

DEFLECTORES DE OLAJE PARA ROMPEOLAS SUPERFICIALES REBASABLES

• Jaime Roberto Ruiz-y-Zurvia-Flores • Lucio Fragoso-Sandoval •
Instituto Politécnico Nacional, México

Resumen

Dentro de la infraestructura portuaria mexicana, algunas obras de protección (rompeolas y escolleras) presentan en la actualidad daños de consideración en su estructura, así como cotas de coronamiento bajo, motivo por el cual tienen problemas de rebase del oleaje en periodos de temporales. Una solución al problema de rebase del oleaje sobre los rompeolas son los deflectores de oleaje construidos de concreto. Dentro de los criterios empleados en el diseño de deflectores para rompeolas superficiales es pertinente su validación, a fin de obtener diseños adecuados para la función a desarrollar por estas estructuras bajo las condiciones de oleaje a que serán sometidas, siendo lo anterior el objeto de esta investigación. En este trabajo se describe el desarrollo de un estudio experimental para determinar el dimensionamiento y la geometría más adecuada de un deflector de oleaje, que fue realizado a través de un modelo físico en el que se probaron cuatro diferentes tipos de deflectores adosados al coronamiento de un rompeolas de tipo trapecial constituido por enrocamiento. El estudio se efectuó en un canal de oleaje angosto, servido de un sistema generador de oleaje regular e irregular hidráulico controlado por computadora. Este último se utilizó para generar y reproducir las condiciones de oleaje irregular requeridas en los ensayos. Para medir y procesar los datos de oleaje del modelo, se dispuso de un ológrafo con sensores de oleaje de tipo resistivo, controlado a través de un sistema computarizado. Los resultados muestran que la geometría (curvatura) del deflector juega un papel fundamental en la disminución de la transmisión del oleaje por rebase, y que el deflector 4 funcionó mejor que los otros, al reducirse más con éste las descargas de rebase de agua. Por otro lado, se utilizaron tres fórmulas del estado del arte para calcular las descargas de rebase del oleaje sobre el rompeolas con deflector: la de Franco, Allsop y EurOtop; al comparar sus datos con los obtenidos experimentalmente, la más apropiada fue la fórmula de Allsop.

Palabras clave: rompeolas superficial, deflector, canal de olas, experimentos, oleaje irregular.

Introducción

Dentro de la infraestructura portuaria, las obras de protección (rompeolas y escolleras) son elementos fundamentales para la adecuada operación de los puertos, motivo por el cual es de gran importancia tener un conocimiento adecuado de su comportamiento bajo la acción del oleaje. El oleaje presenta varios efectos hidrodinámicos sobre estas estructuras, entre los que se encuentra la transmisión del oleaje por rebase (*overtopping*), el cual es fundamental

considerar para obtener un diseño adecuado de la estructura ante las condiciones de oleaje a que se someterá.

Por medio de un análisis realizado a las obras de protección de los principales puertos del país, se pudieron detectar daños y bajas cotas de coronamiento de algunos de ellos (puertos de Ensenada, Salina Cruz, Manzanillo, etcétera); con base en esto, y con apoyo en información relativa a problemas de rebase del oleaje en condiciones de tormenta, lo cual no siempre es aceptable, se decidió realizar un estudio en modelo fí-

sico reducido de un rompeolas superficial permeable, con diferentes deflectores de oleaje adosados a su coronamiento, en el canal de olas angosto con generador de oleaje regular e irregular de tipo hidráulico controlado por computadora con que cuenta el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional. El equipo genera las señales de oleaje irregular por medio de dos métodos: ruido blanco filtrado y la transformada rápida de Fourier (FFT), para ocho diferentes tipos de espectros de oleaje. En el estudio se usaron la transformada rápida de Fourier y el espectro de Pierson-Moskowitz. Se contó con un ológrafo y sensores de oleaje tipo resistivo controlados por computadora para analizar los registros de oleaje obtenidos durante los ensayos, así como con un depósito para aforar las descargas específicas, producto del rebase del oleaje.

Metodología

Oleaje incidente

Con la información de alturas, y periodos de oleaje normal y de tormenta que corresponden a olas generadas en mar abierto, se realizó una propagación de dicho oleaje hacia las profundidades a reproducir en el modelo, a fin de determinar las características con que incidiría sobre el rompeolas con los deflectores a probar, para lo cual se utilizó el método gráfico de frentes de ola (U.S. Army Corps of Engineers, 1984).

De este modo se evaluaron las características del oleaje para una profundidad de 20 m (para su simulación en el modelo), a fin de generar las señales de oleaje irregular que deberían reproducirse en los ensayos (Beresford, 1994).

Niveles del mar

Para el ensayo se consideraron oleaje normal y de tormenta, por lo que en las condiciones

de oleaje de tormenta al nivel medio del mar a reproducir se le agregó una sobre elevación del nivel del mar de 1 m, a fin de semejar situaciones de tormenta.

Batimetría frente al rompeolas

Debido a las características experimentales del proyecto y tomando en cuenta las características de las pendientes de playas en los litorales mexicanos y las dimensiones físicas del canal, se decidió reproducir pendientes en el fondo del canal de 1:50 (7.60 m) y de 1:100 (7.88 m) para el perfil playero, donde se desplantó la sección de rompeolas, así como los deflectores a ensayar.

Sección del rompeolas y los deflectores

Con base en información de otros estudios, se propuso una sección tipo de rompeolas superficial de sección trapecial con talud 2:1 lado mar y 1.5:1 lado puerto, constituido por enrocamiento con un peso de los elementos de coraza de 12 toneladas, y se propusieron cuatro diferentes secciones de los deflectores, mismas que se fueron modificando de acuerdo con los resultados de los ensayos.

Análisis teórico

Fórmula de Hudson

La fórmula de Hudson (Bruun, 1985) se ha venido empleando hasta la fecha en el diseño de rompeolas superficiales a talud; en este caso se utilizó para dimensionar la sección de rompeolas a probar en el modelo. Se suministró a la fórmula con datos de altura de ola de diseño, talud, peso específico del material de enrocamiento y del agua de mar, con los correspondientes coeficientes de estabilidad (K_D) establecidos por el autor para cada una de las condiciones de diseño de las estructuras.

