisis de este aspecto se presenta la tabla 4, donde se muestran los valores medidos de sobreelevación por rotura de la ola en presencia de la estructura y en ausencia de ella. Como se puede apreciar, los valores de sobreelevación son superiores en el caso de la presencia de la estructura, con un valor mínimo de 0,21 m, un máximo de 1,46 m y con un promedio general de 0,72 m; muy distinto sin la estructura, con un mínimo de -0,05 m, un máximo de 0,54 m y con promedio de 0,166 m. Esto ha sido evidenciado por diferentes investigadores. Según Calabrese et al. (2008) una de las diferencias principales entre un rompeolas emergido y un rompeolas sumergido es el transporte neto de agua sobre el rompeolas, este elemento es importante ya que esa masa de agua contribuye a sobreelevar el nivel del mar, adicionándose a la sobreelevación generada por el desbalance en las tensiones de radiación que produce la conocida sobreelevación por rotura del oleaje “wave set up”, y por último las ondas de infragravedad, las cuales se liberan posteriormente a la rotura, conocido como “surfbeat”, estos tres fenómenos se ponen de manifiesto para rompeolas sumergidos.

**Tabla 4. Características del oleaje al pie del muro con estructura y sin la misma (rompeolas de cresta ancha).**

Características del oleaje al pie del muro				
Prueba	Con estructura		Sin estructura	
	H transmitida (m)	Sobreelevación por rotura (m)	H al pie del muro (m)	Sobreelevación por rotura (m)
1	1,2	0,21	2,51	-0,05
2	1,52	0,47	2,99	-0,01
3	1,93	0,81	3,24	0,09
4	2,18	1,14	3,55	0,26
5	1,1	0,22	2,44	-0,04
6	1,33	0,47	2,75	-0,02
7	1,72	0,79	3,04	0,1
8	2,05	1,14	3,26	0,27
9	1,11	0,36	1,82	0,02
10	1,46	0,66	2,09	0,14
11	1,81	1,07	2,32	0,35
12	2,2	1,46	2,63	0,54
13	0,98	0,37	1,65	0,03
14	1,3	0,64	1,8	0,15
15	1,69	1,04	2,11	0,33
16	2	1,35	2,28	0,5

Para ilustrar este fenómeno, y ver su repercusión en el caso de estudio se toma como ejemplo la prueba 12 de la tabla 3, que pertenece al escenario PR 1/50 años y período pico 12 s, la altura de ola transmitida  $H_{st}$  es de 2,2 m, la altura de la ola en la base del muro sin estructura es de 2,63m, la eficiencia para esta prueba es de 16 %, y la sobreelevación varía de 0,54 m a 1,46 m con la presencia de la estructura, tomado de la tabla 4. Por la presencia del rompeolas la altura de ola se reduce en 0,43 m, sin embargo la sobreelevación se incrementa en 0,92 m.

Si se toma la prueba 4 de la tabla 3 perteneciente al escenario del huracán Wilma 2005, la eficiencia es del 39 %, ya que la diferencia de altura de ola por la presencia de la estructura es de 1,37 m, y la sobreelevación aumenta 0,88 m; demostrando la ineficiencia de este tipo de estructura, dígase sumergida en la reducción del rebase, ya que olas de menor altura podrán sobrepasar el muro del malecón.

Como comentario final se señala que la sobreelevación del nivel de la superficie del mar que se genera en la zona protegida por los rompeolas es debido a que los mismos se encuentran localizados en la zona de rotura de las olas generadas. Este fenómeno trae consigo el incremento del rebase del oleaje sobre la estructura (muro del malecón), ya que olas de menor altura sobrepasarían su cota de coronación, esto conllevaría a pensar en la necesidad de mover la posición de los rompeolas en dirección al mar, sin embargo teniendo en cuenta la batimetría de la zona implicaría colocar los rompeolas a profundidades superiores a los 10 m, si se observa la figura 1, para evitar las fuertes pendiente que se generan entre las profundidad de 5 y 10 m en la mayoría de los perfiles que caracterizan el área de estudio, lo cual generaría grandes volúmenes de material para la construcción de los mismos.

