

Reflexión del oleaje en rompeolas superficiales permeables a talud

Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

Profesor e Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Adolfo López Mateos (Zacatenco)
Instituto Politécnico Nacional, Lindavista 07300, México D.F., México
Email: jaruizz@ipn.mx

Lucio Frago Sandoval

Profesor e Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Adolfo López Mateos (Zacatenco)
Instituto Politécnico Nacional, Lindavista 07300, México D.F., México
Email: lfrago@ipn.mx

RESUMEN

Los rompeolas superficiales son estructuras que deben brindar una adecuada protección a la infraestructura portuaria, por lo cual es esencial tener un conocimiento adecuado de su comportamiento bajo la acción del oleaje. El oleaje produce varios efectos hidrodinámicos sobre los rompeolas, entre los cuales está la reflexión objeto de este trabajo. Este se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional de México, en canal angosto con generador hidráulico de oleaje irregular y equipo de medición de olas controlado por computadora. Se analizó el comportamiento de la incidencia de trenes de oleaje sobre las estructuras a través de mediciones de reflexión del oleaje, así como de fotografía y video, las cuales aportaron información que se correlacionó con los resultados.

Palabras clave: canal de olas, ensayos, oleaje irregular, reflexión, rompeolas.

Wave reflection on rubble mound breakwater

ABSTRACT

Rubble mound breakwaters are structures providing adequate to harbour infrastructure, so it is essential to have an appropriate knowledge of its behavior under wave action. Wave action generates several hydrodynamical effects on the breakwater, of which reflection is the object of this work. This work was realized in the “Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, del Instituto Politécnico Nacional de México”, in a narrow channel with hydraulic generator of irregular waves and wave meter equipment controlled by computer. Given the above, it was possible to analyze the behavior of the incident waves group over the structures through wave reflection measurements, photographs and video, which represented information that was compared with results.

Keywords: breakwater, irregular waves, reflection, tests, wave flume.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la reflexión del oleaje en las obras de protección portuaria y costera es de gran relevancia práctica para los ingenieros especialistas, debido a que este efecto puede inducir daños por los estados de mar cercanos a las entradas de los puertos, con una alta reflexión en las áreas protegidas que se traduce en condiciones severas para la navegación y agitación para las embarcaciones que entran o salen del puerto, e intensificación en la erosión al pie de las obras de protección, lo cual las deja desestabilizadas. Este efecto tiene numerosos estudios teóricos y en modelos físicos a escala para diferentes tipos de taludes, lo cual tiene una gran variedad de esquemas predictivos. La mayoría de estos esquemas son para estructuras lisas y de terraplenes de enrocamiento, relacionando el coeficiente de reflexión K_r al parámetro de similitud de rompiente χ como en los estudios de Battjes (1974), Seelig and Ahrens (1981), Postma (1989), etc. De los trabajos de Postma (1989), se conoce que el periodo del oleaje tiene mayor influencia que la altura de la ola, introduciendo el parámetro χ , así como incorporando diferentes taludes.

Una de las primeras soluciones empíricas fue desarrollada por Miche (1951) ecuaciones (1 y 2), quien introdujo la estimación empírica del coeficiente de reflexión en taludes (K_r); asumiendo olas monocromáticas e incidencia normal en una playa con pendiente constante: (U. de Cantabria 2000).

$$K_r^2 = \begin{cases} 1 & \text{si } M \geq 1 \\ M & \text{si } M < 1 \end{cases} \quad (1)$$

donde:

$$M = \frac{16g^2 \tan^5 \beta}{2\rho H_0^2 w} \quad (2)$$

K_r coeficiente de reflexión, adimensional

β pendiente de la playa, en grados

H_0 altura de la ola en profundidades indefinidas, en metros

w frecuencia angular, en radianes/segundo.

Battjes (1974), ecuación (3) derivó teóricamente la reflexión del oleaje para pendientes suaves impermeables en términos del número de Iribarren (χ) (Postma 1989), como sigue:

$$K_r = 0,1 \chi^2 \quad (3)$$

Losada y Giménez-Curto (1981), desarrollaron un modelo exponencial para K_r ecuación (4) sobre la base del parámetro χ (Postma 1989), de la siguiente manera:

$$K_r = A [1 - e^{-B \chi}] \quad (4)$$

Fue calibrada usando los datos para taludes rugosos permeables que fueron aportados por Sollitt and Cross (1972) y Gunbak and Brunn (1979) presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes

		A	B
Sollitt y Cross	1972	0,503	-0,1248
Gunbak	1979	1,3508	-0,0710

Seelig and Ahrens (1981) presentan la fórmula (5) para calcular la reflexión del oleaje, donde indicaron que Miche sobrestimó significativamente la reflexión para olas regulares e irregulares y presentaron una estimación que mejora el cálculo de la reflexión (Postma 1989).

$$K_r = \frac{AX^2}{(B + X^2)} \quad (5)$$

Con las correspondientes constantes A y B en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de Seelig and Ahrens (1981)

A	B	Condicionante
1,00	5,6	pendientes suaves impermeables
0,6	6,6	roca rugosa permeable

Allsop and Hettiarachchi (1989), realizaron una revisión de la fórmula de Seelig and Ahrens, evaluando para dos coeficientes: uno, para taludes impermeables, lisos y rugosos, y dos, para taludes permeables construidos con roca, así como con elementos artificiales y paramentos verticales (muros verticales), permeables e impermeables.

