



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD ZACATENCO

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**“REHABILITACIÓN DE
ROMPEOLAS CON ESTRUCTURAS
TIPO TÁNDEM”**

T E S I S
PARA OBTENCIÓN DE EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
P R E S E N T A :
ALFARO BRITO MARCO ANTONIO

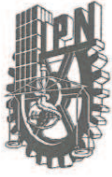
DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. JAIME ROBERTO RUÍZ Y ZURVIA FLORES



México, D. F.

JUNIO 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 17:00 horas del día 20 del mes de junio del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. – U. Z. para examinar la tesis titulada:

“REHABILITACIÓN DE ROMPEOLAS CON ESTRUCTURAS TIPO TÁNDEM.”

Presentada por el alumno:

Alfaro
Apellido paterno

Brito
Apellido materno

Marco Antonio
Nombre(s)

Con registro:

A	1	0	0	4	4	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

M. en C. Lucio Fragoso Sandoval

M. en C. Manuel Meneses García

M. en C. Ricardo Contreras Contreras



Dr. Mario Ulloa Ramírez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

M. en C. Pino Durán Escamilla



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de **México D. F.** el día **22** del mes de **Junio** del año **2012**, el que suscribe **Marco Antonio Alfaro Brito** alumno del Programa de **Maestría en Ingeniería Civil** con número de registro **A100441**, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura–U.Z.**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de el **M. en C. Jaime Roberto Ruíz y Zurvia Flores** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Rehabilitación de rompeolas con estructuras tipo tándem”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **maab2011@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Marco Antonio Alfaro Brito



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Las siguientes dedicatorias y agradecimientos son para todas aquellas personas y seres queridos que colaboraron en mi formación personal y profesional, por todos esos momentos de felicidad que aprendí a valorar, por aquellas situaciones difíciles que de ellas aprendí grandes lecciones que a su vez me hicieron más fuerte, por eso y más gracias a todos.

A mi madre por toda tu confianza, amor y paciencia incondicional, por tus consejos, por ser mi fuerza y por apoyarme al inicio y al final de esta etapa, por enseñarme a ser el mejor de los arbustos. Este logro también es tuyo má.

A mi padre por insistirme en que tengo que dar el extra, con tu ejemplo aprendí que el rendirse no lleva a nada y que el luchar te da todo.

A mi hermana Nadya, por tu ejemplo, por todos esos momentos difíciles que vivimos juntos al inicio de nuestras carreras, por que me mostraste que a pesar de los problemas la vida es bella, gracias hermana por todo.

A mi hermano Paco por tu apoyo, por tu amor y cariño, te quiero hermano.

A mi hermanita Aby por esos momentos de compañía en esta última etapa, por escucharme, por darme tu confianza y apoyo, gracias mani.

A mi amada hija Vianka, tú eres mi motivación más grande, mi fuerza y mi razón de ser, la distancia me hizo valorar cada instante de tu vida. Te amo mi hermosa princesa.

A mi esposa Montse, por aparecer en el momento indicado, por ser mi mejor amiga, por tu paciencia en esta larga carrera, por tus palabras de aliento, por tu tiempo, por tu confianza, y sobre todo por tu amor que me motiva a ser mejor cada día.

A mis Primos, Rosa, Beto, Coni, Gina, Laura, Jorge, Diana, con los que compartí muy buenos momentos a lo largo de mi carrera, gracias primos por su apoyo y consejos.



A la familia Sánchez por su cariño, apoyo y confianza.

A mis amigos, Dagoberto, Gerardo, Steph, Iris, Laura, Silvia, Miriam, Ariel, Luis, Ana, Erick, Yulvis, por los gratos momentos que pasamos juntos, por ser más que compañeros de clases, gracias amigos.

A mis profesores de la sección, al maestro Lucio, al maestro Manuel, al Dr. Mario, al Dr. Navarro, Dr. Oscar, al maestro Pino, al maestro Bruno, a la maestra Norma, pero sobre todo a mi director de tesis al maestro Roberto, muchas gracias maestro por su paciencia, por sus incansables consejos, por su dedicación, y por todo ese apoyo que me ha dado a lo largo de la maestría.

A mi amado Politécnico, a mi ESIA, por abrirme las puertas y ser parte de esta gran institución. En el I.P.N. también se realizan sueños.



CAPITULADO

Lista de figuras.....	iv
Lista de tablas.....	vii
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
Introducción.....	xi
Justificación.....	xiii
Objetivos.....	xiv
Hipótesis.....	xiv
Metodología.....	xiv

I. Generalidades

I.1. Principios generales del oleaje.....	1
I.1.1.Elementos del oleaje.....	1
I.1.2. Clasificación del oleaje.....	2
I.1.3. Teorías del oleaje.....	7
I.1.4. Fenómenos que modifican el oleaje.....	10
I.1.4.1. Refracción del oleaje.....	11
I.1.4.2. Difracción del oleaje.....	12
I.1.4.3. Rompiente del oleaje.....	12
I.1.4.4. Reflexión del oleaje.....	15
I.1.5. Oleaje Irregular.....	16
I.1.6. Espectros de oleaje.....	18
I.2. Obras de protección.....	20
I.2.1. Clasificación de obras de protección.....	20
I.2.2. Criterio de Diseño.....	25
I.2.3. Rompeolas en México.....	27
I.2.4. Rompeolas en tándem.....	29



II. Efectos del oleaje sobre obras de protección.

II.1. Efectos causados por el oleaje.....	31
II.1.1. Ascenso (run-up) y descenso (run-down) de la ola.....	31
II.1.2. Transmisión del oleaje.....	38
II.1.3. Rebase (Overtopping).....	39

III. Aspectos de la modelación.

III. 1. Generalidades de los modelos.....	45
III. 1. 1. Modelos físicos reducidos.....	45
III. 1. 2. Selección de escalas.....	47
III. 2. Condiciones de similitud.....	48
III. 3. Análisis dimensional.....	49
III. 4. Modelos de oleaje con fondo fijo.....	51

IV. Modelo físico reducido.

IV.1. Condiciones de similitud.....	52
IV.2. Selección de escalas.....	53
IV.3. Instalaciones.....	53
IV.4. Equipo.....	55
IV.5. Instrumentación.....	59
IV.6. Construcción.	60
IV.7. Calibración.	68
IV.8. Ensayos.	69
IV.8.1. Condición de los ensayos.....	69
IV.8.2. Procedimiento Experimental.....	70
IV.8.3. Observación de los ensayos.....	72



V. Procesamiento de resultados.

V.1. Análisis de información.....89

V.2. Presentación de resultados.....91

VI. Conclusiones y recomendaciones.....96

Bibliografía.....98

Glosario.....105

Nomenclatura.....111



LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

- Figura I.1. Onda de oleaje y sus características
- Figura I.2. Trayectoria oscilatoria de las partículas de agua en una ola.
- Figura I.3. Trayectoria de traslación de las partículas de agua en una ola.
- Figura I.4. Zonas de generación y decaimiento.
- Figura I.5. Refracción del oleaje.
- Figura I.6. Diagramas de difracción del oleaje.
- Figura I.7. Rompimiento tipo Spilling.
- Figura I.8. Rompimiento tipo Plunging.
- Figura I.9. Rompimiento tipo Surging.
- Figura I.10. Rompimiento tipo Collapsing.
- Figura I.11. Reflexión del oleaje.
- Figura I.12. Método zero-up-crossing.
- Figura I.13. Obras paralelas a la playa (Norfolk, Virginia).
- Figura I.14. Escolleras del puerto Lázaro Cárdenas.
- Figura I.15. Espigones de puerto Vallarta.
- Figura I.16. Rompeolas Natural.
- Figura I.17. Rompeolas Artificial
- Figura I.18. Elementos artificiales para un rompeolas.
- Figura I.19. Sistema de rompeolas en tándem

CAPÍTULO II. EFECTOS DEL OLEAJE SOBRE OBRAS DE PROTECCIÓN.

- Figura II.1. Ascenso del oleaje sobre el talud.
- Figura II.2. Ascenso del oleaje sobre el talud.
- Figura II.3. Descenso del oleaje.
- Figura II.4. Rebase del oleaje.
- Figura II.5. Daños generados por el rebase del oleaje extremo al rompeolas.
- Figura II.6. Agitación en aguas protegidas y daños en instalaciones por el rebase del oleaje extremo.
- Figura II.7. Daños en marina y en rompeolas por el rebase del oleaje extremo.

CAPÍTULO IV. MODELO FÍSICO REDUCIDO.

- Figura IV.1. Canal de oleaje angosto.
- Figura IV.2. Limpieza de fibra.



- Figura IV.3. Limpieza de acrílicos, acomode de tezontle y colocación de amortiguador rehabilitado.
- Figura IV.4. Paleta generadora de oleaje (izq.) y canal angosto en su zona de observación (der.).
- Figura IV.5. Generador de oleaje y oleógrafo (izq.), Sensores de oleaje (der.).
- Figura IV.6. Dimensiones de la sección del rompeolas en prototipo. (Acotación en metros).
- Figura IV.7. Dimensiones de la sección del rompeolas sumergido.
- Figura IV.8. Selección de roca de núcleo y capa secundaria (izq.) y rehabilitación de roca de coraza para la franja verde (der.).
- Figura IV.9. Rehabilitación de roca de coraza para franja azul y blanca.
- Figura IV.10. Sección en Modelo del rompeolas superficial (acotación en centímetros).
- Figura IV.11. Trazo del escantillón (A) y trazo en la pared de acrílico para el rompeolas superficial (B).
- Figura IV.12. Colocación de material para el núcleo del rompeolas superficial.
- Figura IV.13. Colocación de capa secundaria y coraza del rompeolas superficial.
- Figura IV.14. Rompeolas superficial finalizado.
- Figura IV.15. Dimensiones para el rompeolas superficial con ancho de corona de 16m.
- Figura IV.16. Dimensiones para el rompeolas superficial con ancho de corona de 24m.
- Figura IV.17. Trazo del escantillón para los rompeolas sumergido y trazo en pared de acrílico.
- Figura IV.18. Colocación de núcleo y coraza del rompeolas sumergido y rompeolas sumergido finalizado.
- Figura IV.19. Colocación de sensores en aguas profundas, intermedias y reducidas (izq.), modificación de la profundidad del sensor para la calibración (der.).
- Figura IV.20. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
- Figura IV.21. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
- Figura IV.22. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
- Figura IV.23. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.
- Figura IV.24. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
- Figura IV.25. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.
- Figura IV.26. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
- Figura IV.27. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
- Figura IV.28. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
- Figura IV.29. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.



Figura IV.30. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
Figura IV.31. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.
Figura IV.32. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
Figura IV.33. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
Figura IV.34. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
Figura IV.35. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.
Figura IV.36. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
Figura IV.37. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.
Figura IV.38. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
Figura IV.39. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
Figura IV.40. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
Figura IV.41. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.
Figura IV.42. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
Figura IV.43. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.
Figura IV.44. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
Figura IV.45. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
Figura IV.46. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
Figura IV.47. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.
Figura IV.48. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
Figura IV.49. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.
Figura IV.50. Ensayo 1: para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$.
Figura IV.51. Ensayo 2: para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$.
Figura IV.52. Ensayo 3: para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$.
Figura IV.54. Ensayo 4: para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$.
Figura IV.55. Ensayo 5: para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$.
Figura IV.56. Ensayo 6: para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$.

CAPÍTULO V. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

Figura V.1. Variación de altura de ola incidente y transmitida. (N.M.M.)
Figura V.2. Parámetros de altura de ola incidente y transmitida. (S.P.T.)
Figura V.3. Influencia del ancho de corona relativo. (N.M.M.)
Figura V.4. Influencia del ancho de corona relativo. (S.P.T.)
Figura V.5. Influencia de la separación relativa entre estructuras. (N.M.M.)
Figura V.6. Influencia de la separación relativa entre estructuras. (S.P.T.)
Figura V.7. Influencia de la sumergencia relativo. (N.M.M.)
Figura V.8. Influencia de la sumergencia relativa. (S.P.T.)
Figura V.9. Influencia de la profundidad de desplante de la estructura sumergida.



LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

- Tabla I.1. Clasificación de las ondas de Kinsman.
- Tabla I.2. Clasificación de las olas según su profundidad relativa.
- Tabla I.3. Escala anemométrica de Beufort y Douglas.
- Tabla I.4. Teorías lineales.
- Tabla I.5. Teorías no lineales.
- Tabla I.6. Niveles de coronamiento de estructuras en el Pacífico.
- Tabla I.7. Niveles de coronamiento de estructuras en el Golfo.

CAPÍTULO II. EFECTOS DEL OLEAJE SOBRE OBRAS DE PROTECCIÓN.

- Tabla II.1. Caudales de rebase tolerables.

CAPÍTULO III. ASPECTOS DE LA MODELACIÓN.

- Tabla III.1. Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos.
- Tabla III.2. Magnitudes físicas

CAPÍTULO IV. MODELO FÍSICO REDUCIDO.

- Tabla IV.1. Escalas empleadas en el modelo.
- Tabla IV.2. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas superficial.
- Tabla IV.3. Pesos de la roca para las diferentes capas del modelo.
- Tabla IV.4. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas sumergido.
- Tabla IV.5. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas sumergido.
- Tabla IV.6. Periodos, alturas e intervalos de muestreo.
- Tabla IV.7. Programa de ensayos.
- Tabla IV.8. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 1.
- Tabla IV.9. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 1.
- Tabla IV.10. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 2.
- Tabla IV.11. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 2.
- Tabla IV.12. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 3.
- Tabla IV.13. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 3.



CAPÍTULO V. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

Tabla V.1. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 1 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.).

Tabla V.2. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 1 (Con sobreelevación por tormenta de 1m).

Tabla V.3. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 2 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.).

Tabla V.4. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 2 (Con sobreelevación por tormenta de 1m).

Tabla V.5. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 3 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.).

Tabla V.6. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 3 (Con sobreelevación por tormenta de 1m).



RESUMEN

Los rompeolas son estructuras construidas básicamente de roca, están hechas para generar detrás de ellos una zona relativa de calma que permita la operación segura de los buques. Los rompeolas tienen una interacción constante con los efectos del oleaje, uno de ellos es el ascenso del oleaje sobre el talud de la estructura, el cual, al tener un ascenso máximo puede sobrepasar el nivel de coronamiento de dicho rompeolas, y más aún si es un rompeolas con cota de coronamiento baja. En México se cuenta con diversas estructuras que sufren este tipo de problemas.

El objetivo de esta investigación es lograr que, mediante un modelo físico reducido, se pudiera observar, analizar y diseñar el sistema de rompeolas en tándem ante la incidencia perpendicular del oleaje para establecer las condiciones más adecuadas de separación, sumergencia y ancho de coronamiento del rompeolas sumergido.

Se realizó un modelo físico reducido sobre un fondo fijo de dos secciones de rompeolas de enrocamiento; uno superficial con cota de coronamiento baja y otra sumergida delante de la superficial, ambos con taludes 2:1 en lado mar y en lado tierra, se diseñaron con base a el criterio de no rebase del oleaje. Dichas secciones se construyeron dentro de un canal angosto con dimensiones de 24.00m de longitud, 0.66m de ancho y 0.90m de profundidad, equipado con un generador de oleaje, ubicado en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Se emplearon dos equipos de cómputo, uno para controlar el generador de oleaje y otro para el análisis de las mediciones de oleaje; también se utilizó una cámara fotográfica para captar con mayor precisión los efectos del oleaje sobre el sistema en tándem.

Una de las conclusiones de la investigación es que la disminución del ascenso del oleaje sobre la estructura superficial, depende de la geometría y ubicación del rompeolas en tándem. De igual forma, se comprobó que el ascenso del oleaje (run-up) se incrementa con un aumento en la profundidad del agua y el periodo de la ola, pero decrece con un incremento en la esbeltez de la ola y la separación entre los rompeolas. Así mismo, se validaron los resultados de esta investigación con los obtenidos por Shirlal y Rao en el 2010.



ABSTRACT

Breakwaters are structures constructed mostly of rock, large structures are built mostly of rock, are made behind them for generating a quiet zone relative to permit safe operation of ships. The breakwaters have an constant interaction with the effects of wave, one of them is the wave run-up, which, having a maximum run-up can overcome the level crest of the breakwater, and even more so if a breakwater with low crest elevation. In Mexico, various structures have suffered such problems.

The objective of this research is to get through a reduced physical model; one could observe, analyze and design the system of breakwaters in tandem with the wave normal incidence to establish the most suitable separation and submergence of the breakwater crest width submerged.

We performed a reduced physical model on a fixed background of two sections of rubble mound breakwater; a surface with low crest elevation and other submerged before the surface, both with 2:1 slopes on the sea side and land side, were designed based on the criterion of not exceeding the waves. These sections were constructed within a narrow canal with dimensions of 24.00m of length, 0.66m of wide and 0.90m of deep, equipped with a wave generator, located on the premises of the laboratory of the Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco of Instituto Politécnico Nacional. We used two computer equipment, one for controlling the wave generator and one for the analysis of measurements of waves, also used a camera to capture more accurately the effects of wave action on the system in tandem.

Among the research findings is that the decrease of the run-up of the waves on the surface structure depends on the geometry and location of the breakwaters in tandem. Similarly, it was found that the run-up of the waves increases with increasing water depth and wave period, but decreases with an increase in the slenderness of the wave and the separation between the breakwaters. It also validated the results of this research obtained by Shirlal and Rao in 2010.



INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen una cantidad considerable de rompeolas que presentan cotas de coronamiento bajas, por esta razón son susceptibles al rebase del oleaje. El estudio de fenómenos como el ascenso y descenso del oleaje en su talud lado mar es de suma importancia debido a la protección que le brinda al puerto y áreas de agua y tierra. En el sistema portuario se debe buscar un nuevo enfoque de solución a los problemas que se tienen con las obras de protección, en su construcción, funcionamiento y mantenimiento.

Las obras de protección en nuestro país fueron diseñadas hace varias décadas, la condición de no rebase para las que fueron diseñadas ya no es funcional debido al deterioro que la estructura ha tenido por la acción del mar. Existen diferentes formas de rehabilitación de rompeolas que presentan rebase, como es la construcción de una berma al rompeolas ya existente, la construcción de deflectores en su coronamiento, o incluso la sustitución de elementos ya desplazados, por lo tanto el sistema en tándem se presenta como otra opción de rehabilitación para los rompeolas de nuestro país que presentan coronamientos bajos.

El desarrollo de esta tesis se dividió en 6 capítulos de la manera siguiente.

En el primer capítulo se realiza una descripción general del oleaje así como sus diferentes clasificaciones y teorías, de igual forma se mencionan los diferentes fenómenos que modifican el oleaje. Dentro de este mismo capítulo se tratan los diferentes tipos de obras de protección y las características de las obras de protección en nuestro país, así como también del rompeolas en tándem como obra de rehabilitación.

En el capítulo 2, se describen los efectos del oleaje sobre las obras de protección.

En el desarrollo del capítulo 3, se explican los diferentes tipos de modelos avocándonos en los modelos físicos reducidos, igualmente en otro apartado se describe como se realiza la selección de escalas y las condiciones de similitud que se tienen que satisfacer.



En el capítulo 4, se realiza una descripción del diseño y construcción del modelo físico al que se refiere esta tesis, así como de las instalaciones, equipo e instrumentación necesaria para llevar a cabo el estudio. También se describen cada uno de los ensayos realizados del modelo.

En el capítulo 5, se hace un análisis de los resultados de los ensayos, validándolos con datos recopilados en el estado del arte.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan los resultados de esta tesis y se establecen algunas conclusiones a las que se llegaron, de igual forma se proponen recomendaciones para estudios posteriores a este trabajo de investigación.



JUSTIFICACIÓN

México forma parte de una de las mayores zonas comerciales del mundo, además, tiene una excepcional ubicación geográfica que lo convierte en un vínculo necesario del comercio mundial. Los puertos son de gran importancia en el desarrollo de cualquier país, debido a que en ellos se llevan a cabo actividades de comercio marítimo, industrial, pesquero y turístico, entre otros, convirtiéndose así en un importante polo de crecimiento. El sistema portuario en nuestro país considera a 16 puertos como los más importantes, de los cuales nueve se encuentran en el Océano Pacífico y siete en el Golfo de México, seis de estos puertos cuentan con obras de protección con cota de coronamiento baja, lo que hace necesario proponer estructuras complementarias para garantizar su protección contra el oleaje.

