

Modelo determinístico para la estimación de la tasa de sobrepaso en diques mixtos

INTRODUCCIÓN

El diseño de obras de defensa de costas requiere cuantificar el sobrepaso que producirán eventos extremos mediante mediciones de campo, ensayos en modelos reducidos, o mediante la estimación utilizando ecuaciones empíricas o semiempíricas obtenidas fundamentalmente de los estudios realizados en laboratorios de modelación física de obras costeras y marítimas, de esta forma de definirá la coronación de las obras a partir de criterios de rebase permisible ya sea siguiendo un criterio estructural o de acuerdo a la función del área protegida.

Destacados investigadores en el campo de la ingeniería costera han señalado en las dos últimas décadas las ventajas de los diques denominados diques mixtos al compararlos con los diques convencionales. Se ha demostrado que la colocación de muros costeros o parapetos sobre diques convencionales o al final de un revestimiento reduce la cota de coronación de la obra para una misma tasa de sobrepaso. Esto significa un incremento en la eficiencia desde el punto de vista funcional y la reducción de los costos debido a la utilización de una menor cantidad de materiales para una misma cota de coronación.

A continuación se presenta de forma sintética el desarrollo y resultados de trabajos de investigación para la obtención de un modelo matemático determinístico, el cual es obtenido a través de ensayos de modelación física con oleaje regular y el desarrollo de una metodología para aproximar los resultados obtenidos en la investigación a los rebases o sobrepasos producidos por un oleaje más real1-5.

ENSAYOS EN UN CANAL DE OLEAJE DE DIQUES MIXTOS

Los ensayos se han realizado en el canal de oleaje regular, situado en las instalaciones del Centro de Investi-

Resumen / Abstract

Se presenta el resultado de estudios en modelos físicos para la determinación de un modelo determinístico para la estimación de la tasa de rebase promedio del oleaje de tormenta en diques de defensa de costas de tipo mixto.

Palabras clave: sobrepaso, oleaje, diques obras de defensa.

The result of studies in physical models is presented to develop a deterministic mathematical model to estimate the rate of average overtopping due to storm waves in coastal defense dikes of mixed type.

Keywords: overtopping, wave, dikes, coastal defense.

gaciones Hidráulicas de Cuba (CIH).

Las dimensiones del canal son 80 metros de largo, 1,50 metros de ancho y 2,0 metros de profundidad, equipado de una paleta de generación de oleaje de movimiento rotacional en uno de sus extremos.

En el interior del canal se dispuso de un encauzamiento de 0,70 metros de ancho, cuyo eje coincide con el del canal, dejando un espacio a cada lado que permite el paso de parte del oleaje hacia la rampa amortiguadora. El resto entra por el encauzamiento y se dirige hasta la sección.

Se colocaron dos sensores de medición de altura y período de ola, con el objetivo de obtener los parámetros de la ola en aguas profundas y someras. El sensor 1, aguas profundas, situado a una distancia de 35 metros de la paleta, y el sensor 2 aguas someras está ubicado próximo a la sección de ensayo, en uno de los canales laterales al encauzamiento.

Metodología de los ensayos. Sistema de medición de rebase

El procedimiento experimental consiste en someter a las secciones a estudiar a cada escalón de ola calibrado para los dos períodos seleccionados, midiendo el rebase para cada combinación, realizando 5 replicaciones de esta medición.

Los escalones de altura de olas seleccionados para las pruebas son referidos al sensor 1. El agua que sobrepasa es colectada mediante un recipiente conformado por un canal de toma, un tanque para almacenar el agua que pasa por este canal, y una tubería de conducción que transporta el agua desde el tanque hasta el lugar donde se mide su volumen (Figura 1).



Figura 1. Vista del Sistema de Colección de rebases

A continuación se describe el proceso de medición.