Allsop and Channel (1989) otra vez recalibraron la fórmula de Seelig and Ahrens, de datos obtenidos de ensayos realizados en un canal con taludes de enrocamiento, introduciendo oleaje irregular (aleatorio).

Van der Meer and Zanuttigh (2006) desarrollaron una nueva fórmula (6), para calcular el coeficiente de reflexión en función de número de Iribarren o parámetro de Battjes (x_0), basado en el periodo espectral $T_{m1,0}$; definido por las expresiones siguientes y los coeficientes de la tabla 3:

$$K_r = \tanh(ax_0^b) \quad (6)$$

donde:

$$x_0 = \frac{\tan a}{\sqrt{(2 \cdot \rho \cdot H_{m0}) / (g \cdot T_{m-1.0}^2)}} \quad (7)$$

$$a = 0,167 \cdot [1 - \exp(-3,2 \cdot \gamma_f)] \quad (8)$$

$$b = 1,49 \cdot (\gamma_f - 0,38)^2 + 0,86 \quad (9)$$

Donde los valores de a y b , se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de los coeficientes a y b para diferentes materiales

Coefficientes a,b que se incluyen en la fórmula de Van der Meer and Zanuttigh (2006)			
	a	b	g_f
Roca permeable	0,12	0,87	0,4
Dolos	0,12	0,87	varios
Roca impermeable	0,14	0,90	0,55
Pendiente suave	0,16	1,43	1,00

La investigación desarrollada por Van der Meer and Zanuttigh (2006), lo ha llevado a relacionar la reflexión en función de los siguientes parámetros adimensionales, K_r coeficiente de reflexión, χ_0 parámetro de Battjes, $\frac{gT^2}{D_{50}}$ periodo pico relativo, $\frac{R_c}{D_{50}}$ bordo libre relativo, $\frac{B}{D_{50}}$ ancho de coronamiento relativo, $\frac{d}{D_{50}}$ profundidad relativa, $\tan \alpha_{off}$ talud de la estructura lado mar, $\frac{D_{50}}{H_i}$ diámetro medio del enrocamiento relativo y $\frac{\mu}{\rho\sqrt{g}D_{50}^{1,5}}$ viscosidad cinemática relativa (ecuaciones 10, 11, 12 y 13):

$$K_r = f\left(\frac{gT^2}{D_{50}}, \frac{R_c}{D_{50}}, \frac{B}{D_{50}}, \frac{d}{D_{50}}, \tan \alpha_{off}, \frac{D_{50}}{H_i}, \frac{\mu}{\rho\sqrt{g}D_{50}^{1,5}}\right) \quad (10)$$

$$K_r = \tanh(a\chi_0^b) \quad (11)$$

donde:

$$\chi_0 = \frac{\tan a_{inicial}}{\sqrt{(H_{m0})/(L_0)}} \quad \text{si } h \leq 1,5 H_{m0r} \quad (12)$$

$$\chi_0 = \frac{[\tan a_d \cdot (h - 1,5 H_{m0r}) + \tan a_{inicial} \cdot 1,5 H_{m0r}] / h}{\sqrt{H_{m0r} / L_0}} \quad (13)$$

Los coeficientes a , b , y g_f , son iguales a la fórmula de Van der Meer and Zanuttigh (2006).

Instalación

Se contó con un canal de olas angosto con dimensiones de 24,45 m de longitud, 0,66 m de ancho y 0,90 m de profundidad, el que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional de México.

Equipo

Se dispuso de un generador hidráulico de oleaje regular e irregular controlado por computadora a través del programa de cómputo denominado WAVEGEN (Beresford 1994a). En cuanto a la medición del oleaje se contó con un equipo de medición de oleaje, compuesto por un ológrafo y sensores de oleaje de tipo resistivo, controlados por computadora por medio del programa de cómputo HR WAVES (Beresford 1994b).

Instrumentación

Para la medición del oleaje a reproducir en los ensayos, se utilizaron tres sensores de oleaje de tipo resistivo. Las señales analógicas recabadas por los sensores se amplificaron a través de un ológrafo, que a su vez las envió a un convertidor de señales (analógico/digital) con el que cuenta el equipo de cómputo; una vez digitalizadas fueron analizadas por el programa HR WAVES con que cuenta el citado equipo y luego impresas.

PARÁMETROS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

Oleaje incidente

Con base en datos de oleaje normal y de tormenta que corresponden a olas generadas en mar abierto, se realizó una propagación del oleaje hacia las profundidades a reproducir en el modelo (refracción del oleaje) (Shore Protection Manual 1984). De acuerdo con lo anterior, se calcularon las características del oleaje a una profundidad de 20 m. (50 cm. condición de modelo al pie del generador de oleaje). De los ocho diferentes espectros de oleaje con que cuenta el programa de cómputo WAVEGEN del equipo de generación de oleaje, se utilizó el espectro de Pierson-Moskowitz para generar las señales de oleaje irregular a reproducir en los ensayos, por considerarse el más adecuado a las condiciones de oleaje de las costas mexicanas en el Océano Pacífico (de acuerdo con pruebas previas realizadas con los siete diferentes espectros de oleaje con que cuenta el generador de olas).