## ESTUDIO DE DIFERENTES SECCIONES DE ROMPEOLAS

En este acápite se realiza el estudio de diferentes secciones transversales de rompeolas colocados paralelos a la línea de costa para la zona de estudio. Como se concluyó anteriormente los rompeolas con cota de coronación colocada a nivel medio del mar generan una sobre elevación del nivel del mar detrás de la estructura. Este elemento favorece a que olas de menor altura rebasen el muro de protección, no constituyendo una eficaz protección, recomendándose el estudio de los denominados rompeolas de baja creta, que son aquellos que su cota de coronación está por encima del nivel medio del mar, pero durante los eventos extremos quedan sumergidos. Las secciones de rompeolas estudiadas se presentan a continuación. En la figura 5A, se presenta un rompeolas de 30 m de ancho de corona con cota de coronación  $-0,20$  m por debajo del N.M.M, en la figura 5B se presenta la segunda sección estudiada con igual ancho de creta y altura de corona  $+0,54$  m por encima del N.M.M, en la figura 5C, la sección a estudiar tiene un ancho de creta de  $22,0$  m y su cota de coronación es de  $+2,28$  m respecto al N.M.M, el último rompeolas a estudiar tiene una sección transversal de  $12$  m de ancho y cota de coronación igual a  $+3,28$  m.

Las condiciones para las que fueron estudiadas las estructuras son las siguientes:

Profundidad de  $5,05$  m al pie del talud aguas arriba (frente al oleaje), los taludes tienen pendientes  $1:1,5$  y están conformado por núcleo y coraza. Los elementos que componen la coraza son piedras, al igual que el núcleo, se cubrió con una malla de acero para evitar movimiento de los elementos.

Se estudiaron para las 16 pruebas (combinación de 4 alturas de olas significativa, dos períodos picos y dos niveles del mar). Las secciones estudiadas se presentan en la figura 5.

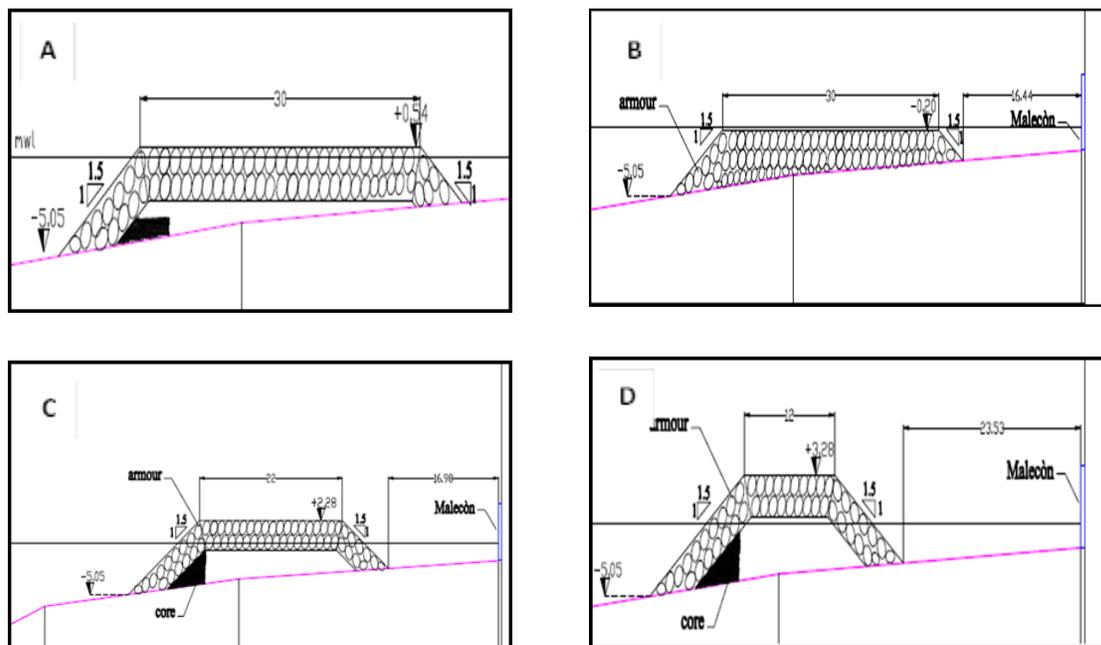


Figura 5. Secciones de rompeolas estudiadas A; B; C y D.