La fórmula es la siguiente:

$$W = \frac{\gamma_s H_d^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

Donde:

W = peso de elementos de coraza en toneladas (Bruun, 1985).

γ_s = peso específico de la roca, en toneladas por metro cúbico.

H_d = altura de ola de diseño al pie de la estructura, en metros.

K_D = coeficiente de estabilidad, adimensional.

S_r = densidad relativa de la roca, adimensional.

α = ángulo del talud de la estructura medido desde la horizontal, en grados.

Fórmulas para cálculo del rebase del oleaje (overtopping)

Para el cálculo del rebase del oleaje sobre el rompeolas con deflectores se utilizaron tres ecuaciones (Burcharth y Hughes, 2002; EurOtop, 2007):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m_0}^3}} = 0.2 \exp\left(-4.30 \frac{R_c}{H_{m_0}}\right)$$

Ec. Franco (1994) (2)

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m_0}^3}} = 0.05 \exp\left(-2.78 \frac{R_c}{H_{m_0}}\right)$$

Ec. Allsop (1995) (3)

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m_0}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.60 \frac{R_c}{H_{m_0}}\right)$$

Ec. EurOtop (2007) (4)

Donde:

q = descarga promedio del rebase de ola, en $m^3/s.m.$

g = la aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

H_{m_0} = altura de ola significativa obtenida del tren de olas, en metros.

R_c = elevación de la estructura por encima del nivel del agua (*freeboard*), en metros.

Modelo físico hidráulico

Selección de la escala del modelo

Para que un modelo físico hidráulico reproduzca los fenómenos naturales con una fidelidad aceptable, es necesario utilizar una escala adecuada en la elaboración del mismo (Hughes, 1995). Se deben considerar las fuerzas que predominan en el fenómeno a estudiar y que se simularán en el modelo; en este caso, las fuerzas más importantes resultan ser las gravitacionales, por lo tanto, el criterio de similitud considerado entre prototipo y modelo es el que relaciona a las fuerzas de inercia y las gravitacionales, esto es, el criterio de Froude.

Con base en lo anterior, y tomando en cuenta las características de los oleajes y niveles del mar a reproducir en el modelo, así como las dimensiones del canal y los requerimientos del generador de oleaje, se optó por una escala de líneas de 1:40, para un modelo de fondo fijo y sin distorsión (Ruiz y Sato, 1992).

En función de la ley de similitud de Froude y de la escala de líneas propuesta, se obtienen las siguientes escalas de utilidad en el estudio:

Escala de líneas horizontal y vertical	$E_L = 40.00$
Escala de longitudes de ola	$E_L = 40.00$
Escala de alturas de ola	$E_L = 40.00$
Escala de periodos de ola	$E_T = 6.32$
Escala de celeridades de ola	$E_C = 6.32$
Escala de rebases de oleaje	$E_O = 252.98$
Escala de fuerzas	$E_F = 64\ 000.00$
Escala de pesos	$E_W = 64\ 000.00$

Arreglo del modelo

Los ensayos se realizaron en un canal de oleaje angosto, con dimensiones de 24.47 m de longitud, 0.90 m de altura y 0.67 m de ancho; mismo que cuenta con un generador de oleaje regular e irregular en uno de sus extremos, dotado de una paleta generadora de oleaje de movimiento traslacional accionada mediante un pistón hidráulico, cuyo control se efectúa por medios electrónicos (computadora). En el

extremo contrario se tiene un amortiguador especialmente diseñado para absorber la energía del oleaje, el cual limita la ocurrencia de reflexiones.

En el interior del canal se representó el perfil del fondo marino (con un firme de concreto), en la zona del rompeolas, en una longitud de 7.60 m, con pendiente de 1:50 y un tramo de 7.88 m de transición, con pendiente 1:100, para ligar el fondo del canal con la pendiente del fondo marino. Con esta disposición se logró un tirante de agua frente al generador de olas de 0.50 m (20 m en prototipo) y un tirante al pie del rompeolas de 0.30 m (12 m en prototipo), referido al nivel medio del mar, tirante suficiente para un funcionamiento adecuado del generador de oleaje (ver figura 1).

Construcción del modelo

Definida la disposición del modelo, se procedió a la construcción, para lo cual se realizaron rellenos compactados y firmes de concreto, a fin de obtener las pendientes del perfil marino a reproducir. Ejecutados estos trabajos y con base en la escala del modelo, se calcularon los pesos de los materiales de enrocamiento y el volumen

del material necesario para el rompeolas base. A continuación se propuso la geometría del primer deflector (U.S. Army Corps of Engineers, 1984) y se fueron proponiendo modificaciones en los tres siguientes con base en los resultados obtenidos en los ensayos del deflector anterior (ver figuras 2 a 5).

Instrumentación

Para la medición del oleaje reproducido en los ensayos se utilizaron dos sensores de oleaje de tipo resistivo: uno se colocó contiguo al generador y el otro al pie del rompeolas (figura 1). También se calculó la reflexión del oleaje para cada una de las señales de oleaje reproducidas en los ensayos, para lo cual se aplicó una metodología utilizando tres sensores de oleaje (Mansard y Funke, 1980), y cuyas separaciones se muestran en el cuadro 1.

Las señales analógicas captadas por los sensores de oleaje se amplifican a través de un ológrafo y se envían a un convertidor de señales analógico/digital con que cuenta el equipo de cómputo, para que una vez digitalizadas sean procesadas por un programa del propio sistema.