Cuando el oleaje generado se mantiene estable, lo cual es comprobado mediante la medición "ola por ola", a través del software de adquisición de datos en tiempo real. El operador de la compuerta del canal de toma abre la misma. En ese mismo instante el operador del software comienza a tomar la muestra de las alturas de olas, esta operación se desarrolla durante 1 minuto 4 segundos, tiempo fijado en el software de adquisición y procesamiento de datos de oleaje. Lo que significa que el número de olas que es registrado para los períodos de oleaje seleccionados (1,7 y 2,2 segundos), es 38 y 29 respectivamente. El software brinda la altura promedio de cada registro.

Mientras transcurre dicho tiempo el agua producto de los rebases de cada ola pasa al recipiente antes mencionado y mediante la tubería es acumulada para ser medida con el uso de probetas graduadas. Se divide el volumen

medido entre el tiempo de duración de la toma de muestra, finalmente obteniendo el gasto de rebase.

Objetivos del Trabajo

1. Obtener un modelo determinístico de tipo potencial similar al obtenido por Córdova (1999) para muros costeros de sección transversal curva de simple curvatura, mediante la búsqueda de los nuevos coeficientes empíricos de rebase para diferentes rangos de longitud de berma relativa (B/L) en diques mixtos.

2. Presentar una Metodología sencilla para la estimación de la Tasa de Rebase de un estado real del mar, a partir de los ensayos realizados con oleaje regular.

Para dar cumplimiento a los mismos se desarrollaron las siguientes tareas:

1. Selección de las características del clima marítimo a utilizar en los ensayos, se toma como punto de partida las condiciones de oleaje en aguas profundas del Mar Caribe Noroccidental, zona en la cual se forman tormentas de gran envergadura que afectan el litoral cubano con bastante frecuencia. En especial se han valorado dos fuentes de información una de carácter internacional y otra de carácter nacional.

- ◆ Global Wave Statistics. (1988).

- ◆ Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero. Informe Final. (1994).

2. Definición de las secciones a estudiar.

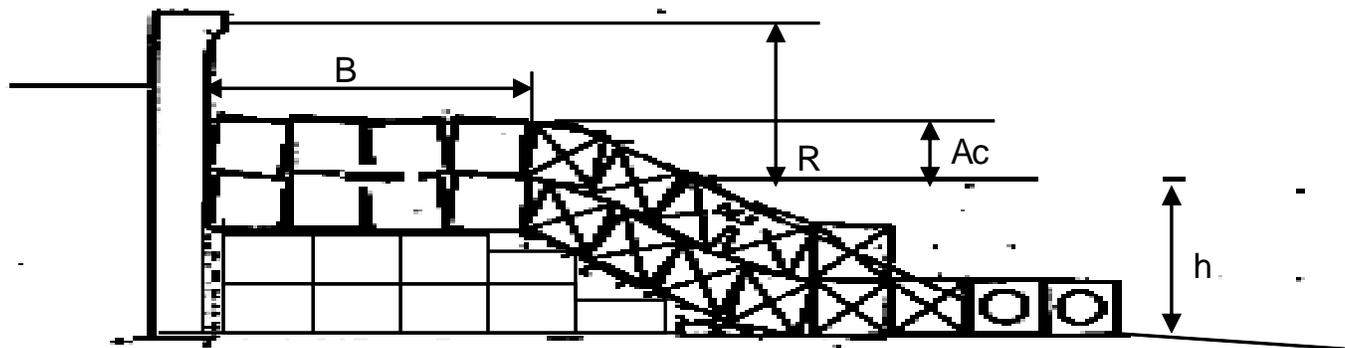
Las alternativas que se estudian se describen de la siguiente manera.

Variante I: Dique mixto conformado por un muro de simple curvatura y una berma de elementos sueltos artificiales, en este caso cubos de hormigón, colocados al azar.

Variante II: Dique mixto conformado por un muro de simple curvatura y una berma monolítica de hormigón, esta estructura presenta el atractivo de además de su principal función que es la defensa de la zona costera, también tiene un uso recreativo durante la época de calma, ya que puede ser usada por los bañistas o como paseo para transeúntes.