Las obras de protección las encontramos en el litoral del Océano Pacífico teniendo una longitud de 74,135m., en el Golfo de México y en el Mar Caribe una longitud de 82,498m., totalizando 156,633m de longitud de obras de protección, de los cuales 26,998m son de rompeolas; es decir, los rompeolas constituyen un 17.23% de las obras de protección realizadas en México. Dichos rompeolas son afectados por diversos efectos del oleaje, uno de ellos es el rebase (overtopping), que es la descarga de agua sobre el cuerpo de un rompeolas. Dicho efecto causa daños directos sobre la estructura y daños indirectos en las instalaciones del puerto, manifestándose en paro de las actividades portuarias o en el peor de los casos daños a las áreas de aguas protegidas y obras de atraque e instalaciones de tierra. [D.G.P, 2000]

En general en México no se realizan estudios suficientes sobre la problemática de las obras de protección con cota de coronamiento baja, lo que motivó el desarrollo de la presente tesis para implementar el estudio experimental de los rompeolas en tándem como obra complementaria en la protección de los puertos, para garantizar así que sean seguros y confiables para los usuarios de ellos. Por lo antes citado, se justifica plenamente la presente tesis para diseñar en forma experimental los rompeolas en tándem, que contribuirán a la protección de las áreas de agua tras los rompeolas superficial en condiciones de oleaje extremo de tormenta, permitiendo las operaciones portuarias por tiempos mayores.



OBJETIVOS

Los objetivos de la presente tesis son los siguientes:

- Analizar y estudiar el efecto de rebase (overtopping) en estructuras permeables a talud de enrocamiento, con base a una investigación del marco teórico metodológico.
- Observar y comprender el sistema en tándem bajo la acción de oleaje irregular, así como validar los resultados comparándolos con los obtenidos de otros estudios.
- Determinar las condiciones de diseño más adecuadas de separación, sumergencia y el ancho de coronamiento del rompeolas sumergido.

HIPÓTESIS

A través de un estudio en modelo físico reducido se pueden dimensionar el sistema de rompeolas en tándem para reducir sustancialmente el rebase del oleaje sobre rompeolas superficial de cota de coronamiento baja.

METODOLOGÍA

Esta investigación experimental se realizó con un modelo físico reducido llevando la siguiente metodología:

- Recopilación, clasificación y análisis de información de la bibliografía existente sobre el tema de investigación, así como la consulta de artículos científicos internacionales.
- Acondicionamiento del canal angosto de oleaje y del equipo a utilizar ubicado en el Laboratorio Ingeniería Hidráulica de la E. S. I. A. Unidad Zacatenco del I. P. N. con la finalidad de obtener las condiciones propicias para generar el fenómeno de estudio.
- Diseño y construcción de un modelo físico reducido, en el que se simularon secciones trapeciales de rompeolas en tándem con material de enrocamiento.



- Calibración del modelo en condiciones normales de oleaje y para oleaje de tormenta tomando lecturas mediante un software.
- Ensayos en el modelo respetando las condiciones de ensayo previamente establecidas.
- Análisis y procesamiento de los resultados producto de los ensayos, basado en las observaciones de cada uno de estos, generando gráficas con dichos resultados.



I. GENERALIDADES

I.1. Principios generales del oleaje

I.1.1. Elementos del oleaje

El oleaje es factor determinante en la geometría y composición de playas, en la planeación y diseño de puertos, vías navegables, estructuras de protección costera, medios de protección costera, y otras obras.

Dichas olas generalmente obtienen su energía de los vientos, la cual finalmente es disipada en regiones cerca de la costa y sobre las playas. Las olas aparecen como un conjunto de crestas y valles en un cambio constante sobre la superficie del agua, debido a la irregularidad de la forma de la ola y a la variabilidad en la dirección de propagación, esto es sí las ondas están bajo la influencia del viento.

La dirección de propagación de las olas puede ser valorada como un promedio de las direcciones de olas individuales. Al oleaje se le puede definir entonces como una sucesión de ondas sobre una superficie de agua que después se propaga hasta alcanzar tierra.

Existen diferentes tipos de generación de dicho fenómeno, como son los movimientos de masas de agua provocados por la atracción de cuerpos celestes, o los movimientos de placas en el fondo marino, erupciones volcánicas o mareas, estos por mencionar a los generadores naturales del oleaje, pero también existen factores artificiales que intervienen en la acción de este, los cuales pueden ser las detonaciones, el tránsito de embarcaciones, descargas hidráulicas o la construcción de infraestructura marina. [S.C.T., 1989] [I.I.E.-C.F.E., 1983]

A continuación se presenta en la Figura 1.1., una idealización del oleaje que describe sus componentes:

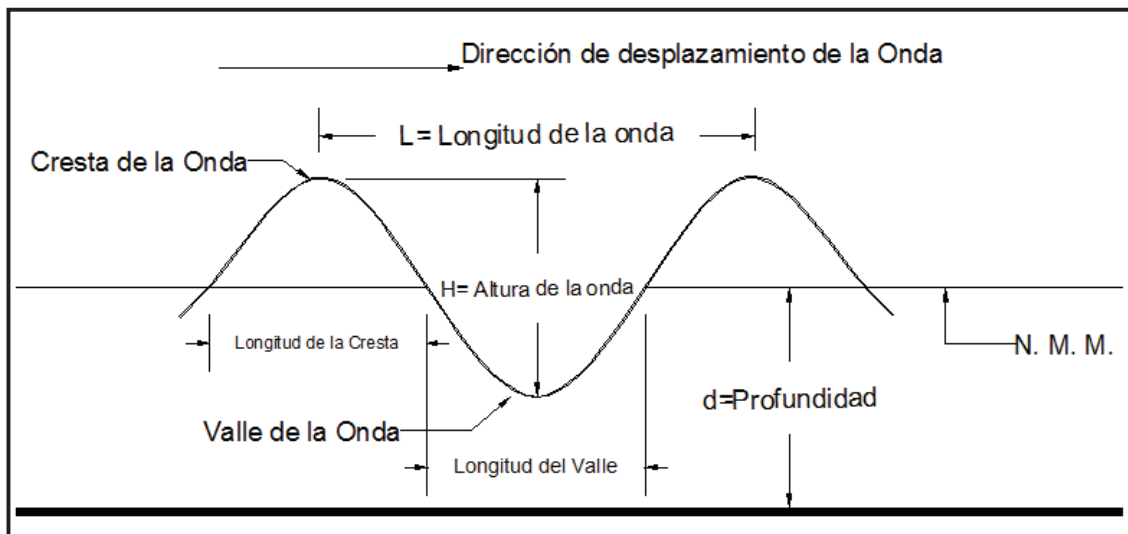


Figura I.1. Onda de oleaje y sus características

Parámetros del oleaje: [Rosales, 2005]

- Longitud de la ola (metros)
- Periodo de la ola (segundos)
- Altura de ola (metros)
- Velocidad de propagación (metros por segundo)
- Elevación (metros)
- Relación de esbeltez (adimensional)
- Profundidad del agua (metros)

I.1.2. Clasificación del oleaje

Debido a la gran variedad de periodos de ola es muy importante en la ingeniería de costas el estudio de ondas, en donde, como se mencionó anteriormente, las de mayor energía son las generadas por el viento.

Una descripción física adecuada de una onda de agua, involucra su forma superficial y el movimiento del fluido debajo de ella. Una ola puede describirse en términos matemáticos simples, se llama ola simple, un ejemplo de estas son las olas senoidales o armónicas, ya que por su perfil de superficie puede ser descrita por una función seno o coseno simple. A las olas difíciles de describir en forma o movimiento y que pueden tener varios componentes se les llama olas complejas. Una ola es periódica si su movimiento y perfil superficial ocurren a intervalos iguales de tiempo. [I.I.E.-C.F.E., (1983)]



La dirección de un oleaje se da en función del punto cardinal del cual proviene dicho oleaje.

Debido a los diferentes tipos de oleaje, en la tabla I.1 se muestra la clasificación de las ondas de Kinsman con sus diferentes características, ya sea por el periodo, la duración de la acción de las fuerzas, etcétera.

1. Clasificación de acuerdo al periodo.

Tabla I.1. Clasificación de las ondas de Kinsman (1965) [I.I.E.-C.F.E., (1983)]

NOMBRE DE LA OLA	PERIODO	FUERZA MÁS IMPORTANTE QUE LA GENERA	FUERZA MÁS IMPORTANTE QUE LA RESTAURA
Ondas Capilares	0 - 0.1 s	Viento	Tensión superficial, fuerza de gravedad
Ondas de ultragravedad	0.1 - 1 s	Viento	Tensión superficial, fuerza de gravedad
Ondas de gravedad	1 - 30 s	Viento	Fuerza de gravedad
Ondas de infragravedad	30s - 5min	Viento	Fuerza de gravedad, fuerza de Coriolis
Ondas de largo periodo	5min - 24hr	Viento, tormenta, maremotos, atracción del sol y de la luna	Fuerza de gravedad, fuerza de Coriolis
Ondas de Transmarea	> 24hr	Atracción del sol y de la luna	Fuerza de Coriolis

2. Clasificación debido a la duración de la acción de las fuerzas.

- Oscilación forzada: La aplicación de la fuerza generadora es constante por lo que las características de la ola dependen totalmente de este factor
- Oscilación libre: Son generadas al aplicarse por un instante una fuerza, provocando que la propagación sea independiente de esta y solo intervenga el periodo y la profundidad por donde viaja.



3. Clasificación debido al desplazamiento de las partículas.

- Olas de oscilación: La trayectoria del movimiento de las partículas es cerrada, en el mismo punto inicia y finaliza su desplazamiento, disminuyendo su velocidad horizontal al disminuir la profundidad. (Figura I.2.)

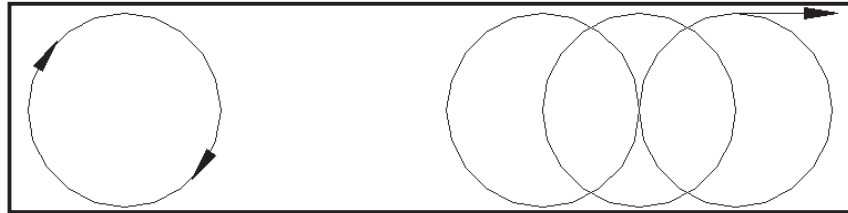


Figura I.2. Trayectoria oscilatoria de las partículas de agua en una ola. (Imagen mejorada de: [I.I.E.-C.F.E., (1983)] [D.A.C.E., 1984])

- Olas de translación: El movimiento de las partículas en su avance es significativo con respecto al punto inicial de la trayectoria. (Figura I.3.)

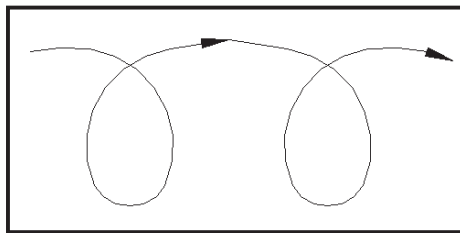


Figura I.3. Trayectoria de translación de las partículas de agua en una ola. (Imagen mejorada de: [I.I.E.-C.F.E., (1983)] [D.A.C.E., 1984])

4. Clasificación de acuerdo a su altura.

- Olas de pequeña amplitud: Esta cuenta con la característica $H < L$.
- Olas de amplitud finita: Se consideran los desplazamientos de la superficie libre del agua.

5. Clasificación de acuerdo al desplazamiento de la cresta.

- Olas progresivas: Existe un desplazamiento horizontal de la cresta.
- Olas estacionarias: El desplazamiento horizontal es nulo y hay un aparente desplazamiento vertical de la cresta.



6. Clasificación de olas estacionarias.

- Clapotis: Son generadas por las olas reflejadas
- Seiches: Son olas de periodo largo.

7. Clasificación por la zona en donde se localizan.

- Olas en la zona de generación (SEA): en esta zona las olas son generadas por el viento en el área denominada "Fetch", área en donde el oleaje es caótico, es decir, el oleaje presenta una serie de protuberancias que nacen y desaparecen continuamente, presentando periodos, longitudes cortas, superficie irregularmente cambiante, además de viajar en todas direcciones. [D.A.C.E., 1984] [U.S.A.C.E., 2001]
- Olas en la zona de decaimiento (SWELL): en esta zona las olas se propagan fuera de la zona de generación con su propia energía alterando sus características al desplazarse y al cambiar la profundidad del fondo, a dicho fenómeno se le denomina también oleaje de fondo u oleaje distante. Las ondas cuentan con periodos y alturas irregulares pero con una dirección predominante. Las ondas con diferentes celeridades se solidifican al acercarse a la línea de costa, donde se modifican por el efecto de fondo. (Figura I.4.) [D.A.C.E., 1984] [U.S.A.C.E., 2001]

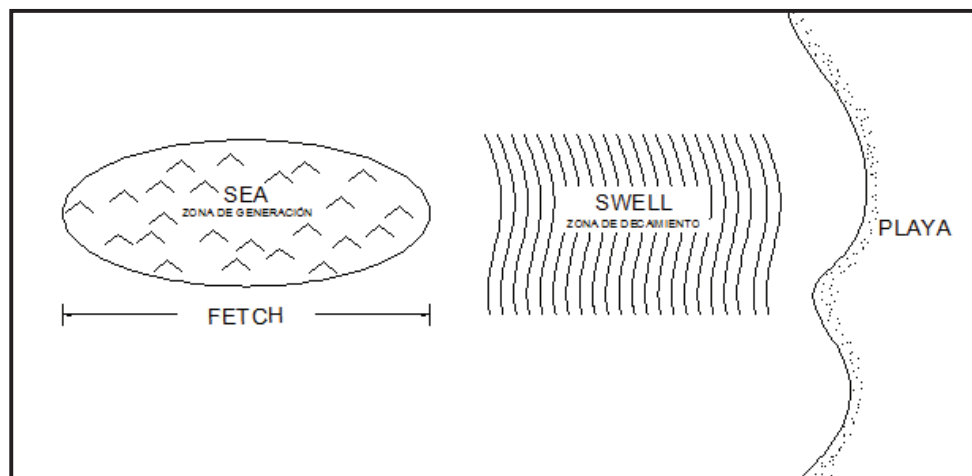


Figura I.4. Zonas de generación y decaimiento. (Imagen mejorada de: [I.I.E.-C.F.E., (1983)])



8. Clasificación de acuerdo a la profundidad.

Otra clasificación tiene que ver con la relación de profundidad con la longitud de la ola, estableciendo tres diferentes zonas como a continuación se presenta en la Tabla I.2.

Tabla I.2. Clasificación de las olas según su profundidad relativa. [I.I.E.-C.F.E., (1983)]

TIPO DE ONDA	VALOR TEÓRICO	VALOR PRÁCTICO
Zona de aguas profundas	$d/L \geq 1$	$d/L \geq 0.5$
Zona de aguas intermedias	$1 > d/L > 0.005$	$0.5 > d/L > 0.05$
Zona de aguas someras	$d/L \leq 0.005$	$d/L \leq 0.05$

Beaufort y Douglas proponen una escala anemométrica en la cual genera una relación viento-ola, en donde con la velocidad del viento se puede determinar los efectos que este causa en mar abierto, así como identificar la altura máxima de ola en metros, en la Tabla I.3 se muestra dicha escala.

Tabla I.3. Escala anemométrica de Beaufort y Douglas. [Ruíz, 2011]

ESCALA DE BEAUFORT				ESCALA DE DOUGLAS		
GRADO	NOMBRE	VELOCIDAD (m/seg)	CONDICIONES DEL MAR	GRADO	NOMBRE	ALTURA DE OLA
0	Calma	0.0 - 0.2	Mar llana.	0	Calma	0.0
1	Ventolina	0.3 - 1.5	Ondulación pequeña en la superficie, sin producción de espuma.	1	Llana	0.0 - 0.1
2	Flojito	1.6 - 3.3	Olas cortas y bajas que no rompen; mar rizada.	2	Rizada	0.1 - 0.5
3	Flojo	3.4 - 5.4	Oleaje que empieza a romper; poca espuma; mar rizada.			
4	Bonacible	5.5 - 7.9	Olas de poca altura pero de mayor longitud; borregos de espuma; esporádicamente rociones de espuma; marejada.	3	Marejadilla	0.5 - 1.25



Tabla I.3. Escala anemométrica de Beaufort y Douglas. (continuación) [Ruíz, 2011]

ESCALA DE BEAUFORT				ESCALA DE DOUGLAS		
GRADO	NOMBRE	VELOCIDAD (m/seg)	CONDICIONES DEL MAR	GRADO	NOMBRE	ALTURA DE OLA
5	Fresquito	8.0 - 10.7	Se acentúa la longitud de las olas; generalización de borregos de espuma; esporádicamente rociones de espuma; marejada.	4	Marejada	1.25 - 2.50
6	Fresco	10.8 - 13.8	Se inicia la formación de grandes olas que rompen; rociones de espuma al aire; mar gruesa.	5	Gruesa	2.50 - 4.00
7	Frescachón	13.9 - 17.1	Crece la mar; mar muy gruesa.	6	Muy gruesa	4.00 - 6.00
8	Duro	17.2 - 20.7	Olas de altura notable; las crestas despiden espuma pulverizada; mar arbolada.			
9	Muy duro	20.8 - 24.4	Olas muy grandes; balances pronunciadas; la espuma empieza a afectar la visibilidad.	7	Arbolada	6.00 - 9.00
10	Temporal	24.5 - 28.4	Olas considerables; mar blanca de espuma; balances fuertes.	8	Montañosa	9.00 - 14.00
11	Borrasca	28.5 - 32.6	Olas extraordinariamente altas; visibilidad escasa causada por la espuma.	9	Confusa	Más de 14.00
12	Huracán	32.7 - 36.9	Atmósfera y mar completamente llena de espuma; visibilidad casi nula			

I.1.3. Teorías del oleaje

A través de la historia las olas producidas por el viento, así como su propagación, han sido observadas, pero no fue sino hasta el siglo XIX cuando surgió la primera formulación matemática del movimiento del oleaje. En 1802 el matemático Franz Gerstner publicó en Praga la teoría trocoidal del oleaje para aguas profundas, mientras que en Inglaterra George Biddell Airy en 1845 desarrolló una teoría de ondas de pequeña amplitud, conocida así o como teoría lineal del oleaje, la cual abarca por completo el rango de aguas profundas a aguas someras. George Gabriel Stokes en 1847 estableció una teoría de ondas de amplitud finita en aguas profundas, lo cual, posteriormente se extendió a aguas intermedias. [Goda, 2000]



Russell en 1944, descubrió la existencia de una onda solitaria con una sola cresta que se propaga sin cambio de forma en aguas someras; Russell las llamó gran ola de translación (great waves of translation). Varios científicos de su época argumentaron que las ondas de forma permanente no podrían existir. En particular, Airy y Stokes decían que la disminución de la onda era una indicación de que aquéllas no eran permanentes, ellos dedicaron parte de sus esfuerzos a entender este curioso fenómeno, y no fue sino hasta el año 1870 que J. Boussinesq y Lord Rayleigh dedujeron que la amplitud de dicha *gran ola de translación*, debía ser una onda viajera proporcional al cuadrado de la secante hiperbólica, poseyendo así una localización exponencial.

Boussinesq derivó la ecuación no lineal en derivadas parciales que hoy lleva su nombre. Pero no fue hasta 1895, cuando Diederick Johannes Korteweg y su alumno Gustav de Vries presentaron la ecuación en derivadas parciales no lineal que captura la esencia de este fenómeno, donde considera la dispersión y la no linealidad, es decir, derivaron una teoría de olas periódicas permanentes de amplitud finita en aguas someras, la cual se conoce hoy en día como teoría Cnoidal de oleaje. [González y Nápoles, 2006] [Goda, 2000]

Las teorías fundamentales del oleaje no fueron establecidas sino hasta finales del siglo XIX, y pasaron muchas décadas antes de que los ingenieros civiles tuvieran la posibilidad de hacer uso de dichas teorías en aplicaciones prácticas. (Tabla I.4 y I.5)

Durante la segunda guerra mundial, la necesidad de información para la planeación de operaciones militares, para el desembarco de Normandía, estimuló el interés en la predicción de las características del oleaje. Los oceanógrafos H. U. Sverdrup y W. H. Munk combinaron relaciones teóricas y empíricas para desarrollar un método de predicción de altura de ola significativa (el promedio del tercio más alto de alturas de un tren de olas). Poco más tarde esta teoría mejoró para convertirse en el método SMB, desarrollado por Sverdrup, Munk y Bretchneider quienes entendieron claramente que las olas están compuestas por varias ondas largas y pequeñas. El concepto de altura de ola significativa se basa en la comprensión del oleaje como un proceso aleatorio.

