

Comparación experimental de la estabilidad estructural de rompeolas permeables para secciones transversales con coronamiento abierto y cerrado

Ocaña Espinosa de los Monteros Karina Griselda, Mendoza Grande Manuel, Servín Lugo María Dolores, Porres López Adriana Guadalupe, Casas Valencia Cindy

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

Karina.Ocana@imt.mx , mmendoza@imt.mx , dservin@imt.mx , aporres@imt.mx , ccasas@imt.mx

R e s u m e n

En la literatura sobre el tema relativo a la estabilidad de los rompeolas permeables, destacan los conceptos de diseño de coronamientos con secciones cerradas y abiertas, siendo ésta última condición un riesgo que pone en peligro la estabilidad de la estructura cuando los elementos de la coraza se colocan de esta manera y cuando se presentan niveles de sobreelevación por tormenta sumados a un fuerte oleaje.

El objetivo principal de este trabajo es comparar de manera experimental la estabilidad de las estructuras diseñadas y sometidas a las mismas condiciones de oleaje tomando en cuenta la diferencia geométrica con coronamiento cerrado o abierto, y cómo impacta esta variable en su comportamiento estructural, lo que se refleja en costos de mantenimiento preventivo y correctivo en los rompeolas.

Los modelos hidráulicos de estabilidad estructural, son una herramienta que permite estudiar la estabilidad de las estructuras exteriores de protección en puertos y costas. La necesidad de construir estructuras que disipen la energía del oleaje ha conducido a su estudio y con ello a la utilización de modelos hidráulicos, los cuales son una opción para observar fenómenos y características que permitan optimizar los diseños que se proponen. Los rompeolas permeables como amortiguadores de la energía, están sujetos a la fuerza que genera el oleaje, dentro de los principales daños que se han observado durante los ensayos de modelos físicos, es el que corresponde al daño del coronamiento de dichas estructuras.

La diferencia de estabilidad que aportan cada uno de los tipos de coronamiento se compararon en un modelo hidráulico bidimensional; el estudio consiste en un modelo físico reducido a escala 1:40, permeable, construido con diferentes materiales para la coraza, de sección transversal trapecial con talud 2:1; los ensayos se realizaron en un canal de olas angosto con un generador de oleaje irregular controlado por un equipo de cómputo. A continuación, se presentan resultados comparativos de la estabilidad de estructuras con coronamiento abierto y cerrado, con el objetivo de resaltar la importancia en el procedimiento constructivo, con materiales como roca, cubos ranurados y core-loc.

Comportamiento de la estabilidad estructural de secciones transversales con coronamiento abierto y cerrado para rompeolas permeables

Antecedentes

Comúnmente observamos que los puertos no pueden situarse en zonas de abrigo natural, por lo que se recurre a crear zonas con condiciones aptas para la navegación y las operaciones que actualmente requiere un puerto; para este fin se diseñan obras de protección que brinden las condiciones de operatividad requeridas para las embarcaciones y las actividades que se realizan en sus instalaciones.

Las estructuras que amortiguan el oleaje, se ven sometidas a oleaje de tormenta y a la sobreelevación en el nivel del mar por marea de tormenta, por lo tanto, cuando los coronamientos son abiertos, el material de la capa secundaria queda expuesto y al rebasar el oleaje el coronamiento de la estructura, hay movimiento de los elementos de la capa secundaria y en consecuencia se mueven los elementos de coraza iniciando la degradación de la estructura. En este trabajo se presentan resultados comparativos de la estabilidad de estructuras con coronamiento abierto y cerrado, con el objetivo de resaltar la importancia en el procedimiento constructivo, con materiales como roca, cubos ranurados y core-loc.