Niveles del mar

El estudio consideró la condición de oleaje normal y de tormenta, el plano de referencia fue el Nivel de Bajamar Media Inferior (N.B.M.I.) y se consideró una sobre elevación por tormenta de 1,00 m.

Secciones de rompeolas

Se propusieron 4 secciones de rompeolas superficiales de sección trapecial: se diseñaron dos rompeolas con taludes 2:1 (lado mar) y 1,5:1 (lado protegido) constituidos, uno por enrocamiento en su coraza con peso 12 toneladas y otro con elementos artificiales (dolos) con peso de coraza de 19 toneladas (pesos determinados con la fórmula de Hudson) (Shore Protection Manual 1984); y dos rompeolas de berma, el primero con rango de pesos de coraza de enrocamiento de 1,28 a 3,84 toneladas y el segundo con rango de pesos de coraza de enrocamiento de 2,56 a 5,12 toneladas.

MODELO FÍSICO HIDRÁULICO.

Escala del modelo

En el estudio, las fuerzas más importantes resultan ser las gravitacionales, por lo tanto, el criterio de similitud entre prototipo y modelo es el que relaciona las fuerzas de inercia y gravitacionales (Número de Froude). En función de la ley de similitud de Froude, de las magnitudes del canal angosto y de los requerimientos del generador de oleaje, se propuso una escala de líneas (1:40), de donde se obtienen las siguientes escalas de interés:

Escala de líneas horizontales y verticales	$E_L =$	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 fuerzas	$E_F =$	64 000,00
Escala de pesos	$E_W =$	64 000,00

Arreglo del modelo

Los ensayos se llevaron a cabo en el canal de olas angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (figura 1), el cual cuenta con un generador de oleaje irregular en uno de sus extremos, el que está dotado de una paleta generadora de oleaje de movimiento traslacional accionada mediante un gato hidráulico, cuyo control se efectúa por procedimientos electrónicos controlados por computadora. En el extremo contrario se tiene un amortiguador para absorber la energía del oleaje, el cual limita la ocurrencia de reflexiones.

En el interior del canal se reprodujo el perfil del fondo marino en una longitud de 6,00 m con una pendiente de 1:50 y un tramo de 9,00 m de transición con pendiente 1:100, para poder ligar el fondo del canal con la pendiente del fondo marino; sobre el perfil del fondo se representaron las secciones de rompeolas a ensayar. 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 de los rompeolas de 0,30 m (12 m en prototipo), referido al nivel de bajamar media inferior, tirante suficiente para un funcionamiento adecuado del generador de oleaje.

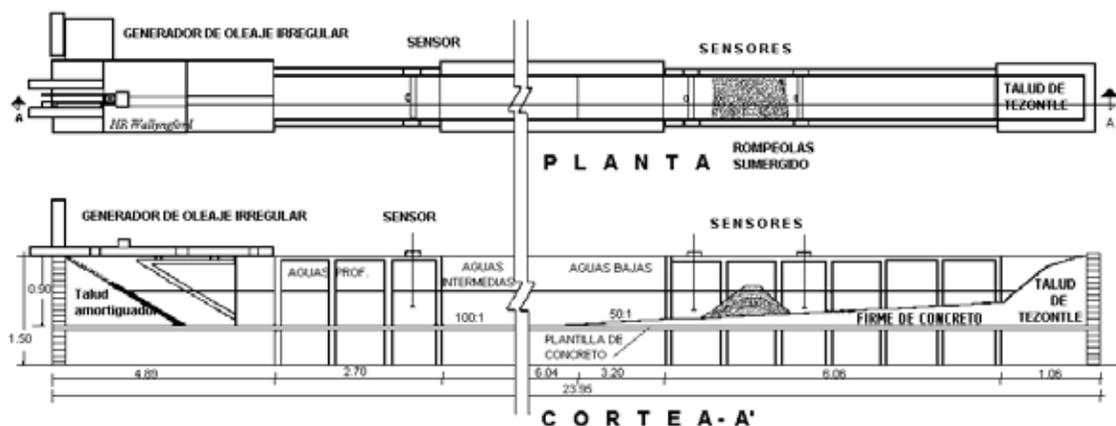


Figura 1. Canal angosto y generador de oleaje irregular

Construcción del modelo

Definida la disposición del modelo, se procedió a la construcción del mismo para lo cual se realizaron rellenos, compactados y firmes de concreto para obtener las pendientes del perfil marino a reproducir.

Ejecutados estos trabajos y con base en la escala del modelo, se calcularon los pesos en modelo de los materiales para el rompeolas de 12 toneladas de coraza, el rompeolas de dolos de 19 toneladas, el rompeolas de berma de 1,28 a 3,84 toneladas en su coraza y el segundo rompeolas de berma de 2,56 a 5,12 toneladas en su coraza (ver tabla 4), y los volúmenes de material necesarios para cada una de estas estructuras.