Sin embargo, este concepto ha sido algunas veces malentendido al representar olas de altura y periodo constantes. La teoría de oleaje monocromático



y los resultados experimentales obtenidos con un tren de olas regulares, frecuentemente han sido aplicados directamente a problemas reales, bajo la suposición de que el oleaje regular corresponde exactamente a la altura significativa. [Goda, 2000]

El concepto de representación espectral del oleaje en el dominio de la frecuencia fue introducido por Neumann en 1953 y Pierson en 1954. Anteriormente, Pierce llevó a cabo trabajos de investigación fundados en el análisis estocástico de las ondas oceánicas. El primer estudio de las características de la altura de ola de un registro de oleaje, fue realizado en 1952 por Longuet-Higgins, quien introdujo los siguientes conceptos de previsión:

- Oleaje direccional
- Oleaje de banda ancha
- Oleaje no gaussiano
- Oleaje no lineal
- Distribución conjunta de periodos y alturas.

Por otra parte, St. Denis y Pierson establecieron en 1953 un enfoque estocástico para ondas aleatorias. A estas investigaciones siguieron las de Walden en 1964 y las de Hogben y Lumb en 1967. En las últimas décadas se ha incrementado los trabajos, sobre todo de aplicación; sin embargo, no tomando en cuenta los de Pierson (1955), Borgman (1972) y Battjes (1977), son pocos los que tratan de modelos estadísticos y estocásticos.

Tabla I.4. Teorías lineales. [I.I.E.-C.F.E., (1983)] [D.A.C.E., 1984]

TEORÍAS LINEALES			
INVESTIGADOR	NOMBRE DE LA TEORÍA	MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS	TRANSPORTE DE MASA
George Biddell Airy (1845)	Teoría de Airy	Oscilatoria	No
George Biddell Airy (1845)	Teoría de la onda larga	Oscilatoria	No
George Gabriel Stokes (1847)	Teoría de primer orden	Oscilatoria	No



Tabla I.5. Teorías no lineales. [I.I.E.-C.F.E., (1983)] [D.A.C.E., 1984]

TEORÍAS NO LINEALES			
INVESTIGADOR	NOMBRE DE LA TEORÍA	MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS	TRANSPORTE DE MASA
Franz Gerstner (1802)	Teoría trocoidal	Oscilatoria	No
John Scott y Russell (1856)	Teoría de la onda solitaria	Translación	Si
George Gabriel Stokes (1880)	Teoría de segundo orden	Casi oscilatoria	Pequeño
Diederick Johannes Korteweg y Gustav de Vries (1895)	Teoría Cnoidal	Casi oscilatoria	Pequeño
L. Skelbreia (1959)	Teoría de tercer orden		
J. A. Hendrickson y L. Skelbreia (1961)	Teoría de quinto orden		
W. R. Dean y Peter L. Monkemeyer (1970)	Teoría de la función de corriente		
Leonard William Shwartz (1974)	Teorías de ordenes mayores		

Es importante tomar en cuenta el desarrollo tecnológico en materia de oleaje, para aplicarlo a México, que, como muchos otros países, tiene carencias de información. Es necesario aprovechar adecuadamente todas las fuentes de investigación, como las que se han descrito anteriormente, para avanzar en el conocimiento del oleaje de los mares de nuestro país. [Rosales, 1999]

I.1.4. Fenómenos que modifican el oleaje

El oleaje al estar cada vez más cerca de la costa está expuesto a sufrir modificaciones debido a los cambios de nivel en el fondo marino y/o barreras que se presenten en su trayecto. Estas modificaciones pueden ser observadas cuando el oleaje se acerca a la línea costa debido a los efectos del fondo y la fricción, pues se ven afectadas su velocidad, su longitud y su altura. Los fenómenos que modifican el oleaje son los siguientes:



- Refracción
- Difracción
- Rompiente
- Reflexión

A continuación se describirán cada uno de estos fenómenos.

I.1.4.1. Refracción del oleaje

Este fenómeno es causado cuando las olas se aproximan a la costa, debido a que la celeridad de la ola depende de la profundidad en la cual ésta se propaga. Si la celeridad de la onda disminuye con la profundidad, la longitud de la onda debe disminuir proporcionalmente. El oleaje toma una nueva orientación conforme a los cambios del fondo, provocando que la cresta se deforme en su proyección horizontal, de tal forma que dichos frentes se vuelven paralelos a las líneas batimétricas sobre las que viajan cuando llegan a aguas someras. Debido a que este efecto depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda se representa con (d/L) .

Las olas también pueden refractarse no necesariamente por el fondo sino también por corrientes marinas o algún obstáculo que ocasione que una cresta se desplace más rápido que otra. La refracción es importante considerarla debido a que la mayoría de las obras marítimas están localizadas en aguas someras o intermedias. (Figura I.5.) [I.I.E.-C.F.E., (1983)]

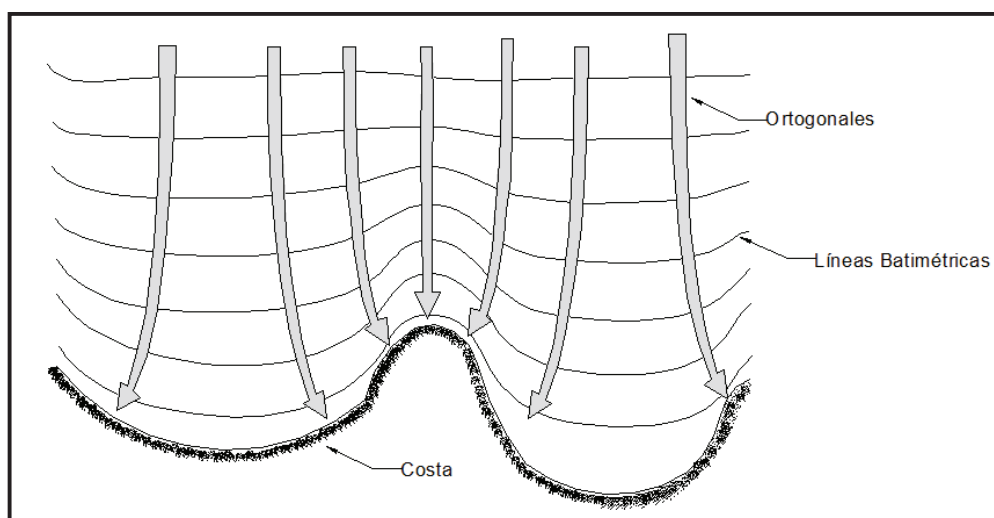


Figura I.5. Refracción del oleaje. (Imagen mejorada de: [D.A.C.E., 1984] [I.I.E.-C.F.E., 1983])



I.1.4.2. Difracción del oleaje

La difracción es fundamentalmente una transferencia lateral de energía, se produce cuando las olas al viajar inciden sobre alguna barrera artificial o natural, las ondas se curvan a su alrededor y penetran dentro de la zona protegida, con lo que se presenta una expansión lateral. Este fenómeno afecta la distribución de la energía detrás de una barrera, como por ejemplo en el morro de un rompeolas o en la entrada de un recinto portuario formado por dos rompeolas o por la presencia de una isla. (Figura I.6)

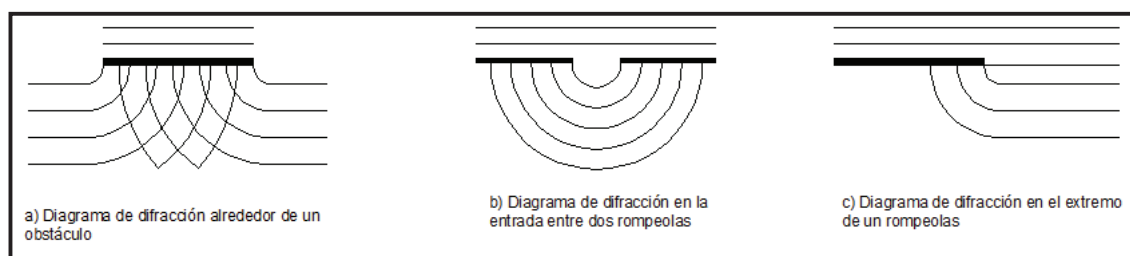


Figura I.6. Diagramas de difracción del oleaje. (Imagen mejorada de: [DACE-2, 1984] [I.I.E.-C.F.E., (1983)])

I.1.4.3. Rompiente del oleaje

Este fenómeno se presenta cuando la ola incide contra la playa, a alguna otra barrera artificial o natural, este rompimiento aparece cuando la ola alcanza un estado crítico y puede ser motivada por la relación de esbeltez, por el efecto del fondo, por la perturbación de la superficie del agua, por la transferencia de energía del viento sobre la superficie libre del agua en zonas profundas o por la forma de la estructura sobre la cual rompe. Por lo tanto, la rompiente es fase límite del movimiento de la ola, donde la cresta de la ola colapsa cuando llega a ese límite. [D.A.C.E., 1984]

En 1978 Jurjen Anno Battjes demostró que la rompiente de la ola puede clasificarse en función del número de Iribarren.

Rompiente tipo continua (spilling)

Esta se genera gradualmente, se observa la presencia de burbujas de espuma y turbulencia sobre la cresta, la ola tiene un perfil casi simétrico y no existe una clara línea de rompiente. Se presenta cuando la pendiente de la playa es generalmente suave y la relación de esbeltez es pequeña.



De acuerdo al número de Iribarren, este presenta un valor menor a 0.4 ($\xi_b < 0.4$). (Figura I.7) [Frías y Moreno, 1986]



Figura I.7. Rompimiento tipo Spilling

Rompiente tipo rodante (plunging)

Esta rompimiento se desarrolla drásticamente, en su cresta presenta una curvatura formándose un tubo de aire en el interior de la ola, tiene muy bien definida la zona de rompiente, que es en donde el agua de la cresta se adelanta a la onda y cae frente a ella, produciendo mucha espuma y turbulencia. De acuerdo al número de Iribarren se encuentra entre los valores siguientes $0.4 < \xi_b < 2.0$ (Figura I.8). [Frías y Moreno, 1986]



Figura I.8. Rompimiento tipo Plunging



Rompiente tipo ondulante (surging)

Este tipo de rompiente se presenta en playas con gran pendiente, esta rompiente ocurre casi en la línea de playa. Se caracteriza por sus olas largas y pendientes fuertes, la cara interior de la onda toma forma asimétrica y abombada en la parte alta. De acuerdo al número de Iribarren se genera cuando $\xi_b > 2.0$ (Figura I.9). [Frías y Moreno, 1986]



Figura I.9. Rompimiento tipo Surging

Rompiente tipo colapsante (collapsing)

C. J. Galvin en 1968 establece el término de collapsing para definir otro tipo de rompiente, este se emplea para describir la transición de la rompiente tipo plunging a la Surging (Figura I.10). [D.A.C.E., 1984]



Figura I.10. Rompimiento tipo Collapsing



I.1.4.4. Reflexión del oleaje

Este fenómeno lo podemos observar si el oleaje no rompe e incide en alguna estructura natural o artificial. A menudo los efectos de la reflexión del oleaje pueden ser tan importantes como las de la refracción y la difracción en el diseño de las estructuras costeras, particularmente para estructuras asociadas con el desarrollo de puertos. La reflexión del oleaje indica una reflexión de su energía como oposición a la disipación. Por consecuencia, al existir múltiples reflexiones y en ausencia de suficiente disipación de energía, dentro de un complejo portuario, puede traer como resultado una gran acumulación de energía que aparece como oleaje de agitación y oscilaciones que pueden causar movimiento excesivo en las embarcaciones atracadas y en otras instalaciones flotantes, dando como resultado el desarrollo de grandes esfuerzos en las amarras.

Por consiguiente, los malecones, muros de contención y revestimientos, deben disipar y no reflejar, siempre que sea posible, la energía del oleaje incidente. Las playas naturales dentro de un puerto son excelentes disipadoras de energía de oleaje, y las modificaciones que se pretendan realizar en un puerto y que causen la disminución de las áreas playeras deben ser muy bien analizadas antes de ejecutarse. Entonces la energía de la ola puede tener las siguientes modificaciones (Figura I.11) [D.A.C.E., 1984]:

- Disiparse, como lo hace ante un fondo rugoso o una estructura porosa.
- Transmitirse parcialmente detrás de la barrera, como es el caso de un rompeolas.
- Reflejarse en dirección distinta a la de incidencia sobre la barrera.

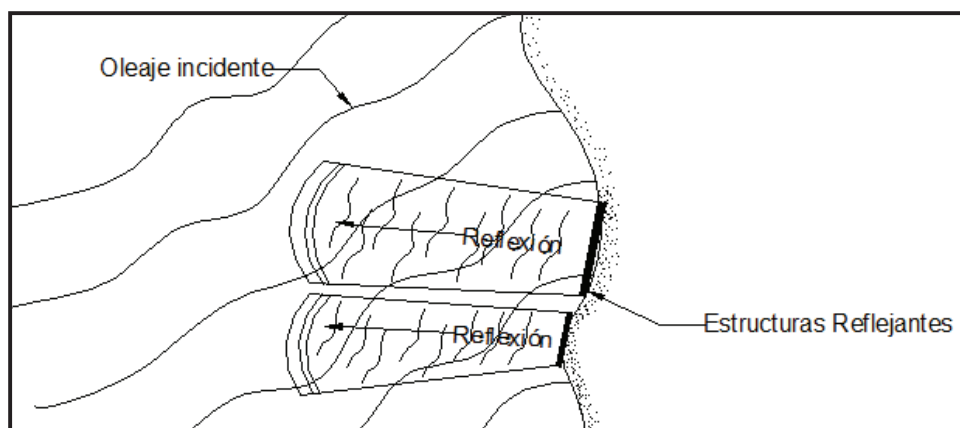


Figura I.11. Reflexión del oleaje. (Imagen mejorada de: [D.A.C.E., 1984])



I.1.5. Oleaje Irregular

En el oleaje real las olas con alturas y periodos iguales no se mantienen uniformemente; en un tren de olas que llega a la costa, las alturas, periodos y perfiles son diferentes, debido a que en la trayectoria que sigue al salir de la zona de generación encuentran condiciones que deforman su estado inicial, como los fenómenos de difracción, refracción, reflexión. Para el estudio y análisis es válido considerar el oleaje regular, pero para la obtención de mejores resultados es mejor considerar el oleaje irregular debido a que realmente es así en la naturaleza, esto nos permite realizar un mejor dimensionamiento, repercutiendo en una disminución importante de costos de construcción. El oleaje irregular se estudia basado en datos y predicciones estadísticas del oleaje real, considerando los fenómenos que lo deforman o las condiciones de oleaje extremo utilizadas para el diseño de las estructuras. En las investigaciones que se realizan dentro de los laboratorios existen dos formas de reproducir el oleaje irregular, la primera consta de la propagación de un tren de olas con diferentes periodos y alturas, mientras que en la segunda es la de superposición de distintos trenes de olas regulares con sus respectivas alturas y periodos. A diferencia de las características geométricas, la definición se realiza de manera distinta entre ellas, ya que debido a la irregularidad del perfil no permite aplicar los mismos conceptos.

La altura de ola en el oleaje irregular se puede establecer por algunos de los siguientes métodos [S.C.T., 1989]:

- Obteniendo la diferencia de la altura vertical media entre el punto más alto y el siguiente de altura mínima.
- La altura que existe entre la cresta y el valle despreciando las variaciones pequeñas en el perfil.
- La distancia que hay desde el perfil máximo hasta el mínimo entre dos puntos consecutivos de tiempo al cruzar el nivel medio de la ola o nivel Zero-up-cross en la misma dirección, ya sea hacia arriba o hacia abajo.

Para el estudio, análisis y manejo de los datos se emplean los conceptos de olas representativas, las cuales se obtienen al contar con un grupo de datos medidos de campo, o bien, de las predicciones de datos estadísticos, las más comunes son las siguientes [S.C.T., 1989] [Ocaña, 2001]:

- Ola máxima, la cual tiene la altura máxima ($H_{m\acute{a}x}$) de los datos registrados en un grupo y su periodo correspondiente es ($T_{m\acute{a}x}$).
- Ola un d\acute{e}cimo donde la altura $H_{1/10}$, es el promedio de la d\acute{e}cima parte de las alturas mayores de un grupo de datos y su periodo $T_{1/10}$.
- Ola significativa cuya altura $H_{1/3}$, es el promedio de la tercera parte de alturas m\acute{a}s altas del grupo a la cual corresponde un periodo $T_{1/3}$, el cual no es el promedio de los periodos m\acute{a}s largos del grupo. Este concepto se introdujo cuando se desarroll\acute{o} el m\acute{e}todo de predicci\acute{o}n de Sverdrup-Munk-Bretschneider al observar que su valor es similar a los obtenidos en el campo.
- Ola promedio en la que \bar{H} es el promedio de las alturas de los datos del grupo de olas y su periodo correspondientes \bar{T} .

Para el an\acute{a}lisis de las caracter\xedsticas del oleaje irregular existen dos m\acute{e}todos, los cuales son los siguientes [S.C.T., 1989] [Oca\~na, 2001]:

- M\acute{e}todo Zero-up-crossing (Figura I.12). Este considera que la altura en un tren de olas irregular es la diferencia entre el punto m\acute{a}ximo y el m\xednimo de la ola definida anteriormente, y el periodo es el tiempo en que la ola cruza el nivel medio (Zero-up-crossing) en un sentido, hasta el tiempo en que vuelva a presentarse la misma condici\acute{o}n. Aqu\xed la ola representativa es la ola significativa del grupo.

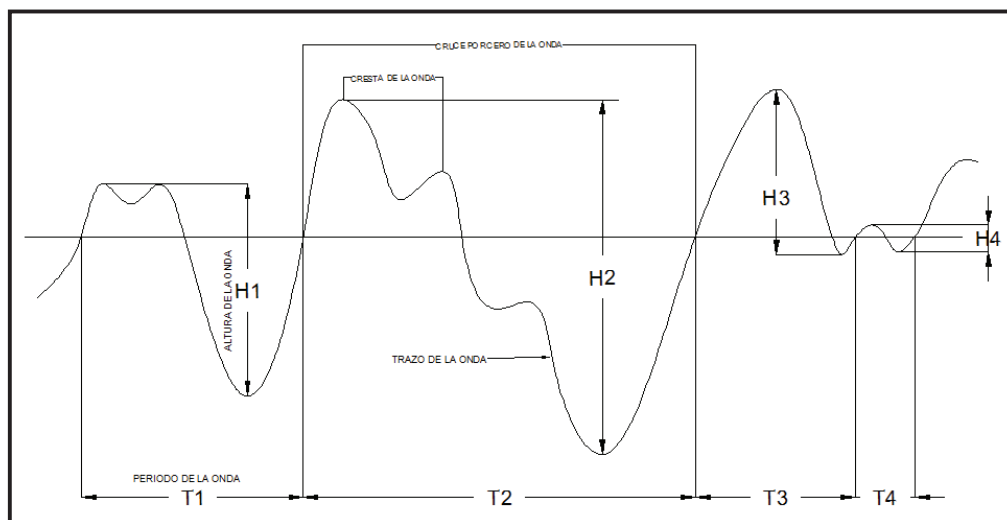


Figura I.12. M\acute{e}todo zero-up-crossing. (Imagen mejorada de: [M.H.L., 2011])



- Espectro de energía. En este método el tren de olas irregulares se separa en varios regulares, a los cuales se les da el nombre de componentes, teniendo cada uno sus propios periodos y direcciones, que con ciertos cálculos nos dan la energía de cada uno. Al agrupar estos datos en una sola gráfica se obtiene la distribución de energía a la que se denomina espectro direccional cuando se han agrupado los datos por direcciones, y se le llama espectro frecuencial cuando el periodo es el dato que lo conforma. Cuando se incluyen ambos espectros el resultado es uno llamado bidireccional.