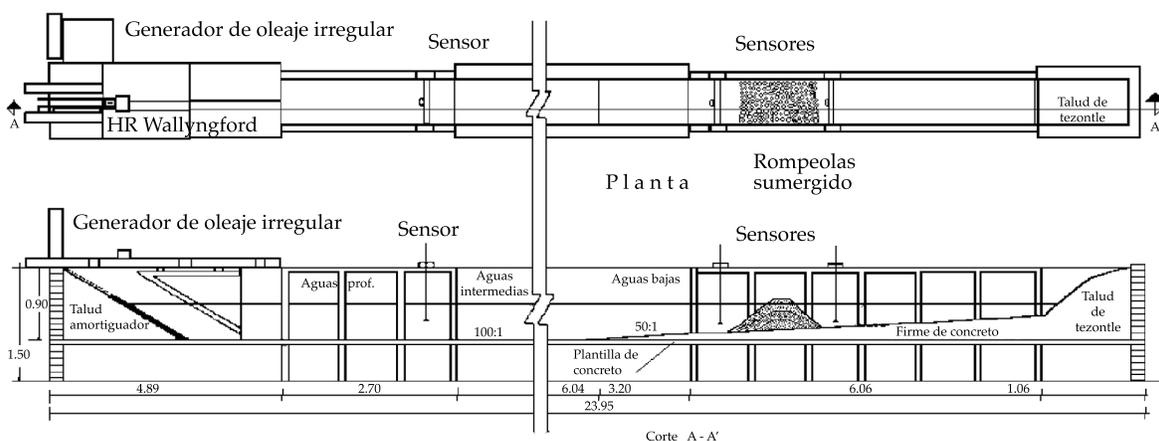


Figura 1. Canal angosto y generador de oleaje irregular.

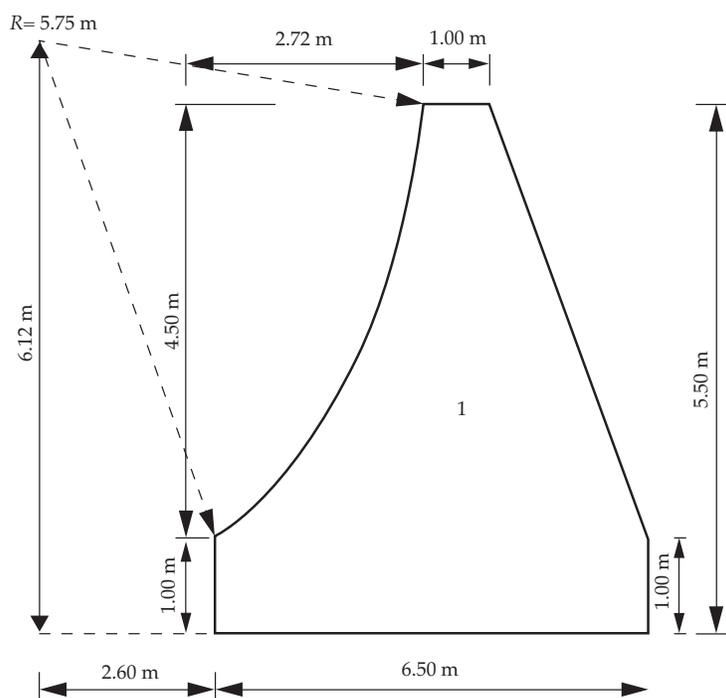


Figura 2. Diseño deflector número 1.

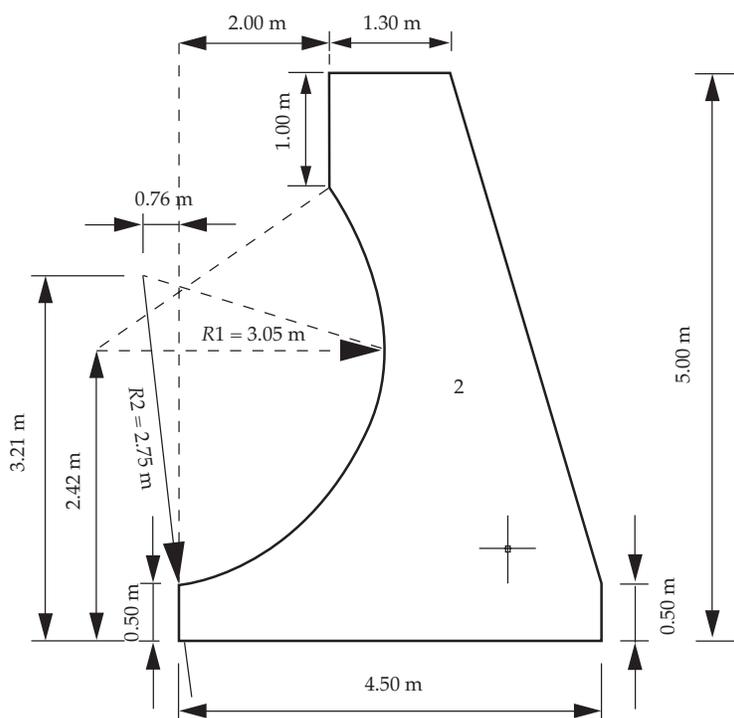


Figura 3. Diseño deflector número 2.

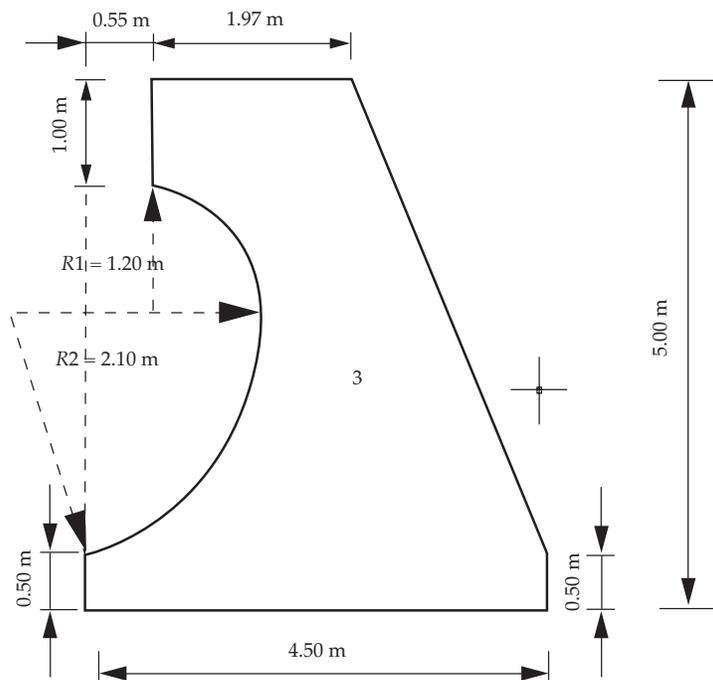


Figura 4. Diseño deflector número 3.

