

Estimación del porcentaje de vacíos mínimo de elementos de la capa coraza de los rompeolas en modelo hidráulico

Flores Álvarez Juan Esteban, Toledano Vega Noe, Estrada Camacho Juan Ramón

Investigadores de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte.

jflores@imt.mx, ntoledano@imt.mx; estradar@imt.mx

R e s u m e n

En general, en la construcción de rompeolas la conformación de las capas que forman el cuerpo de la estructura debe de ser de forma tal que permitan la estabilidad estructural y la durabilidad a lo largo del tiempo de estas obras de protección. Para lograr este propósito, es necesario vigilar durante su construcción que todos los materiales sean bien graduados en peso, forma geométrica y colocación.

Este proceso de construcción permite evitar en la manera de lo posible fallas estructurales del rompeolas debido principalmente a la acción del oleaje de tormenta. Es de especial atención la colocación de los elementos de la capa más expuesta al oleaje (capa coraza) la cual puede estar constituida por rocas o por elementos prefabricados de concreto. Cuando los elementos de la capa coraza son construidos de concreto, el proceso constructivo, el acarreo y colocación en el rompeolas juegan un papel fundamental en la durabilidad de los propios elementos como en la vida útil del rompeolas.

La colocación de los elementos de la capa coraza sobre los taludes de los rompeolas es uno de los puntos más importantes al construir este tipo de obras, para lo cual, existen manuales que, de acuerdo al elemento que se plantee para tal propósito, establecen los parámetros de partida para que se supervise su colocación. Tal es el caso de los elementos: Core Loc, Cubo tipo antifer y X-Block que se analizaron en el estudio del cual se deriva la presente publicación.

El estudio en modelo hidráulico reducido, el cual se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte, abordó los aspectos más relevantes de la colocación de los elementos mencionados en el párrafo anterior, como volumen de vacíos y formas específicas de colocación de cada uno de ellos sobre el rompeolas, con el fin de observar y constatar el daño que sufre un rompeolas de no ser construido de la manera correcta y adecuada en las obras de protección.

Los resultados obtenidos permitieron constatar la metodología planteada por los fabricantes de dichos elementos prefabricados, y sobre todo, exponer la importancia de la colocación por parte de las empresas constructoras de los elementos para poder así tener la confiabilidad de que las obras de protección sean duraderas y seguras durante el tiempo de vida útil planteado desde los proyectos ejecutivos y analíticos previos.

Por tal motivo, el objetivo principal del estudio en modelo físico fue aumentar el porcentaje de vacíos de la capa coraza de los rompeolas, para verificar cual sería el

mínimo de piezas que se podrían colocar por área de coraza para que esta sección se considerara estable y con daño mínimo causado por el oleaje, y que resultara duradera en el tiempo de vida útil de la estructura de protección.

Formulación y análisis del comportamiento de los rompeolas.

Los elementos que conforman la coraza de un rompeolas, en un inicio en la construcción de estructuras de protección costera y portuaria, fueron en su mayoría rocas de cualquier forma y especie, con el pasar de los años, el ser humano fue notando que las formas semiesféricas con salientes o aristas importantes y de material más sólido y compacto en comparación con otros, fueron las formas más adecuadas para conformar mejores elementos de protección contra el oleaje.

Con el paso de los años, estas piezas o elementos constituyentes del manto principal de un rompeolas a talud, se han ido modificando, ya que las necesidades se han incrementado de acuerdo a los requerimientos de generar y construir más y mejores obras de protección a lo largo y ancho del planeta, para poder realizar eficientemente los intercambios de mercancías, bienes y servicios cualquiera que estos fueren y que puedan ser transportados por medios marítimos.

Con la creciente demanda de mover más bienes materiales principalmente a lo largo y ancho de todo el planeta, la necesidad de crear nuevas obras de protección día con día con más y mejores diseños tanto de forma como de material también ha aumentado. La investigación a partir de aproximadamente el primer tercio del siglo XX hasta años recientes en este siglo XXI ha generado la creación de elementos artificiales con distintas formas geométricas que al ser colocadas en los rompeolas resulten más eficientes y eficaces. Estos elementos con distintas formas geométricas van desde los primeros cubos que fueron diseñados semejante a las rocas nombradas escollera (ver figura 1.1), formas cúbicas, bloques antifer o Cubo ranurado, tetrápodos, dolos, y distintas formas que varían de acuerdo al diseño que fue analizado en distintas instalaciones de laboratorios de distintas partes del mundo, para obtener los valores de estabilidad y densidad (volumen de vacíos) que inciden directamente en la trabazón (sujeción) entre las piezas mismas al momento de ser colocadas sobre el talud del rompeolas, han ido mejorando la creación de estas estructuras.

Armour unit	Country	Year	Armour unit	Country	Year
Cube	–	–	Seabee	Australia	1978
Tetrapod	France	1950	Shed	UK	1982
Tribar	USA	1958	Accropode	France	1980
Modified Cube	USA	1959	Haro	Belgium	1984
Stabit	UK	1961	Hollow Cube	Germany	1991
Akmon	NL	1962	Core-Loc [®]	USA	1996
Tripod	NL	1962	A-Jack	USA	1998
Cob	UK	1969	Diahitis	Ireland	1998
Dolos	RSA	1963	Samoa Block	USA	2002
Antifer Cube	France	1973			

Figura 1 Evolución de los elementos constituyentes de la capa coraza.

Fuente: Bakker, P. (2003).

Dentro del análisis para el cálculo y diseño de este tipo de elementos para construir la capa de coraza de los rompeolas se encuentra la fórmula establecida Castro (1933),

cuyas recomendaciones fueron mejoradas por Iribarren (1938), el cual fue considerado por muchos autores como la investigación inicial referente sobre estabilidad de la capa más expuesta al oleaje de los rompeolas.

Posteriormente durante el año 1950 Iribarren y Nogales, ratificaron la formulación realizada en 1938 con modificaciones en el parámetro de la altura de ola el cual toma en cuenta el valor de la profundidad del agua al pie de la estructura y el periodo de ola. El modelo final de estos investigadores se publicó en 1965, el cual resume algunas limitaciones de la utilización de la fórmula la cual se diseñó bajo el estudio y resultados de estructuras con diferentes pendientes y distintos tipos de elementos de coraza y las condiciones de ola.

Estos trabajos sirvieron como base para realizar más a cerca del mismo tema alrededor del mundo, tal es el caso de Larras (1952) quien tomó en cuenta en modelos la profundidad del agua al pie de la estructura y la longitud de ola.

En Estados Unidos, Mathews, Epstein y Tirrel (1949) propusieron formulaciones para la estabilidad hidráulica en 1948 y 1949 respectivamente, cuyo reporte se presentó como inédito en Bruun (1985). Hickson y Rodolfo (1950) propusieron un modelo establecido para embarcaderos en 1950 y Hudson y Jackson (1953) presentaron una fórmula en 1953 que consistió en algunas modificaciones realizadas a la fórmula de Iribarren.

La formulación empírica de modelos de diseño basada en el parámetro de estabilidad corresponde a Robert Hudson (1958 y 1959), la cual es la más ampliamente conocida. Hudson notó que los coeficientes experimentales del modelo de Iribarren no pudieron determinarse con precisión a partir de pequeños experimentos a escala de estabilidad de rompeolas porque tuvieron variaciones de una prueba a otra para las mismas condiciones experimentales. Así, Hudson propuso en 1958 una fórmula más sencilla tras realizar nuevas pruebas de estabilidad con oleaje regular y utilizando rocas de cantera y tetrápodos (lo que más tarde fue analizado con tribar, tetraedro y otra forma especial de elementos prefabricados de concreto):

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

Donde:

K_D es el coeficiente de estabilidad del elemento, en función de la relación $H/HD=0$

$HD = 0$ es la altura límite de ola (donde no se produce daño), considerado como menos del 1% del volumen de unidades erosionadas relativo a él volumen total de rocas en la capa de coraza.

$\gamma_s = \rho_s * g$ es el peso específico de las unidades de la capa de coraza

H es la altura de ola significativa

$s_r = \gamma_s / \gamma_w$ es la densidad relativa de los elementos de coraza sumergidos en agua

α es la pendiente de la estructura del lado mar

De igual forma la relación $H/HD=0$ se vinculó a un cierto porcentaje de daño utilizados en la formulación de R. Hudson, por lo que probablemente fue uno de los primeros en estimar cuantitativamente el daño en estructuras de protección portuarias. Tal acercamiento fue posible debido a la estandarización de un método de perfilado de las secciones ensayadas para cuantificar la forma y cantidad del daño en rompeolas, desarrollado primeramente en los Estados Unidos de Norteamérica.