I.1.6. Espectros de oleaje

Espectro Pierson-Moskowitz

En 1964, Pierson y Moskowitz, desarrollaron una fórmula basada en la teoría de similitud de Kitaigorodskii, para representar estados de mar completamente desarrollados generados por el viento. La expresión representa una elevación del nivel del mar, debida a la constante acción del viento y a su duración. La forma es derivada de los datos de oleaje por viento obtenidos de la observación de campo. [Moskowitz y Pierson, 1964]

$$S(f) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-0.74 \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right)^4 \right]$$

Donde:

$S(f)$ = Densidad de energía, ($m^2 \cdot s$)

f = Frecuencia, en ciclos por segundo (cps).

g = Aceleración de la gravedad, (m/s^2).

$U_{19.5}$ = Velocidad media del viento medida o calculada a la altura de 19,5 m, en m/s.

Esta ecuación es válida para oleaje en completo desarrollo y para velocidades del viento, medidas a 19.5 m., entre 10.3 y 23.1 m/s.



Método del Espectro de Bretschneider (1959)

La siguiente expresión es usada [I.I.E.-C.F.E., 1983]

$$S(f) = 0,43 \left(\frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2} \right)^2 \frac{g^2}{f^5} \exp \left[-0,675 \left(\frac{1}{\bar{T}f} \right)^4 \right]$$

Donde:

f = Frecuencia, en ciclos por segundo (cps).

$S(f)$ = Densidad de energía, (m²·s)

\bar{H} = Altura de ola en m

\bar{T} = Periodo de la ola (seg)

Espectro de Neumann (1953) [Neumann y Pierson, 1966]

Este modelo espectral analítico fue el primer modelo usado con fines de diseño en ingeniería. Este está en función de la velocidad del viento medida a 10 m. sobre el nivel medio del mar, y queda expresado como:

$$S(f) = 1,466 H_{m0}^2 \frac{f_p^5}{f^6} \exp \left[-3 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2} \right]$$

$$H_{m0} \approx H_s = 4(m_0)^{1/2}$$

$$f_p = \left[\left(\frac{1}{6} \right) \left(\frac{g}{\pi U_{10}} \right) \right]^2$$

Donde:

H_{m0} = Altura de ola del momento de orden cero la cual es aproximada (m)

H_s = Altura de ola significativa (m)

f_p = frecuencia pico (s)

Espectro ISSC (1964) [Chakrabartis, 1977]

En el congreso de la ISSC (International Ship Structures Congress) se sugirió una modificación a la forma del espectro propuesto por Bretschneider,



considerando la relación entre la frecuencia de pico f_p y la frecuencia media f como se presenta a continuación:

$$E(f) = 0.1107H_s^2 \frac{f^4}{f^5} \exp \left[-0.4427 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4 \right]$$

Donde:

$$f = 1.296f_p$$

Espectro ITTC [Chakrabartis, 1977]

En los congresos celebrados en 1966, 1969 y 1972 de la ITTC (International Towing Tank Conference) se propusieron modificaciones para el espectro sugerido por Pierson-Mozkowitz, en términos de la altura de ola significativa y la frecuencia.

$$E(f) = 0.1272m_o f_z^{-4} f^{-5} \exp \left[-0.318 \left(\frac{f_z}{f} \right)^4 \right]$$

Donde:

$$f_z = \frac{1}{t_{02}}$$

I.2. Obras de protección

I.2.1. Clasificación de obras de protección

Para su estudio las obras de protección de costas se pueden dividir de acuerdo a sus características estructurales y ubicación con respecto a la playa en:

- Obras paralelas a la playa
- Obras perpendiculares a la playa

Obras paralelas a la playa

Tienen la función de fijar la línea de playa, son estructuras tales como: muros reflejantes o no reflejantes, malecones rígidos o flexible, que al colocarlos paralelos a la costa forman un dique entre la playa y el mar. (Figura I.13)

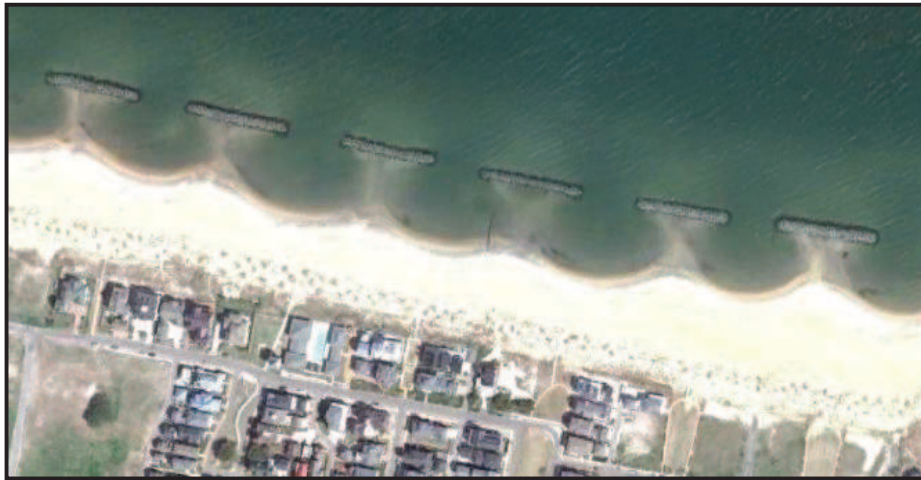


Figura I.13. Obras paralelas a la playa (Norfolk, Virginia) [N.O.A.A., 2011]

Obras perpendiculares a la playa

Tienen la función de proteger los puertos y reducir el transporte litoral. Dentro de estas obras se tienen principalmente a las escolleras, espigones y rompeolas.

Escolleras

Son estructuras construidas y diseñadas sobre la costa, para encausar o mantener en contacto algún cuerpo de agua (río, laguna o estuario) con el mar, y controlar el transporte litoral, así como del oleaje. Las escolleras son construidas en las desembocaduras de los ríos o canales de comunicación para ayudar a profundizar el canal o estabilizarlo. (Figura I.14)

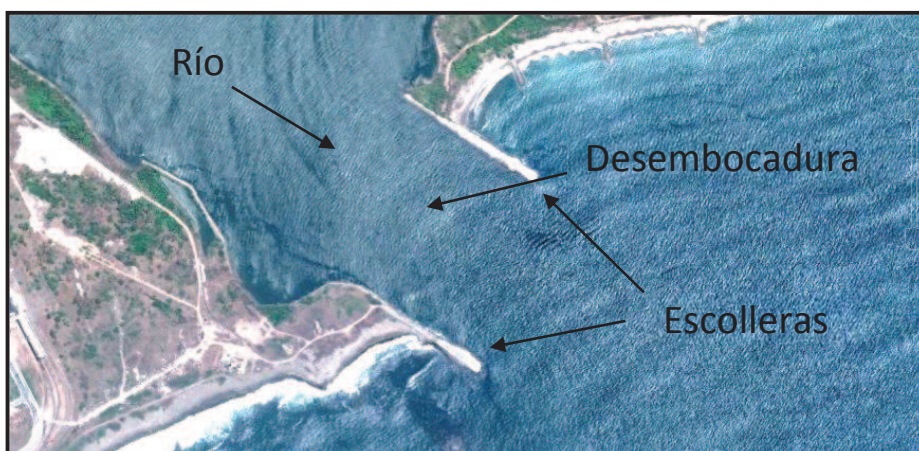


Figura I.14. Escolleras del puerto Lázaro Cárdenas [N.O.A.A., 2011]



Espigones

Es una estructura construida para proteger una costa equilibrándola a conveniencia, usualmente se construyen en forma perpendicular a la línea de costa con el fin de detener el transporte litoral, o para la protección de la zona destinada. Estos elementos atrapan el material sólido provocando un depósito en la zona de llegada del material y una erosión en la zona posterior con el fin de ampliar la franja costera o evitar la erosión en zonas donde existan edificaciones que pudieran estar en peligro debido a este efecto. (Figura I.15) [U.S.A.C.E., 2001]



Figura I.15. Espigones de puerto Vallarta [N.O.A.A., 2011]

Rompeolas

Un concepto simple de rompeolas se define como una barrera natural o artificial que se interpone entre el mar o un lago y la costa, e interrumpe la fuerza de las olas para proporcionar aguas tranquilas a un puerto. Los rompeolas naturales son islas y promontorios que protegen a una zona marítima de las olas. Los artificiales pueden estar unidos o separados de la orilla y son de muchas formas y tamaños. Se pueden construir con roca o elementos prefabricados e incluso de una combinación de ambos. (Figura I.16 y I.17) [I.C.E., 1992]



Figura I.16. Rompeolas Natural



Figura I.17. Rompeolas Artificial

Es una estructura que sirve para crear una zona de abrigo de relativa calma detrás de ella, es decir, generar un puerto, con el fin de permitir y facilitar las maniobras y operaciones de las embarcaciones, así como evitar o reducir el azolve en las zonas de acceso, maniobras de atraque y operación, disminuyendo el transporte litoral hacia estas importantes zonas.

Los rompeolas pueden ser abiertos, con un extremo en tierra denominado arranque, y otro en el mar, el morro. Exentos o aislados, con dos morros; o cerrados, con dos arranques. Su planta puede ser recta, quebrada, curva, en T, en L o de muy diversa configuración. Por su longitud pueden ser cortos o largos, rebasables e no rebasables, y por su sección, permeables e impermeables. Por su comportamiento ante el agente oleaje incidente, los rompeolas se clasifican en rompeolas (en talud) y reflejantes (verticales). Los rompeolas en talud son los que permiten la rompiente del oleaje mediante la desestabilización del movimiento orbital ondulatorio. Esto se logra disponiendo un talud inclinado convenientemente protegido, capaz de soportar las acciones incidentes y determinado en función de las mismas y del rebase máximo para mantener un comportamiento estructural e hidráulico admisible en el espejo de agua abrigado. [I.I.E.-C.F.E., 1983]

Están contruidos por bloques naturales o artificiales de muy distintas formas dispuestos sobre taludes. Cuando se puedan disponer de canteras próximas, de tamaño y peso suficiente, explotables y de calidad, es siempre aconsejable el empleo de enrocamiento natural. En ciertos casos, cuando esta situación no se produce se recurre, al menos en las partes expuestas, al empleo de elementos artificiales.



Con estos últimos se presentan varios inconvenientes, uno es el incremento en los costos de construcción, otro es que presentan una menor densidad en comparación con la roca, y un inconveniente más es por el material del que está construido, el concreto; al estar construidos dichos elementos tan solo por concreto son susceptibles a la falla por torsión por la falta de acero de refuerzo, ya que este ante los altos contenidos de cloruro del agua de mar presentaría corrosión, provocando un aumento de volumen y por consecuencia la falla del concreto. Su gran ventaja reside en la uniformidad y adaptación a grandes pesos en relación a los agentes y acciones que actúan. Las piezas sobre el talud pueden colocarse en obra de forma aleatoria o acomodadas en forma específica.

Los primeros son más fáciles de construir y rompen mejor la energía del oleaje, que se consume entre los huecos del material granular o artificial. Los segundos son más difíciles de colocar, sobre todo en mares agitados y energéticos, y tienden a descender por el talud, presentando un nivel de daño por descenso o remoción. (Figura I.18)

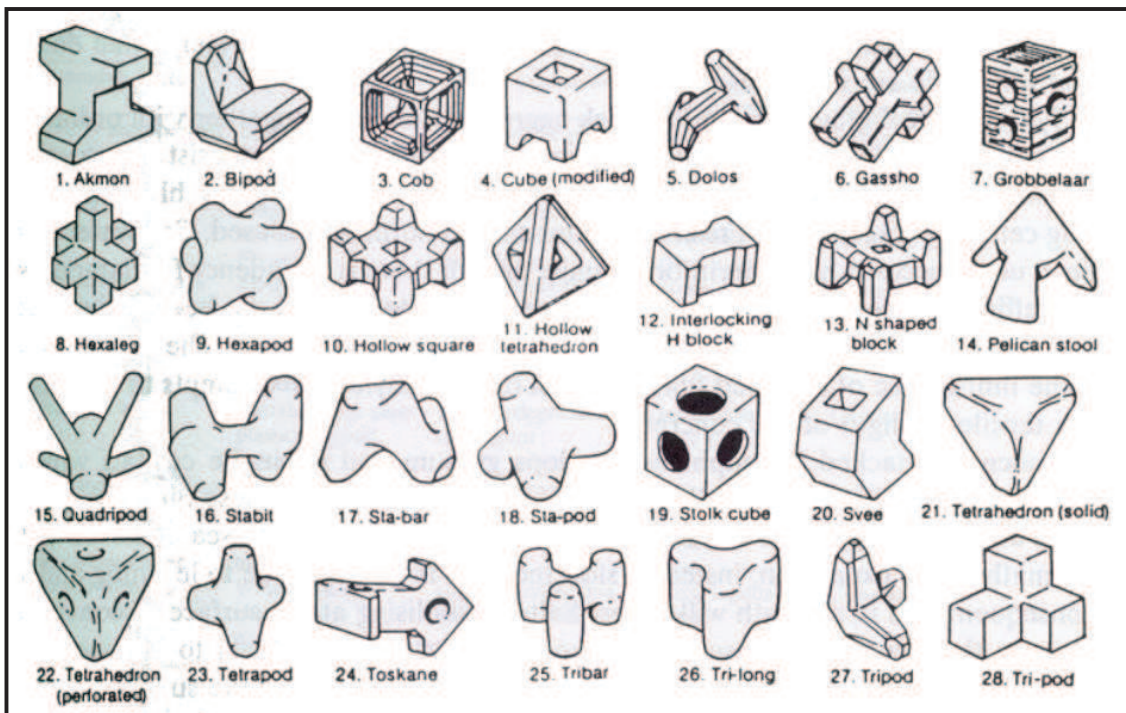


Figura I.18. Elementos artificiales para un rompeolas. [E.T.S.E.C.C.P., 2002]

Siguiendo el criterio de Iribarren sobre la exposición conceptual de los rompeolas, se pueden clasificar de la siguiente forma:



1. Rompeolas de enrocamiento natural.
2. Rompeolas de elementos artificiales:
 - Elementos colocados al azar.
 - Elementos acomodados.

Se puede decir que el rompeolas a talud es una obra marítima exterior de naturaleza deformable, flexible, que avisa de su daño que progresa gradualmente y que necesita de mantenimiento y conservación durante su vida útil mínima o de proyecto. El terreno de cimentación es una variable esencial en el diseño, ya que la socavación o la posible erosión del pie, banqueta o berma del mismo pueden conducir al colapso progresivo y a la inutilización de la estructura, dejando de cumplir su misión estructural, funcional e hidráulica. [I.I.E.-C.F.E., 1983]

I.2.2. Criterio de Diseño

El objetivo principal de la construcción de un rompeolas es establecer una zona de calma en la que las embarcaciones puedan permanecer con seguridad ante periodos meteorológicos adversos o no. Por lo tanto, el rompeolas debe ser capaz de soportar el impacto del oleaje ya que, de no serlo, puede haber consecuencias catastróficas para las embarcaciones y áreas en tierra del puerto. Para un buen funcionamiento de un rompeolas se debe tomar en muy cuenta desde los cálculos de proyecto hasta la colocación de los elementos. Los rompeolas que se encuentran a profundidades superiores a los 3m deben contar con asistencia técnica especializada, debido a la compleja naturaleza de las olas en profundidades mayores. [Bruun, 1989]

El rompeolas típico de enrocamiento lo conforman principalmente tres capas, en los párrafos subsecuentes se describen cada una de ellas:

Núcleo

Normalmente este lo conforman materiales de desecho de cantera sin partículas finas, este material es vertido en el mar por medio de un camión de volteo; para facilitar el vertido por dicho camión, el núcleo debe tener preferiblemente un ancho de 4 a 5 metros o más en la corona y encontrarse a una altura aproximada de 0.5m por encima del nivel medio del mar, esto por razones



de seguridad. Dado el peso del material del núcleo, todo el trabajo de construcción relacionado con rompeolas deberá efectuarse durante las estaciones de más calma, y colocando la capa secundaria y núcleo de manera constante y consecutiva para no perder el material del núcleo por el oleaje. [D.G.P, 2000]

Capa secundaria

Esta capa se coloca entre la coraza y el núcleo, la cual que impedirá el lavado o pérdida de elementos entre los huecos de las sucesivas capas. A nivel sumergido, la naturaleza del terreno o a gran profundidad pueden recomendar la disposición de banquetas de apoyo de manto o bermas de pie antisocavación, que permiten evitar el deslizamiento profundo de la capa resistente e incluso detectar la posible erosión con daño progresivo en la cimentación de la estructura.

A nivel emergido, generalmente con objeto de disminuir la sección del rompeolas, y con ello abaratar la inversión de la obra de defensa y abrigo, la coronación del rompeolas viene ocupada por un monolito de concreto, el espaldón, de múltiples formas, que permite controlar la respuesta funcional hidráulica de la sección proyectada. Van der Meer define en 1988, los monomios de altura de ola y periodo como adimensionales, antes de estudiar el comportamiento dinámico de los taludes hasta la obtención de su equilibrio. Estos conceptos fueron analizados previamente, a nivel histórico de diseño y cálculo, por Hedar entre 1953 y 1960 y por Iribarren en 1965, con objeto de comprobar el grado de equilibrio de la estructura en función de sus solicitaciones y del ángulo del talud, hasta alcanzar un comportamiento de equilibrio hacia arriba o hacia abajo de la coraza en función del llamado " α " crítico.

Coraza

Formada por elementos en varias capas de gran tamaño, naturales o artificiales, concertados o dispuestos aleatoriamente sobre el talud, destacando, por citar algún ejemplo, el acrópodo, diseñado para su empleo en monocapa; los dolos, tribares, tetrápodos, cubos, bloques, escolleras, entre otros, colocados en dos capas; o el material de cantera dispuesto en dos o más capas en la formación de la coraza resistente.



I.2.3. Rompeolas en México

A continuación se muestran en las tablas I.6 y I.7 las características de las obras de protección en los puertos del país en el Litoral Pacífico y el Golfo de México y el Caribe. [D.G.P, 2001]

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS EN LOS PUERTOS MEXICANOS

Tabla I.6. Niveles de coronamiento de estructuras en el Pacífico. [D.G.P, 2001]

LITORAL PACÍFICO				
ESTADO/PUERTO	TIPO DE ESTRUCTURA	CORONAMIENTO Ancho/Alto (m)		MATERIAL
Baja California N.				
Ensenada	Rompeolas	8.90	7.20	Roca hasta 8 Ton. y concreto
Baja California S.				
Cabo San Lucas	Rompeolas y Espigón	10.00	2.50	Roca y concreto hidráulico
Sonora				
Puerto Peñasco	Rompeolas y Escollera	5.00	7.00	Roca hasta 8 Ton.
Yavaros	Rompeolas	10.00	4.50	Roca hasta 6 Ton.
Sinaloa				
Topolobampo	Rompeolas	2.00	3.00	Roca de 6 a 12 Ton.
Mazatlán	Rompeolas	6.00	7.50	Roca hasta 20 Ton
Colima				
Las Hadas	Rompeolas	5.00	2.60	Roca hasta 10 Ton. y concreto hidráulico
San Pedrito	Rompeolas y Escollera	7.30	3.00	Roca de 8 a 12 Ton.
Manzanillo	Rompeolas	7.30	3.00	
Michoacán				
Lázaro Cárdenas	Escolleras	6.00	7.00	Roca hasta 12 Ton.



Tabla I.6. Niveles de coronamiento de estructuras en el Pacífico. [D.G.P, 2001] (continuación)

LITORAL PACÍFICO				
ESTADO/PUERTO	TIPO DE ESTRUCTURA	CORONAMIENTO Ancho/Alto (m)		MATERIAL
Guerrero				
Puerto Vicente G.	Escolleras	6.20	7.00	Roca hasta 12 Ton.
Oaxaca				
Salina Cruz	Rompeolas	10.00	4.00	Roca de 8 a 16 Ton.
Chiapas				
Puerto Madero	Escolleras	6.00	5.50	Roca

Tabla I.7. Niveles de coronamiento de estructuras en el Golfo. [D.G.P, 2001]

LITORAL DEL GOLFO Y CARIBE				
ESTADO/PUERTO	TIPO DE ESTRUCTURA	CORONAMIENTO Ancho/Alto (m)		MATERIAL
Tamaulipas				
Boca de Jesús Ma.	Escolleras	5.00	2.00	Roca hasta 10 Ton.
La Pesca	Escolleras	6.00	5.25	Roca hasta 10 Ton.
Altamira	Escolleras	8.00	3.00	Roca hasta 12 Ton.
Veracruz				
Tamiahua	Escolleras	4.60	4.00	Roca de 6 a 16 Ton.
Tuxpan	Escolleras	13.00	7.00	Roca de 6 a 16 Ton.
Veracruz	Rompeolas	7.30	3.80	Roca de 6 a 16 Ton.
Boca del Río	Escolleras	5.00	3.00	Roca de 6 a 16 Ton.
Coatzacoalcos	Escolleras	10.80	2.60	Roca de 6 a 16 Ton.