El análisis de los resultados en esta fase se lleva a cabo realizando una comparación para cada alternativa de rompeolas estudiados combinados con los muros costeros de acuerdo con la reducción del rebase promedio del oleaje, y teniendo en cuenta el rebase admisible establecido. Los rompeolas se combinaron con las variantes de muro vertical a la cota actual (+3,96 m; a la cota + 4.46 m y muro de simple curvatura a la +4,46 m). El total de pruebas realizadas es de 192.

En la tabla 5 se presentan los resultados para la variante de rompeolas a la cota de corona - 0,20 m y ancho de corona 30 m, se puede constatar que la condición más favorable para los mayores rebases ocurre para la sobreelevación de +2,28 m escenario del huracán Wilma 2005, y el período pico del espectro de 12 s. En la tabla 5 se muestran las mediciones de rebase realizadas para esta variante, donde se puede observar que los resultados de los casos de muro vertical a +3,96 m y muro curvo a +4,46 m son similares, ligeramente menores para el caso del muro de simple curvatura. También existen valores de rebase por debajo del gasto admisible (0,05 m<sup>3</sup>/s m), los cuales han sido señalados en color rojo, los mismos se producen en ambos escenarios para los escalones de oleaje más pequeños.

**Tabla 5. Caudal de rebase específico promedio. Alternativa rompeolas sumergido -0,20 m y longitud de cresta 30 m.**

Sumergido (-0,20) Ancho de corona 30 m.						
Pruebas	Hs (m)	Tp (s)	N.Mar (m)	Muro vertical (+3,96 m)	Muro vertical (+4.46 m)	Muro curvo (+4,46 m)
1	2,7	12	2,280	0,089	<b>0,040</b>	<b>0,016</b>
2	4	12	2,280	0,242	0,142	0,122
3	5,4	12	2,280	0,561	0,374	0,362
4	6,5	12	2,280	0,938	0,682	0,648
5	2,7	10	2,280	0,069	<b>0,030</b>	<b>0,023</b>
6	4	10	2,280	0,182	0,102	0,084
7	5,4	10	2,280	0,410	0,247	0,239
8	6,5	10	2,280	0,737	0,515	0,490
9	2,7	12	1,730	<b>0,027</b>	<b>0,007</b>	<b>0,003</b>
10	4	12	1,730	0,141	<b>0,075</b>	<b>0,067</b>
11	5,4	12	1,730	0,382	0,238	0,212
12	6,5	12	1,730	0,680	0,486	0,457
13	2,7	10	1,730	<b>0,022</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>
14	4	10	1,730	0,087	<b>0,036</b>	<b>0,024</b>
15	5,4	10	1,730	0,259	0,147	0,119
16	6,5	10	1,730	0,523	0,342	0,321

Los resultados de los ensayos para la variante de rompeolas a la cota de +0,54 m y longitud 30m de la corona se presentan en la tabla 6. Los valores de rebase por debajo del umbral establecido de 0,05 m<sup>3</sup>/sm han disminuido su magnitud para los mismos escalones de la variante de rompeolas sumergido (-0,20 m). La variante de muro de simple curvatura presenta resultados ligeramente mejores que la de muro vertical a la misma cota (+4,46 m).

**Tabla 6. Caudal de rebase específico promedio. Alternativa rompeolas de cresta baja +0,54 m, y longitud de cresta 30 m.**

<b>Sumergido (+0,54) ancho de corona 30 m.</b>						
<b>Pruebas</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>N.Mar (m)</b>	<b>Muro vertical (+3,96 m)</b>	<b>Muro vertical (+4.46 m)</b>	<b>Muro curvo (+4,46 m)</b>
1	2,7	12	2,280	<b>0,027</b>	<b>0,026</b>	<b>0,013</b>
2	4	12	2,280	0,133	0,125	<b>0,092</b>
3	5,4	12	2,280	0,417	0,351	0,329
4	6,5	12	2,280	0,748	0,662	0,666
5	2,7	10	2,280	<b>0,017</b>	<b>0,019</b>	<b>0,008</b>
6	4	10	2,280	0,092	0,076	<b>0,055</b>
7	5,4	10	2,280	0,359	0,226	0,204
8	6,5	10	2,280	0,603	0,478	0,465
9	2,7	12	1,730	<b>0,005</b>	<b>0,010</b>	<b>0,004</b>
10	4	12	1,730	<b>0,062</b>	<b>0,071</b>	<b>0,057</b>
11	5,4	12	1,730	0,294	0,193	0,185
12	6,5	12	1,730	0,473	0,408	0,405
13	2,7	10	1,730	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>
14	4	10	1,730	<b>0,022</b>	<b>0,031</b>	<b>0,024</b>
15	5,4	10	1,730	0,115	0,118	0,121
16	6,5	10	1,730	0,282	0,295	0,279