Este método de estimación mediante perfiles de daño evidenció algunas deficiencias de la fórmula de R. Hudson, donde en este contexto Van der Meer (1985 a 1988) desarrolló un modelo de estabilidad con una difusión similar a la de R. Hudson, donde Van der Meer consideró la altura (H) y el período de ola (por medio del número de Iribarren, ξ_0), el número de ondas (Nw), el diámetro medio del cubo (Dn50), el peso específico relativo (Δ), la pendiente del rompeolas ($\cot \alpha$), y la permeabilidad de capa (P). También se consideró el área de erosión adimensional (S) en las fórmulas de la siguiente manera:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 6.2 \xi_0^{0.5} p^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}} \right)^{0.2} \quad (\text{ecuación 2})$$

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 1.0 \xi_0^p \sqrt{\cot \alpha} P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}} \right)^{0.2} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde para el oleaje con rompiente tipo plunging se cumple la ecuación 2, y para la rompiente de oleaje generado con el espectro de energía surging se cumple la ecuación 3.

Esta formulación diferencia las ondas con rompiente de ola tipo plunging y las ondas con rompiente de ola de surging, y también incluyó la posibilidad de aplicarse en un diseño probabilístico. Para este propósito, se puede suponer que el coeficiente 6.2 en la ecuación (2) se aplica con una desviación estándar de 0.4. Del mismo modo, se puede suponer que el coeficiente 1.0 en la ecuación (3) se utiliza normalmente con una desviación estándar de 0.08. Por lo que la estabilidad mínima se alcanza cuando $\xi \approx 3$ en la fórmula. Este escenario corresponde a las olas que colapsan: mientras que las olas que rompen tipo plunging se interpretan como las causantes de daño durante el ascenso y descenso del oleaje, mientras que las olas que colapsan (rompen) se observa que erosionan la capa de coraza durante el ascenso y descenso del oleaje.

Van der Meer realizó 262 pruebas y también consideró las 300 pruebas de Thompson y Shuttler (1975) donde encontró contrariamente a ellos que el daño se relacionó directamente con el período de ola después de analizar sus datos. Comprobó que la estabilidad de los modelos de rompeolas de enrocamiento impermeables, convencionales y homogéneos está directamente relacionada con la permeabilidad total de la estructura. Aun cuando empleó elementos prefabricados de concreto y rocas naturales seleccionadas, no relacionó influencia de estos elementos en el gradiente de estabilidad. Por esta razón el parámetro Dn50 solo fue considerado en la fórmula. Posteriormente utilizó espectros diferentes de Pierson-Moskowitz (uno de banda ancha y otro de banda estrecha), no encontrando relación entre el daño y la forma espectral o el grupo de ondas. Por el contrario, si estableció notables diferencias entre

las pruebas con oleaje monocromático e irregular, y también determinó una dependencia del daño en función del número de olas. Por lo que estas formulaciones son solo válidas para un número de olas de entre 1,000 y 7,000, que tienden a sobrestimar el daño para más de 8,000 olas.

En 1998, Van der Meer relacionó los criterios de Hudson de "no daño" cuando las capas inferiores a la coraza aun no son expuestas por el oleaje con el criterio de fallo cuando estas capas ya han sido exteriorizadas con los valores correspondientes el área de erosión adimensional (S) que está directamente relacionada con la pendiente del rompeolas. Además, adaptó de sus fórmulas establecidas para una tormenta única para el cálculo del daño causado por tormenta progresivas y acumulativas.

Van der Meer también desarrolló en 1988 una fórmula para estimar el daño en estructuras construidas en la capa coraza a base de cubos, tetrápodos y acrópodos, al igual que una fórmula para analizar las pendientes más comunes de los rompeolas. En esta última fórmula introdujo el parámetro de daño de Hedar quien fue el primero en proponerlo en 1960, el cual consiste en tomar en cuenta el número de unidades (N₀) desplazadas fuera de la capa de coraza consideradas dentro de un ancho de capa equivalente a un cubo. De igual forma, asumió que este daño equivalente al área de un cubo es igual al diámetro nominal D_{n50} para cubos (ecuación 4), 0.65h para los tetrápodos (ecuación 5) y 0.7h para acrópodos (ecuación 6).

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = \left(6.7 \frac{N_0^{0.4}}{N_W^{0.3}} + 1 \right) \left(\frac{H_s}{L_0} \right)^{-0.1} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = \left(3.75 \frac{N_0^{0.4}}{N_W^{0.25}} + 0.85 \right) \left(\frac{H_s}{L_0} \right)^{-0.2} \quad (\text{ecuación 5})$$

Falla si:

$$N_0 > 0.5 \rightarrow \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 4.1 \quad (\text{ecuación 6})$$

Evolución geométrica de elementos constituyentes de la capa coraza.

Con el análisis y formulación del comportamiento de los rompeolas, principalmente con la estimación del daño en la capa de coraza, la cual se construye con roca o elementos prefabricados de concreto, lo que es de suma relevancia en el diseño, comportamiento y determinación de la durabilidad y funcionalidad de estas obras de protección portuaria y costera. Donde principalmente, este análisis realizado se ha enfocado en la importancia de determinar el óptimo acomodo de las piezas de la coraza para determinar el mejor acomodo de acuerdo al espaciamiento de los elementos y grosor de la capa.

En la investigación del estado del arte para realizar el proyecto de investigación y la publicación técnica número 700¹ del Instituto Mexicano del Transporte, de la cual se desprende este artículo, referencia que los elementos de la coraza de un rompeolas (figura 2) hay distintas formas geométricas en la actualidad, las cuales cuentan con un distinto coeficiente de estabilidad de acuerdo con su forma geométrica, que acorde a

¹ Fuente: Flores, J. y Al. (2022). Publicación Técnica No. 700

esta característica tiene un grado de estabilidad bajo la acción del oleaje y un volumen de vacíos al ser colocados en el rompeolas. Estos factores de los elementos de la coraza de un rompeolas hicieron surgir la necesidad de analizar en un estudio en modelo hidráulico, estas características mínimas de acomodo de las piezas para determinar el parámetro mínimo de funcionalidad que permitan tener un agarre (trabazón) óptimo entre las mismas piezas colocadas sobre los taludes de los rompeolas, y que brinde una certeza de durabilidad de las obras marítimas y portuarias.

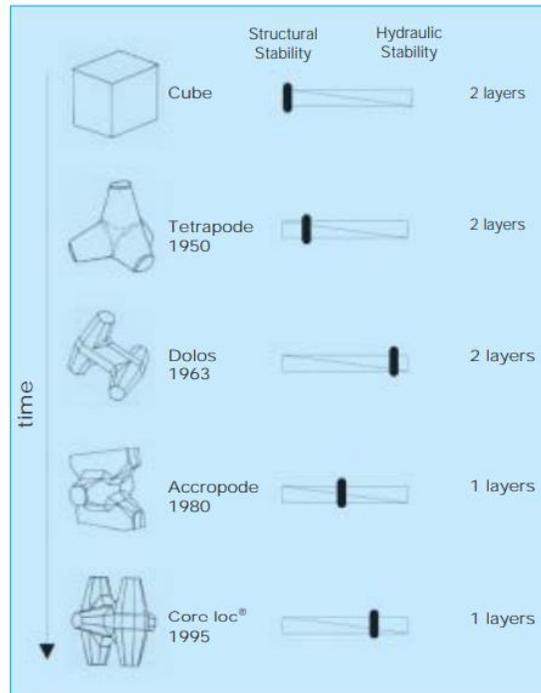


Figura 2 Evolución en el diseño de los elementos de coraza para rompeolas a talud.

Fuente: Bakker, P. (2004).

Para el análisis del comportamiento estructural de los rompeolas en la capa de coraza con elementos artificiales diferentes a la roca se planteó la utilización del Cubo ranurado (tipo antifer), Core loc y Bari o Xbloc.

Al tener en cuenta el planteamiento de estos tres elementos para el análisis del comportamiento estructural de secciones de rompeolas, se recopilaron las características propias de cada elemento como el número de piezas a colocar en la coraza para brindar una óptima cobertura al rompeolas, el coeficiente de estabilidad (K_D), y la forma de colocación de estos elementos en el rompeolas (tabla 1).

De igual forma para el cálculo del número total de elementos a colocar en las secciones de rompeolas analizadas se recabaron los valores del coeficiente de capa y porosidad promedio de la coraza (tabla 2), y el coeficiente de talud (tabla 3) de cada elemento utilizado en el estudio en modelo hidráulico.

Cabe señalar que para la determinación del espesor de capa y el número de elementos a emplear para la construcción de las secciones de rompeolas del modelo hidráulico se utilizó la fórmula (ecuación 7) de Robert Hudson (1974) donde también se toma en

cuenta el coeficiente de porosidad (o porcentaje de vacíos).

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{w_r} \right)^{1/3} \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde:

r es el espesor promedio de la capa en metros (o pies),

n es el número de piezas de elemento de concreto o roca de cantera,

K_Δ es el coeficiente de capa (de acuerdo al elemento de la coraza)

W es el peso de las piezas individuales en toneladas (Ton. /m³), (que se determina con la ecuación 1.1), y

w_r es la densidad de masa en toneladas por metro cúbico (Ton. /m³).