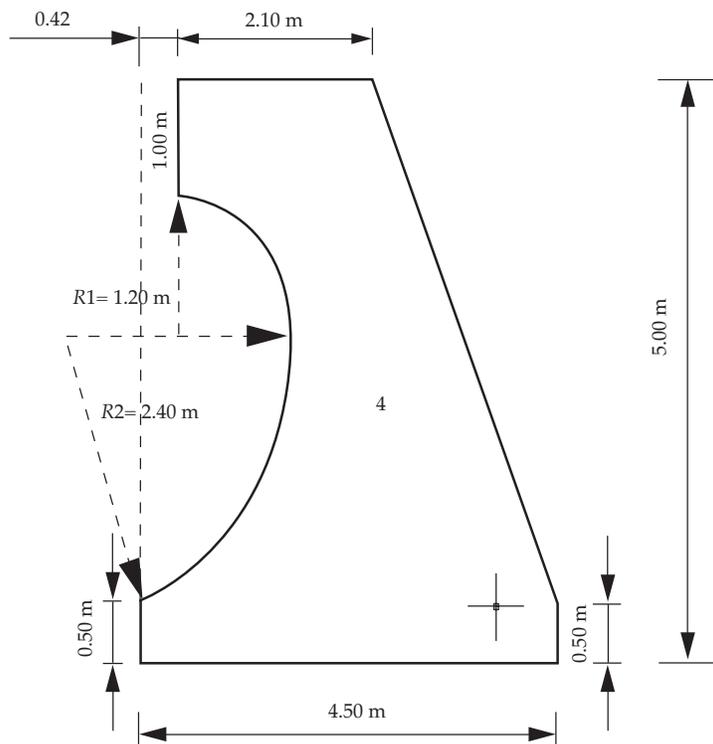


Figura 5. Diseño deflector número 4.

Cuadro 1. Separación de sensores de oleaje.

Periodo de oleaje promedio (seg)	Espaciamiento entre sensores (m)
6.32	Para X2 [1:3] = 0.41 Para X1 [1:2] = 0.16 Para X3 [2:3] = 0.25
6.95	Para X2 [1:3] = 0.45 Para X1 [1:2] = 0.19 Para X3 [2:3] = 0.26
7.59	Para X2 [1:3] = 0.50 Para X1 [1:2] = 0.22 Para X3 [2:3] = 0.28
8.22	Para X2 [1:3] = 0.55 Para X1 [1:2] = 0.26 Para X3 [2:3] = 0.29
8.85	Para X2 [1:3] = 0.59 Para X1 [1:2] = 0.30 Para X3 [2:3] = 0.29
9.49	Para X2 [1:3] = 0.64 Para X1 [1:2] = 0.35 Para X3 [2:3] = 0.29
10.12	Para X2 [1:3] = 0.69 Para X1 [1:2] = 0.40 Para X3 [2:3] = 0.29
10.75	Para X2 [1:3] = 0.73 Para X1 [1:2] = 0.45 Para X3 [2:3] = 0.28
11.38	Para X2 [1:3] = 0.78 Para X1 [1:2] = 0.50 Para X3 [2:3] = 0.28
12.02	Para X2 [1:3] = 0.82 Para X1 [1:2] = 0.55 Para X3 [2:3] = 0.27
12.65	Para X2 [1:3] = 0.87 Para X1 [1:2] = 0.61 Para X3 [2:3] = 0.26

Para compensar la reflexión del oleaje en el rompeolas y la paleta del generador, se utilizó el siguiente procedimiento:

- Con el HR Wallinford Dynamic Wave Absorption, que trabaja a través de un arreglo de tres sensores de oleaje montados cerca del generador de oleaje, se realiza un análisis de la reflexión del oleaje en tiempo real (FFT), transmitiendo compensaciones

a las señales de oleaje reproducidas por el generador.

Procedimiento experimental

Programa de ensayos

Las condiciones de oleaje para los ensayos del rompeolas tipo sin deflector y del rompeolas tipo con cada uno de los cuatro deflectores se presentan en el cuadro 2.

Condiciones y procedimiento de los ensayos

Condiciones de los ensayos

- En todos los ensayos se utilizó el método de FFT (transformada rápida de Fourier) y el espectro frecuencial de Pierson-Moskowitz para generar las señales de oleaje a reproducir en los ensayos; este último es uno de los ocho espectros de oleaje con que cuenta el equipo.
- En todos los ensayos se midió la energía del oleaje incidente y reflejado con tres sensores de oleaje (análisis de reflexión del oleaje).
- En todos los ensayos el oleaje se midió en dos puntos diferentes: cerca del generador y al pie del rompeolas.

Procedimiento de los ensayos

1. Estimación de la reflexión del oleaje (Mansard y Funke, 1980):
 - Se colocaron tres sensores de oleaje a una distancia mayor o igual a una longitud de ola tanto del generador como del rompeolas y separados entre sí de acuerdo con el periodo del oleaje utilizado en cada ensayo (ver el cuadro 1).
 - Se generó oleaje y se midió la energía del oleaje incidente y reflejado en cada uno de los tres sensores.
 - Se calculó el coeficiente de reflexión promediando las energías del oleaje incidente y reflejado, evaluados a partir de los datos obtenidos por los tres sensores.

Cuadro 2. Programa de ensayos.

Número de señal	$T_{\text{prototipo}}$ (seg)	T_{modelo} (seg)	$H_{\text{prototipo}}$ (m)	H_{modelo} (cm)
1	6.32	1.00	1.59	3.97
2	6.95	1.10	1.92	4.79
3	7.59	1.20	2.29	5.72
4	8.22	1.30	2.68	6.70
5	8.85	1.40	3.11	7.77
6	9.49	1.50	3.57	8.94
7	10.12	1.60	4.07	10.17
8	10.75	1.70	4.59	11.48
9	11.38	1.80	5.14	12.85
10	12.02	1.90	5.76	14.41
11	12.65	2.00	6.36	15.91

2. Medición del rebase del oleaje sobre el rompeolas con diferentes deflectores:

- Se reprodujo oleaje en cada ensayo en tiempo suficiente como para tener una incidencia de 200 olas sobre la estructura.
- Se midieron las descargas específicas de agua que rebasaron el deflector en cuestión con respecto al tiempo de cada ensayo en un depósito previamente aforado (ver figura 6).