Rompeolas permeables

Dentro de las estructuras que amortiguan el oleaje, los rompeolas permeables (Fotografía 1), son los más comúnmente construidos en nuestro país. Debido a las características de los materiales pétreos y algunos casos, la lejanía de los bancos a las zonas de construcción, no siempre es posible construir con roca, por lo que se recurre a la fabricación de elementos artificiales in situ; se diseñan con coronamiento cerrado y cuando se requiere se diseñan secciones abiertas que permiten el acceso a vehículos para inspección y mantenimiento. Este tipo de obras, se requieren para disipar el oleaje con el objetivo de controlar y disminuir los efectos del oleaje en los procesos costeros, entre ellos, la erosión, el azolve de canales de acceso, el desequilibrio del aporte de sedimentos, etc.



Fotografía 1. Rompeolas permeables

En la Figura 1 se muestra el diseño de rompeolas con coronamiento abierto y coronamiento cerrado.

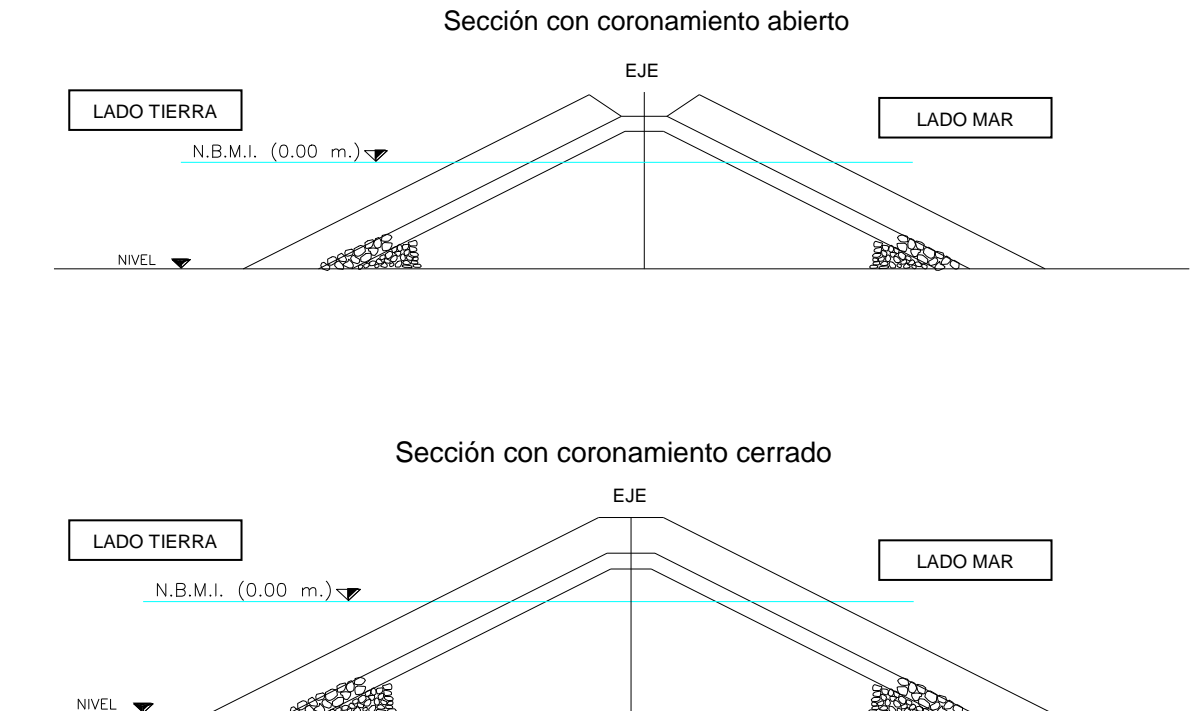


Figura 1. Diseño rompeolas permeable con coronamiento abierto y cerrado.

Debido a que los rompeolas permeables están sujetos a condiciones de oleaje normal pero también a condiciones extraordinarias, resulta frecuente que las estructuras se dañen al presentarse condiciones que superan los lineamientos de diseño; una vez presentado el daño debido a las dimensiones de este tipo de obras, se proponen secciones abiertas para dar el mantenimiento requerido, utilizando el coronamiento de la capa secundaria como acceso, de lo contrario se tendrían que utilizar métodos constructivos más complejos vía marítima que encarecen el mantenimiento.