Los resultados relativos a los rompeolas de baja cresta, o de mayor cota de coronación son presentados en la tabla 7. Se comparan las variantes estudiadas para el escenario período de retorno 50 años, caracterizada por una sobreelevación de +1,73 m, en este caso ambos rompeolas estudiados tiene su cota de corona por encima del nivel de tormenta (+2,28 m y +3,28 m), las alternativas que mejores resultados presentan son las de rompeolas combinadas con muro de simple curvatura a la cota +4,46 m, y la variante combinada con muro vertical a la cota +4,46 m.

En la tabla 7 se observan que no hubo rebase para la menor altura de ola de las estudiadas, y valores por debajo del valor señalado como admisible, o en el orden de magnitud de los  $0,05\text{m}^3/\text{sm}$  hasta el escalón de altura de ola estudiado de 5,4 m, la combinación de muro de simple curvatura a la cota +4,46 m con el rompeolas a la cota +2,28 m y longitud de la corona de 22 m es la de mejor comportamiento en reducción de rebase.

En el escenario del huracán Wilma 2005, donde el nivel del mar esta sobreelevado +2,28 m, se observa un comportamiento similar al escenario 50 años de período de retorno. En este caso las variantes que mejor reducen el rebase del oleaje son las que los muros tanto vertical, como de simple curvatura tiene la cota de coronación +4,46 m, y cota de corona del rompeolas +3,28 m, es evidente la influencia que tiene la cota de coronación del rompeolas que en este escenario está 1,00 m por encima del nivel de tormenta (+2,28 m). Los valores de rebase para este escenario, de acuerdo con la tabla 7 se comportan por debajo o en el orden de magnitud del valor señalado como restricción hasta el escalón de altura de ola estudiado de 4,00 m, menor que para el escenario de período de retorno 50 años (escalón 5,4 m), esto debido a la mayor sobreelevación del nivel del mar (+2,28 m) que presenta éste escenario, quedando menos emergido la estructura, lo que permite una mayor transmisión de la ola que incide sobre la estructura.

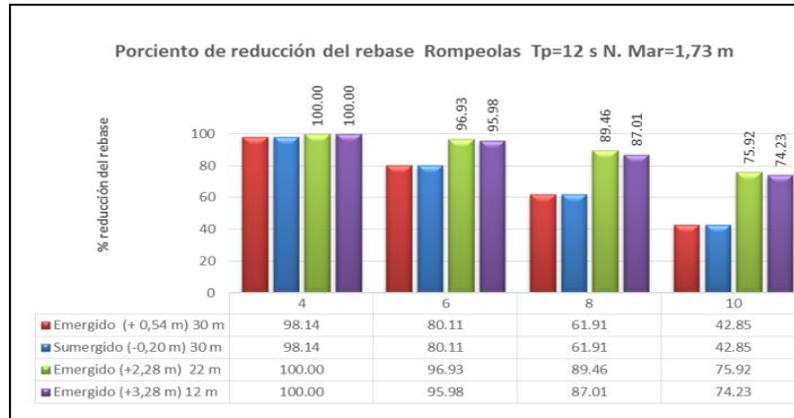
**Tabla 7. Caudal de rebase promedio específico. Alternativa rompeolas de cresta baja +2,28 m y longitud de cresta 22 m. Alternativa rompeolas de cresta baja +3,28 m y longitud de cresta 12 m.**