Ensayos

Presentación de la información experimental

Coefficientes de reflexión

Los coeficientes de reflexión obtenidos en los ensayos son aceptables, tal y como lo marca la bibliografía especializada para este tipo de estructuras, la cual establece una reflexión no mayor al 30%; en el estudio se obtuvo del orden de 22%.

Resultados

Los resultados de los ensayos para el rompeolas sin deflector y con los cuatro deflectores fueron los siguientes:

1. En el caso del rompeolas sin deflector (cuadro 3), se presentó un gran número de

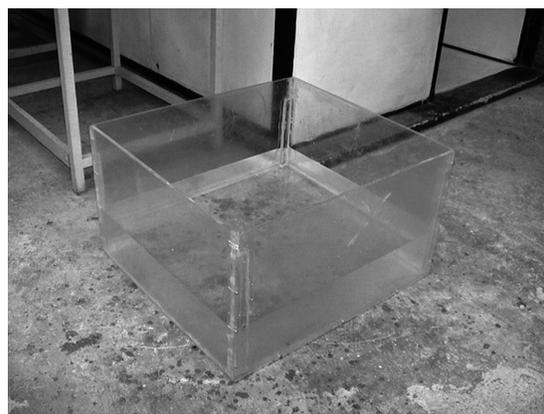


Figura 6. Depósito para medición de las descargas de rebase.



Figura 7. Ensayo 11, serie 2, deflector número 1.



Figura 8. Ensayo 4, serie 3, deflector número 2.



Figura 9. Ensayo 11, serie 4, deflector número 3.

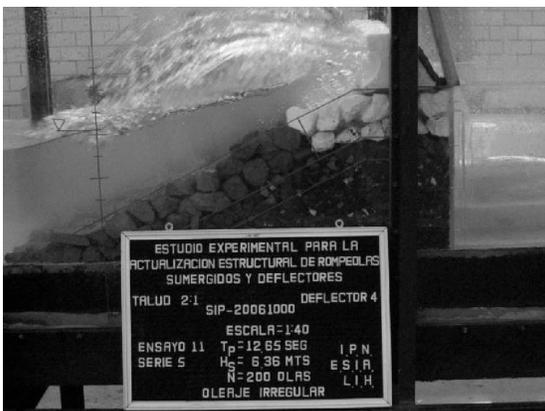


Figura 10. Ensayo 11, serie 5, deflector número 4.

- descargas de rebases sobre la estructura ($0.506 \text{ m}^3/\text{s.m}$).
- En el caso del rompeolas con el deflector 1 (cuadro 3), se apreció una pequeña disminución en el número de descargas de rebase ($0.418 \text{ m}^3/\text{s.m}$), con respecto al caso sin deflector (17.39%).
 - En el caso del rompeolas con el deflector 2 (cuadro 4), se presentaron disminuciones sustanciales en el número de descargas de rebase ($0.102 \text{ m}^3/\text{s.m}$), con respecto al deflector 1 (75.68%).
 - En el caso del rompeolas con el deflector 3 (cuadro 4), se contabilizaron importantes disminuciones en el número de descargas de rebase ($0.076 \text{ m}^3/\text{s.m}$), con respecto al deflector 2 (24.67%).
 - En el caso del rompeolas con el deflector 4 (cuadro 5), se presentaron importantes disminuciones en el número de descarga de rebase ($0.054 \text{ m}^3/\text{s.m}$), con respecto al deflector 3 (28.74%).
 - Finalmente, se aplicaron tres fórmulas para el cálculo de la descarga de rebase sobre el rompeolas con deflector: Franco, Allsop y EurOtop, ecuaciones (2), (3) y (4), respectivamente, cuyos resultados se presentan en el cuadro 5.

Conclusiones

Del análisis de los resultados y de las observaciones realizadas, se formulan las siguientes conclusiones:

- Se puede observar que la descarga específica de rebase (*overtopping*) disminuyó sustancialmente a medida que se modificó la geometría (curvatura) de la cara lado mar de los deflectores (ver figuras 2 a 5).
- El deflector más eficiente resultó ser el número 4 (menor descarga de rebase con respecto al número de olas incidentes) (ver figura 11), el cual realizó su trazo de la cara lado mar con dos radios de curvatura.

Cuadro 3. Resultados de ensayos con rompeolas sin deflector y con deflector 1.

Tiempo de ensayo (min)	Número de rebases	Volumen de rebase (m ³)	Gasto de rebase (M) (m ³ /m/seg)	Gasto de rebase (P) (m ³ /m/seg)	Tiempo de ensayo (min)	Número de rebases	Volumen de rebase (m ³)	Gasto de rebase (M) (m ³ /m/seg)	Gasto de rebase (P) (m ³ /m/seg)
3.09	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.55	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.19	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.16	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.26	2	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.27	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.49	3	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.47	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
4.03	6	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.07	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
4.19	14	1.570000E-02	9.279388E-05	2.347499E-02	4.32	7	2.720900E-03	1.608171E-05	4.068351E-03
4.25	28	3.917000E-02	2.282435E-04	5.774103E-02	4.36	14	6.996600E-03	4.076916E-05	1.031378E-02
4.59	74	7.075000E-02	3.817222E-04	9.656809E-02	4.56	37	2.915250E-02	1.572884E-04	3.979083E-02
5.11	158	2.129900E-01	1.032219E-03	2.611309E-01	5.15	79	8.318180E-02	4.031263E-04	1.019829E-01
5.23	292	2.570000E-01	1.216929E-03	3.078586E-01	5.13	146	1.881308E-01	8.908240E-04	2.253607E-01
5.49	462	4.429900E-01	1.998275E-03	5.055236E-01	5.45	231	3.662188E-01	1.651969E-03	4.179152E-01
S/deflector	S/deflector	S/deflector	S/deflector	S/deflector	Deflector 1	Deflector 1	Deflector 1	Deflector 1	Deflector 1

Cuadro 4. Resultados de ensayos con rompeolas con deflectores 2 y 3.