Desde el punto de vista funcional, las estructuras de coronamiento abierto cumplen con su función de disipar el oleaje en condiciones normales, pero cuando se presentan eventos de tormenta con sobre elevación del nivel del mar y alturas de ola mayores a la de diseño, los elementos tienen poca resistencia en el coronamiento donde incide directamente la fuerza del oleaje, iniciando un desplazamiento de los elementos de menor peso de la capa secundaria que quedan expuestos en los coronamientos abiertos. De estos y otros estudios, las principales conclusiones apuntan, en general, a que las variables de mayor influencia son el nivel de sobre elevación por tormenta, la cota del coronamiento de la estructura, el ancho de coronamiento, el tipo de elementos con que se construye la coraza, así como la geometría de su sección transversal.

El planteamiento tomó en cuenta tres aspectos:

- a) La estabilidad de las estructuras está en función del nivel del mar, incluyendo la sobreelevación por marea de tormenta y de la altura de ola.
- b) La estabilidad de la estructura está en función del tipo de elementos de coraza.
- c) Una estructura con coronamiento cerrado es más estable que las construidas con coronamiento abierto.

El modelo

Se utilizó un modelo físico reducido escala 1:40, permeable, con diferentes materiales para elementos de coraza, de sección trapecial con talud 2:1, en un canal de olas angosto con un generador de oleaje aleatorio, de fondo fijo. El modelo se rigió con la Ley de similitud de Froude.

Diseño de Estructuras

Los pesos y la geometría de las estructuras ensayadas se obtuvieron a partir de la fórmula de Hudson, las características para las secciones prototipo y del modelo propuestas se muestran en la Figura 1.

La fórmula de Hudson se expresa como sigue:

$$P = \frac{H_d^3 \gamma_s}{K_d (Sr - 1)^3 \cot \alpha}$$

Donde:

- P.- Peso de los elementos de coraza (ton)
- Hd.- Altura de ola de diseño (m)
- γ_s .- Peso específico del material de los elementos de coraza (ton)
- Sr.- Densidad relativa del material
- α .- Ángulo del talud con respecto a la horizontal (°)
- Kd.- Coeficiente de estabilidad

Equipo e instrumentación

El canal de olas angosto (Fotografía 2), tiene una longitud de 50 m, ancho de 0.60 m y una profundidad de 1.30 m, cuenta con un sistema de alimentación de agua y desagüe, una paleta metálica con movimiento tipo pistón, con servo motores de corriente directa con poca inercia operado por una computadora, el sistema de generación es capaz de reproducir oleaje monocromático y aleatorio unidireccional,

con un tirante máximo de agua de 80 cm es posible generar oleaje con alturas de ola de 0 a 40 cm con períodos de ola de 0.5 a 5 seg.



Fotografía 2. Canal de olas angosto del Laboratorio de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte.

El equipo de medición registra la variación de niveles de agua, está conectado a un convertidor de señales y a un sensor de tipo capacitivo el cual que capta las señales analógicas, las envía al convertidor y transformando los datos analógicos en digitales para su interpretación. Este sistema nos ayuda a medir alturas de ola y periodos ensayados.

Al terminar el ensayo, el equipo permite analizar las señales captadas por el sensor, obteniendo en el caso del oleaje irregular, alturas de ola significativa ($H_{1/3}$), ($H_{1/10}$) y altura máxima ($H_{MÁX}$), así como el período del tren de olas (T). El sistema de medición se hizo en línea, obteniendo la altura de ola incidente; para amortiguar el efecto de reflexión en el canal, se colocaron taludes de roca en ambos extremos del canal, uno en la parte posterior del generador y en la parte final del canal.

Procedimiento experimental

Construidas las secciones y llenando el canal se colocan los sensores a una distancia por lo menos el equivalente a una longitud de ola, calibrados los sensores con el ológrafo, se seleccionan las señales y el espectro de oleaje de acuerdo a la programación de ensayos, la cual se presenta en la Tabla 1:

Tabla 1. Programación de ensayos.