A continuación se determinaron los volúmenes de enrocamiento para la capa secundaria y el núcleo correspondientes para cada sección de rompeolas y finalmente se realizó la construcción de las secciones de rompeolas a ensayar.

Tabla 4. Relación de parámetros de diseño, modelo-prototipo

Parámetro	Prototipo	Modelo
Peso de los elementos:		
Coraza.	19.00 tn 12.00 tn 2.56 tn 3.84 tn	296.88 gr 187.50 gr 40.00 gr 60.00 gr
Capa secundaria. Núcleo	1.90 a 0.95 tn 95 a 5 Kg	29.70 a 14.85 gr 2 gr
Ancho de corona:		
Coraza.	6.94 m.	17.35 cm.
Capa secundaria. Núcleo	6.00 m. 3.50 m	15.00 cm. 8.75 cm.
Espesor de las capas:		
Coraza.	3.90 m.	9.75 cm.
Capa secundaria.	2.00 m.	5.00 cm.
Cotas de coronamiento		
Coraza	8.30 m	20.75 cm
Capa secundaria Núcleo	4.40 m 2.40 m	11.00 cm 6.00 cm

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Calibración

En esta fase se realizaron varias series de ensayos para comprobar la validez de las señales de oleaje calculadas para cada uno de los ensayos (once señales), así como la calibración de los sensores de oleaje resistivos a ser utilizados en los ensayos (tres sensores). Este último paso se realizó con el programa de cómputo HR WAVES en la subrutina CAL.

Programa de ensayos

Para la elaboración de la fase experimental, se generaron once señales de oleaje a reproducirse en los ensayos con el programa WAVEGEN en la subrutina SEASTATE considerando uno de los siete espectros de oleaje disponibles (espectro de oleaje de Pierson–Moskowitz), y se calcularon las separaciones de los sensores de oleaje con el programa HR WAVES subrutina REFLECTION, de acuerdo con el periodo de ola de cada una de las señales de oleaje programadas para los ensayos. Lo anterior se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5. Programa de ensayos

Periodo Modelo (s)	Periodo Prototipo (s)	Altura Modelo (cm)	Altura Prototipo (m)	Intervalo Muestreo modelo	Intervalo Muestreo prototipo	Separación de sensores prototipo			Separación de sensores modelo		
						x ₂ (m)	x ₁ (m)	x ₃ (m)	x ₂ (cm)	x ₁ (cm)	x ₃ (cm)
1,00	6,32	3,98	1,59	0,1250	0,7900	16,00	6,20	18,00	40,00	15,60	24,40
						4 9	8 15	6 12			
1,10	6,95	4,80	1,92	0,1375	0,8688	17,90	7,50	10,30	44,60	18,80	25,80
						4 9	8 15	6 13			
1,20	7,59	5,73	2,28	0,1500	0,9488	19,70	9,00	10,70	49,30	22,50	26,90
						4 10	7 15	7 14			
1,30	8,22	6,70	2,68	0,1625	1,0275	21,60	10,50	11,00	53,90	26,30	27,50
						4 10	7 15	7 15			
1,40	8,85	7,78	3,11	0,1750	1,1063	23,40	12,20	11,20	58,40	30,50	27,90
						4 10	7 15	7 16			
1,50	9,49	8,93	3,60	0,1825	1,1863	25,20	14,00	11,20	63,00	35,10	27,90
						4 11	7 15	8 17			
1,60	10,12	10,13	4,05	0,2000	1,2650	27,00	15,90	11,10	67,50	39,80	27,70
						4 11	6 15	9 18			
1,70	10,75	11,48	4,59	0,2125	1,3438	28,80	17,90	10,90	72,00	44,70	27,30
						4 11	6 15	9 20			
1,80	11,38	12,83	5,13	0,2250	1,4225	30,60	19,90	10,70	76,40	49,70	26,70
						4 11	6 15	10 21			
1,90	12,02	14,40	5,76	0,2375	1,5025	32,40	22,00	10,40	80,90	55,00	25,90
						4 12	6 15	11 23			
2,00	12,65	15,90	6,36	0,2500	1,5813	34,10	24,10	10,00	85,30	60,20	25,10
						4 12	6 15	12 24			

CONDICIONES Y PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

Condiciones de los ensayos

- Se utilizó el espectro de Pierson-Moskowitz para generar las señales de oleaje a reproducir en los ensayos.
- En todos los ensayos para calcular el coeficiente de reflexión del oleaje sobre las estructuras, se reprodujo oleaje en tiempo suficiente para que el equipo realizara el proceso respectivo (Mansard and Funke 1980).

Procedimiento de los ensayos

Ensayos para obtener el coeficiente de reflexión:

- Se colocaron un grupo de tres sensores de oleaje a una distancia mayor de una longitud de ola, tanto del generador de olas como de la estructura en prueba, y separados entre sí de acuerdo con el periodo del oleaje.
- Se reprodujo oleaje, y se calculó la energía de ola incidente y reflejada en la estructura por cada uno de los tres sensores de oleaje.
- Se calculó el coeficiente de reflexión, promediando las energías del oleaje incidente y reflejado de cada uno de los tres sensores.