Tabla I.7. Niveles de coronamiento de estructuras en el Golfo. [D.G.P, 2001] (continuación)

LITORAL DEL GOLFO Y CARIBE				
ESTADO/PUERTO	TIPO DE ESTRUCTURA	CORONAMIENTO Ancho/Alto (m)		MATERIAL
Yucatán				
Celestun	Escolleras	3.50	5.00	Roca de 8 a 12 Ton.
Sisal	Escolleras	5.00	4.00	Roca de 8 a 12 Ton.
Chuburna	Escolleras	3.50	6.50	Roca de 8 a 12 Ton.
Progreso	Escolleras	3.00	5.00	Roca hasta 10.40 Ton
Chabihau	Rompeolas	4.00	4.00	Roca
Quintana Roo				
Puerto Morelos	Rompeolas	6.00	4.00	Roca
Puerto Aventuras	Escolleras	4.00	1.50	Roca

I.2.4. Rompeolas en tándem

Llaman el concepto de rompeolas en tándem a un par de estructuras funcionando juntas como una unidad. Dichas estructuras están construidas en paralelo una de la otra, el rompeolas que se encuentra frente al mar es un rompeolas sumergido. Para su cálculo y diseño se consideran tres variantes principales, la sumergencia y ancho de corona del rompeolas en tándem y la separación entre el pie de cada estructura (Figura I.19).

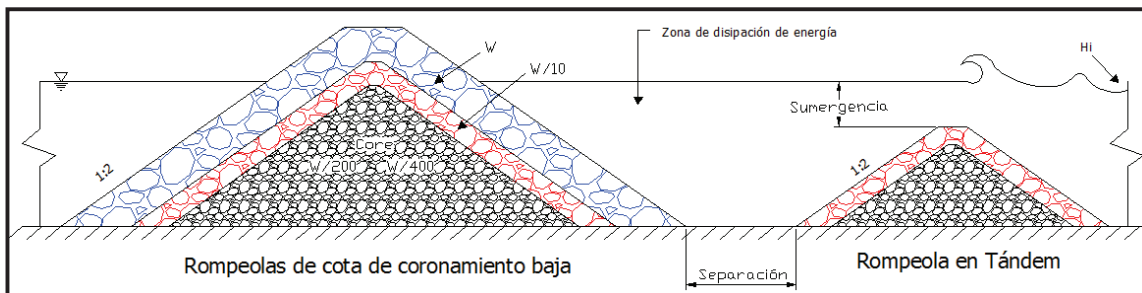


Figura I.19. Sistema de rompeolas en tándem

Con el propósito de fundamentar la presente tesis, a continuación se muestran las principales ideas que en la actualidad existen sobre el tema objeto de este estudio.



Los rompeolas superficiales son estructuras construidas para reflejar y disipar la energía del oleaje que generó el viento y así prevenir la transmisión de está sobre el área protegida. Tal que, la construcción de estos rompeolas hace posible el uso del área protegida como un anclaje salvo para barcos y facilitar la carga y descarga de buques dentro del puerto en aguas tranquilas. La mayor parte de los rompeolas solo sirven para proveer de protección contra las olas pero algunos de ellos sirven como doble propósito proveer de un atraque y también de prevenir la sedimentación.

Los rompeolas sumergidos son estructuras con características geométricas similares a las de un rompeolas superficial pero con su cresta por debajo del nivel de agua (SWL). Los rompeolas sumergidos son usados para la protección costera y la disipación de la energía del oleaje y la regulación del transporte de sedimentos. Ellos también pueden ser utilizados para rehabilitar rompeolas dañados. El rompeolas sumergido es una línea de enrocamiento homogénea sin una coraza. [I.C.E., 1992]

Shirlal y Rao en el 2010, realizaron un estudio de laboratorio sobre el modelo del rompeolas en tándem con escala 1:30, fue modelado en un canal con dimensiones de dimensiones 50m x 0.71 x 1.10m., el canal cuenta con un fondo móvil para regular el oleaje.

La prueba del modelo fue sujeta a alturas de oleaje significativo entre 10cm y 16cm, con los periodos significantes que varían de 1.5seg a 2.5seg, en profundidades de agua de 25 a 45 cm. Durante las pruebas, la altura de ola incidente y la rompiente fueron registrados. Al principio el oleaje causó el reajuste de las rocas a posiciones estables, y como el número de olas fue aumentando, fue observado el movimiento de las rocas y su desplazamiento, el daño máximo ocurrió en el área entre SWL + la altura de ola y en SWL. [Prasad y Otros, 2010]

Como se comentó anteriormente, existen diferentes formas de rehabilitación de rompeolas que presentan rebase, como es la construcción de una berma al rompeolas ya existente, la construcción de deflectores en su coronamiento, o incluso la sustitución de elementos ya desplazados, pero el proceso constructivo de una berma en un rompeolas representa considerablemente un aumento en su costo debido a la maquinaria especializada que se requiere para su construcción, los deflectores son por su sistema constructivo y dimensiones igualmente encarecen dicha rehabilitación, por lo tanto el rompeolas en tándem es una opción de rehabilitación para los rompeolas de nuestro país que presentan coronamientos bajos.



II. Efectos del oleaje sobre obras de protección.

II.1. Efectos causados por el oleaje

II.1.1. Ascenso (run-up) y descenso (run-down) de la ola

El ascenso y descenso máximo (Run-up y Run-down) de la ola, son dos factores importantes para el diseño de estructuras de protección. Estos efectos están referidos al nivel medio del mar. Tanto el ascenso máximo (Ru), como el descenso máximo (Rd), están en función de las características del oleaje, profundidad del agua, pendiente de la playa en frente de la estructura, talud de la estructura, pendiente de la misma y rugosidad. (Figura II.1.) [I.I.E.-C.F.E., 1983], [Herbich, 1990]

La destrucción en las estructuras y los daños sobrevienen en caso de fuertes ascensos y de débil descenso de las olas; el modo en que la obra sufre los daños, consiste en el derrumbamiento de la parte baja del rompeolas o el rebase de la cresta con la destrucción de la parte alta y trasera de la obra. Cuando una ola rompe sobre un rompeolas coronado sobre el nivel medio del agua en reposo, el agua se desplaza sobre él; el nivel máximo que alcanza el agua al ascender sobre el talud y no rebasar la cota de coronamiento del rompeolas, es conocido como ascenso máximo o Run-up (Ru); mientras que si la altura de la estructura es inferior a la alcanzada por el agua, parte de ésta desbordará sobre el rompeolas, produciéndose el fenómeno denominado overtopping o rebase. El punto de máximo descenso del agua sobre el talud del rompeolas es conocido como descenso máximo o Run-down (Rd). [I.I.E.-C.F.E., 1983]

Las velocidades de ascenso y descenso de las olas en las estructuras, ha inducido a introducir un término denominado resonancia de las olas ascendentes y descendentes. Este fenómeno se presenta cuando las olas rompen de una manera constante, a tal punto que las olas que previamente ya han roto son alcanzadas por otra rompiente en su descenso, lo que desarrolla un máximo esfuerzo perpendicular sobre el talud. [I.I.E.-C.F.E., 1983]

Tres condiciones deben ser consideradas al evaluar el ascenso máximo de la ola:

1. La ola es no rompiente sobre la obra.
2. La ola rompe sobre el talud de la obra.
3. La ola rompe antes de llegar a la obra.



El ascenso del oleaje (Run-up), es la distancia vertical entre el nivel medio del mar y el punto más alto alcanzado por la ola sobre el talud de una estructura de protección, marcando el nivel de diseño que se utiliza para determinar el nivel de coronamiento o el límite superior de protección, así como también indicar la posibilidad de rebase del oleaje (overtopping) (Figura II.1.) [U.S.A.C.E., 1984] [U.C., 2000] [D.A.U.S., 1995] [I.I.E.-C.F.E., 1983] [E.T.S.E.C.C.P., 2002]

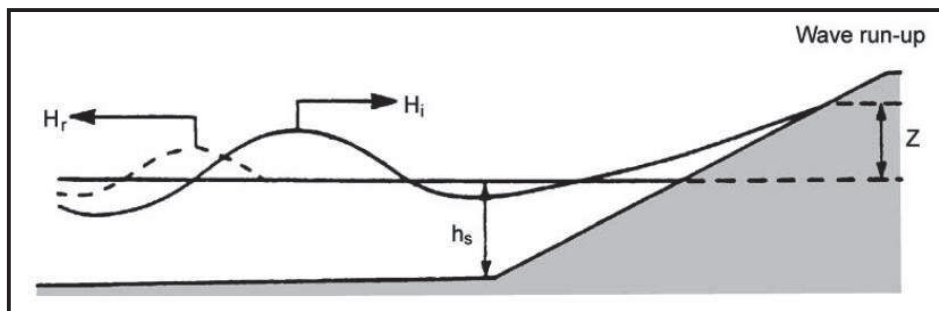


Figura II.1. Ascenso del oleaje sobre el talud [Herbich, 1990]

El conocer con bastante precisión la magnitud del ascenso máximo esperado permite considerar una altura de bordo libre suficiente para dar una adecuada protección, pero al mismo tiempo para que dicha altura de bordo libre sea lo más bajo posible. [I.I.E.-C.F.E., 1983]

A continuación se presentan los parámetros de lo cual depende el ascenso máximo.

$$Ru = f [H, L, T, C, E, d, \beta, S_b, \alpha, S, r, \rho, \mu].$$

En donde:

H = Altura de oleaje

L = Longitud de oleaje

T = Periodo de oleaje

C = Celeridad del oleaje

E = Energía del oleaje

d = Profundidad media

β = Ángulo de incidencia del oleaje

S_b = Talud de la playa

α = Talud de la estructura

S = Forma de la estructura

r = Rugosidad relativa del talud

ρ = Densidad de masa

μ = Viscosidad dinámica



Las variables citadas son de suma importancia para describir los sucesos físicos cuando una ola o un tren de olas se propagan desde aguas profundas hasta la costa y de las cuales depende el ascenso máximo. [Herbich, 1990].

El nivel de ascenso de oleaje puede ser menor que el nivel de coronamiento de diseño y reducido éste por el incremento de la rugosidad o permeabilidad de la estructura; así mismo, el oleaje que incide sobre la estructura con algunos ángulos también puede reducir el nivel del ascenso de la ola, esta reducción es expresada en términos de un factor de reducción (r) (ver Figura II.2).

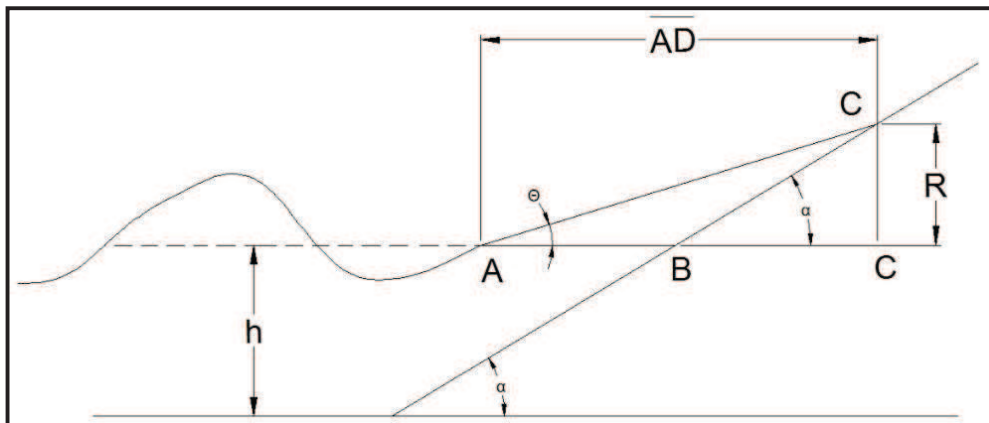


Figura II.2. Ascenso del oleaje sobre el talud
(imagen editada tomada de: [Herbich, 1990])

Battjes (1971), estudió el problema desde el punto de vista teórico para la rompiente del oleaje sobre el talud en rompeolas. El empleó el parámetro adimensional R_u/H , para la predicción del Run-up con oleaje monocromático; posteriormente, aplicando la "teoría de equivalencia" obtuvo resultados aceptables con oleaje irregular; este estudio de distribución del ascenso normalizado se describe con la expresión 2.1.

$$R_{un} = \sqrt{Hl} \quad (2.1)$$

Donde:

$$H = H/\hat{H}$$

$$l = L_0/\overline{L_0}$$

Asumiendo que las variables H y l son parámetros en común, aplicando la distribución de Rayleigh como una función de run-up se obtuvieron diferentes



niveles de correlación entre H y I. En términos generales, el ascenso del oleaje (run-up), está en función del parámetro de similitud de rompiente definido como:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_0}} \quad (2.2)$$

Donde:

ξ = Parámetro de similitud de rompiente

α = Ángulo de inclinación del talud

$$S_0 = \frac{2\pi H_{m0}}{g T_{m-1,0}^2}$$

H_{m0} = Altura de ola de momento de orden cero

$T_{m-1,0}^2$ = Periodo de la ola de momento de espectro negativo

m_0 = Momento del espectro de orden cero

m_1 = Momento del espectro negativo

g = Aceleración de la gravedad

La capacidad de predecir el ascenso máximo del oleaje (run-up), es función del talud de la estructura y de los avances en los diferentes diseños de las mismas. La importancia del ascenso del oleaje irregular en estructuras aparece desde 1984 en el Shore Protection Manual. Basado en publicaciones anteriores se sugiere para el ascenso del oleaje irregular la distribución de Rayleigh, la cual está dada por la ecuación 2.4.

$$\frac{R_p}{R_s} = \left(-\frac{\ln P}{2} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Donde:

P = Probabilidad de excedencia

R_p = Elevación del run up asociada con P

R_s = Ascenso del oleaje significativo



En otras palabras, el nivel del ascenso del oleaje de los ascensos se estima con $P=0.02$ y se denota como $R=0.02$. El Shore Protection Manual, recomienda que el valor del ascenso del oleaje (Run-up) puede ser determinado a través de nomogramas. Muchos investigadores en países como Holanda, como por ejemplo Wassing (1957) han usado una fórmula para determinar el ascenso del oleaje irregular dado por la ecuación 2.5

$$R_{u2\%} = 8H_{1/3} \tan \alpha \quad (2.5)$$

Donde:

$R_{u2\%}$ =Elevación vertical, donde la superficie libre del agua excede del 2% de los ascensos del oleaje.

$H_{1/3}$ =Altura de ola significativa

α =Ángulo de inclinación del talud de la estructura.

Ahora bien, el descenso del oleaje o también conocido como run-down (Rd), se define como la distancia vertical entre el nivel medio del mar en reposo y el punto más bajo que alcanza la superficie libre del agua sobre el talud de la estructura de protección; este nivel es empleado para determinar el alcance más bajo de la capa de coraza y la elevación de las capas secundaria y del núcleo; además de lo anterior permite obtener la distancia máxima que alcanza la ola por debajo del nivel medio del mar, ya que es ahí donde se generan las mayores velocidades, motivo por el cual se tiene que colocar una protección al pie de la estructura; por lo tanto conocer el descenso máximo puede disminuir en gran medida los costos de la obra, sin llegar a comprometer la seguridad. (Figura II.3) [I.I.E.-C.F.E., 1983] [U.C., 2000].

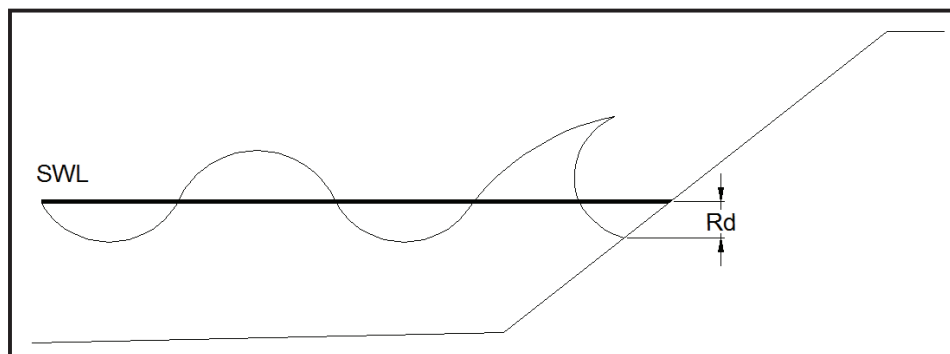


Figura II.3. Descenso del oleaje. [Syarahan, 2003] [E.T.S.E.C.C.P., 2002]
[C.E.T.M.E.F. y Otros, 2006]



Los niveles del descenso del oleaje en taludes porosos de enrocamiento tienen también influencia en la permeabilidad de la estructura y del parámetro de similitud de rompiente. Algunos análisis del 2% del nivel del descenso en las secciones probadas por Van der Meer en 1988, a través de una serie de estudios, concluye con una ecuación que incluye los efectos de la permeabilidad de la estructura y la relación de esbeltez de la ola. (Ver ecuación 2.6). [Van Der Meer, 1988]

Cabe señalar que a menudo se utiliza el 2% de excedencia ($R_{d2\%}$), como variable de diseño especialmente en estructuras tipo revestimiento. [Vand Der Meer, 1998] [I.I.E.-C.F.E., 1983] [E.T.S.E.C.C.P., 2002]

$$\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 2.1\sqrt{\tan \alpha} - 1.2P^{.15} + 1.5e^{-60S_{om}} \quad (2.6)$$

En donde:

$R_{d2\%}$ = Descenso del oleaje que excede el 2% de los descensos

H_s = Altura de ola significativa

α = Ángulo de inclinación del talud del rompeolas

P = Porosidad de la estructura

En el caso de la estabilidad de los rompeolas, el descenso del oleaje, juega un papel muy importante, ya que este fenómeno en combinación con la rompiente del oleaje, puede causar inestabilidad en los elementos de coraza de la obra de protección, ya que cuando se presenta sobre el talud una rompiente de tipo ondulante, en el descenso se generan corrientes con grandes velocidades que en ocasiones suelen provocar movimientos en las piezas superficiales de la capa de coraza e inmediatamente después se presenta la rompiente de otra ola, lo que genera el desplazamiento de los elementos que quedaron de alguna forma fuera de su posición original. El ascenso y descenso del oleaje definen pues la cota a la que la estructura queda directamente expuesta a la acción del oleaje, es decir su proyección sobre el plano de la estructura, que es la zona de rompiente del oleaje. [INMAR, 2002]

Con respecto a la fórmula 2.1, Battjes (1974), describe lo investigado sobre el ascenso y descenso de la ola (Run-up, Run-down), en los siguientes puntos:



1. En taludes lisos y con valores de $0.5 < \xi < 2.0$ el ascenso de la ola se puede calcular con la fórmula (2.7) de Hunt.

$$\xi = \frac{R_u}{h} \quad 2.7$$

2. En taludes lisos el ascenso máximo ocurre para olas rompiendo sobre el talud en el rango de rompiente (Collapsing-Plunging). Esto corresponde a un valor aproximado de $2 < \xi < 3$.
3. En rompeolas de enrocamiento, el ascenso de la ola aumenta continuamente con $\xi = \text{aprox. } 4$, con valores mayores se presenta el rebase del oleaje sobre la estructura u overtopping.
4. El ascenso en taludes permeables e impermeables aumenta con el incremento del valor de ξ hasta aproximadamente valores iguales a 4.
5. El descenso en taludes lisos, no puede estar por debajo del nivel de aguas tranquilas, para $\xi < 2.20$.
6. Las presiones de máximo impacto ocurren para ξ menor que 2 y mayor de 3 donde la ola rompiente golpea a la obra sin un colchón de agua (coraza descubierta).
7. Se produce un aumento de la presión hidrostática en el interior del enrocamiento debido al ascenso de la ola. Dicho aumento es mayor entre menor sea la permeabilidad y con valores de ξ crecientes menores que 4.
8. La estabilidad de los rompeolas de enrocamiento, dependen del periodo de la ola, así como también de la altura de la misma. Las fuerzas que tratan de dislocar la coraza son máximas cuando ocurre un descenso profundo simultáneamente y repetidamente, con una rompiente de ola tipo collapsing o plunging, para $2 < \xi < 3$, por lo cual la estabilidad, inicial de enrocamiento es más crítica.
9. Un análisis de valores de ξ por acciones de la ola sobre un talud impermeable como también de enrocamiento incluye presiones como: tipo de rompientes, punto de la rompiente, índice de la rompiente, reflexión,



ascenso de la ola, presiones de impacto y máximo Set-up, sobre el talud, todo esto en función de ξ .