Serie	H_i (m)	T (seg)	Coronamiento	Tipo de elemento
1	4 – 8	12	Abierto	Core-loc
2	4 – 8	12	Cerrado	Core-loc
3	4 – 8	12	Abierto	Roca
4	4 – 8	12	Cerrado	Roca
5	4 – 8	12	Abierto	Cubos

6	4 – 8	12	Cerrado	Cubos
---	-------	----	---------	-------

La duración de cada ensayo fue de 4 hrs. en prototipo, las cuales se contabilizan en el equipo de medición, completado cada uno de los ensayos se contabilizaron los elementos que se movieron o desplazaron de su posición original, para considerarlo como daño, los elementos que solo oscilaron o se acomodaron dentro de la misma región no se cuantificaron.

Se utilizaron secciones transversales con diferentes elementos de coraza como: core-loc (Fotografía 3) roca (Fotografía 4), y cubos ranurados (Fotografía 5). En las pruebas se observó si la forma de trabajar de los diferentes tipos de elementos influye en el comportamiento de la estabilidad, los elementos de roca y los cubos ranurados, son elementos que trabajan por gravedad, se colocan en dos capas, se consideran elementos con un alto peso para poder resistir las fuerzas del oleaje. Los core-loc y otros elementos como los A-jacks, son elementos que trabajan utilizando su trabazón como resistencia, cuando alguno de los elementos se desplaza se inicia un daño en cadena debido a que trabajan en forma de red.



Fotografía 3. Ensayos de secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con coraza de core-loc.



Fotografía 4. Ensayos de secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con coraza de roca.



Fotografía 5. Ensayos de secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con coraza de cubos ranurados.

Cuantificación de daño

Como se mencionó anteriormente en la construcción de la sección se contabilizaron los elementos expuestos del lado mar, así como los del coronamiento por lo que al finalizar cada ensayo se contabilizó el número de elementos desplazados de su posición original y al relacionar este con el total de piezas de la coraza, se obtuvo el porcentaje de daño.

$$\text{Daño (\%)} = \frac{\text{No. elementos desplazados}}{\text{No. total de elementos}} \times 100$$

Este resultado se relacionó con la altura de ola significativa medida en cada ensayo, esta fue registrada por un sensor de tipo capacitivo parte del sistema de medición del equipo que se describió anteriormente.

En cada uno de los ensayos se cuantificó el daño y al final de cada serie se acumularon con el fin de presentar una curva que represente el efecto de la acción del oleaje en la estructura relacionando la altura de ola significativa que incide en la estructura y el daño en porcentaje causado por estas, con ello se puede tener un indicio de daño esperado al someter a la estructura a olas de determinada altura.

Análisis de Resultados

Al ser sometido un rompeolas a una acción de oleaje superior a la capacidad para la cual fue diseñado, los daños generados pueden llegar a ser devastadores en la estructura. El comportamiento del rompeolas bajo la acción del oleaje es muy importante en la selección de la sección de diseño que incluye geometría y peso de los elementos. Cuando una estructura se destruye, no sucede de una forma súbita, el daño es gradual conforme el oleaje desplaza poco a poco elementos de coraza fuera de la sección o de la zona donde debieron de proteger.