PRESENTACION DE LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

Ensayos para calcular la reflexión del oleaje en las estructuras

En los ensayos programados para calcular los coeficientes de reflexión para cada una de las cuatro estructuras propuestas, se propusieron las siguientes variables a medirse al pie de las mismas: H_s (altura de ola significativa), T_p (periodo pico), s (relación de esbeltez de la ola), ξ (parámetro de similitud de rompiente) y K_r (coeficiente de reflexión); los resultados obtenidos y su correlación con los presentados con las fórmulas de Ahrens y Van der Meer, que fueron seleccionadas como las más afines al estudio, se muestran en las tablas 6 a la 9.

Tabla 6. Rompeolas clásico con coraza de enrocamiento de 12 toneladas

Ensayo	Hs	Tp	s	ξ	Valores de K_r (Rompeolas clásico 12 ton)		
					Kr		
					Serie 3 WR	Ahrens	Van der Meer
1	1,44	5,82	0,0272	3,03	0,1907	0,3491	0,3048
2	1,73	6,11	0,0297	2,90	0,1850	0,3364	0,2943
3	2,07	6,67	0,0298	2,90	0,2031	0,3358	0,2938
4	2,40	7,01	0,0313	2,83	0,1938	0,3286	0,2880
5	2,88	7,50	0,0328	2,76	0,1997	0,3216	0,2825
6	3,30	7,94	0,0335	2,73	0,2173	0,3183	0,2799
7	3,59	8,57	0,0313	2,83	0,2401	0,3285	0,2879
8	3,97	9,32	0,0293	2,92	0,2763	0,3384	0,2959
9	4,30	9,80	0,0287	2,95	0,2902	0,3415	0,2984
10	5,08	10,42	0,0300	2,89	0,3049	0,3350	0,2931
11	5,46	10,78	0,0301	2,88	0,3217	0,3344	0,2926

Tabla 7. Rompeolas clásico con coraza de dolos de 19 toneladas

Ensayo	Hs	Tp	s	ξ	Valores de K_r (Rompeolas de dolos 19 ton)		
					Kr		
					Serie 4 WR	Ahrens	Van der Meer
1	1,49	5,82	0,0282	2,98	0,2087	0,3441	0,3006
2	1,71	6,16	0,0289	2,94	0,1996	0,3405	0,2976
3	2,07	6,53	0,0311	2,84	0,2206	0,3295	0,2887
4	2,41	7,08	0,0308	2,85	0,2082	0,3310	0,2899
5	2,84	7,44	0,0329	2,76	0,2128	0,3213	0,2822
6	3,40	7,92	0,0347	2,68	0,2137	0,3131	0,2759
7	3,67	8,02	0,0365	2,62	0,2323	0,3054	0,2701
8	4,00	9,13	0,0307	2,85	0,2519	0,3312	0,2901
9	4,49	9,84	0,0297	2,90	0,2653	0,3363	0,2942
10	5,26	10,42	0,0310	2,84	0,2793	0,3298	0,2889
11	5,67	10,92	0,0305	2,87	0,2983	0,3326	0,2912

Tabla 8. Rompeolas de berma de enrocamiento de 2,56 a 5,12 toneladas

Valores de Kr (Rompeolas de berma roca grande)							
Ensayo	Hs	Tp	s	ξ	Kr		
					Serie 1	Ahrens	Van der Meer
					WR		
1	1,49	5,59	0,0305	2,86	0,2345	0,3322	0,2908
2	1,67	6,00	0,0297	2,90	0,2239	0,3363	0,2941
3	1,75	6,65	0,0253	3,14	0,2506	0,3595	0,3138
4	2,21	6,98	0,0291	2,93	0,2289	0,3396	0,2968
5	2,78	7,78	0,0294	2,92	0,2328	0,3377	0,2953
6	3,38	8,26	0,0317	2,81	0,2585	0,3265	0,2863
7	3,57	8,49	0,0317	2,81	0,2417	0,3265	0,2863
8	3,99	9,58	0,0278	3,00	0,2928	0,3458	0,3020
9	4,39	10,06	0,0278	3,00	0,2971	0,3461	0,3023
10	5,01	10,32	0,0301	2,88	0,2882	0,3342	0,2925
11	5,37	10,95	0,0287	2,95	0,2587	0,3414	0,2984

Tabla 9. Rompeolas de berma de enrocamiento de 1,28 a 3,84 toneladas

Valores de Kr (Rompeolas de berma roca pequeña)							
ueña	Hs	Tp	s	ξ	Kr		
					Serie 2	Ahrens	Van der Meer
					WR		
1	1,59	5,56	0,0329	2,75	0,2649	0,3209	0,2819
2	1,76	5,92	0,0322	2,79	0,2511	0,3245	0,2847
3	2,07	6,61	0,0303	2,87	0,2569	0,3331	0,2916
4	2,46	7,07	0,0315	2,82	0,2551	0,3275	0,2871
5	3,17	7,72	0,0341	2,71	0,2582	0,3159	0,2781
6	3,74	8,23	0,0354	2,66	0,2802	0,3103	0,2738
7	4,05	8,55	0,0355	2,65	0,2657	0,3098	0,2734
8	4,50	9,61	0,0312	2,83	0,2828	0,3290	0,2883
9	4,92	9,93	0,0320	2,80	0,2796	0,3254	0,2855
10	5,44	10,11	0,0341	2,71	0,2535	0,3158	0,2780
11	5,93	11,13	0,0307	2,86	0,1852	0,3316	0,2904

RESULTADOS

En las figuras 2 a 5 se presentan los coeficientes de reflexión obtenidos en los ensayos relacionándolos con la altura de ola incidente, con el parámetro de similitud de rompiente y con fórmulas para calcular el coeficiente de reflexión presentadas en el estado del arte.