Para el cálculo de los espesores de las capas se tomó en cuenta las recomendaciones del Shore Protection Manual (1984) para cada elemento de coraza planteado en el estudio y calculado con la siguiente formula:

$$e = nk_{\alpha} \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (\text{ecuación 8})$$

Donde:

e Espesor de la capa

n Número de capas

k_α Coeficiente de capa.

W Peso de los elementos

Tabla 1 Número de elementos por capa, coeficiente de estabilidad y valor del ángulo de reposo del rompeolas.

Valor de K _D para roca y elementos artificiales de concreto											
Nombre de los elementos artificiales de concreto	Número de capas de la coraza	Colocación	Valor de K _d (Cuerpo)			Valor de K _d (Morro)					
			Ola rompiente	Ola no rompiente	cot α	Ola rompiente	Ola no rompiente	cot α			
Roca de cantera	2	azar	2.1	2.4	1.5 a 5.0	1.7	1.9	1.5-3.0			
Lisa y redonda									2.8	3.2	2.3
Rugosa y angular									1	azar	2.9
Rugosa y angular	2	azar	3.5	4		2.9	3.2	1.5			
						2.5	2.8	2.0			
						2.0	2.3	3.0			
Rugosa y angular	3	azar	3.9	4.5		3.7	4.2	1.5-3.0			
	2	especial	4.8	5.5		3.5	4.5				
Tetrápodos y Cuadrípodo	2	azar	7.2	8.3		5.9	6.6	1.5			
						5.5	6.1	2.0			
					3.7	4.1	3.0				
Tribar	2	azar	9	10.4	8.3	9.0	1.5				
					7.8	8.5	2.0				
					7.0	7.7	3.0				
	1	uniforme	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5-3.0				
Dolos	2	azar	22	25	2.0	15.0	16.5	2.0			
						13.5	15.0	3.0			
Cubo modificado	2	azar	6.8	7.8	1.5 a 5.0	5.0	7.0	1.5-3.0			
Hexápodo	2	azar	8.2	9.5							
Core loc	1	azar	16			13					
Bari (o X-Block)	1	azar/GPS	16			13					

Fuente: U. S. Army Corps of Engineers, (1984)

Tabla 2 Coeficientes de capa y porosidad por elemento de coraza.

Coeficiente de capa y porosidad promedio de la coraza				
Elemento de la coraza	Número de capas	Colocación	Coeficiente de capa	Porosidad en %
Roca de cantera (lisa)	2	volteo	1.02	38
Roca de cantera (rugosa)	2	volteo	1.15	37
Roca de cantera (rugosa)	3	volteo	1.10	40
Cubo modificado	2	volteo	1.10	47
Tetrápodo	2	volteo	1.10	50
Cuadrípodo	2	volteo	0.95	49
Hexápodo	2	volteo	1.15	47
Tribar	2	volteo	1.02	54
Dolos	2	volteo	1.00	63
Tribar	1	uniforme	1.13	47
Core loc	1	uniforme	1.51	60
Bari (o X-Block)	1	uniforme/GPS	1.51	65

Fuente: U. S. Army Corps of Engineers, (1984).

Tabla 3 Coeficientes de talud para el diseño de rompeolas.

Coeficiente de talud	
1 : 1	0.414
1.33 : 1	0.334
1.5 : 1	0.302
2 : 1	0.236
2.5 : 1	0.193
3 : 1	0.162
3.5 : 1	0.140
4 : 1	0.123
5 : 1	0.099

Fuente: U. S. Army Corps of Engineers, (1984)

Cabe señalar que los valores de las tablas 1 y 2 para los elementos Core loc y Bari o XBlock fueron recopilados en fuentes de información² más recientes que las citadas al termino de cada tabla.

El modelo

Para analizar el comportamiento de los elementos de la coraza de un rompeolas (Cubo anifer, Core loc y Bari o XBlock) se dispuso de las piezas a escala que ya se tenían construidas en el Laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte y junto con las características geométricas del canal de olas (35x5x1.2 m) se obtuvieron las escalas (tabla 4) de las secciones de rompeolas verificadas en el estudio en modelo reducido de fondo fijo. El modelo se rigió con la Ley de similitud de Froude.

Tabla 4 Escalas geométricas para llevar a cabo la construcción y análisis del modelo hidráulico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima.

<i>Elementos de coraza de la sección tipo</i>	<i>Escala de líneas (EL)</i>
Cubo antifer	1:56
Core loc	1:47.4
Bari o Xbloc	1:65.4

fuentes de información:

² Fuente: Melby, J. (1997).- Core loc

Fuente : Bakker, P. (2003). – Bari o XBlock

Diseño de Estructuras

Los pesos de los elementos para construir las estructuras (talud 1.5:1) a escala se obtuvieron a partir de la fórmula de Hudson, cuya geometría se muestra en las figuras 3 a 5.

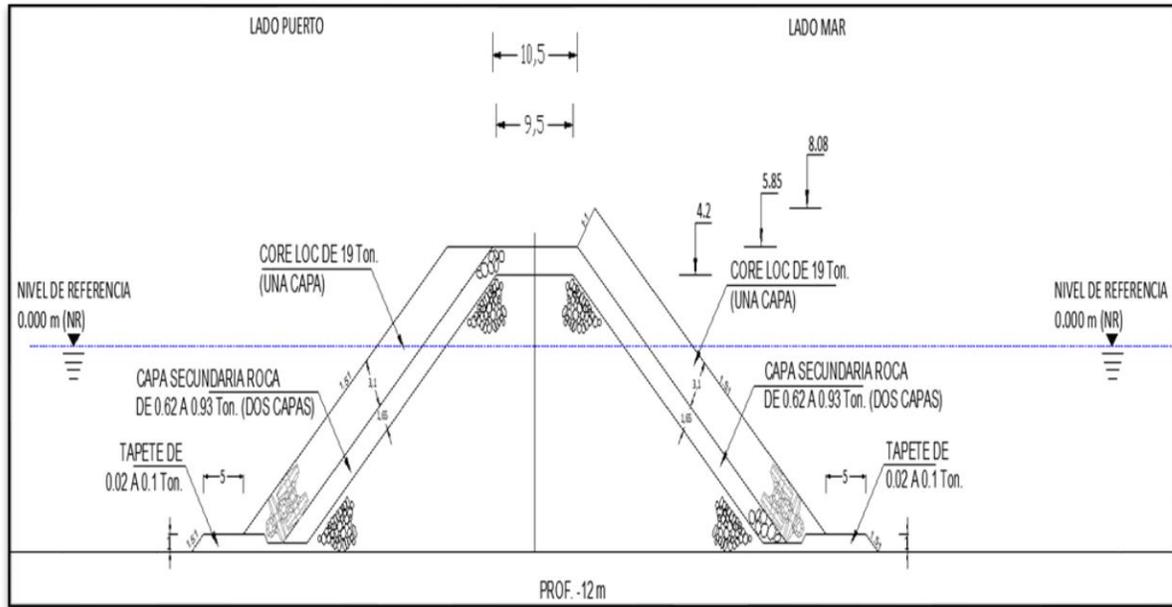


Figura 3 Diseño de la sección transversal con elementos Core loc en la coraza.

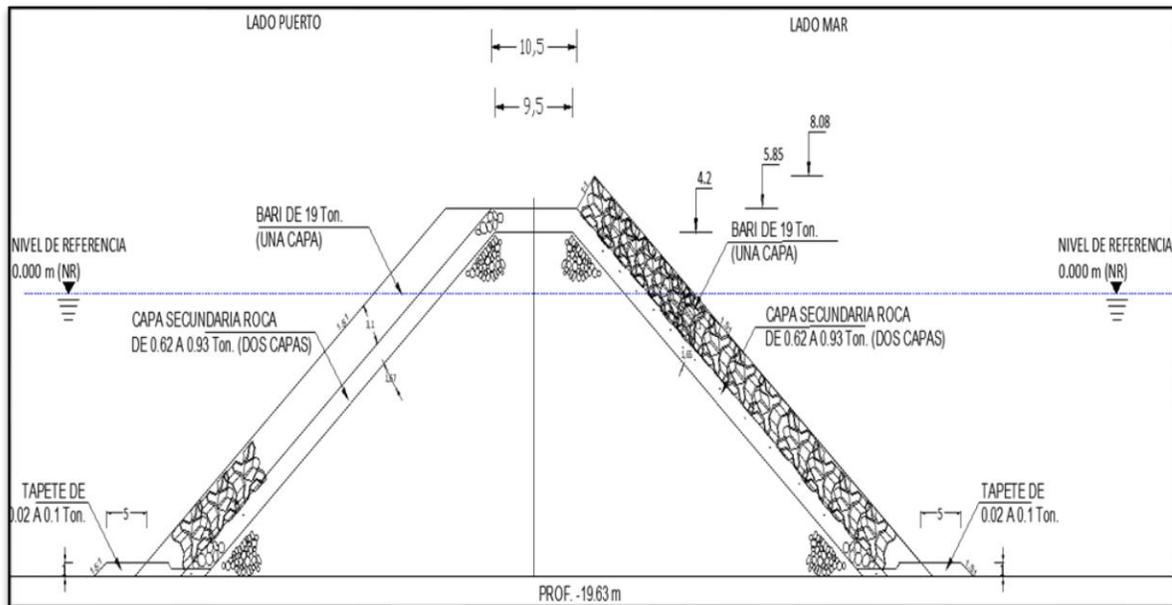


Figura 4 Diseño de la sección transversal con elementos Bari o Xblock en la coraza.