En los esquemas que a continuación se presentan (Figura 2) se muestran las secciones:

Variante I



Variante II

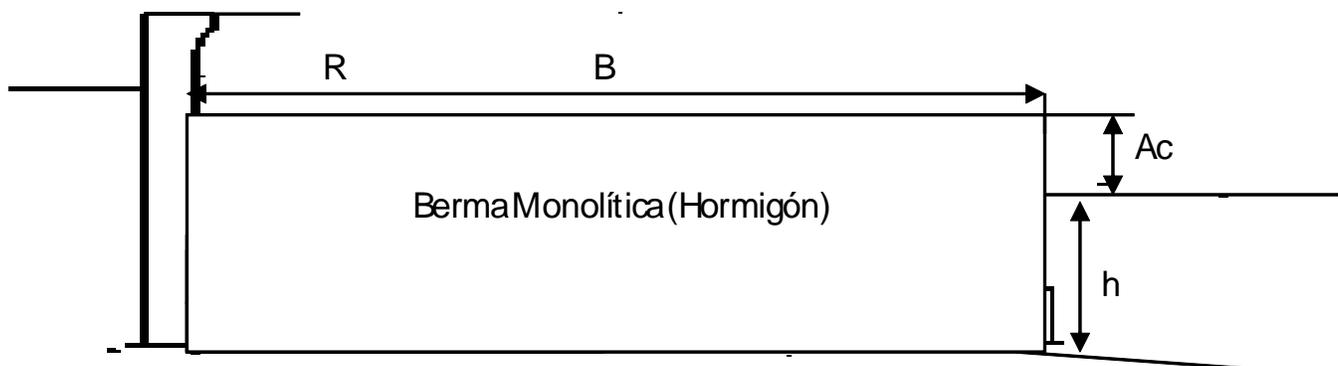


Figura 2. Variantes I y II

Definición de las variables que intervienen en el estudio.

En el fenómeno de sobrepaso intervienen un alto número de variables, por lo que se hace necesario definir dentro del amplio rango de variables involucradas en el fenómeno de rebase aquellas que tomarán parte en el estudio, se excluyen por considerarse de menor importancia, manteniendo constantes constante la pendiente del fondo marino, tomando una representativa del tramo comprendido desde el Complejo Sierra Maestra hasta la zona de Marina Hemingway del litoral norte de la Ciudad de la Habana, su valor es 1:20.

Otro parámetro que se mantiene constante, es la altura de la berma respecto al nivel de aguas tranquilas (A_c), su valor será cero, ya que se hace coincidir la parte superior de la berma con el nivel de agua.

Las variables seleccionadas son:

Altura de ola (H).

Período de la ola (T).

Altura de coronación del muro (R).

Longitud de la berma (B).

Profundidad al pie de la estructura (h).

Los rangos de las variables a nivel de laboratorio, así como los niveles de cada una de ellas son presentados a continuación, se destaca la amplitud del rango de la variable adimensional pendiente de la ola (H/L) siendo el mismo 0,0066 - 0,051; donde están enmarcadas las condiciones de oleaje del Mar Caribe noroccidental.

Los bloques de hormigón utilizados en las bermas de elementos sueltos son de 0,08 metros de longitud, garantizando suficiente peso para no ser movidos por el oleaje generado. El requerimiento que debe cumplir el experimento en este sentido, es el referido al Número de Reynolds el cual debe ser superior a 3×10^4 para garantizar la no magnificación de las fuerzas viscosas en el interior de las cavidades que se forman en el interior de la berma, lo que traería consigo que no se garantice un flujo turbulento, como ocurre en la realidad física. El resultado de este cálculo para estas pruebas es de $3,7 \times 10^4$ en la situación más favorable a las fuerzas viscosas, cálculo realizado con temperatura del agua de 20 grados centígrados. (Tabla 1).