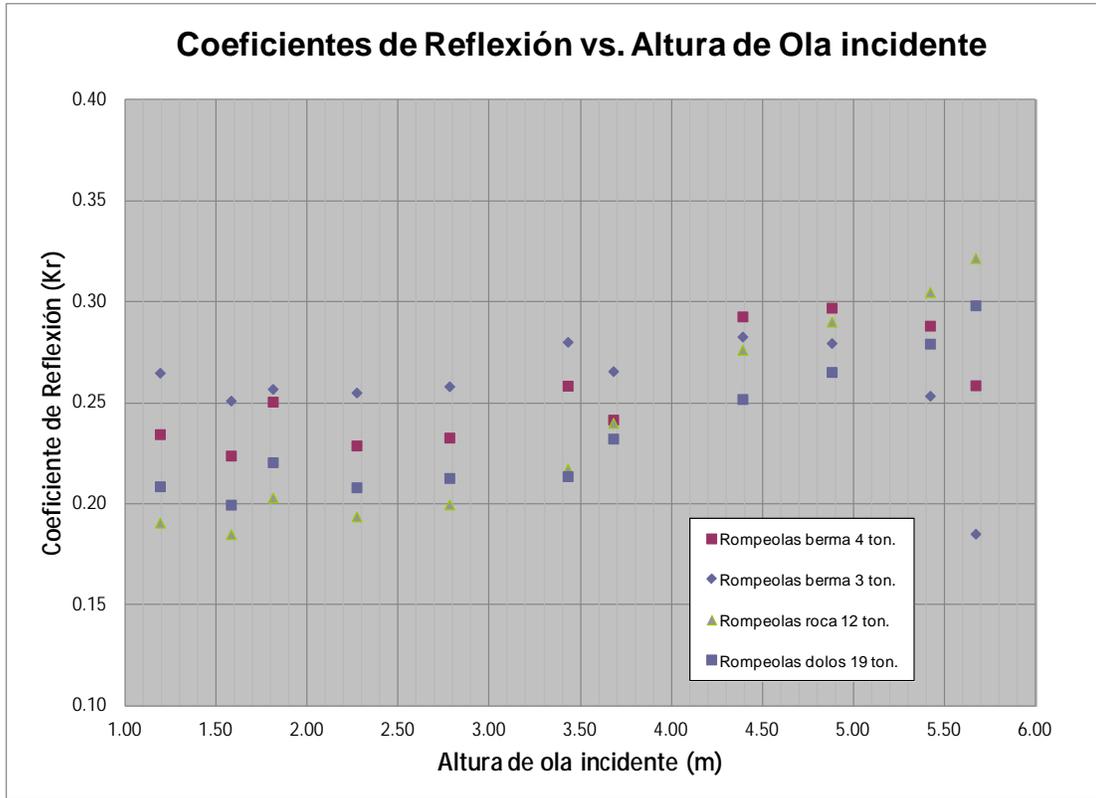


Figura 2. Coeficientes de reflexión vs. Altura de ola incidente

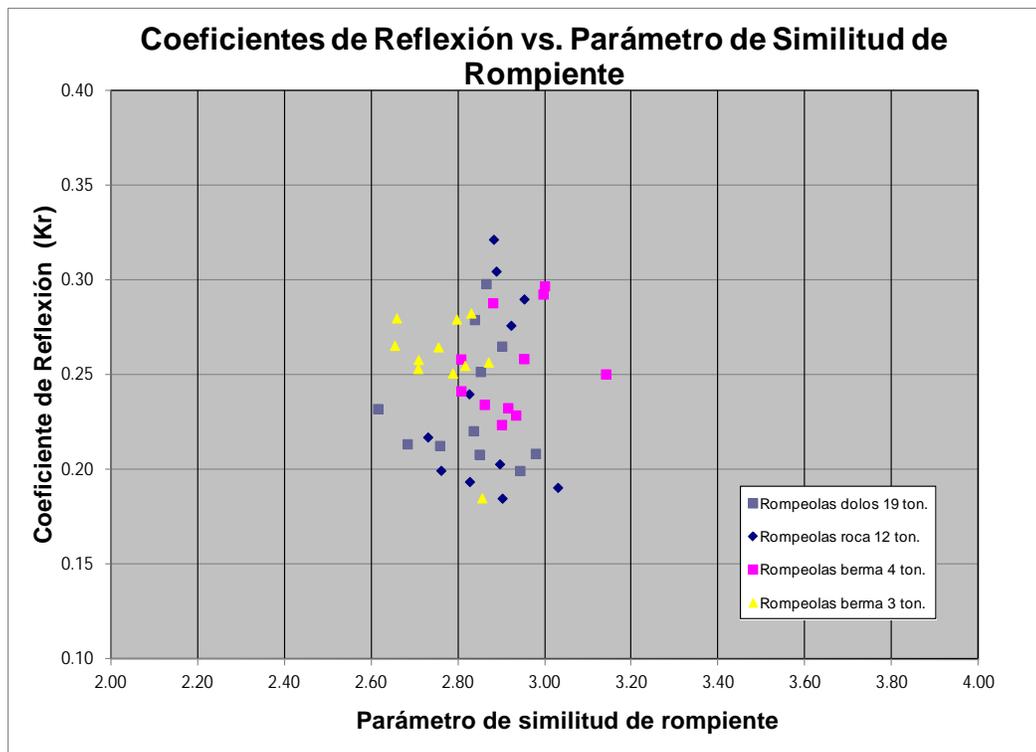