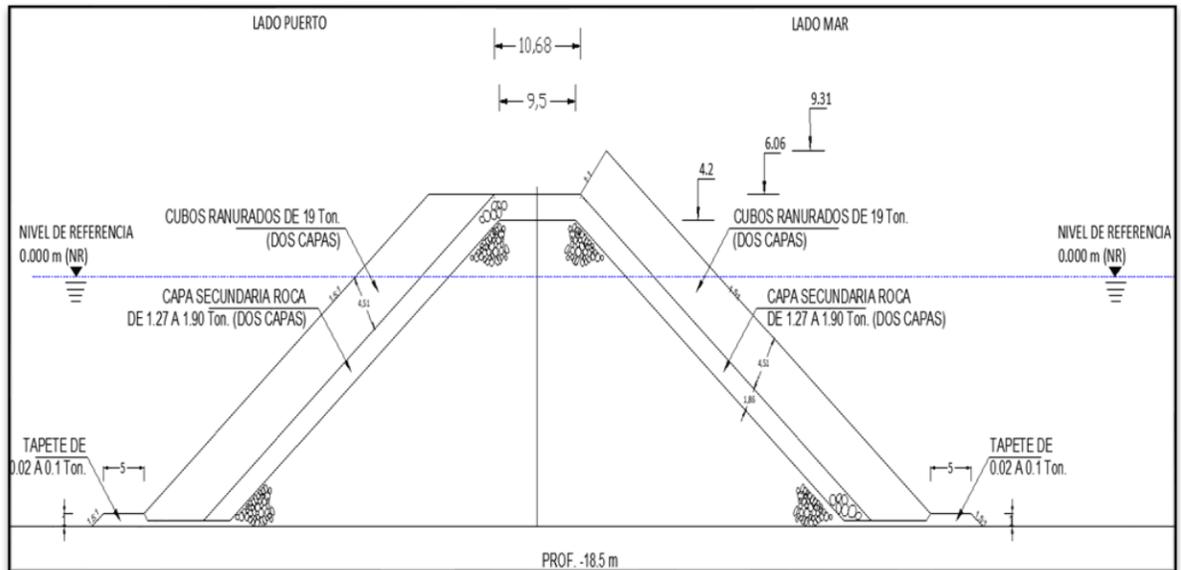
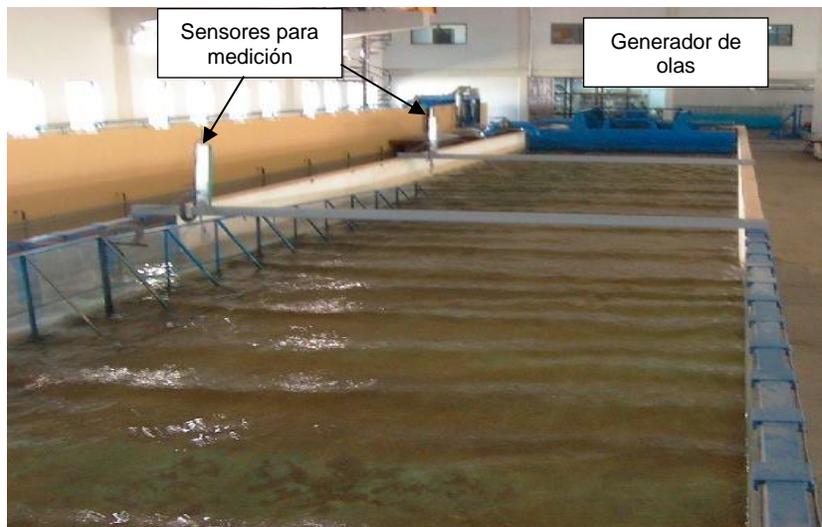


Figura 5 Diseño de la sección transversal con Cubo ranurado en la coraza.

Medio, Equipo e instrumentación

El canal de olas (Fotografía 1), tiene dimensiones de 35 m x 5 m x 1.20 m, cuenta con un sistema de alimentación y desagüe, un generador de olas con paleta metálica, con servo motor de corriente directa con poca inercia operado por una computadora. Este sistema de generación es capaz de reproducir oleaje monocromático y aleatorio unidireccional con un tirante máximo de agua de 80 cm lo que permite generar oleaje con alturas de ola de 0 a 40 cm con períodos de ola de 0.5 a 5 segundos.



Fotografía 1 Canal de olas del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte.

Los sensores para la medición del oleaje registran la variación de niveles de agua, estos se conectan a un convertidor de señales analógicas y transforman los datos analógicos en digitales para su interpretación.

Al término de los ensayos, el equipo permite analizar las señales captadas por el sensor para estimar alturas de ola significativa ($H_{1/3}$), ($H_{1/10}$) y altura máxima ($H_{MÁX}$), así como el período del tren de olas (T). Para amortiguar el efecto de reflexión en el canal, se colocaron taludes de roca en ambos extremos, uno en la parte posterior del generador y en la parte final del canal.

Procedimiento experimental

Para la verificación de los porcentajes de vacíos mínimos permisibles de los elementos colocados en el modelo hidráulico, se realizaron 216 ensayos con secciones de rompeolas a escala, 72 ensayos para cada sección construida con los diferentes elementos de prueba (Cubo antifer, Core loc y Bari o XBlock), como se indica en las tablas 5 a 7.

Dentro del canal de olas se utilizaron 2 sensores (fotografía 2) de oleaje tipo resistivo de ± 5 volts de resolución, colocados equidistantemente a 0.5 m. entre cada uno de ellos para medir la altura de ola incidente H_i y la reflejada H_r , como se indica en Figura 6.



Fotografía 2 Sensores tipo resistivo de medición de oleaje para los ensayos en modelo hidráulico en el canal de olas.

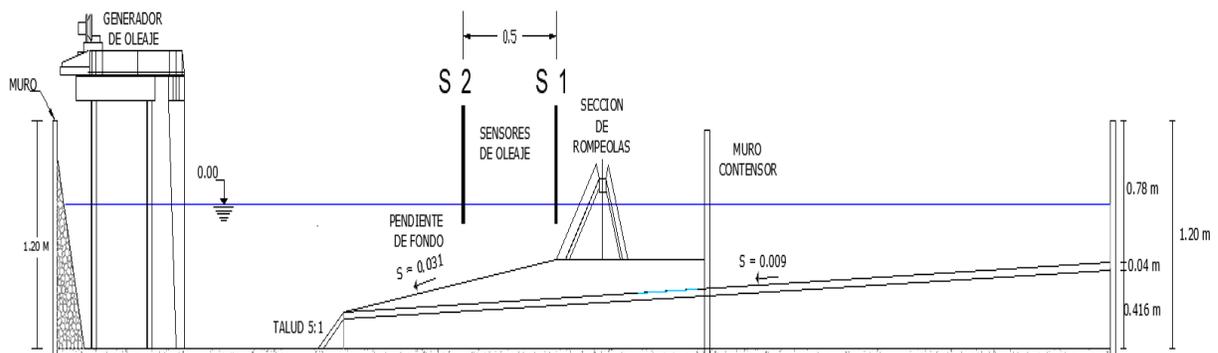


Figura 6. Ubicación de los sensores de oleaje en el modelo.

Construidas las secciones, colocados los sensores y una vez lleno el canal, se

seleccionaron las señales de oleaje de acuerdo a los espectros de energía Bretschneider-Mitsuyasu y JONSWAP, para lo cual se realizó el programa de trabajo (Tablas 5 a 7) que se presenta a continuación:

Tabla 5 Programa de ensayos para secciones de rompeolas con Core loc en la coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo	Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
Core loc	0.00 B.M.	10	4	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_01	Core loc	0.00 B.M.	10	4	65%	JONSWAP	Ensayo_37
			5	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_02				5	65%	JONSWAP	Ensayo_38
			6	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_03				6	65%	JONSWAP	Ensayo_39
			7	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_04				7	65%	JONSWAP	Ensayo_40
		14	4	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_05			14	4	65%	JONSWAP	Ensayo_41
			5	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_06				5	65%	JONSWAP	Ensayo_42
			6	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_07				6	65%	JONSWAP	Ensayo_43
			7	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_08				7	65%	JONSWAP	Ensayo_44
		18	4	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_09			18	4	65%	JONSWAP	Ensayo_45
			5	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_10				5	65%	JONSWAP	Ensayo_46
			6	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_11				6	65%	JONSWAP	Ensayo_47
			7	60%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_12				7	65%	JONSWAP	Ensayo_48
		10	4	60%	JONSWAP	Ensayo_13			10	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_49
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_14				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_50
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_15				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_51
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_16				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_52
		14	4	60%	JONSWAP	Ensayo_17			14	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_53
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_18				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_54
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_19				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_55
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_20				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_56
		18	4	60%	JONSWAP	Ensayo_21			18	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_57
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_22				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_58
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_23				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_59
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_24				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_60
		10	4	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_25			10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_61
			5	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_26				5	68%	JONSWAP	Ensayo_62
			6	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_27				6	68%	JONSWAP	Ensayo_63
			7	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_28				7	68%	JONSWAP	Ensayo_64
		14	4	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_29			14	4	68%	JONSWAP	Ensayo_65
			5	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_30				5	68%	JONSWAP	Ensayo_66
			6	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_31				6	68%	JONSWAP	Ensayo_67
			7	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_32				7	68%	JONSWAP	Ensayo_68
		18	4	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_33			18	4	68%	JONSWAP	Ensayo_69
			5	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_34				5	68%	JONSWAP	Ensayo_70
			6	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_35				6	68%	JONSWAP	Ensayo_71
			7	65%	Bretschneider-Mitsuyasu	Ensayo_36				7	68%	JONSWAP	Ensayo_72