Tabla 1. Variables que intervienen

Diques mixtos con berma de elementos sueltos		
<i>Variables absolutas</i>		
<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>niveles</i>
H (m)	0,05 – 0,23	10
T (seg.)	1,7 y 2,2	2
R (m)	0,06 – 0,13	3
B(m)	0,33 – 0,67	3
h(m)	0,10 y 0,20	2
Ac(m)	0	1
<i>Parámetros adimensionales</i>		
<i>Parámetros</i>	<i>Rango</i>	<i>Niveles</i>
H/L	0,0066 – 0,051	20
h/H	0,43 – 4,0	20
R/H	0,26 – 2,6	30

Diques mixtos con berma monolítica " Paseo Marítimo"

<i>Variables absolutas</i>		
<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>niveles</i>
H (m)	0,05 – 0,23	10
T (seg.)	1,7 y 2,2	2
R (m)	0,05 – 0,10	3
B(m)	0,16 – 0,50	3
h(m)	0,10	1
Ac(m)	0	1
<i>Parámetros adimensionales</i>		
<i>Parámetros</i>	<i>Rango</i>	<i>Niveles</i>
H/L	0,0066 – 0,051	20
h/H	0,43 – 2	20
R/H	0,21 – 2	30

Como pasos necesarios para llevar a cabo el experimento se concibieron y desarrollaron las siguientes tareas:

1. Diseño y construcción en el canal de oleaje de la instalación experimental.
2. Calibración del oleaje de ensayo.
3. Desarrollo de una metodología de ensayo.
4. Diseño y construcción de un sistema para la medición de los rebases producto del oleaje generado.

Diseño del experimento

Se presenta el total de pruebas a realizar y los rangos de las variables, se destaca un total de 18 pruebas, lo que representa, de acuerdo con el número de escalones de oleaje generados (5 escalones) y los tres niveles de la variable longitud de berma, un total de 270 gastos promedios, los cuales son obtenidos para cada altura de ola a partir de cinco repeticiones como mínimo de gastos de sobrepaso medidos, resultando un total de **1350 mediciones puntuales**. (Tabla 2).

Tabla 2. Representación del número de pruebas y las diferentes fases del experimento.

Número de las pruebas	Fase	Variante estudiada	profundidad (m)	Período Tp (seg.)	Hs (m)	Longitud de la Berma (m)	Altura de coronación R (m)
1	I	dique mixto	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,06
2		berma de bloques	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,08
3		bloques	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,10
4	II	dique mixto	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,06
5		berma de bloques	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,08
6		bloques	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,10
7	III	dique mixto	0,20	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,06
8		berma de bloques	0,20	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,10
9		bloques	0,20	1,7	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,13
10	IV	dique mixto	0,20	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,06
11		berma de bloques	0,20	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,10
12		bloques	0,20	2,2	0,05 – 0,23	0,33 – 0,67	0,13
13	V	dique mixto	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,05
14		berma monolítica	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,07
15		monolítica	0,10	1,7	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,10
16	VI	dique mixto	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,05
17		berma monolítica	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,07
18		monolítica	0,10	2,2	0,05 – 0,23	0,16 – 0,50	0,10

Desarrollo de un modelo empírico de estimación de la Tasa de Rebase Promedio.

La obtención de los coeficientes empíricos que permitan representar de forma más precisa las características de las estructuras estudiadas y las condiciones físicas es una vía mediante la cual se generaliza y amplia las posibilidades de los modelos existentes.

Siguiendo esta idea en el campo científico, se aplica el modelo obtenido por Córdova (1999).

$$Qo = A(R')^{-B} \quad R' = R/Hs$$

El Factor de Descarga (Córdova 1999) se define como:

$$Qo = \frac{qT_p}{L_p^2 \sqrt{\left(\frac{h}{Hos}\right)^3}}$$

donde:

Qo: Factor de Descarga (adim.).

q: Tasa de Rebase Promedio Específica (m3/sm).

Tp: Período Pico (seg.)
 Lp: Longitud de onda (m)
 h: Profundidad al pie de la estructura (m).
 Hos: Altura de ola significativa en aguas profundas (m).

En las siguientes tablas 3 y 4 se presentan de forma resumida los coeficientes de rebase A y B del modelo para cada rango de longitud de berma relativa (B/L), así como los coeficientes de determinación.