10. Una consecuencia diferente de dichos resultados, es que las populares fórmulas de diseño incluyendo la ola de diseño y el factor K_d , se consideran hasta cierto punto inadecuadas, sobre todo tratándose de grandes e importantes estructuras. Por lo tanto se recomienda en términos generales emplear el parámetro ξ , para futuros diseños. [Battjes, 1974] [Ruíz, 2011] [U.S.A.C.E., 1984].

II.1.2. Transmisión del oleaje

En el diseño de obras de protección, se trata de que la transmisión del oleaje sea mínima o bien controlada, para optimizar el costo de la misma contra su funcionamiento. La ola se transforma en energía ante su incidencia con una estructura marina, los principales efectos debidos a esta interacción de energía son los siguientes:

- Transmisión y disipación de la energía de la ola.
- Generación de otros tipos de movimientos, como son las corrientes y reflexión de la ola.
- Transmisión por rebase debido a la descarga de agua.

Este efecto está relacionado con la geometría de las obras de protección, como rompeolas, escolleras, espigones, en cualquiera de sus dos tipos, superficiales o sumergidos. [U.S.A.C.E., 1984] [Bruun, 1989]

Cuando una ola rompe sobre una obra de protección o sobre la playa, se amortigua gran parte de la energía recibida de los vientos durante su recorrido por el océano; dicha energía puede proceder de la fuerza del oleaje, de las diferencias de nivel creadas por la marea o de las corrientes. [Cifuentes y Otros, 2000]

Un parámetro importante y necesario para controlar la transmisión del oleaje sobre la obra de protección es la elevación de coronamiento de la estructura por encima del nivel de agua (freeboard, h_c) que se obtiene mediante el cálculo del ascenso máximo (run-up). [S.C.T., 2002]



II.1.3. Rebase (overtopping)

El rebase del oleaje (overtopping), es el fenómeno que se genera cuando el ascenso de la ola sobre la cara del rompeolas rebasa la arista del coronamiento, sobrepasando por lo tanto la cota de diseño del rompeolas (Figura II.4), por lo que el agua excedente suele sobrepasar más de la mitad de la ola, hasta llegar al extremo en que la ola en su totalidad sobrepase por completo al rompeolas, rompiendo si es el caso, sobre el coronamiento (cuando el ancho es lo suficientemente amplio) o si no, cae toda el agua tras el rompeolas sobre la cara posterior de éste, generando daños directos, erosionando el talud interior del rompeolas y, lo que es de igual forma grave, provocando agitación en la zona de resguardo, lo que genera en primera instancia choque entre embarcaciones y consecuentemente que el agua agitada tienda a subir por los taludes del puerto y los muelles, causando así, daños a las instalaciones, equipo y mercancías que se encuentren sobre dichos muelles, sin mencionar al personal de operación que se encuentre en ese momento. (Figura II.5 y II.6 y II.7) [VOWS, 2000]

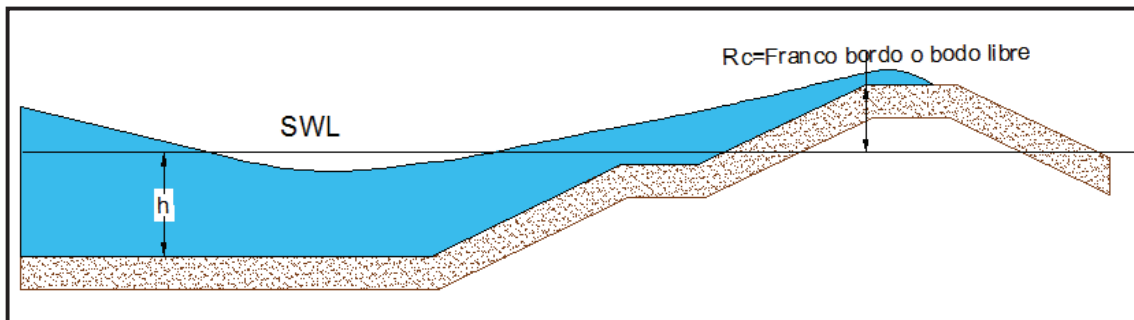


Figura II.4.Rebase del oleaje. (Imagen editada : [Eurotop, 2007])



Figura II.5. Daños generados por el rebase del oleaje extremo al rompeolas



Figura II.6. Agitación en aguas protegidas y daños en instalaciones por el rebase del oleaje extremo.

Para Franco y otros (1994) y Heebsgaard y otros (1998), el overtopping es uno de los parámetros más importantes de un rompeolas, ya que el no tomarse en cuenta afectaría considerablemente la eficiencia funcional de la estructura, de lo contrario, se puede mejorar o maximizar su seguridad estructural. La descarga de overtopping es de hecho el parámetro principal para el diseño de la forma y altura de la cresta del rompeolas. [Heebsgaard y Otros, 1998]

Juhl (1994), se establece que el overtopping en las estructuras costeras es influenciado por un largo número de parámetros relacionados. [Heebsgaard y Otros, 1998]

Algunos de estos parámetros principales son:

- Parámetros geométricos: configuración y ancho de la cresta, profundidad del agua, franco bordo y talud de la capa de coraza.
- Parámetros del material de construcción: porosidad, forma y diámetro de la roca.
- Parámetros hidrográficos: altura de ola, periodo de la ola, ángulo de incidencia de la ola, esbeltez de la ola, rompiente, secuencia de la ola, condiciones del viento y nivel del agua.

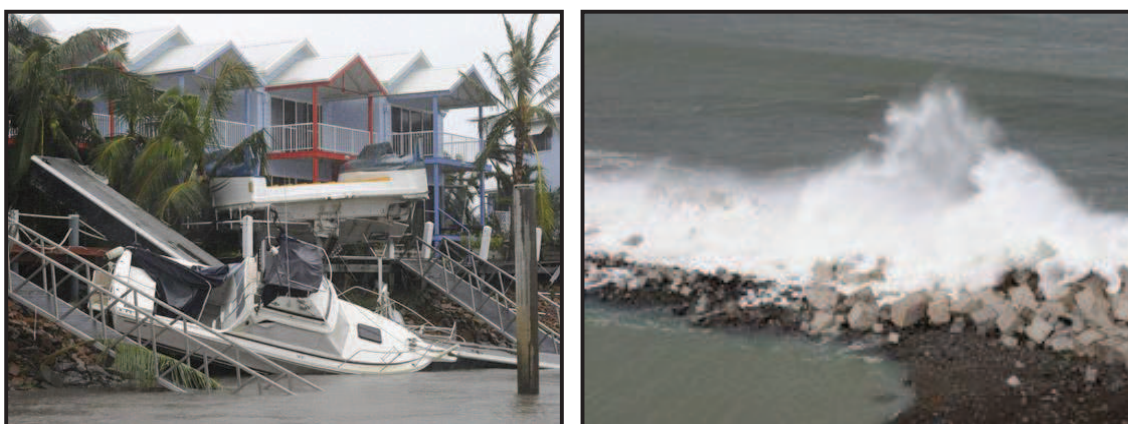


Figura II.7. Daños en marina y en rompeolas por el rebase del oleaje extremo.

Según Burcharth (2001), el rebase del oleaje ocurre cuando el nivel mayor del run-up excede el francobordo de la cresta de la estructura R_c . La cantidad aceptable de overtopping depende de la función particular de la estructura. Ciertas funciones ponen restricciones aceptables en las descargas de overtopping. Por ejemplo las vías de acceso y caminos, instalaciones sobre la cresta del rompeolas, áreas que puedan afectar embarcaciones, así como aéreas de almacenaje de mercancías, y construcciones localizadas detrás del rompeolas, son consideraciones de diseño. El criterio de diseño para overtopping debe incluir dos niveles: overtopping durante condiciones de servicio normal y overtopping durante condiciones de diseño extremas, donde podría ocurrir algún daño permanente a instalaciones y a la misma estructura. [Andersen y Brucharth, 2001]

Schüttrumpf (2002), se menciona que el rebase del oleaje es el responsable de que muchos rompeolas fallaran en tiempos pasados. Esto no es factible para poder evitar completamente el rebase del oleaje en el futuro debido a la incertidumbre en la predicción de los diseños del nivel del agua y los altos costos económicos de los rompeolas. Por lo tanto el overtopping se debe tomar en cuenta para el diseño de los rompeolas construidos en el mar. [Möller y Otros, 2002]

Van Gent (2002), se dice que, la transmisión por rebase del oleaje (overtopping) por encima de los rompeolas puede causar diferentes situaciones peligrosas. Esta transmisión puede ser caracterizada por las descargas medias del mismo, pero sin que pueda proporcionar información de eventos individuales. [Van Get, 2002]



Según el Grupo de Ingeniería Oceanográfico y de Costas (G.I.O.C.), el rebase, se define como el transporte de una cantidad importante de agua sobre la corona de una estructura. Este transporte se puede producir en forma de rebase de masa de agua, debido a una cota de corona inferior al ascenso del oleaje, a la caída de masa de agua derivada del flujo vertical de impacto contra el rompeolas o las salpicaduras de agua-espuma arrastradas por el viento hacia la zona protegida. [U.C., 2000]

Como se mencionó anteriormente, el agua que rebasa un rompeolas puede provocar problemas de distinto tipo, como son:

- Daño físico a personas que visiten, trabajen o se encuentren en la zona abrigada.
- Daño por sobrecarga, inundación o arrastre a edificios, vehículos, barcos, equipos e instalaciones situados en la zona abrigada.
- Daño económico por la afección a la operatividad de las instalaciones abrigadas.
- Provocar transmisiones de oleaje indeseadas.
- Averías en las superestructuras o estructuras de la coronación y zona interior del rompeolas.

En zonas de aguas profundas y mares abiertos, la construcción de un rompeolas cuya probabilidad de rebase sea nula llevaría a diseños no compatibles con consideraciones de otro tipo como son las estéticas o económicas. Por otro lado, en algunos casos, especialmente en los rompeolas exentos de protección de costas, el rebase es una variable deseable, ya que ayuda a la renovación del agua, mientras que por otro lado la baja cota de corona minimiza el efecto de obstrucción visual del horizonte en la perspectiva desde la costa.

En general, el rebase en las estructuras de protección de costas será indeseable en aquellos casos en que el acceso de personas y vehículos sobre la estructura no esté restringido, como es el caso de los muros de protección con paseo marítimo o cuando el volumen de agua rebasada pueda crear problemas a



equipos, instalaciones tanto por impacto de la masa de agua, como por inundación, como puede ser el caso de los rompeolas de contención.

El caudal de rebase tolerable por una determinada estructura dependerá, por consiguiente de los siguientes factores:

- a) Estabilidad de la corona y de la cara del rompeolas lado mar de la estructura.
- b) Capacidad de los sistemas de drenaje de la cara del lado mar. Posibilidad de daño a edificios, equipos e instalaciones situados al abrigo de la estructura.
- c) Posibilidad de daño a personas.
- d) Nivel de operatividad deseable en las instalaciones abrigadas por el rompeolas.
- e) Transmisión de oleaje deseado.

Algunos de estos factores, como es la capacidad de drenaje, relacionada con la posibilidad de inundación, dependen del caudal medio de rebase durante periodos de tiempo elevados, que dependen del área inundada, mientras que otros factores como puede ser la posibilidad de arrastre a vehículos o personas, dependen de los caudales instantáneos generados por las olas individuales. En la Tabla II.1., Franco L. en "Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters", se dan algunos rangos de valores del rebase medio tolerable para diferentes escenarios de riesgo y elementos afectados. [Franco y Otros, 1994]

El caudal medio de rebase (q), se determina midiendo el volumen de agua que sobrepasa la estructura por unidad de longitud de la misma y por unidad de tiempo. Si en el intervalo de tiempo t_0 , alcanzan la estructura un cierto número de olas y cada ola produce un volumen de rebase Q (H_1, T_1).



Tabla II.1. Caudales de rebase tolerables. [Franco y Otros, 1994]

1000	SEGURIDAD FUNCIONAL			SEGURIDAD ESTRUCTURAL		200
	100	Inseguro a cualquier velocidad	Muy peligroso	Daños estructurales	Daño aún con protección	
					Daño si el paseo no está pavimentado	20
10	Dique de hierva: Peligroso	Dique en talud: Peligroso	Daños estructurales	Daño si el talud interior no está protegido	Sin peligro	
						1
0.1	Dique vertical: Inseguro aparcado	Dique vertical: peligroso	Sin peligro	0.3		
					0.01	Inconfortable pero no peligroso
0.001	Inseguro a velocidad alta	Húmedo pero no inconfortable	Sin peligro	0.004		
					0.0001	Seguro a cualquier velocidad
Vehículos	Peatones	Edificios	Muros de contención	Diques con revestimientos		



III. Aspectos de la modelación

La utilización de los modelos se debe a que existen problemas que no son accesibles para resolverse totalmente o satisfactoriamente por la vía analítica; por lo tanto, se recurre a la investigación experimental. De tal forma el proyecto definitivo de una obra, realizado con el auxilio de un modelo en el que se haya logrado un máximo de rendimiento en su funcionamiento, tendrá por una parte el máximo de probabilidades de que funciones eficientemente al aplicarlo en la realidad, y por otra parte carecerá de erogaciones innecesarias referentes a costos de construcción, de operación o de ambos.

A continuación se explica brevemente los diferentes tipos de modelos que existen:

- **Modelos matemáticos.** Es el conjunto de leyes y relaciones de las variables que describen un fenómeno, que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante apropiadas técnicas matemáticas. [Vergara, 1993]
- **Modelos analógicos.** Se le denomina así si a dos fenómenos físicos de diferente naturaleza y las ecuaciones que los describen se presentan en forma análoga. [Vergara, 1993]
- **Modelos físicos reducidos.** Estos modelos deberán ser semejantes al prototipo, y por lo tanto deberá satisfacer las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m . [Vergara, 1993]

III. 1. Generalidades de los modelos

III. 1. 1. Modelos físicos reducidos

Dentro de los modelos físicos reducidos o también denominados modelos hidráulicos de un río, canal, puerto, laguna, etc.; puede construirse con fronteras fijas o móviles, más comúnmente llamados modelos de fondo fijo o modelos de fondo móvil.

**Modelos de fondo fijo.** [Vergara, 1993]

Se emplean para reproducir fenómenos en donde la variación de los niveles y la velocidad de los flujos son parámetros determinantes. Un ejemplo de estos son los proyectos de control de avenidas, de navegación y de irrigación.

Modelos de fondo móvil. [Vergara, 1993]

Este tipo de modelos se emplean para la solución de problemas relacionados con la estabilización de cauces de ríos o canales y playas. En este tipo de modelos es importante el reproducir las variables del flujo combinadas con las del sedimento y la mecánica del transporte.

También existen los modelos denominados modelos con distorsión y sin distorsión, de los cuales se explica lo siguiente:

- *Modelos sin distorsión y con distorsión.* [Vergara, 1993]

Cuando en un modelo hidráulico las escalas de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas son iguales se dice que el modelo es sin distorsión, es decir, el modelo es similarmente geométrico.

A diferencia del modelo sin distorsión, en el modelo con distorsión geométrica se da cuando existen por lo menos dos escalas de líneas diferentes, la cual siempre será mayor que la unidad.

Algunas de las causas de distorsión en los modelos son diferentes, algunas se mencionan a continuación:

1. **Rugosidad.** Es imposible conseguirla cuando la rugosidad necesaria es muy pequeña físicamente.
2. **Flujo.** Cuando el tipo de flujo en el modelo no corresponde al prototipo.
3. **Por razones de espacio.** Cuando el modelo resulte muy grande en relación con el área disponible, lo que conlleva a aumentar la escala de líneas.
4. **Equipo de medición.** Esto es cuando se dispone o cuenta con equipo cuyas proporciones no permitan obtener la información correcta.

**III.1.2. Selección de escalas** [Vergara, 1993]

En la selección de escalas, tanto horizontales y verticales se hace de forma independiente en busca de que el modelo resulte lo más grande posible, siempre y cuando sea factible económicamente y del mismo modo se cuenta con el área suficiente, de igual forma se considera el tiempo, la instrumentación, las rugosidades a reproducir así como la alimentación del agua.

El efecto de escala se define como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y el prototipo causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas en el prototipo. [Vergara, 1993]

En la Tabla III.8. se presentan los rangos de escalas lineales recomendados para diferentes problemas, así como las distorsiones máximas admisibles, tanto para modelos de fondo fijo como para modelos de fondo móvil.

Tabla III.1. Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos [Vergara, 1993].

MODELOS DE:	ESCALAS DE LÍNEAS	OBSERVACIONES
1. Obras hidráulicas: 1.1. Vertedores, tanques, amortiguadores, rápidos y túneles. 1.2. Cárcamos de bombeo y compuertas. 1.3. Conductos cerrados con flujo a superficie libre. 1.4. Flujo alrededor de estructuras.	De 1:5 a 1:25 De 1:5 a 1:30 De 1:10 a 1:25 De 1:20 a 1:70	Modelos sin distorsión y de fondo fijo.
2. Penetración del Oleaje (Agitación) 2.1. Con olas de corto periodo (Oleaje). 2.2. Con olas de periodo intermedio y largo.	De 1:60 a 1:200 1:100 (Escala recomendada de 1:50 a 1:100)	Modelos sin distorsión de fondo fijo. Escala recomendada 1:100 Para modelos sin distorsión de fondo fijo. Para modelos con distorsión y valor usual de ésta de 3 a 5 de fondo fijo.
3. Estabilidad de estructuras bajo la acción de olas 3.1. A dos dimensiones 3.2. A tres dimensiones	De 1:20 a 1:60 De 1:40 a 1:80	Modelo sin distorsión de fondo fijo. Escala recomendable de 1:30. En grandes canales se han empleado escalas de hasta 1:1. Es recomendable usar oleaje irregular.
4. Maniobras de embarcaciones 4.1. Atracadas y libres (maniobrabilidad).	De 1:100 a 1:150	Modelo sin distorsión de fondo fijo. Es recomendable usar oleaje irregular.



Tabla III.1. Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos (continuación) [Vergara, 1993].

MODELOS DE:	ESCALAS DE LÍNEAS	OBSERVACIONES
5. Transporte litoral	De 1:60 a 1:50	Modelo de fondo fijo con trazador Modelo de fondo móvil. Recomendable la distorsión de hasta 5.
	De 1:100 a 1:80	Modelos de fondo móvil sin distorsión.
6. Flujo en ríos y canales	Ex de 1:250 a 1:150	Modelos con distorsión de fondo fijo. Distorsión máxima de 10.
7. Erosión local por corrientes	De 1:20 a 1:60	Modelos de fondo móvil sin distorsión.
8. Transporte de sedimentos en ríos	Ex de 1:100 a 1:500 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos de fondo móvil con distorsión, recomendable hasta 5.
9. Estuarios	Ex de 1:200 a 1:2000 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos distorsionados con fondo fijo. Distorsión máxima admisible de 10 y de 5 para modelos de fondo móvil.

Otro efecto que se presenta es debido a los límites del modelo, estos se deben ubicar de tal forma que su efecto sea mínimo. Un ejemplo, es en el caso de los modelos marítimos, como en el caso de la reflexión y de fricción que pueden ser considerables los resultados finales.

III.2. Condiciones de similitud [Vergara, 1993]

Para que un modelo pueda reproducir los efectos, resultados y conclusiones similares al prototipo, es necesario cumplir con condiciones de similitud, que se deben cumplir para satisfacerlo. A continuación se mencionan estas tres similitudes:

Similitud geométrica.