Tabla 6 Programa de ensayos para secciones de rompeolas con Bari o XBlock en la coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Periodo en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo	Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Periodo en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
Bari Xblock	0.00 B.M.	10	4	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_73	Bari Xblock	0.00 B.M.	10	4	65%	JONSWAP	Ensayo_109
			5	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_74				5	65%	JONSWAP	Ensayo_110
			6	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_75				6	65%	JONSWAP	Ensayo_111
			7	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_76				7	65%	JONSWAP	Ensayo_112
		14	4	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_77			14	4	65%	JONSWAP	Ensayo_113
			5	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_78				5	65%	JONSWAP	Ensayo_114
			6	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_79				6	65%	JONSWAP	Ensayo_115
			7	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_80				7	65%	JONSWAP	Ensayo_116
		18	4	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_81			18	4	65%	JONSWAP	Ensayo_117
			5	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_82				5	65%	JONSWAP	Ensayo_118
			6	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_83				6	65%	JONSWAP	Ensayo_119
			7	60%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_84				7	65%	JONSWAP	Ensayo_120
		10	4	60%	JONSWAP	Ensayo_85			10	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_121
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_86				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_122
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_87				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_123
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_88				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_124
		14	4	60%	JONSWAP	Ensayo_89			14	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_125
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_90				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_126
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_91				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_127
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_92				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_128
		18	4	60%	JONSWAP	Ensayo_93			18	4	68%	Bretschneider-	Ensayo_129
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_94				5	68%	Bretschneider-	Ensayo_130
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_95				6	68%	Bretschneider-	Ensayo_131
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_96				7	68%	Bretschneider-	Ensayo_132
		10	4	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_97			10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_133
			5	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_98				5	68%	JONSWAP	Ensayo_134
			6	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_99				6	68%	JONSWAP	Ensayo_135
			7	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_100				7	68%	JONSWAP	Ensayo_136
		14	4	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_101			14	4	68%	JONSWAP	Ensayo_137
			5	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_102				5	68%	JONSWAP	Ensayo_138
			6	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_103				6	68%	JONSWAP	Ensayo_139
			7	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_104				7	68%	JONSWAP	Ensayo_140
		18	4	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_105			18	4	68%	JONSWAP	Ensayo_141
			5	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_106				5	68%	JONSWAP	Ensayo_142
			6	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_107				6	68%	JONSWAP	Ensayo_143
			7	65%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_108				7	68%	JONSWAP	Ensayo_144

Tabla 7 Programa de ensayos para secciones de rompeolas con Cubo antifer en la coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo	Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
Cubo antifer	0.00 B.M.	10	4	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_145	Cubo antifer	0.00 B.M.	10	4	52%	JONSWAP	Ensayo_181
			5	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_146				5	52%	JONSWAP	Ensayo_182
			6	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_147				6	52%	JONSWAP	Ensayo_183
			7	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_148				7	52%	JONSWAP	Ensayo_184
		14	4	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_149			14	4	52%	JONSWAP	Ensayo_185
			5	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_150				5	52%	JONSWAP	Ensayo_186
			6	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_151				6	52%	JONSWAP	Ensayo_187
			7	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_152				7	52%	JONSWAP	Ensayo_188
		18	4	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_153			18	4	52%	JONSWAP	Ensayo_189
			5	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_154				5	52%	JONSWAP	Ensayo_190
			6	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_155				6	52%	JONSWAP	Ensayo_191
			7	47%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_156				7	52%	JONSWAP	Ensayo_192
		10	4	47%	JONSWAP	Ensayo_157			10	4	57%	Bretschneider-	Ensayo_193
			5	47%	JONSWAP	Ensayo_158				5	57%	Bretschneider-	Ensayo_194
			6	47%	JONSWAP	Ensayo_159				6	57%	Bretschneider-	Ensayo_195
			7	47%	JONSWAP	Ensayo_160				7	57%	Bretschneider-	Ensayo_196
		14	4	47%	JONSWAP	Ensayo_161			14	4	57%	Bretschneider-	Ensayo_197
			5	47%	JONSWAP	Ensayo_162				5	57%	Bretschneider-	Ensayo_198
			6	47%	JONSWAP	Ensayo_163				6	57%	Bretschneider-	Ensayo_199
			7	47%	JONSWAP	Ensayo_164				7	57%	Bretschneider-	Ensayo_200
		18	4	47%	JONSWAP	Ensayo_165			18	4	57%	Bretschneider-	Ensayo_201
			5	47%	JONSWAP	Ensayo_166				5	57%	Bretschneider-	Ensayo_202
			6	47%	JONSWAP	Ensayo_167				6	57%	Bretschneider-	Ensayo_203
			7	47%	JONSWAP	Ensayo_168				7	57%	Bretschneider-	Ensayo_204
		10	4	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_169			10	4	57%	JONSWAP	Ensayo_205
			5	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_170				5	57%	JONSWAP	Ensayo_206
			6	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_171				6	57%	JONSWAP	Ensayo_207
			7	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_172				7	57%	JONSWAP	Ensayo_208
		14	4	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_173			14	4	57%	JONSWAP	Ensayo_209
			5	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_174				5	57%	JONSWAP	Ensayo_210
			6	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_175				6	57%	JONSWAP	Ensayo_211
			7	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_176				7	57%	JONSWAP	Ensayo_212
		18	4	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_177			18	4	57%	JONSWAP	Ensayo_213
			5	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_178				5	57%	JONSWAP	Ensayo_214
			6	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_179				6	57%	JONSWAP	Ensayo_215
			7	52%	Bretschneider-Mitsubishi	Ensayo_180				7	57%	JONSWAP	Ensayo_216

Como se puede observar en las tablas 5 a 7 los porcentajes de vacíos para las capas de coraza con elementos Core loc, Bari o XBlock y Cubo tipo antifer se propusieron a partir del recomendado en el estado del arte (60, 65 y 47%), y se fueron aumentando en un 5% hasta alcanzar un máximo de 10% para los elementos Cubo ranurado y un 8% para Core loc y Bari o Xblock, es decir, se fue reduciendo el numero de elementos por capa de coraza hasta determinar cual era el menor posible para que la sección de rompeolas no sufriera un daño sustancial mayor al 5% de estabilidad y se encontrara en la condición de falla en los rompeolas, como lo marcan los parámetros internacionales.

La duración de los ensayos se determinó de 4 hrs en prototipo y en modelo en base a la escala para cada sección con el elemento correspondiente de coraza con el cual fue construida, con el fin de caracterizar de manera adecuada el daño en cada una de las secciones ensayadas, los tiempos por ensayo se muestran en la tabla 8.

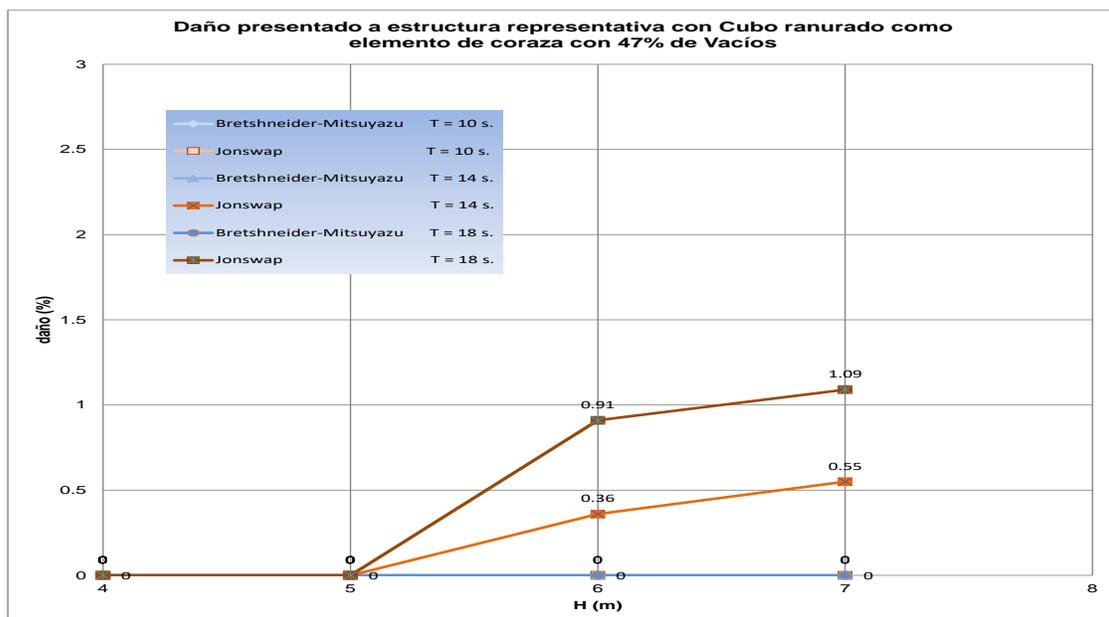
Tabla 8 Tiempos de ensayos por elemento de coraza