Tabla 3. Diques Mixtos berma de elementos sueltos (bloques de hormigón).

Long. berma relativa (B/L)	Coficiente A	Coficiente B	C. de determinación r ²
0,040 – 0,070	0,0023	4,5889	0,81
0,070 – 0,100	0,001	4,5346	0,87
0,100 – 0,150	0,0007	4,6950	0,79

Tabla 4. Diques Mixtos bermas monolíticas. Paseos Marítimos.

Long. berma relativa (B/L)	Coficiente A	Coficiente B	C. de determinación r ²
0,023 – 0,040	0,0032	3,8833	0,84
0,040 – 0,070	0,0003	5,4181	0,90
0,070 – 0,100	0,0062	2,7226	0,89

Mediante el análisis estadístico de correlación lineal, entre los resultados calculados por el modelo de estimación y los medidos en el laboratorio se lleva a cabo la comprobación de la bondad de ajuste de los mismos. Este proceso se realiza en todos los casos. Las tablas 5 y 6 que se muestran a continuación sumen los coeficientes de correlación. (r) para cada modelo presentado.

Tabla 5. Diques Mixtos berma de elementos sueltos (bloques de hormigón).

Long. berma relativa (B/L)	Coficiente de Correlación (r)
0,040 – 0,070	0,88
0,070 – 0,100	0,86
0,100 – 0,150	0,89

Tabla 6. Diques Mixtos bermas monolíticas. Paseos Marítimos.

Long. berma relativa (B/L)	Coficiente de Correlación (r)
0,040 – 0,070	0,87
0,070 – 0,100	0,89
0,100 – 0,150	0,97

Como se puede observar los coeficientes de correlación en el caso de los diques mixtos conformados por elementos artificiales están entre 0,86 y 0,89. Esto significa que la relación que existe entre los valores calculados y los resultados experimentales está en el orden del 87 por ciento, lo que puede evaluarse de relación aceptable, En el caso de los Paseos Marítimos los valores de coeficientes de correlación están entre 0,87 y 0,97; lo que manifiesta una muy buena relación entre lo medido y calculado, estas diferencias se explican en la mayor complejidad del fenómeno, en la interacción estructura - oleaje en los diques conformados por elementos sueltos.

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTIMAR LA TASA DE REBASE DE OLEAJE IRREGULAR.

VALIDACIÓN

En la literatura internacional se señala que después de realizar un estudio utilizando la técnica de generación de oleaje regular, se hace necesario para realizar una estimación correcta de la Tasa de rebase de un estado del mar real utilizar la " Teoría de Equivalencia ", la cual plantea que la distribución de los rebases de un oleaje real sobre una estructura puede ser calculado asignando individualmente a cada componente (combinación H; T) del oleaje aleatorio, el valor de rebase que correspondería a un tren de olas regulares de la misma altura y período.

Goda en 1985, simplifica esta definición, al señalar que todos los períodos del oleaje son equivalentes a un período representativo del registro, como podría ser el período significativo o pico, basando su afirmación en que los rebases de diseño se deben a un número reducido de olas de altura considerable dentro de la tormenta o temporal.

A continuación se presenta una metodología sencilla que permite estimar con buena precisión la Tasa de Rebase producida por un oleaje aleatorio a partir del modelo obtenido en esta investigación. También la posibilidad de definir los diferentes parámetros geométricos que componen los diques mixtos aquí estudiados, a partir de definir una Tasa de Rebase admisible, tomando como criterio la protección de la estructura o el uso del área protegida.

La Información necesaria para realizar la estimación es la siguiente:

1. Respecto a la estructura:
 - ◆ Altura de Coronación R (m).
 - ◆ Longitud de la berma B (m).
2. Respecto al entorno:
 - ◆ Profundidad al pie de la estructura h (m).
3. Respecto al clima marítimo.
 - ◆ Registro de oleaje conocido real, dígame medido en el mar por Instrumentos.
 - ◆ Registro de oleaje generado a partir de algunos de los espectros conocidos.
 - ◆ Características estadísticas del registro de oleaje.