Tiempo de ensayo (min)	Número de rebases	Volumen de rebase (m ³)	Gasto de rebase (M) (m ³ /m/seg)	Gasto de rebase (P) (m ³ /m/seg)	Tiempo de ensayo (min)	Número de rebases	Volumen de rebase (m ³)	Gasto de rebase (M) (m ³ /m/seg)	Gasto de rebase (P) (m ³ /m/seg)
2.56	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.59	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.19	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.19	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.28	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.24	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
3.49	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.47	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
4.03	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.03	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
4.28	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.32	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
4.38	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.39	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
5.02	2	3.303950E-03	1.629909E-05	4.123345E-03	5.07	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
5.11	8	1.088360E-02	5.274549E-05	1.334355E-02	5.16	2	1.049490E-02	5.036888E-05	1.274232E-02
5.11	19	2.837510E-02	1.375150E-04	3.478855E-02	5.2	7	2.487680E-02	1.184745E-04	2.997168E-02
5.51	55	8.940100E-02	4.018134E-04	1.016508E-01	5.47	19	6.685640E-02	3.026839E-04	7.657298E-02
Deflector 2	Deflector 2	Deflector 2	Deflector 2	Deflector 2	Deflector 3	Deflector 3	Deflector 3	Deflector 3	Deflector 3

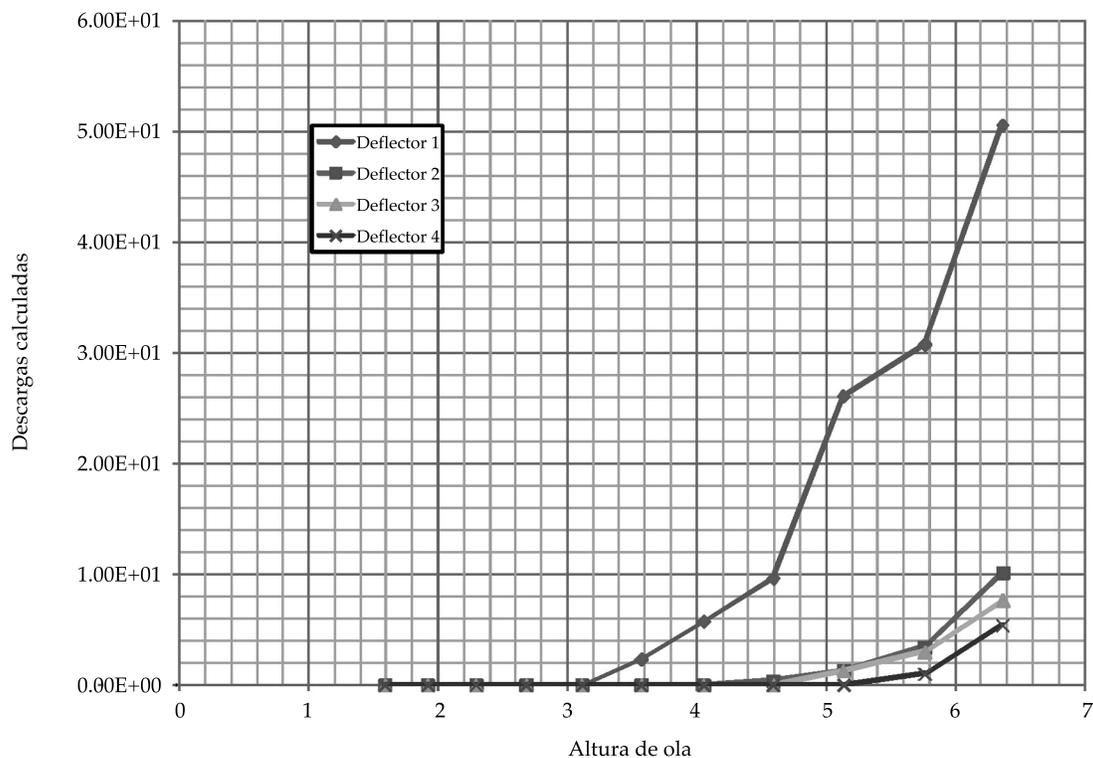
3. Se puede apreciar en las figuras 12, 13 y 14, que de la relación entre las descargas medidas en los ensayos y las calculadas empleando las fórmulas de Franco, Allsop y EurOtop, la que presenta una tendencia aceptable es la de Allsop, por lo cual esta fórmula sería la más adecuada para el cálculo de las descargas de rebase de los deflectores.

Recomendaciones

- Se considera pertinente continuar el estudio utilizando otras geometrías para nuevos deflectores (escalonados).
- Es pertinente continuar el estudio modificando las condiciones de ensayo para un número mayor de olas incidiendo sobre los deflectores.

Cuadro 5. Resultados de ensayos con rompeolas con deflector 4, y descargas calculadas para rompeolas con deflector con las ecuaciones de Franco, Allsop y Eurotop.

Tiempo de ensayo (min)	Número de rebases	Volumen de rebase (m ³)	Gasto de rebase (M) (m ³ /m/seg)	Gasto de rebase (P) (m ³ /m/seg)	Rc/Hs (m)	Gasto fórm. Franco (m ³ /m/seg)	Gasto fórm. Allsop (m ³ /m/seg)	Gasto fórm. Eurotop (m ³ /m/seg)
3.09	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	5.9748	8.732585E-12	1.91974E-08	4.501974E-08
3.19	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.9479	9.588460E-10	4.42533E-07	1.739253E-08
3.26	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	4.1485	3.885858E-08	5.32044E-06	4.413102E-07
3.49	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.5448	6.596550E-07	3.60796E-05	5.260298E-06
4.03	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	3.0547	6.784629E-06	1.76170E-04	4.060207E-05
4.19	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.6611	4.533345E-05	6.47144E-04	2.154370E-04
4.25	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.3457	2.126036E-04	1.87914E-03	8.399371E-04
4.59	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.0697	8.403443E-04	4.88286E-03	2.824465E-03
5.11	0	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.8519	2.533784E-03	1.05723E-02	7.496004E-03
5.23	2	8.551400E-03	4.049200E-05	1.024367E-02	1.6493	7.202375E-03	2.20886E-02	1.892403E-02
5.49	13	4.781010E-02	2.156657E-04	5.455910E-02	1.4937	1.631533E-02	3.94980E-02	3.913404E-02
Deflector 4	Deflector 4	Deflector 4	Deflector 4	Deflector 4				

Gráfico descargas de rebase *vs.* alturaFigura 11. Descargas de rebase *versus* altura de ola incidente.