<i>Elementos de coraza de la sección tipo</i>	<i>Tiempo de ensayo (min) (t)</i>
Cubo ranurado (tipo antifer)	32
Core loc	34.8
Bari o Xbloc	29.7

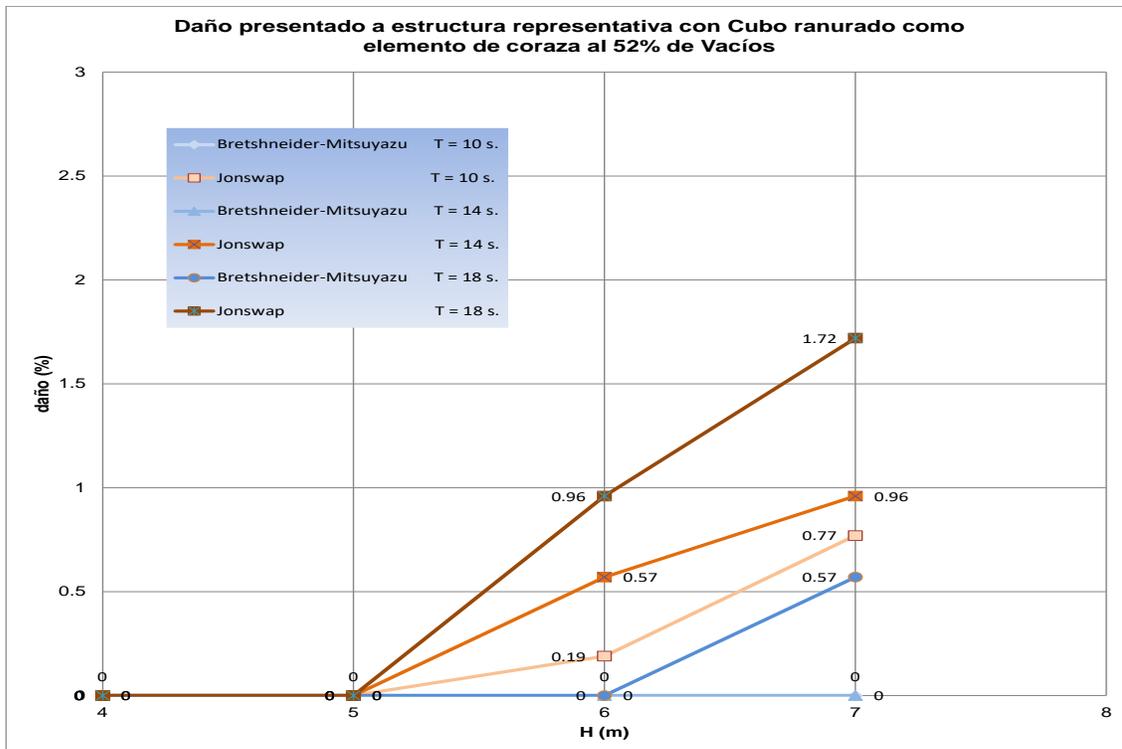
Análisis de Resultados

Con las condiciones para los ensayos establecidas, se llevaron acabo los 216 ensayos para la verificación del comportamiento de las secciones de rompeolas construidas con los elementos Cubo ranurado (tipo antifer), Core loc y Bari o XBlock, los resultados de la serie de ensayos se muestran en las siguientes graficas.

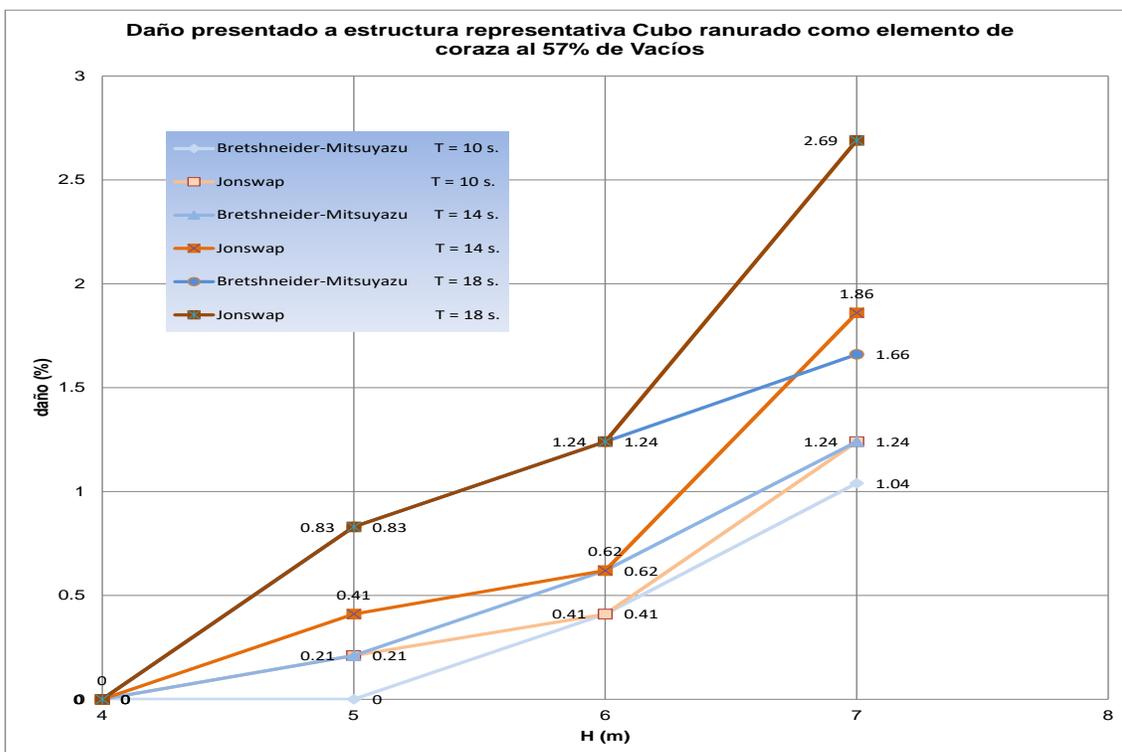
Gráficas comparativas del daño producido a las secciones de rompeolas.



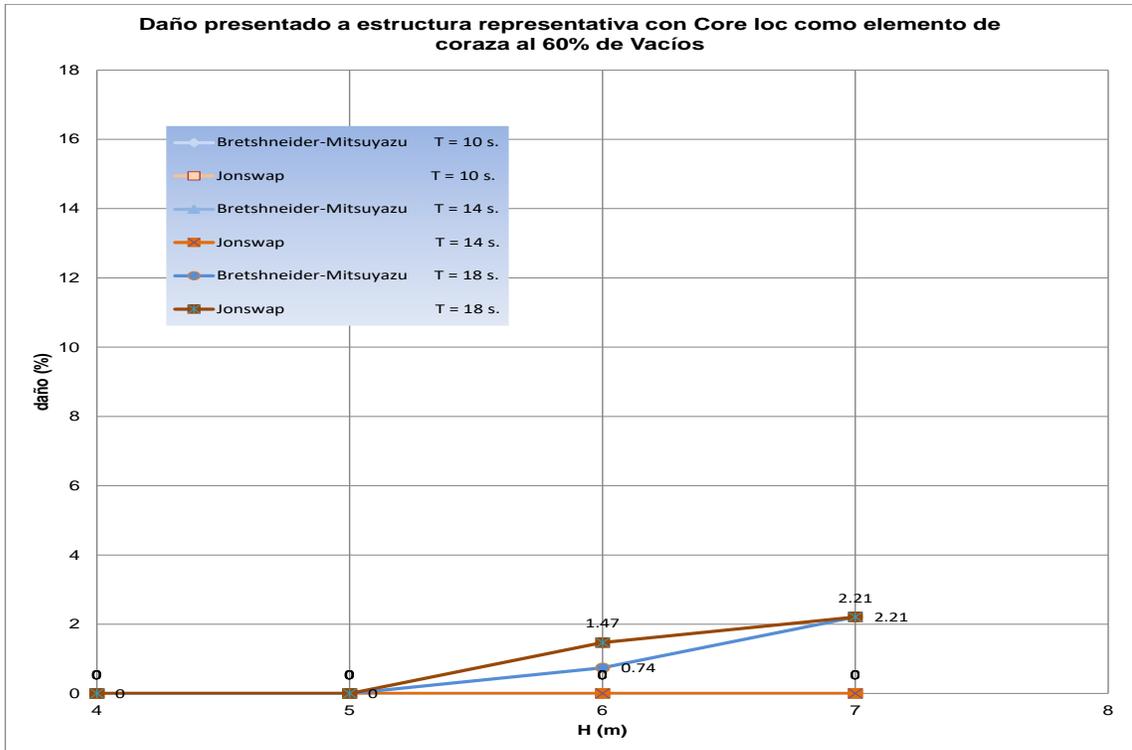
Gráfica 1 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 47%.