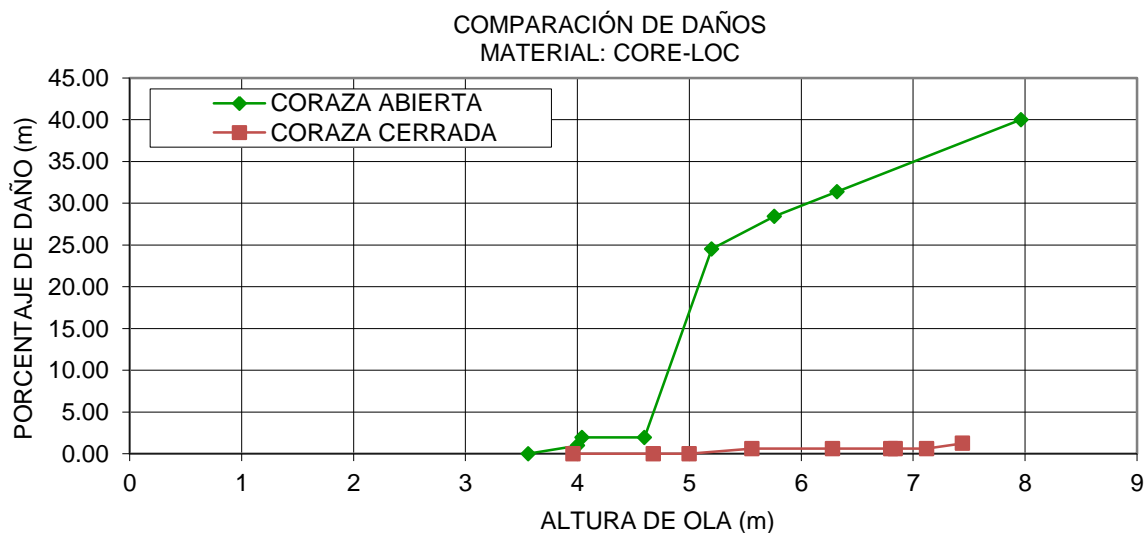
La forma más fácil de representar el comportamiento de las estructuras ensayadas bajo la acción del oleaje es plasmar los resultados en las curvas de daños,

relacionando las alturas de oleaje significantes medidas en los ensayos con los daños presentados en la capa de coraza del lado mar, esto permite observar una tendencia del comportamiento de la estructura a lo largo de su vida útil y con condiciones de oleaje mayores a las ensayadas, ya que existe la posibilidad de que se presenten tormentas de condiciones extremas no contempladas en la altura de ola de diseño ya que su periodo de retorno es muy largo y su incidencia muy poco frecuente.

Por esta razón, se establecen criterios de daño permisible en la estructura, así como la altura y periodo de diseño que resulte óptima para el funcionamiento de las instalaciones para las cuales fue requerida la obra, se tratan de obtener la mayor cantidad de datos, aunque frecuentemente es difícil encontrar una fuente de información completa que cuente con estadísticas de medición de oleaje, periodos, intensidades y duración de tormentas presentadas en la naturaleza.

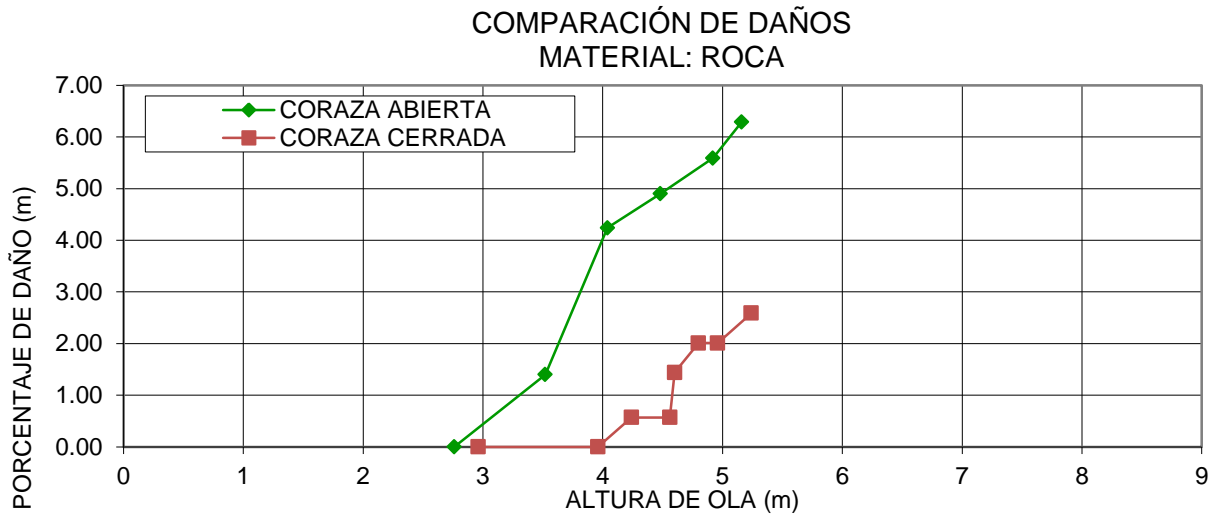
Además de la cuestión de estabilidad de la estructura y las condiciones de oleaje, es de suma importancia tomar en cuenta el factor económico, por ello se estudiaron varias secciones, materiales y disposición de los mismos de tal manera que aporten las mejores condiciones de estabilidad y funcionamiento, y a la vez con un costo de construcción y mantenimiento que de factibilidad al proyecto. Las secciones abiertas son las que presentan daños superiores, comparadas con secciones con los mismos pesos, pero con coronamientos cerrados. En las Gráficas 1, 2 y 3 se muestran los daños comparativos para core-loc, roca y cubos ranurados con coronamientos abiertos y cerrados.