Metodología.

1. Calcular la longitud de berma relativa (B/L).
2. Seleccionar los coeficientes empíricos del modelo, que corresponden al valor de longitud de berma relativa calculado.
3. Calcular los valores de altura de corona relativa, según Goda (R^*), para cada una de las alturas de olas que componen el registro de oleaje aleatorio.
4. Calcular el Factor de Descarga, según Córdova 1999 sustituyendo el parámetro adimensional de altura de corona relativa R^* y los coeficientes en el modelo de tipo potencial.
5. Calcular la Tasa de Rebase Absoluta (q), para cada componente del registro.
6. Calcular la probabilidad de ocurrencia de cada ola del registro, utilizando la Distribución de Rayleigh.

$$p(H)dH = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{H_i}{H_s}\right) \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{H_i}{H_s}\right)^2\right] dH$$

7. Realizar el producto de la probabilidad con el gasto de rebase de cada ola, sumándose todos los productos, obteniendo la Tasa de rebase promedio del oleaje aleatorio.

Para realizar la verificación del modelo propuesto, que se traduce en conocer cuán capaz es el mismo de representar un resultado obtenido con oleaje irregular, como representación de un estado real del mar, y mostrar la metodología propuesta para estimar la Tasa de rebase del oleaje aleatorio a partir de un modelo empírico obtenido con oleaje regular. Se toman los resultados de los ensayos ejecutados en el laboratorio de Modelos físicos Costeros y Marítimos con oleaje irregular del Centro de Estudios de Puertos y Costas de España por un grupo de especialistas cubanos, sobre la propuesta de defensa contra inundaciones en punto singular del Malecón de la Ciudad de la Habana.

La propuesta consiste en un dique mixto conformado por un muro de doble curvatura y una berma conformada por elementos artificiales (bloques de hormigón), colocados al azar.

- Las características de la sección son las siguientes:
- Altura de coronación = 4,20 m y 4,70 m
 - Longitud de la berma = 15,0 m.
 - Profundidad al pie de estructura = 6,0 m.

En la tabla 7 que se muestra a continuación se presentan los resultados de la aplicación de la metodología mediante una hoja de cálculo EXCEL, aplicando el modelo obtenido. La tabla 8 siguiente muestra el grado de similitud entre los valores obtenidos con oleaje irregular en el CEPYC de España y los obtenidos con el método aquí propuesto.

Tabla 8. Grado de similitud

Hs (m)	q (l/sm) Irregular	q (l/sm) regular T. E.
4.16	4.55	4.69
4.63	7.05	7.28
5.91	23.5	18.23
6.37	29.56	25.18

El coeficiente de correlación entre los valores obtenidos con oleaje irregular y regular es de 0,9756 (Figura 3).

Comparación entre resultados obtenidos con oleaje irregular y resultados con oleaje regular aplicando la Teoría de Equivalencia