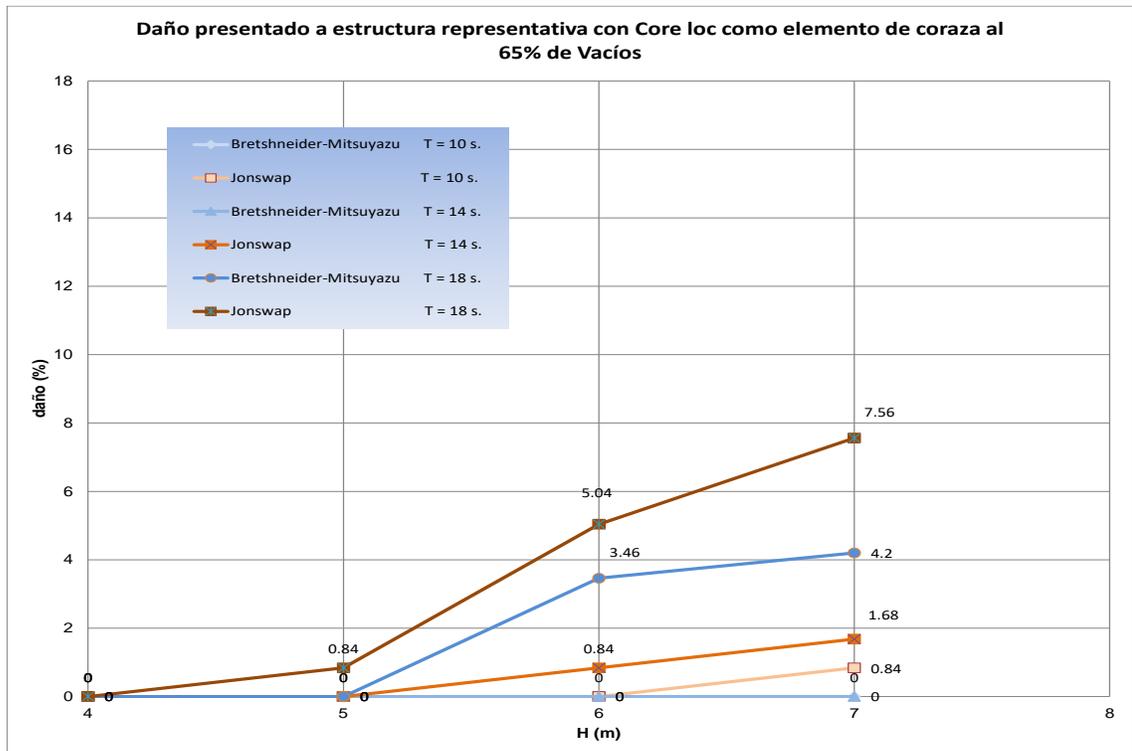
Gráfica 2 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 52%.



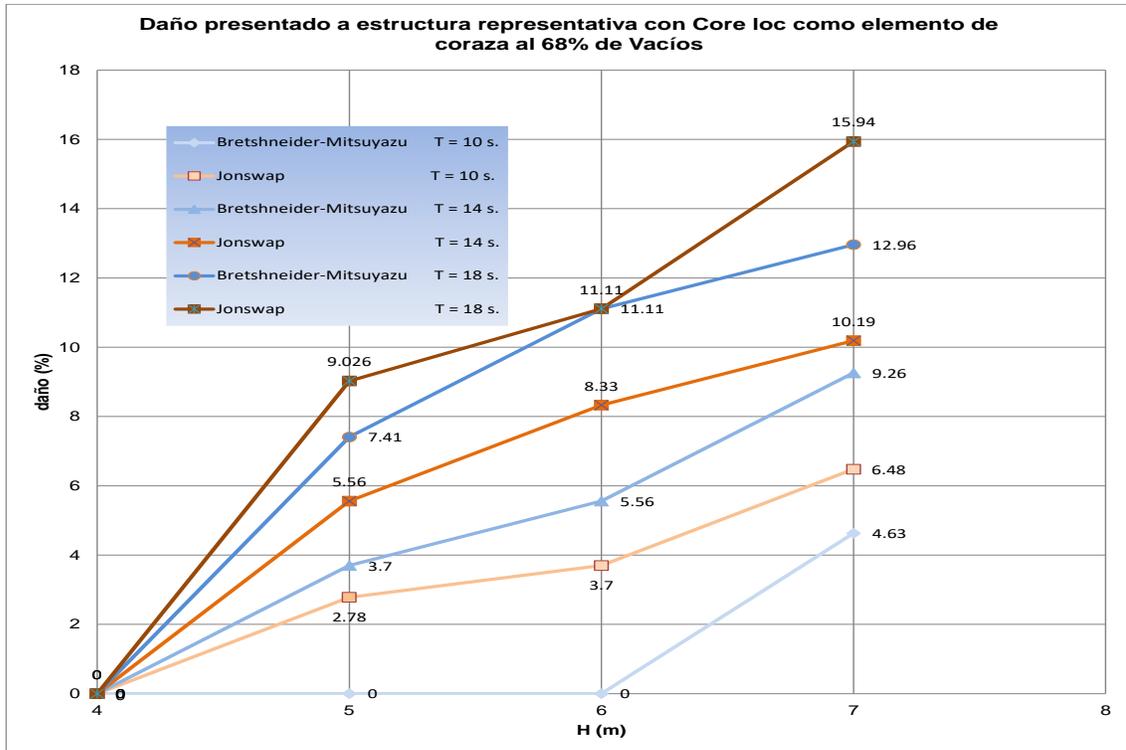
Gráfica 3 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 57%.



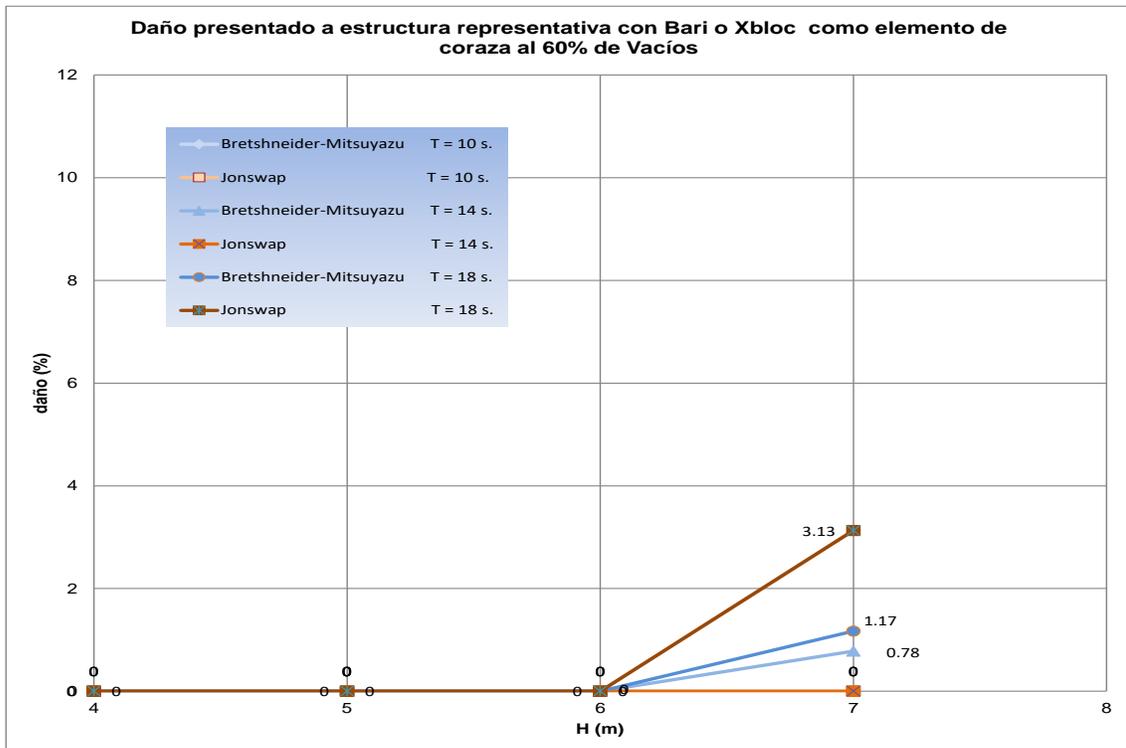
Gráfica 4 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 60%.