1. Secciones con core-loc. Como se puede observar en la Gráfica 1, cuando el coronamiento de la sección abierta para una altura de ola de 7.96 m se presenta un daño del 40.00%, mientras que, para el coronamiento cerrado, para una altura de 7.44 m se presenta un daño del 1.24%.



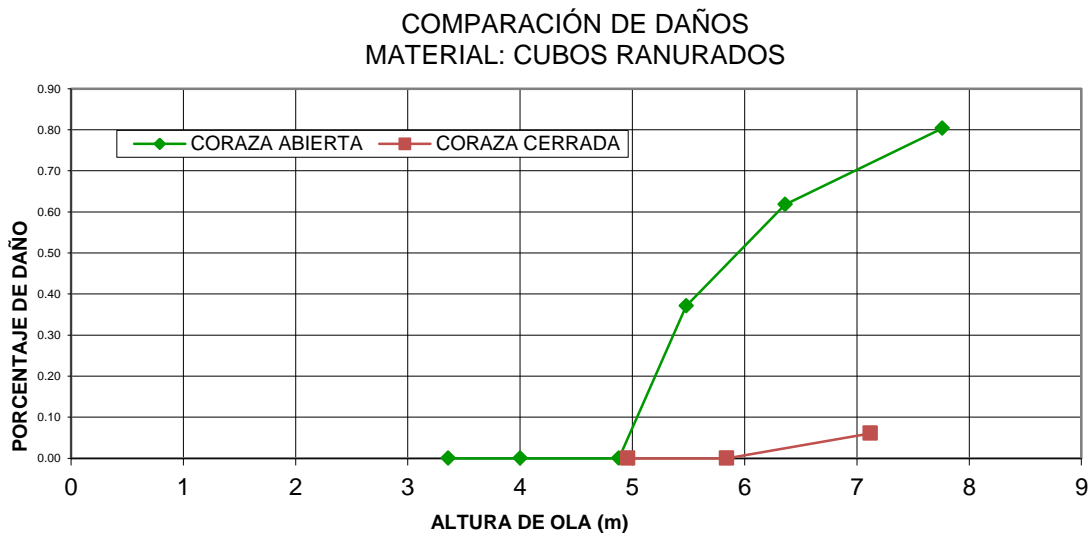
Gráfica 1. Comparación de daños, con secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con core-loc.

2. Secciones con Roca, se puede observar en la Gráfica 2, cuando el coronamiento de la sección abierta para una altura de ola de 5.16 m se presenta un daño del 6.29%, mientras que, para el coronamiento cerrado, para una altura de 5.24 m se presenta un daño del 2.59%.



Gráfica 2. Comparación de daños, con secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con roca.