Figura 3. Coeficientes de reflexión vs. Parámetro de similitud de rompiente

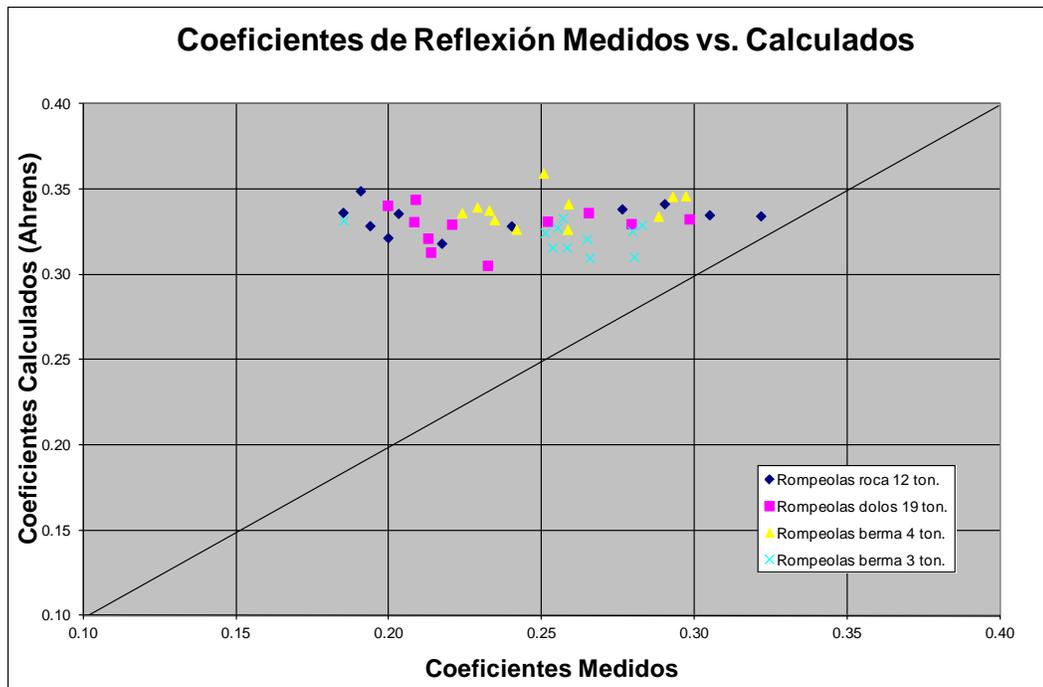


Figura 4. Coeficientes de Reflexión Medidos vs. Calculados (Ahrens)