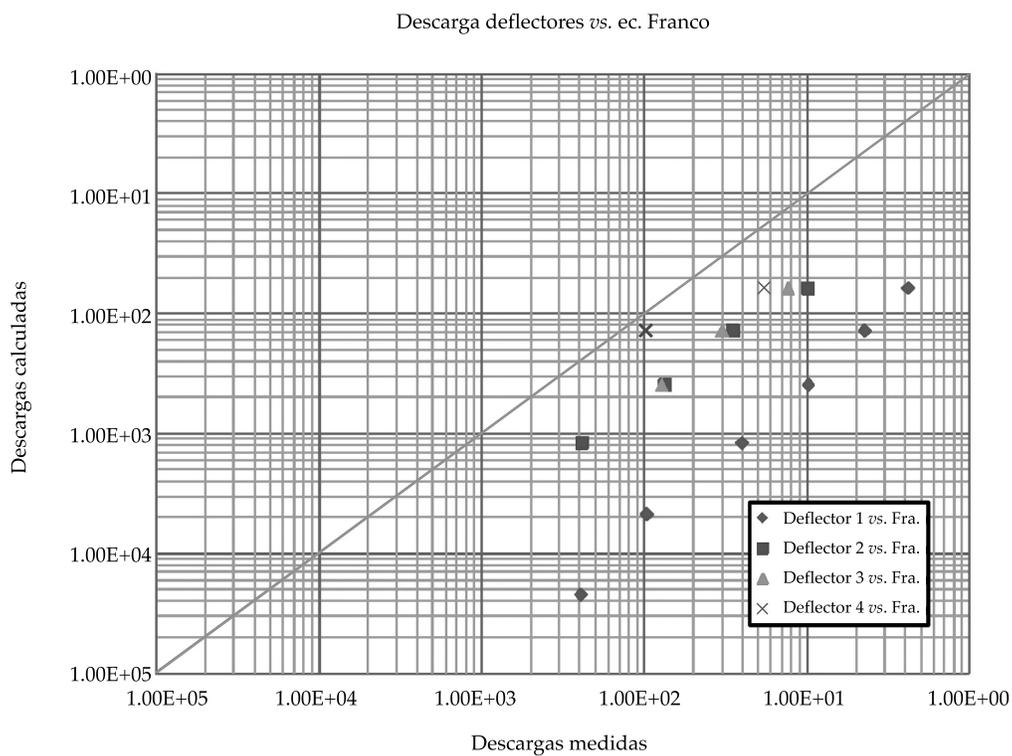


Figura 12. Descargas de rebase calculadas, ecuación Franco *versus* medidas.

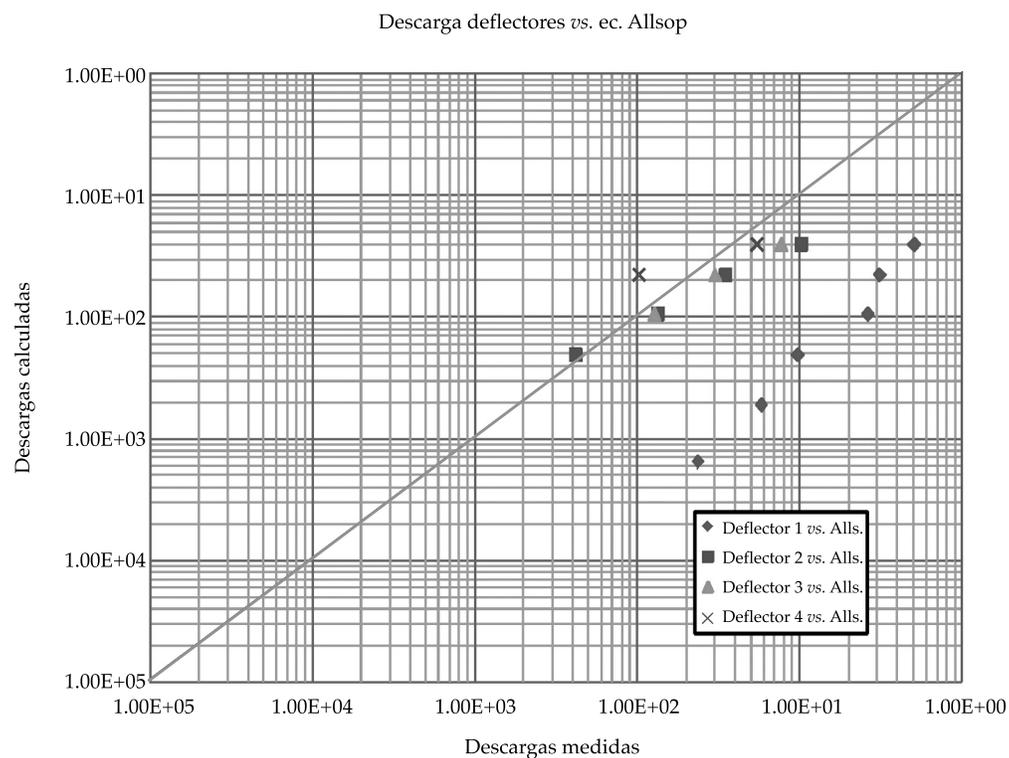


Figura 13. Descargas de rebase calculadas, ecuación Allsop *versus* medidas.