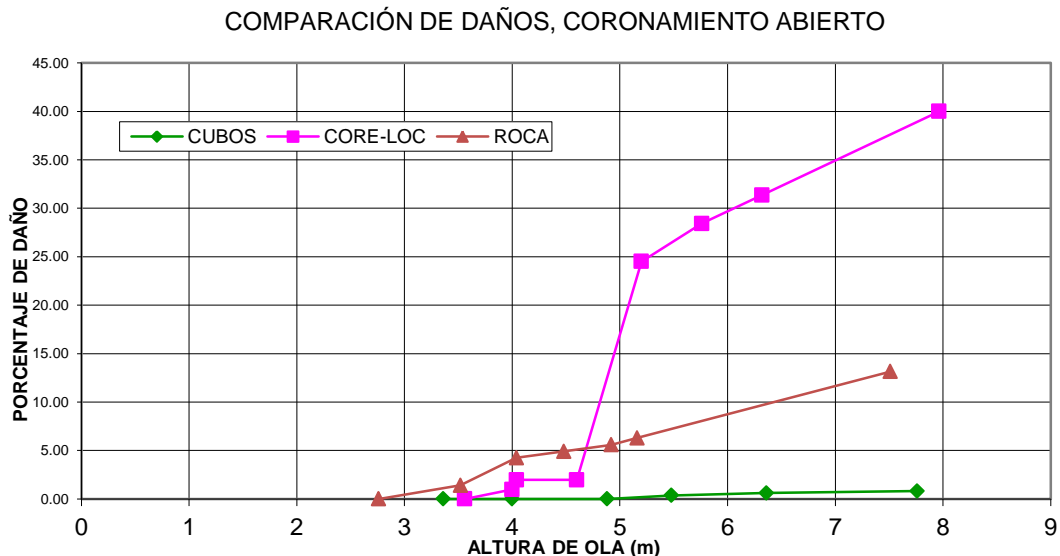
3. Secciones con Cubos ranurados, en la Gráfica 3, se aprecia que el daño cuando el coronamiento es abierto se presenta un daño de 0.80% para una altura de ola de 7.76 m y para el coronamiento cerrado, se presenta un daño de 0.06% para una altura de ola de 7.12 m.



Gráfica 3. Comparación de daños, con secciones de coronamiento abierto y cerrado construidas con cubos ranurados.

Las estructuras construidas con elementos que utilizan la trabazón como principio de estabilidad, presentaron porcentaje de daños mayores a los elementos que trabajan por gravedad, como los cubos ranurados o las rocas, en las secciones con coronamiento abierto. En la Gráfica 4, se observa la comparación de los resultados de estabilidad, de los diferentes materiales con coronamiento abierto. La diferencia en porcentaje para la sección con coronamiento abierto para una altura de ola de 7 m en los tres casos es, para cubos ranurados de 0.70%, para roca de 12% y para core-loc de 35.70%.

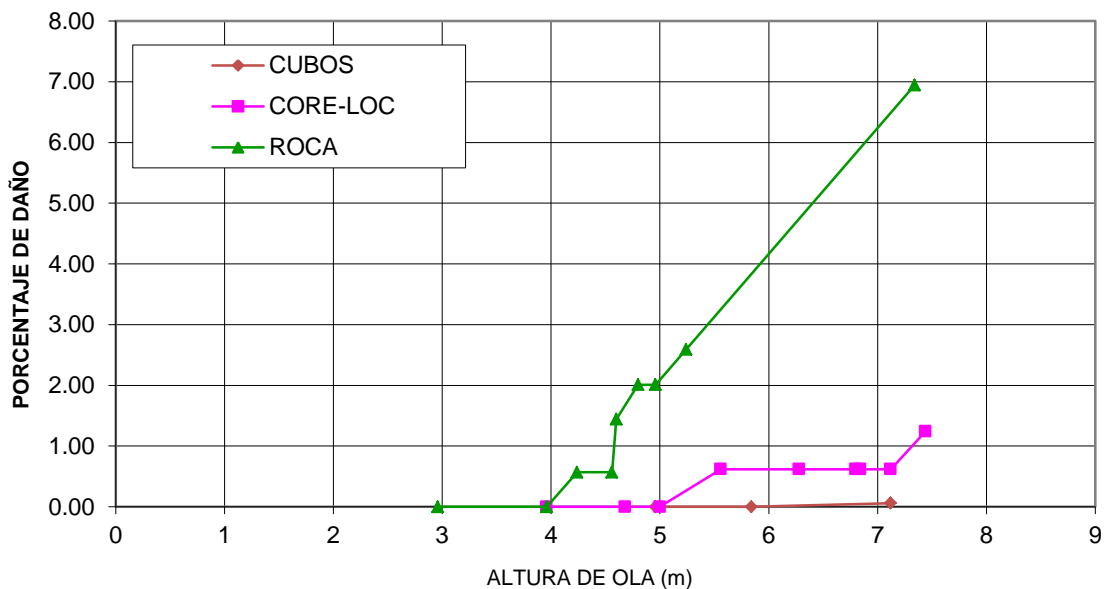
En esta gráfica se puede apreciar como en secciones con coronamiento abierto, las estructuras construidas con cubos ranurados resultan ser las más estables, mientras que las estructuras construidas con core-loc, presentaron un mayor porcentaje de daño. Se observa que en el caso de secciones que requieran forzosamente un acceso para el mantenimiento de la estructura, la construcción de espaldones de concreto es una buena opción y los daños pueden disminuir en un buen porcentaje, de acuerdo a la geometría de la sección.