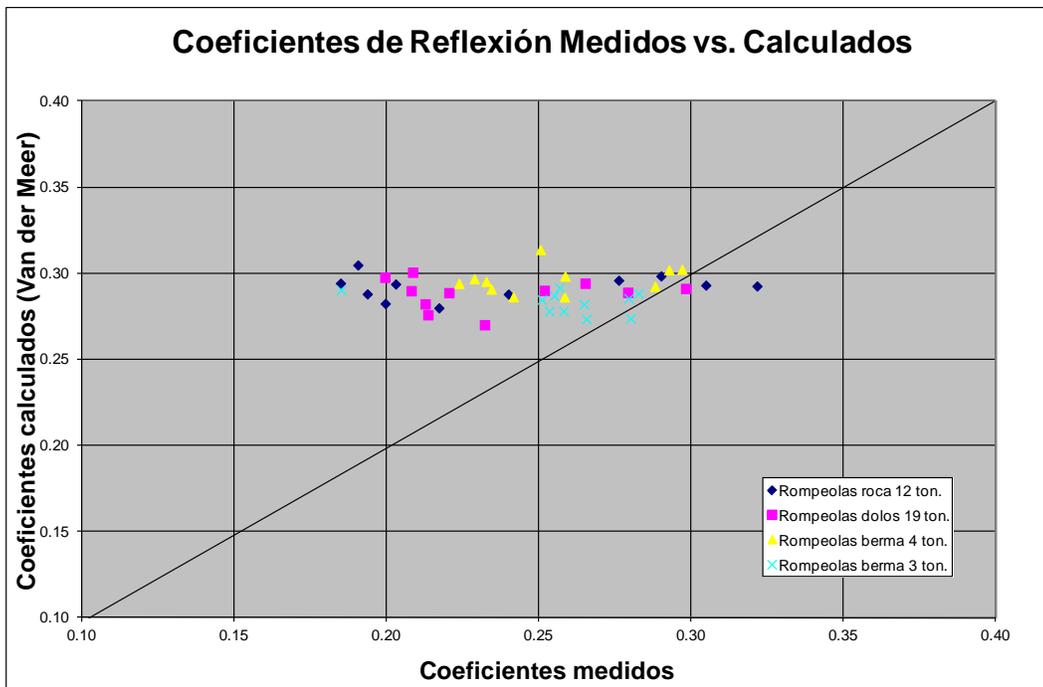


Figura 5. Coeficientes de Reflexión Medidos vs. Calculados (Van der Meer)

CONCLUSIONES

- Se observa que la relación entre los coeficientes de reflexión del oleaje sobre las estructuras ensayadas y la altura de ola incidente, presenta un comportamiento acotado entre los valores de K_r de 0,17 a 0,32, sin importar la variación de la altura y el periodo del oleaje (figura 2).
- Se aprecia que la relación entre los coeficientes de reflexión del oleaje medidos y el parámetro de similitud de rompiente, presentan un comportamiento acotado entre los valores del coeficiente de reflexión K_r de 0,17 a 0,32 y del parámetro de similitud de rompiente ξ de 2,60 a 3,15, indicando que un factor primordial en la reflexión del oleaje sobre los rompeolas a talud es la permeabilidad de las estructuras, la cual en base a su evaluación fue diferente en cada de las mismas (figura 3).
- Se denota que la relación entre los coeficientes de reflexión medidos y los calculados con la fórmula de Ahrens, presentan una correlación moderada, y por lo tanto medianamente recomendable su utilización para la evaluación práctica (figura 4).
- Finalmente se puede apreciar que la relación entre los coeficientes de reflexión medidos y los calculados con la fórmula de Van der Meer, presentan una mayor correlación, y por lo tanto sería la fórmula más adecuada para el cálculo de los coeficientes de reflexión en su aplicación práctica en las estructuras analizadas (figura 5).

RECOMENDACIONES

- Sería conveniente realizar ensayos en modelo incrementando el rango del parámetro de similitud de rompiente (ξ).
- Dentro de lo posible, se considera pertinente probar nuevas estructuras constituidas por elementos artificiales en la coraza de la estructura (tetrápodos, cubos, acrópodos, coreloc, etc.).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, con el apoyo y financiamiento de la Secretaria de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional de México, bajo el registro SIP-20100753.

REFERENCIAS

- Allsop, N.W.H. and Hettierachchi, S.S.L.** (1989). "Wave reflection in harbors; the design, construction and performance of wave absorbing structures", Report OD89, Hydraulics Research, Wallingford, England.
- Allsop, N.W.H. and Channel, A.R.** (1989). "Wave reflection in harbors: reflection performance of rock armoured slopes in random waves", Report OD102, Hydraulics Research, Wallingford, England

- Beresford, P.J.** (1994a). "Operation. WAVEGEN – Wave Generator Control Software Program, User Manual". H.R. Wallingford, England.
- Beresford, P.J.** (1994b). "Operation HR Waves - Wave Reflection and Transfer Functions. The Theory of Data Analysis Routines, User Manual". H.R. Wallingford, England.
- Gunbak, A.R. and Brunn, P.M.** (1979). "Wave mechanics principles on the design of rubble-mound breakwaters", Proc. Port and Oc. Engrg. Under Artic Conditions POAC'79, Norwegian Institute of Tech., Trondheim, Norway, pp. 1301-1318.
- Losada, M.A. y Giménez-Curto, L.A.** (1981). "Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action", Coastal Engineering, Vol. 4, Elsevier Science Ltd, pp. 187-206.
- Mansard, E.P. and Funke, E.R.** (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", Proceedings of Seventeenth Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia, pp. 154-172.
- Postma, G.M.** (1989). "Wave reflection from rock slopes under random wave attack", Master Thesis, Department of Civil Engineering, Delft University of Tecnology, Holland.
- Seeling, W.N. and Ahrens, J.P.** (1981). "Wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters", CERC Technical paper 81-1, Fort Belvoir, USACE, Vicksburg, MS, USA.
- Shore Protection Manual** (1984). "Structural Design: Physical Factors, Wave Forces, Stability of Rubble Structures", Vol. II Ed. USACE, pp. 7-211.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H.** (1972). "Wave reflection and transmission at permeable breakwaters", Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Report No. 147, Vicksburg, MS, USA.
- U. de Cantabria** (2000). "Transformación del oleaje en las proximidades de la costa", Ed. Universidad de Cantabria, España, Vol. 1, pp. 24-26.
- Van der Meer, J.W. and Zanuttigh, B.** (2006). "Wave reflection from coastal structures", Proceedings ICCE, Vol. 5, San Diego, California, USA, pp. 4337-4349.