Descarga deflectores vs. ec. EurOtop

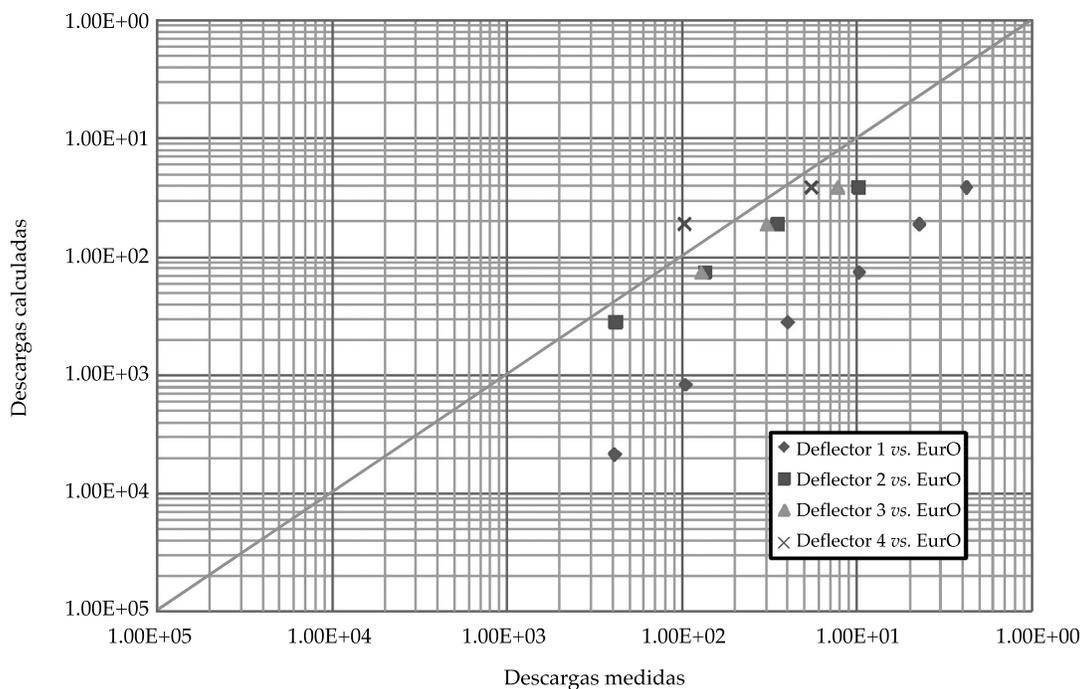


Figura 14. Descargas de rebase calculadas, ecuación EurOtop versus medidas.

- Es recomendable validar otras ecuaciones para el cálculo de la descarga de rebase sobre los deflectores.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional, financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, bajo el registro SIP-20061000 "Estudio Experimental para la Actualización Estructural de Rompeolas Sumergidos y Deflectores".

Recibido: 17/08/10
Aceptado: 08/05/12

Referencias

- ALLSOP, H., FRANCO, L., VERHAEGHE, H., VAN DER MEER, J.W., and ROUCK, J. *Wave Overtopping at Coastal Structures: Development of Data Base Towards Up-graded Prediction Methods*. 28th International Conference of Coastal Engineering, Cardiff, U.K., 2002, pp. 21-40.
- BERESFORD, P.J. *Programa de Control del Generador de Olas. Manual de Usuario*. Wallingford, England: HR Wallingford, 1994.
- BRUUN, P. Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection. *Developments in Geotechnical Engineering*. Vol. 37. Elsevier Science Ltd., 1985, pp. 340-580.
- BURCHARTH, H.F. and HUGHES, S.A. Fundamental of Design. In: *Coastal Engineering Manual, Part. VI. Desing of Coastal Project Elements*. Chapter VI-5. Hughes, S.A. (editor). Engineer Manual 1110-2-1100. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 2002, pp. 19-33.
- EUROTOP WAVE OVERTOPPING OF SEA DEFENSES AND RELATED STRUCTURES. Assessment Manual, Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, Kuratorium fur Fonschung im Kusteningenieurwesen, DE, 2007.
- HAMER, D. and HEMER, F. Laboratory Experiments on Wave Transmission by Overtopping. *Proceedings of Coastal Engineering*. Amsterdam, 1982.
- HU-SAU-LON, J. and McCAULEY, J. Estimation of Wave Overtopping Rates for Irregular Waves. *Journal of*

- Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol. 123, No. 5, 1997, pp. 266-273.
- HUGHES, S.A. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advances Series on Ocean Engineering. Vol. 7, World Scientific, River Edge, NJ, USA, 1995, pp. 81-130.
- MANSARD, E.P.D., and FUNKE, E.R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. 17th International Conference of Coastal Engineering, Sydney, Australia, 1980, pp. 95-96.
- RUIZ, J.R. y SATO, S. *Planeación y ejecución del experimento físico*. V Curso Internacional de Ingeniería Hidráulica Portuaria. México, D.F.: SCT-JICA, 1992, 20 pp.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Shore Protection Manual*. Vol. 1. Vicksburg, USA: Department of the Army, Coastal Engineering Research Center, 1984.
- VAN DER MEER, J.W. and VAN DE WALLE, B. Wave Run-Up and Overtopping on Coast as Structures. *Proceedings 23rd ICCE*. Venetia, France, 1992, pp. 1758-1771.

Abstract

RUIZ-Y-ZURVIA-FLORES, J.R. & FRAGOSO-SANDOVAL, L. *Wave deflectors for surface breakwaters*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 57-71.

In Mexican ports, some of the protection works (such as breakwaters and jetties) present severe structural damage, as well as low crown height, causing seasonal problems related to wave overtopping. One solution to this problem consists of using concrete wave deflectors. Validation is a criterion used to design deflectors for surface breakwaters, in order to obtain designs appropriate to the functioning of these structures under the wave conditions to which they will be submitted. Therefore, the objective of this study is to describe the development of an experimental study to determine the most effective dimensions and geometries for a wave deflector. The study was conducted using a physical model which tested four different types of deflectors placed at the crown of a trapezoidal rubble mound breakwater. It was carried out in a narrow wave flume using a computer-controlled system to generate regular and irregular water waves. The wave-maker was used to generate and reproduce the irregular wave conditions required by the tests. A holograph with resistive wave gauges controlled by a computerized system was used to measure and process the model's wave data. The results showed that the wave deflector's geometry (curvature) plays a fundamental role in diminishing wave overtopping, and that wave deflector 4 showed the best behavior, having more greatly reduced overtopping. In addition, three state-of-the-art formulas —Franco, Allsop and EurOtop— were employed to calculate wave overtopping for breakwaters with wave deflectors. Allsop's formula was found to have better agreement with the experimental results obtained.

Keywords: *surface breakwater, deflector, wave flume, tests, irregular waves.*

Dirección institucional de los autores

M.C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

M.C. Lucio Fragoso Sandoval

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura,
Unidad Zacatenco
Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Adolfo López Mateos
Delegación Gustavo A. Madero
07300 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5729 6000, extensiones 53140, 53086
jaruizz@ipn.mx
jaimezurvia@yahoo.com.mx
lfragoso@ipn.mx
lucio_fragoso@yahoo.com.mx