Gráfica 4. Comparación de estabilidad de secciones con coronamiento abierto, construidas con diferentes materiales.

En el caso de las secciones con coronamiento cerrado resultaron más estables las estructuras construidas con cubos ranurados, mientras que las menos estables fueron las construidas con elementos de roca. En la Gráfica 5, se observa la comparación de los resultados de estabilidad, de los diferentes materiales con coronamiento cerrado. La diferencia en porcentaje para las secciones ensayadas para una altura de ola de 7 m en los tres casos es, para cubos ranurados de 0.05%, para roca de 6.20% y para core-loc de 0.62%.

COMPARACIÓN DE DAÑO, CORONAMIENTO CERRADO



Gráfica 5. Comparación de estabilidad de secciones con coronamiento cerrado, construidas con diferentes materiales.

El uso de deflectores de concreto (Fotografía 6) resulta también una opción para evitar la incidencia directa del oleaje sobre el coronamiento de la estructura siempre y cuando se presenten también rebases de ola sobre el coronamiento.



Fotografía 6. Secciones transversales con secciones abiertas y con deflector de oleaje.

Conclusiones

Los resultados del estudio coinciden en gran medida con las hipótesis planteadas al principio, comprobando que los principales parámetros de influencia son el tipo de sección transversal de construcción, los tipos de elementos de coraza, la combinación de sobreelevación por tormenta con alturas de ola superiores a la altura

de ola de diseño. Se observa que, al cerrar el coronamiento de la sección transversal y compararlo con el coronamiento abierto el comportamiento de la estabilidad varía dependiendo de material de la coraza.

Las estructuras construidas con cubos ranurados siguen resultando ser las más estables, ya que el porcentaje de daño no rebasa el 1% en ambos casos, mientras que las estructuras construidas con core-loc, presentaron mayor estabilidad con el coronamiento cerrado al reducirse notoriamente el porcentaje de daño a 0.62% y compararlo con un daño de 35.68% en la sección abierta. En el caso de las estructuras construidas con coraza de roca, el porcentaje de daño se redujo un 50% de un porcentaje de daño de 12% con coraza abierta a un 6% con coraza cerrada.

Referencias Bibliográficas

1. Frías, Armando; Moreno, Gonzalo, "Ingeniería de Costas", Ed. LIMUSA, 1988.
2. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. "Shore Protection Manual Vol. I", 1984.
3. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. "Shore Protection Manual Vol. II", 1984.
4. U.S. Army Corps of Engineers. Coastal and Hydraulics Laboratory. "Wave Hindcast Study for Port Madero, Mexico, Final Report", 2002.
5. Vergara S., Miguel A., "Técnicas de Modelación Hidráulica", Ed. Alfaomega, 1992.