Pruebas	Hs (m)	Tp (s)	N.Mar	Emergido (+2,28 m) 22 m ancho de corona.			Emergido (+3,28 m) 12 m ancho de corona.		
				Muro vertical (3,96 m)	Muro curvo (+0,50 m)	Muro vertical (+0,50 m)	Muro vertical (3,96 m)	Muro curvo (+0,50 m)	Muro vertical (+0,50 m)
1	2,7	12	2,280	<b>0,0056</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,0047</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0008</b>
2	4	12	2,280	<b>0,0687</b>	<b>0,0280</b>	<b>0,0434</b>	<b>0,0652</b>	<b>0,0345</b>	<b>0,0403</b>
3	5,4	12	2,280	0,3117	0,1923	0,1838	0,2793	0,1803	0,1867
4	6,5	12	2,280	0,6189	0,4333	0,4273	0,5613	0,3771	0,3769
5	2,7	10	2,280	<b>0,0012</b>	<b>0,0015</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0010</b>
6	4	10	2,280	<b>0,0348</b>	<b>0,0169</b>	<b>0,0145</b>	<b>0,0328</b>	<b>0,0158</b>	<b>0,0155</b>
7	5,4	10	2,280	0,1678	0,0876	0,0948	0,1439	0,0866	0,0834
8	6,5	10	2,280	0,4491	0,2944	0,2862	0,3922	0,2735	0,2563
9	2,7	12	1,730	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
10	4	12	1,730	<b>0,0274</b>	<b>0,0104</b>	<b>0,0139</b>	<b>0,0268</b>	<b>0,0136</b>	<b>0,0148</b>
11	5,4	12	1,730	0,1242	0,0587	0,0770	0,1123	<b>0,0723</b>	<b>0,0655</b>
12	6,5	12	1,730	0,3649	0,1926	0,2344	0,3159	0,2062	0,2170
13	2,7	10	1,730	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
14	4	10	1,730	<b>0,0038</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0050</b>	<b>0,0041</b>	<b>0,0012</b>
15	5,4	10	1,730	0,0491	<b>0,0278</b>	<b>0,0364</b>	<b>0,0511</b>	<b>0,0376</b>	<b>0,0254</b>
16	6,5	10	1,730	0,2070	0,0994	0,1382	0,1788	0,1317	0,0974

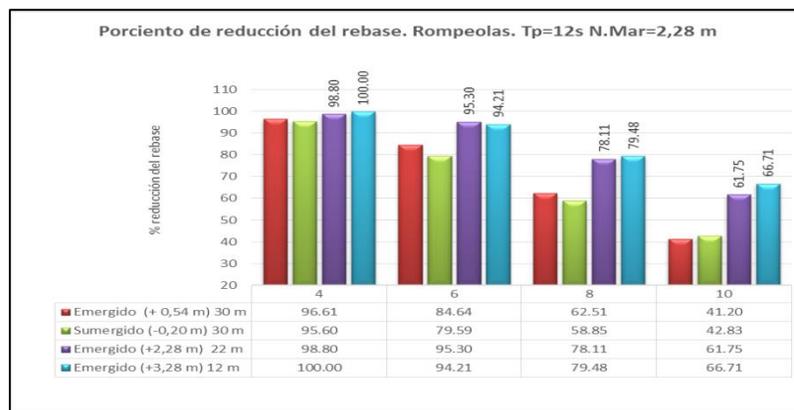
Para realizar el análisis desde el punto de vista de porcentaje de reducción del rebase en esta fase se presentan las figuras 6 y 7. Sólo se muestran los resultados para la combinación de muro de simple curvatura (+4,46 m) combinado con los rompeolas. Como se puede constatar en los gráficos en el caso del escenario período de retorno 50 años la variante de rompeolas con cota de coronación +2,28 m y longitud 22 m presenta valores que van desde el 100 % de reducción para la altura de ola significativa de 4,00 m en aguas profundas hasta 75,92 % para 10,0 m de altura de ola significativa en aguas profundas. Referente a la variante de rompeolas a la cota de coronación +3,28 m y longitud 12 m los resultados son muy similares.

Respecto al escenario huracán Wilma 2005, donde la sobre elevación del nivel el mar es 2,28 m. La variante más efectiva entre los rompeolas emergidos es la que tiene cota de coronación +3,28m y longitud 12 m, con mejores resultados para los escalones de altura de olas mayores, el efecto de la sobre elevación del mar hace que disminuyan los porcentos de reducción respecto al escenario 50 años período de retorno, en este caso para 4,00 m de altura de ola se reduce en un 100 %, para 10,00 m, el mayor valor de la reducción es 66,61 %.