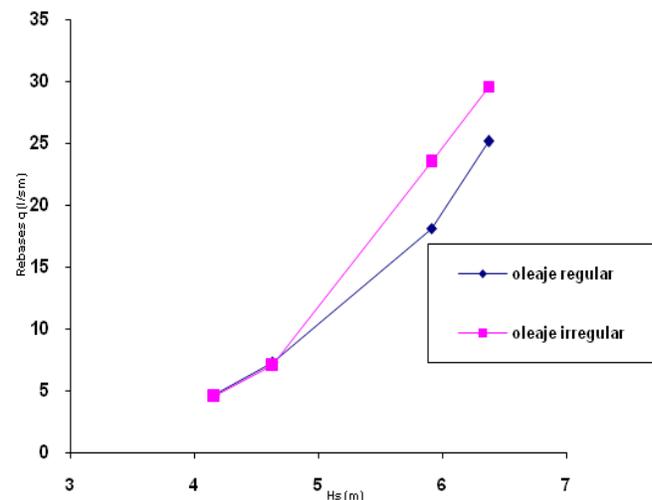


Figura 3. Comparación de resultados

Tabla 7. Resultados de la aplicación

Altura de ola significativa. ($H_m = 0,625^* H_s$)		Tasa de Reb. Abs. $10^{-3} m^3/m.s$													
(m)	Altura de olas de olas	Altura de Corona Relativa	Factor de Descarga	Tasa de Rebase Abs.	Probab. Ocurrec.	Probab. ocurrec	Probab. ocurrec.	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)		
	(m)	$F^*(adim.)$	Adim.	($10^{-3} m^3/m.s$)	Hs=4,16m	Hs=4,63m	Hs=5,91 m	Hs=6,37 m	2.E-03	2.E-03	2.E-03	2.E-03	1.E-03		
4.16	4.63	5.91	6.37	0.50	8.40	6.4E-08	0.01	0.29	0.27	0.21	0.19	4.16	4.63	5.91	6.37
4.16	4.63	5.91	6.37	1.50	2.80	9.4E-06	0.18	0.70	0.66	0.56	0.53	0.13	0.12	0.10	0.10
4.16	4.63	5.91	6.37	2.50	1.68	9.5E-05	0.86	0.73	0.76	0.74	0.72	0.63	0.65	0.64	0.62
4.16	4.63	5.91	6.37	3.50	1.20	4.4E-04	2.39	0.51	0.60	0.74	0.75	1.22	1.44	1.76	1.80
4.16	4.63	5.91	6.37	4.50	0.93	1.4E-03	5.12	0.26	0.37	0.60	0.65	1.32	1.87	3.06	3.33
4.16	4.63	5.91	6.37	5.50	0.76	3.4E-03	9.42	0.10	0.17	0.41	0.48	0.93	1.65	3.86	4.57
4.16	4.63	5.91	6.37	6.50	0.65	7.2E-03	15.64	0.03	0.07	0.24	0.32	0.45	1.05	3.80	4.94
	4.63	5.91	6.37	7.50	0.56	1.4E-02	24.14		0.02	0.13	0.18		0.50	3.02	4.40
		5.91	6.37	8.50	0.49	2.4E-02	35.29			0.06	0.09			1.99	3.30
		6.37		9.50	0.44	4.0E-02	49.46			0.02	0.04				2.12
											suma	4.69	7.28	18.23	25.18

CONCLUSIONES

1. Se obtienen los nuevos coeficientes para el modelo empírico de estimación propuestos en el trabajo para los dos tipos de diques estudiados en función de la longitud de berma relativa, señalando que los coeficientes de determinación (r^2) están entre 0,81 y 0,90 y los de correlación (r) entre 0,86 y 0,97, lo que permite afirmar que la calidad del ajuste es buena y el modelo explica de forma satisfactoria el fenómeno para las condiciones estudiadas.

2. La Metodología propuesta para la Estimación de la Tasa de Rebase Promedio de oleaje aleatorio a partir de resultados experimentales con oleaje regular es válida, lo cual es corroborado al comparar los resultados de la misma con un caso real, obtenido mediante la modelación con oleaje irregular.

3. Se confirma la posibilidad de la aplicación de la Teoría de Equivalencia como herramienta para la predicción del rebase para oleaje real.

REFERENCIAS

1. CEDEX. "Manual de Normalización de Ensayos." CEPYC. Madrid. 1989.
2. Cordova L. "Estudio sobre Rebase en el tramo más crítico del Malecón de la Habana. Variantes para su disminución en magnitud y efectos negativos." Tesis de Maestría. 1996.
3. Córdova L. y Fontova M. "Estudio de variantes de protección contra sobrepasos del tramo calle 12 - calle J, del Malecón Habanero. Reporte de Investigación. 1994.
4. Córdova L. "Estudio del fenómeno de Rebase en obras de defensa de costas para las condiciones de Cuba. Tesis presentada para optar por el grado científico de doctor en ciencias técnicas. 1999.
5. Owen W. y Steele A. "Effectiveness of recurved wave return walls." HR Wallingford. Report No SR261. 1991.

Recibido: abril del 2010
Aprobado: mayo del 2010