Se refiere a la similitud de la forma, se definen puntos homólogos sobre los cuales se definen magnitudes, lados, superficies y volúmenes homólogos. Implica una relación constante para cualquier longitud. Para que se cumpla la similitud se debe igualar lo siguiente:

$$\frac{X_p}{X_m} = \frac{Y_p}{Y_m} = Constante \quad (\text{III.1.})$$

**Similitud cinemática.**

Se establece este tipo de similitud cuando la comparación del prototipo y del modelo es con respecto al movimiento. Se cumple cuando son homólogos en cualquier tiempo. Por tal motivo las velocidades entre dos puntos homólogos deberán ser constantes. Se debe cumplir con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática. En dicha similitud se debe cumplir lo siguiente:

$$\frac{V_{1p}}{V_{1m}} = \frac{V_{2p}}{V_{2m}} = \frac{V_{3p}}{V_{3m}} = \text{Constante} \quad (\text{III.2.})$$

Similitud dinámica.

Es necesario tomar en cuenta la acción de las fuerzas sobre las partículas de un fluido, como son la fricción, tensión superficial, gravedad o peso, etc. Lo que significa que las fuerzas homólogas también deberán ser constantes, se establece una escala dinámica de fuerzas. Cuando las fuerzas existentes cumplan con una condición equivalente, se tiene:

$$\frac{F_{1p}}{F_{1m}} = \frac{F_{2p}}{F_{2m}} = \frac{F_{3p}}{F_{3m}} = \frac{F_p}{F_m} = \frac{P_p}{P_m} = \text{Constante} \quad (\text{III.3.})$$

III.3. Análisis Dimensional [Vergara, 1993]

En el análisis dimensional en un fenómeno físico se pueden identificar el conjunto de magnitudes o variables que en él intervienen, y con el análisis dimensional de dichas magnitudes es factible encontrar las relaciones entre las variables mediante una ecuación que debe ser dimensionalmente homogénea.

Existen dos grupos con los cuales se clasifican las magnitudes físicas (Tabla III.2.)

Tabla III.2. Magnitudes físicas

MAGNITUDES FÍSICAS	
Básicas	Fundamentales
Longitud (L), masa (m), tiempo (T)	Área (A), volumen (V), velocidad (v), Gasto (Q), fuerza (F)



Cuando el número de variables físicas son cuatro o más del teorema π de Buckingham, constituye una excelente herramienta, mediante la cual pueden agruparse estas magnitudes en un número menor de grupos adimensionales significativos, a partir de los cuales pueden establecerse una ecuación. Los grupos adimensionales se llaman grupos π .

La aplicación del teorema π de Buckingham es la siguiente:

El parámetro π_1 relaciona la altura de la ola transcurrida con la altura de la ola incidente, siendo este, el coeficiente de transmisión.

$$\pi_1 = \frac{H_T}{H_I}$$

El parámetro π_2 relaciona la longitud de la ola en aguas profundas y la altura de la ola incidente, teniendo así el inverso de la relación de esbeltez.

$$\pi_2 = \frac{L_O}{H_I}$$

El parámetro π_3 relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad.

$$\pi_3 = \frac{T^2 g}{H_I}$$

El parámetro π_4 relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas.

$$\pi_4 = \frac{T\nu}{H_I^2}$$

El parámetro π_5 está en función de la pendiente del talud de la estructura.

$$\pi_5 = \alpha$$

Obteniéndose los parámetros anteriores, se plantea la ecuación donde se muestra que el coeficiente de transmisión está en función de la relación de esbeltez de la ola, del parámetro de número de Froude, del parámetro del número de Reynolds y de la pendiente del talud de la estructura. También que se muestre que la escala de líneas vertical es igual a la horizontal. Además donde la escala de



altura de la ola incidente y la escala de longitud en aguas profundas respectivamente sean iguales a la escala de líneas. Teniéndose entonces la siguiente igualdad:

$$EH_I = E_V^{2/3} \quad (\text{III.4.})$$

Se puede decir que si E_V es diferente de 1, el flujo en el modelo deberá ser diferente en el prototipo, para que se pueda satisfacer la condición de similitud de Froude y de Reynolds de manera simultánea; y si se considera que el oleaje en la naturaleza se propaga por la fuerza de gravedad, que los efectos ocasionados por la viscosidad son mínimos y que el fluido es el mismo en el modelo que en el prototipo, la condición de similitud de Froude es la que se debe cumplir, ya que en este caso, el número de Reynolds no es considerado como una condición de similitud; sólo será empleado para verificar la certeza de que se está trabajando con un flujo de tipo turbulento.

III.4. Modelos de oleaje con fondo fijo [Vergara, 1993]

Los modelos físicos son de gran ayuda para determinar la mejor orientación y dimensiones de la entrada de un puerto y de las obras de protección. Es importante tomar en cuenta la refracción, reflexión y difracción, para que en caso de que sea necesario hacer las modificaciones pertinentes de geometría para reducir sus efectos en la zona del puerto.

El movimiento que presentan las embarcaciones dentro de la zona de abrigo, es debido a la agitación que se generan dentro de ésta. Esto implica seleccionar las olas contra las que se protegerá el puerto.

1. Olas de acuerdo a su periodo:
 - Olas de corto periodo, con valores que van de un segundo a dos minutos y alturas de hasta 12 metros.
 - Olas de largo periodo, de dos minutos a una hora.
2. En relación con su profundidad:
 - Olas en aguas poco profundas, cuando la relación d/L (d es profundidad y L es la longitud de la ola) es menor que 0.05.
 - Olas en aguas intermedias, cuando $0.05 < d/L < 0.5$.
 - Olas en aguas profundas, cuando $d/L > 0.5$.



IV. Modelo físico reducido.

En la hidráulica existen fenómenos que son demasiado complicados y no es posible comprenderlos solamente por medios matemáticos, por lo que es necesario utilizar técnicas de experimentación, las cuales nos ayudan a obtener resultados a los problemas de ingeniería de costas como es la transmisión del oleaje, acción de mareas, corrientes, etc. Las soluciones derivadas de modelos matemáticos no son suficientes, ya que sus resultados para poder ser confiables deben de ser validados por medio de modelos físicos a escala reducida. [Vergara, 1993]

IV.1. Condiciones de similitud.

Las fronteras del modelo en cada una de sus partes, así como el patrón de flujo conformado por líneas de corrientes, debe satisfacer la similitud geométrica con el prototipo, por lo tanto se consideran los siguientes aspectos que fueron explicados anteriormente:

1. Refracción.
2. Difracción.
3. Reflexión.

Tomando en cuenta que la agitación es el resultado de los tres fenómenos antes descritos, el modelo deberá cumplir la condición de similitud de deformación del oleaje debido a cada fenómeno. Considerando que la propagación del oleaje se debe básicamente a la acción de la fuerza de gravedad, y siendo prácticamente nula la influencia de la fuerza, viscosa y de tensión superficial, la condición de similitud que debe cumplirse es la de Froude, lo que indica que el régimen de flujo es turbulento, y suponiendo que la aceleración debida a la gravedad es la misma en el modelo y el prototipo ($E_g = 1$), se tiene que:

$$E_v = E_L^{1/2} = E_X^{1/2} \quad (\text{IV.1})$$

Como la celeridad, en rigor es una velocidad, se tiene que:

$$E_v = E_C = \frac{E_L}{E_T} = \frac{E_X}{E_T} = E_X^{1/2} \quad (\text{IV.2})$$

Donde:



E_v = Escala vertical

E_L = Escala de líneas

E_x = Escala en el eje x

E_T = Escala de periodo.

IV.2. Selección de escalas

Respetando las consideraciones anteriores, las limitaciones geométricas del canal de oleaje angosto y tomando en cuenta los requerimientos del generador de oleaje irregular, se propuso un modelo bidimensional, de fondo fijo y sin distorsión. El modelo estará regido por las fuerzas de inercia y gravitacionales, por lo tanto las escalas del mismo estarán regidas por la ley de similitud de Froude. Con base a lo anterior se propuso una escala de líneas de 1:40, lo cual está dentro de las recomendaciones citadas en la Tabla III.1. Otras escalas de interés a utilizar en el modelo son las que se presentan en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1. Escalas empleadas en el modelo

TIPO DE ESCALA	NOTACIÓN	ESCALA
Escala de líneas horizontal	E_{LH}	$E_{LH} = 1:40$
Escala de líneas vertical	E_{LV}	$E_{LV} = 1:40$
Escala de longitud de ola	E_L	$E_L = 1:40$
Escala de altura de ola	E_H	$E_H = 1:40$
Escala de periodos	E_T	$E_T = 1:6.32$
Escala de pesos	E_W	$E_W = 1:64000$

IV.3. Instalaciones.

La instalación en donde realizó este estudio se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura de la Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Es un canal de oleaje angosto con fondo fijo y está conformado por paredes de concreto y en ciertas secciones con paredes de acrílico de 15mm de espesor, tiene 24.50m de longitud, 0.66m de ancho y una profundidad de 0.90m. (Figura IV.1)

Para habilitar la instalación a las condiciones del estudio, se tuvo que fabricar un firme de mortero-cemento-arena, de 2cm de espesor, para reproducir el perfil playero donde se colocarían las estructuras. Dicho perfil playero está conformado por dos tramos, uno con una pendiente 1:50 en una longitud de 6m, donde se desplantarían las estructuras, y otro con una pendiente 1:100 en una longitud de 9m para ligar el fondo del canal con el perfil playero.

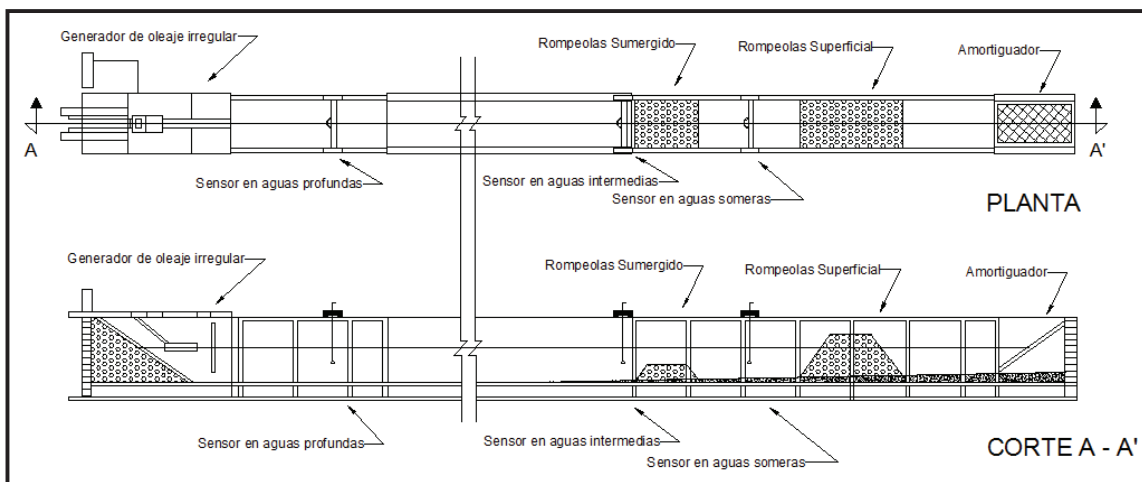


Figura IV.1. Canal de oleaje angosto. (Imagen editada : [Ruíz, 2009])

Dentro de los trabajos previos a la construcción de las estructuras se realizó una rehabilitación del amortiguador de oleaje, se lavó el tezontle colocado bajo dicho amortiguador, y se limpiaron las paredes de acrílico para una mejor observación. (Figuras IV.2 y IV.3)



Figura IV.2. Limpieza de fibra



Figura IV.3. Limpieza de acrílicos, acomode de tezontle y colocación de amortiguador rehabilitado.

IV.4. Equipo

El canal está equipado con un generador capaz de reproducir señales de oleaje regular e irregular mediante una paleta de tipo pistón de movimiento traslacional, accionada mediante un gato hidráulico, el cual es controlado por computadora mediante procedimientos mecánico-electrónicos. (Figura IV.4)



Figura IV.4. Paleta generadora de oleaje (izq.) y canal angosto en su zona de observación (der.)

El generador de oleaje es controlado y operado con un equipo de cómputo, el cual cuenta con un software llamado WAVEGEN, además que permite simular las condiciones del mar dependiendo de las necesidades del estudio. El programa puede generar oleaje por medio de varios métodos [Beresford-A, 1994]:

1. Método de ruido blanco filtrado digitalmente (Filtred White Noise Generator).



2. Método de Fourier. Con la suma de varias olas sinusoidales, también se le conoce como método de la transformada rápida de Fourier (Fourier Method Wave Generator).
3. Oleaje de tipo regular (Regular Wave Generator).
4. Ola solitaria (Solitary Wave).

Dentro del menú existen varios espectros de oleaje que se pueden utilizar, como son los siguientes:

1. Espectro de ola Jonswap

- Definición por velocidad del viento, U_{10} (m/s), y distancia del fech, F (m). Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp - \left(1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right) * \gamma \exp - \left(\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \quad (\text{IV.3})$$

Donde:

$$a = 0.076 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0.22}$$

γ = parámetro de forma, valor por omisión de 3.3

$$f_p = 3.5 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0.33} \frac{g}{U}$$

$$\sigma = 0.07 \text{ para } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 \text{ para } f > f_p$$

- Definición por frecuencia pico, f_p (Hz), altura de ola significativa, H_s , y parámetro de forma, γ . Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = \frac{aH_s^2 f_p}{(2\pi)^4 f^5} \exp - \left(1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right) * \gamma \exp - \left(\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \quad (\text{IV.4})$$

Donde:

$$\sigma = 0.07 \text{ para } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 \text{ para } f > f_p \text{ y } f_p = T_p^{-1}$$



2. Espectro de ola de Pierson – Moskowitz.

- Definición por frecuencia pico, f_p (Hz). Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = \frac{0.0004988}{f^5} \exp - \left(1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right) \quad (\text{IV.5})$$

Donde: $f_p = T_p^{-1}$

3. Espectro del Congreso Internacional de Estructuras de Barco (ISSC).

- Definición por frecuencia pico, f_p (Hz) y altura de ola significativa, H_s . Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = \frac{0.313H_s^2 f_p^4}{f^5} \exp - \left(1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right) \quad (\text{IV.6})$$

Donde: $f_p = T_p^{-1}$

4. Espectro del Congreso Internacional de Remolque de Buques Tanque (ITTC).

- Definido por la altura de ola significativa H_s . Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = \frac{0.0004988}{f^5} \exp - \left(\frac{0.001995}{H_s^2 * f_p^4} \right) \quad (\text{IV.7})$$

5. Espectro de ola BTTP.

- Definición por velocidad del viento, U_{10} (m/s) que debe ser por lo menos 10 m/s. Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = 1.997 * \left(11.247 - \frac{1.326}{f_p} \right)^2 * \exp - \left(\left(\frac{(f-f_p)^2}{0.01035*(f-f_p)+0.042} \right) \right) \quad (\text{IV.8})$$

Donde:



$$f_p = \frac{3.33}{U + 24.065} \quad (U > 10)$$

La ecuación superior para $S(f)$ aplica para: $(f_p - 0.042) < f < (f_p + 0.263)$, en cualquier otro caso: $S(f) = 0$

6. Espectro de ola Darbyshire costero.

- Definición por velocidad del viento, U_{10} (m/s) y distancia del fech, F (m). Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = 0.00593 * (DU)^3 * \exp - \left(\frac{D^2 * (f - f_p)^2}{0.0085 * (f - f_p) + 0.042} \right)^{0.5} \quad (\text{IV.9})$$

Donde:

$$f_p = \frac{0.463}{D^{0.75} * U^{0.5}} \quad D = \frac{E^3 + 3E^2 + 65E}{E^3 + 12E^2 + 260E + 80} \quad E = 0.0054 * F$$

La ecuación superior para $S(f)$ aplica para: $D * (f - f_p) > 0.042$, en cualquier otro caso: $S(f) = 0$

7. Espectro de ola Darbyshire oceánico.

- Definición por velocidad del viento, U_{10} (m/s). Espectro $S(f)$ definido por:

$$S(f) = 0.000259 * U^3 * \exp - \left(\left(\frac{(f - f_p)^2}{0.0085 * (f - f_p) + 0.042} \right)^{0.5} \right) \quad (\text{IV.10})$$

Donde:

$$f_p = \frac{1.0}{2.704 * U^{0.5} + 3.559 * 10^{-6} * U^4} \quad (\text{IV.11})$$

La ecuación superior para $S(f)$ aplica para: $(f - f_p) > - 0.042$, en cualquier otro caso: $S(f) = 0$

8. Espectro de ola Neumann.

- Definición por frecuencia pico, f_p (Hz). Espectro $S(f)$ definido por:



$$S(f) = \frac{0.0002518}{f^5} \exp - \left(3 \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right) \quad (\text{IV.12})$$

Donde: $f_p = T_p^{-1}$

Para éste estudio se empleó el espectro de ola de Pierson–Moskowitz. Debido a que corresponde a las condiciones de un Fetch largo que es el caso para las costas de México.

IV.5. Instrumentación

Las olas se producen mecánicamente por el desplazamiento del agua bajo movimiento aleatorio del generador que es de pistón. El laboratorio de Ingeniería Hidráulica cuenta con una caseta de control, en la cual se operan dos equipos de cómputo, uno de ellos es el que controla el generador de oleaje, y el otros equipo de cómputo tiene un programa para la medición del oleaje denominado HR WAVES. Este programa se utiliza para registrar el oleaje generado y así mismo permite la medición y análisis del oleaje en condiciones de mar en forma variada. [Beresford-B, 1994] [Ruíz, 2011]

Este equipo presenta las siguientes opciones de aplicación:

1. Subrutina de calibración de sensores (CAL).
2. Subrutina de medición y análisis de oleaje por espectros de oleaje (SPEC).
3. Subrutina de medición y análisis de oleaje por tiempo o número de olas (WARP).
4. Subrutina de salida (EXIT)

En la medición del oleaje se utilizan tres sensores de oleaje de tipo resistivo (uno en aguas profundas, otro al pie de la estructura sumergida y el tercero entre ambos rompeolas). Los sensores transmiten la señal recabada a un ológrafo de cuatro canales, que las amplifica y envía a un convertidor de señales. Ya digitalizadas, se analizan a través del software llamado HR WAVES y se envía a la impresión de resultados. (Figura IV.5)

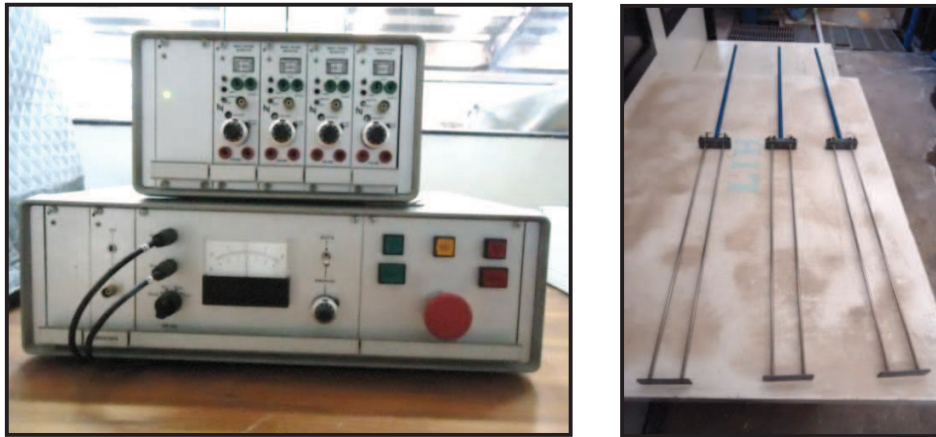


Figura IV.5. Generador de oleaje y oleógrafo (izq.), Sensores de oleaje (der.)