A partir del análisis de los resultados de los ensayos de las combinaciones se concluye que la combinación de muro de simple curvatura a la cota +4,46 m con los rompeolas emergidos es la mejor alternativa.



**Figura 6. Porcentaje de reducción del rebase promedio. Escenario Período de retorno 50 años.**



**Figura 7. Porcentaje de reducción del rebase promedio. Escenario huracán Wilma 2005**

## CONCLUSIONES

Como resultado de los estudios experimentales de diferentes alternativas de rompeolas para la protección del malecón tradicional de La Habana, se puede concluir que los rompeolas con cota de coronación próximo al nivel medio del mar, no son efectivos para las condiciones de estudio debido a la sobreelevación del nivel del agua que se genera en la parte protegida, que sumado a los efectos del fenómeno de reflexión hacen que olas de menor altura generen sobrepasos o rebases del oleaje mayores. La posibilidad de colocarlos a mayores distancias de la línea de costa para mitigar estos efectos haría las obras muy costosas ya que deberán colocarse a profundidades superiores a los 10 m para evitar las fuertes pendientes del perfil del fondo marino en el área de estudio.

Los coeficientes de trasmisión obtenidos experimentalmente para rompeolas con su cota de coronación a nivel medio del mar están en el orden de magnitud a los obtenidos en los cálculos previos realizados en la fase de diseño para lograr una altura de ola significativa al pie del muro del malecón que generara el rebase admisible de 50 L/ms para todos los escenarios estudiados, sin embargo, en las pruebas realizadas para determinar el rebase del oleaje se pudo constatar que

sólo se logra alcanzar la tasa de rebase admisible para los oleaje de menor altura, y condición de sobreelevación de +1,73 m, a menor de los dos escenarios estudiados.

Los rompeolas de baja cresta combinados con el muro de simple curvatura demostraron ser más efectivos, para los escalones de alturas de ola significativa más altas en el escenario del huracán Wilma 2005, se produce un importante reducción aunque no se alcanza la tasa de rebase admisible.

## REFERENCIAS

- Calabrese M., Vicinanza D., Buccino M.** (2008). “2D Wave setup behind submerged breakwaters”. *Ocean Engineering Journal* Vol. 35, pp 1015-1028. ISSN 0029-8018, Elsevier Ltd. United Kingdom
- Córdova L., Lamazares R., Salgueiro G.** (2013). “Propuestas de obras de defensa de costas para dar solución a las penetraciones del mar en la zona del malecón tradicional de la ciudad de La Habana”, Reporte Técnico. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.
- Córdova L., Dentale F., Capobianco A., Buccino M.** (2015) “Experimental campaign on the overtopping of the seawall Malecón Tradicional”. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Volumen 1-4, número 1, pp 1499 – 1505. ISBN: 978-1-880653-89-0 Hawaii, USA.
- Córdova L., Buccino M., Salerno D., Pugliese E., Torres R., Capobianco A., Ponce M.** (2016). “Análisis de los resultados de los estudios mediante modelación física del rebase del oleaje, presiones sobre los muros costeros y estabilidad de los elementos que componen las bermas y rompeolas. Propuesta de Solución”, Reporte Técnico. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.
- d’Angremond K., van Roode F.** (2002). “Breakwaters and closure dams”. s.l.: Delft University Press, ISBN: 978-90-6562-173-3, Holanda
- Eurotop** (2007). “Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual”. ISSN 04552-7739. Holanda.
- Holthuijsen L. H., Booij N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. M. M, Ris R. C, Van Der Westhuysen A. J. and Zijlema M.** (2004). “SWAN Cycle III version 40.41 user’s manual”, Delft University of Technology Press, Delft, The Netherlands.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### Contribución de los autores

*Luis Fermín Córdova López* <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó el diseño de la investigación, desarrollos de los ensayos, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final.

*Mariano Buccino* <https://orcid.org/0000-0002-5959-6545>

Realizó la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, desarrollo de los ensayos y análisis de los resultados.