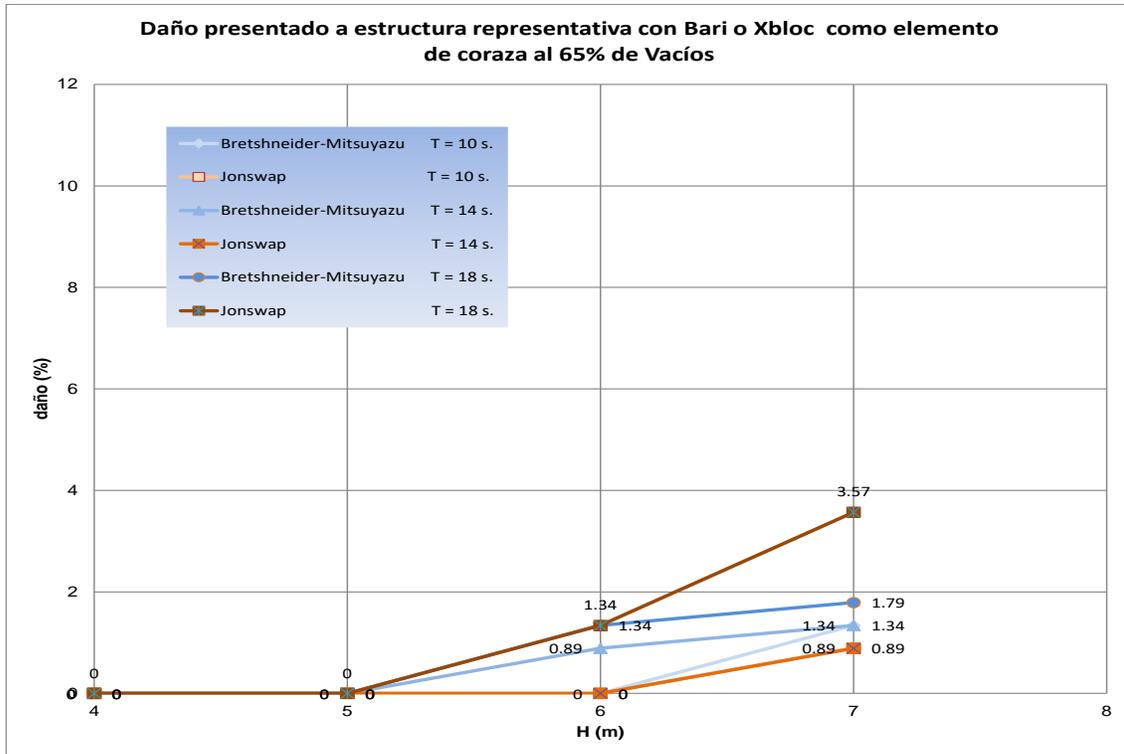
Gráfica 5 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 65%.



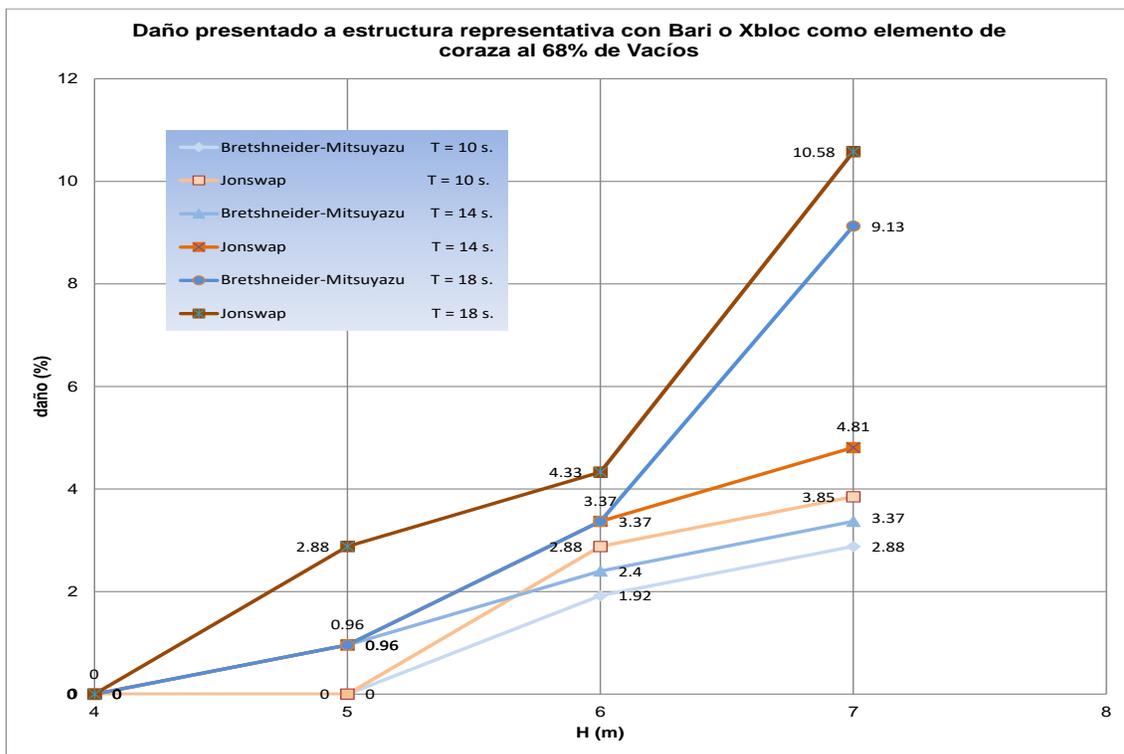
Gráfica 6 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 68%.



Gráfica 7 Resultados de daño presentado a estructura construida con Bari o Xblock en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 60%.



Gráfica 8 Resultados de daño presentado a estructura construida con Bari o Xblock en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 65%.



Gráfica 9 Resultados de daño presentado a estructura construida con Bari o Xblock en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 68%.

Conclusiones

Del análisis realizado a cada una de las secciones de rompeolas construidos en el canal de olas del laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, se observó que:

- La sección construida con cubo ranurado (tipo antifer) se comportó de manera estable, ya que registro un daño en el rompeolas en general del 2.69% máximo registrado, al disminuir su numero de piezas y por ende el volumen de vacíos aumentó de un 47% recomendado hasta un 57% verificado en este estudio.
- La sección construida con Core loc en la coraza del rompeolas resulto estable cuando se colocaron los elementos con el volumen de vacíos recomendado en la literatura (60%), cuando se aumento el porcentaje de vacíos aumento también el daño a un máximo de 15.94% cuando el volumen de vacíos se aumentó al 68%.
- La sección de rompeolas construida con Bari o Xblock cuando se construyó con el porcentaje de vacíos recomendada (60%) de igual forma resultó estable, al aumentar el volumen de vacíos también aumentó el daño registrado en la coraza al alcanzar un máximo de 10.58% con 68% de porcentaje vacíos.

Cabe señalar que las modelaciones fueron realizadas a secciones de rompeolas en condiciones de oleaje incidente en forma perpendicular a la sección, con una pendiente de fondo de 0.031 y talud de 1.5:1.

Por lo que se concluye que, bajo las condiciones de oleaje y estructurales, el Cubo ranurado (tipo antifer) resultó ser el mas estable al disminuir el numero de elementos en la capa coraza.

El elemento Bari o Xblock resulto ser el elemento con estabilidad intermedia al registrar un daño del 10.58% al aumentar en un 10% el volumen de vacíos y, el Core loc resultó ser el menos estable al considerarse una condición de mayor porcentaje de vacíos en la capa coraza.

Los resultados determinados en este estudio no son representativos de alguna estructura en particular en prototipo, solo son referencia para poder determinar que elemento presenta menor daño en la coraza si se aumenta el porcentaje de vacíos (y se reduce el número de elementos por área en la coraza), sin limitar el estudio de cada estructura en particular con sus propias variantes.

Referencias Bibliográficas

Bakker, P. (2003). *Development of concrete breakwater armour units*. The Netherlands: Delta Marine Consultants b.v. Gouda. P. 3. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/268399601_Development_of_concrete_breakwater_armour_units

Bakker, P. (2004). *Introduction of the Xbloc Breakwater Armour Unit*. The Netherlands Delta Marine Consultants b.v. Gouda. pp. 2-7. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/275960538_Introduction_of_the_Xbloc_Breakwater_Armour_Unit

Flores, J. y Al. (2022). *Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas*. [Publicación técnica No. 700]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt700.pdf>

Melby, J. (1997). *CORE-LOC Concrete Armor Units*. Vicksburg, MS USA.: Technical Report CHL-97-4. U. S. Army Corps of Engineers. pp. 15, 35. Consultado en <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA327318.pdf>

U. S. Army Corps of Engineers, (1984). *Shore Protection Manual. Vol. 2*. Palm City, FL. U.S.A.: Coastal Engineering Research Center. pp. 330, 358.