IV.6. Construcción

Los rompeolas que se construyen en México son en su mayoría estructuras permeables a talud, constituidas por enrocamiento, donde en base a la experiencia se recomienda utilizar un talud de 2:1 lado mar y, 1.25:1 a 1.5:1 lado protegido, en el morro se recomienda un talud de 2:1 en todas las direcciones, esto debido a las concentraciones de energía que hay en el cuerpo. [I.I.E.-C.F.E., 1983]

La sección transversal de un rompeolas está formada por [I.I.E.-C.F.E., 1983]:

- Coraza (capa principal). Capa exterior de la estructura que está formada por una o dos capas de elementos; los que deben resistir la acción directa del oleaje.
- Capa secundaria. Sirve para soportar los elementos de la coraza y además como filtro para evitar que se salgan los elementos de la capa en la que se apoya.
- Núcleo. Sirve como soporte y relleno a la estructura y es de tipo masivo. Está formado con material de rezaga y rocas pequeñas.

En base a la información recopilada en lo que respecta a rompeolas que sufren rebase, se empleará un rompeolas superficial, con coraza de enrocamiento de 12 toneladas. Los elementos de la capa secundaria y el núcleo, de acuerdo a los que establece el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, se recomienda que sea W/10 y W/20 y para el núcleo se recomienda



que esté entre W/200 a W/4000. El peso específico de la roca que se utilizará para la construcción del modelo es de 2.57 ton/m³, para todas las capas.

Obtención de pesos del enrocamiento para el rompeolas superficial

Utilizando la escala de líneas E_L = 40, y establecido el peso del enrocamiento de coraza, definimos los pesos del material en modelo, de igual forma se establecen los rangos de pesos para cada una de la capa secundaria y del núcleo. (Tabla IV.2)

Tabla IV.2. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas superficial

CAPA	PROTOTIPO			MODELO		
	-25%	Real	25%	-25%	Real	25%
Coraza	9 Ton	12 Ton	15 Ton	140gr	190gr	240gr
	-30%	Real	+30%	-30%	Real	+30%
Secundaria	0.80 Ton	1.2 Ton	1.6 Ton	13gr	19gr	25gr
Núcleo	>3kg			>0.5gr		

Para obtener los espesores correspondientes a la coraza y la capa secundaria se hace uso de la ecuación que presentó Per Bruun (1985). [I.I.E.-C.F.E., 1983]

$$E_{CORAZA} = nK_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_s}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{IV.13}$$

El número de capas a utilizar de acuerdo a las recomendaciones es de 2 a 3 capas para la coraza y de 2 a más para la capa secundaria. De lo cual obtenemos los valores de la Tabla IV.3.

Tabla IV.3. Pesos de la roca para las diferentes capas del modelo

ESPESORES CON ENROCAMIENTO			
MODELO		PROTOTIPO	
Espesor de Capa de Coraza	Espesor de Capa Secundaria	Espesor de Capa de Coraza	Espesor de Capa Secundaria
9.6cm	4.45cm	3.84m	1.78m

La geometría final del rompeolas superficial en sección de prototipo es la mostrada en la Figura IV.6.

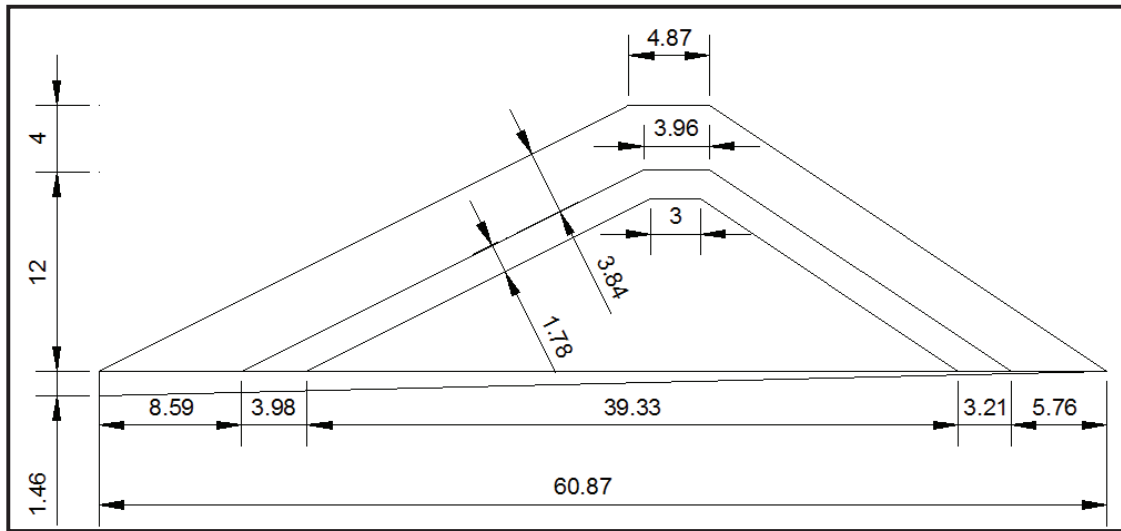


Figura IV.6. Dimensiones de la sección del rompeolas en prototipo. (Acotación en metros)

Por geometría los coronamientos de la capa secundaria y coraza son:

$$B_{CORAZA} = 4.87 \text{ metros}$$

$$B_{CAPA SECUNDARIA} = 3.96 \text{ metros}$$

De acuerdo a las cotas de coronamiento de los rompeolas de nuestro país se verificó que las cotas más bajas oscilan en los 4 metros por arriba del N.A.T. Por lo tanto, por las características del canal angosto de oleaje, se consideró el rompeolas con una altura de 12 metros por abajo del N.A.T., más 4 metros por arriba de dicho nivel, resultando un total de 16m de altura.

Obtención de pesos del enrocamiento para el rompeolas sumergido.

Para poder determinar los pesos de enrocamiento para el rompeolas sumergido, se utilizó la fórmula de Hudson modificada. (Ecuación IV.14).

$$W_B = \frac{1}{10} W \frac{H_D}{d_2} \quad (\text{IV.14})$$

Donde:

W_B = Peso en toneladas del elemento de coraza a una profundidad (d)

W = Peso en toneladas del elemento de coraza del rompeolas superficial

H_D = altura de la ola de diseño, en metros

d_2 = profundidad sobre la corona del rompeolas sumergido, Rc.



El rompeolas sumergido solo estará constituido por la capa de coraza y el núcleo como lo indica el estado del arte. En la Tabla IV.4 se muestra los pesos del material a utilizar.

Tabla IV.4. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas sumergido

CAPA	PROTOTIPO			MODELO		
	-25%	Real	25%	-25%	Real	25%
Coraza	2.88 Ton	3.84 Ton	4.8 Ton	45gr	60gr	75gr
	-30%	Real	+30%	-30%	Real	+30%
Núcleo	0.27 Ton	0.38 Ton	0.49 Ton	4.2gr	6.0gr	7.8gr

El cálculo del espesor de la coraza se realiza con la ecuación de Per Brunn (IV.13.), Los valores obtenidos son los mostrados en la Tabla IV.5.

Tabla IV.5. Pesos de la roca para las diferentes capas del rompeolas sumergido

ESPEORES CON ENROCAMIENTO	
PROTOTIPO	MODELO
Espesor de Capa de Coraza	Espesor de Capa de Coraza
1.4m	3.5cm

La geometría final del rompeolas sumergido se presenta en la Figura IV.7.

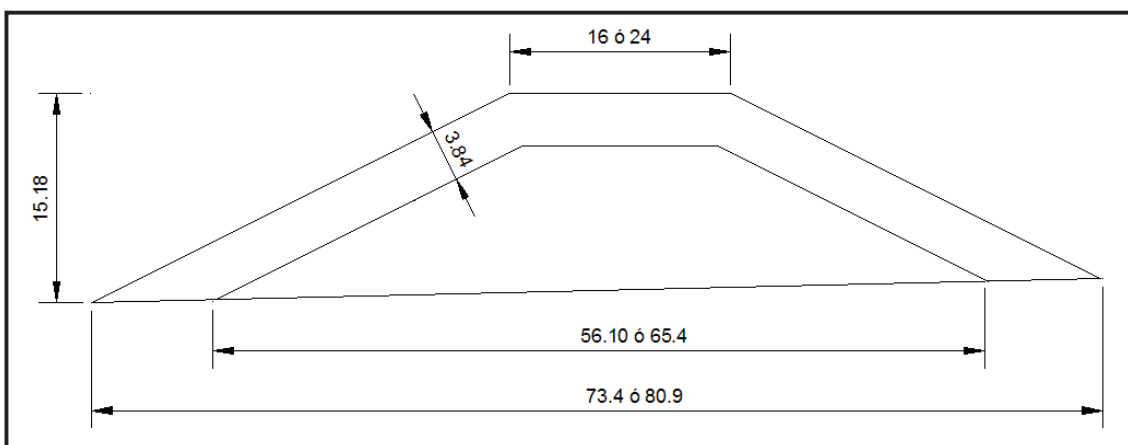


Figura IV.7. Dimensiones de la sección del rompeolas sumergido. (Acot. [m])



Clasificación de roca

Las capas de roca para el rompeolas se clasificaron de la siguiente manera:

- Núcleo.
- Capa secundaria.
- Coraza.

Para obtener el material a utilizar se llevó a cabo el rompimiento de roca que se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica, con mazeta como herramienta. Conocidos los pesos a utilizar se seleccionó la roca triturada que cumple con el peso de la coraza, para posteriormente pintarla de tres colores diferentes, esto para dividir el talud en franjas, dichas divisiones nos ayudaran a una mejor observación del ascenso y descenso de la ola sobre el talud de la estructura. (Figuras IV.8 y IV.9)



Figura IV.8. Selección de roca de núcleo y capa secundaria (izq.) y rehabilitación de roca de coraza para la franja verde (der.)



Figura IV.9. Rehabilitación de roca de coraza para franja azul y blanca.

Construcción del rompeolas superficial.

En esta investigación se construyeron dos rompeolas, el primero denominado rompeolas superficial y el segundo denominado rompeolas sumergido. Se inició con la elaboración de un escantillón el cual tendría la función de guía para el trazo de la estructura en la pared de acrílico como se muestra en la figuras IV.11, con el fin de construirlo adecuadamente con la geometría mostrada en la figura IV.10.

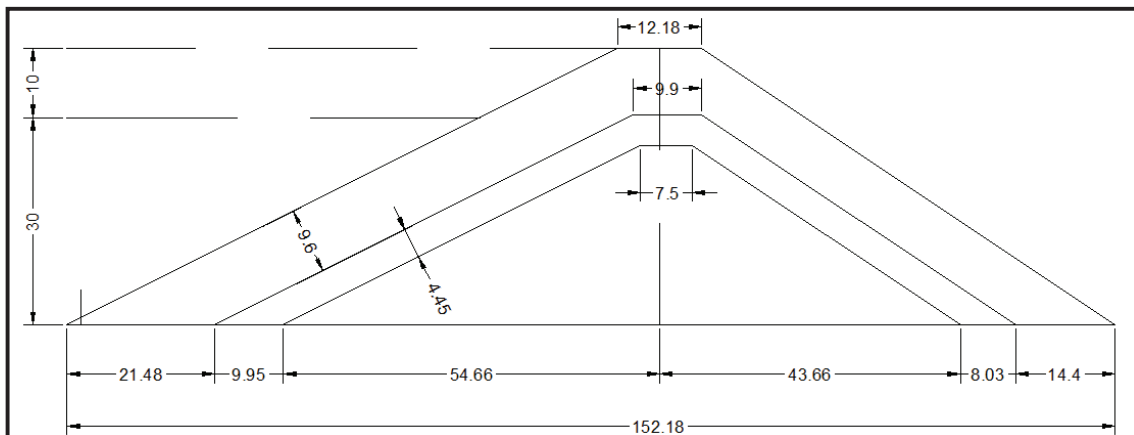


Figura IV.10. Sección en Modelo del rompeolas superficial (acotación en centímetros)



Figura IV.11. Trazo del escantillón (A) y trazo en la pared de acrílico para el rompeolas superficial (B)

En el proceso de construcción para el rompeolas superficial, se utilizó una escuadra de madera para obtener una buena alineación de la estructura, enseguida se colocó el material del núcleo, luego el correspondiente a la capa secundaria y finalmente los elementos de coraza. (Figuras IV.12 y IV. 13)



Figura IV.12. Colocación de material para el núcleo del rompeolas superficial.



Figura IV.13. Colocación de capa secundaria y coraza del rompeolas superficial

El rompeolas superficial terminado es el mostrado en la figura IV.14.



Figura IV.14. Rompeolas superficial finalizado



Construcción del rompeolas sumergido.

Para el rompeolas sumergido se consideraron seis variantes, pero con dos diferentes geometrías, éstas se dieron modificando el ancho de la corona. A continuación se presentan las dos estructuras en prototipo. (Figura IV.15 y IV.16)

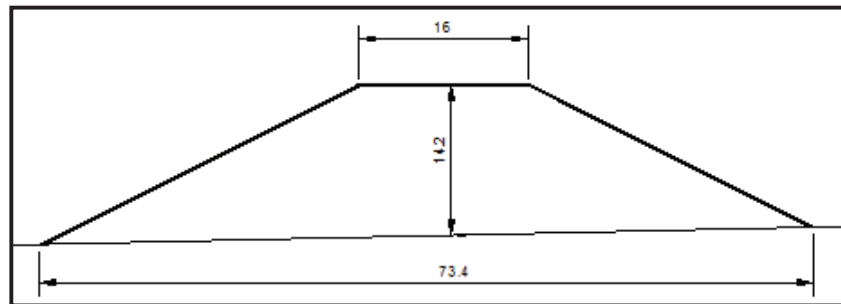


Figura IV.15. Dimensiones para el rompeolas superficial con ancho de corona de 16m

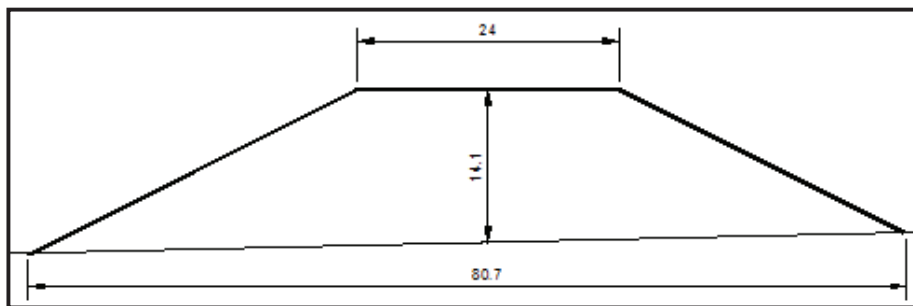


Figura IV.16. Dimensiones para el rompeolas superficial con ancho de corona de 24m

De igual forma que con el rompeolas superficial, se siguió el mismo proceso constructivo. Como se puede observar en las figuras IV.17.



Figura IV.17. Trazo del escantillón para los rompeolas sumergido y trazo en pared de acrílico.



Se procedió a colocar el material para el núcleo, y la capa de coraza. (Figuras IV.18)

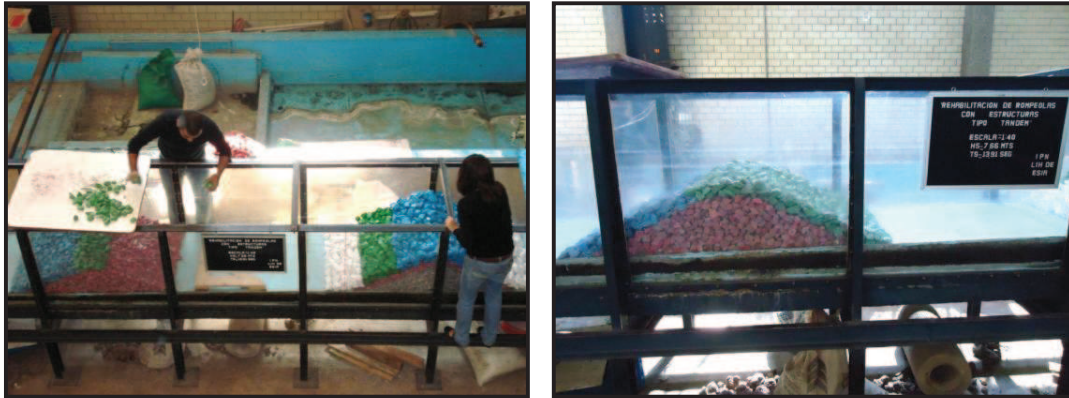


Figura IV.18. Colocación de núcleo y coraza del rompeolas sumergido y rompeolas sumergido finalizado

IV.7. Calibración.

Para este estudio se utilizaron 3 sensores, el primero a dos metros aproximadamente de la paleta generadora de oleaje (aguas profundas A.P.), el segundo muy cerca del pie del rompeolas sumergido (aguas intermedias A.I.) y el tercero en la parte media entre el rompeolas superficial y el rompeolas sumergido (aguas reducidas A.R.). La calibración de los sensores se realizó variando la profundidad de la siguiente forma:

1. Se baja el sensor 0.04m esto para obtener el nivel de la cresta de la ola y se registra la lectura del equipo.
2. Se sube el sensor 0.04m para obtener nuevamente el nivel cero de la ola y se registra la lectura del equipo.
3. Se sube el sensor 0.04m para obtener el nivel del valle de la ola se registra la lectura en el equipo.
4. Por último se baja el sensor 0.04m para obtener nuevamente el nivel cero de la ola y se registra la lectura.

Dicha calibración se realizó, como se mencionó anteriormente, para condiciones normales de oleaje y para oleaje de tormenta. (Figuras IV.19)



A continuación a través del equipo con las lecturas registradas se realiza, mediante un software, una regresión lineal para obtener la ecuación de la recta y su respectivo coeficiente de correlación; el cual debe ser por lo menos 0.99 para ser aceptada la calibración, en caso contrario se rechaza y se vuelve a calibrar el equipo repitiendo los pasos anteriores.

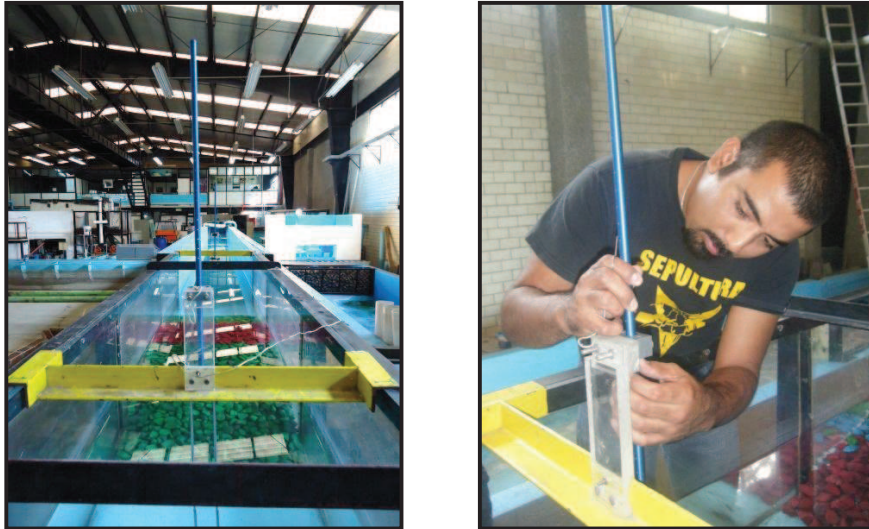


Figura IV.19. Colocación de sensores en aguas profundas, intermedias y reducidas (izq.), modificación de la profundidad del sensor para la calibración (der.)

IV.8. Ensayos.

IV.8.1. Condición de los ensayos.

Para la realización de los ensayos se consideraron las siguientes condiciones:

- En todos los ensayos se generó oleaje irregular, utilizándose el espectro frecuencial de Pierson-Moscowitz para generar las señales de oleaje.
- Se consideró en el estudio un oleaje normal y de tormenta, el plano de referencia es el Nivel de Bajamar Media Inferior (N.B.M.I.)
- Se estableció que para cada serie de ensayos se tuviera un total de 600 olas incidiendo sobre las estructuras.
- En todos los ensayos se calculó el coeficiente de reflexión.



En la Tabla IV.6, se muestran las 6 señales de oleaje a reproducir en los ensayos.

Tabla IV.6. Periodos, alturas e intervalos de muestreo.

Número de señal	Tm (seg.)	TP (seg.)	Hm (cm.)	HP (m).
1	1.700	10.75	11.475	4.59
2	1.800	11.38	12.825	5.13
3	1.900	12.02	14.400	5.76
4	2.000	12.65	15.900	6.36
5	2.100	13.28	17.625	7.05
6	2.200	13.91	19.150	7.66

IV.8.2. Procedimiento Experimental

Ya realizados los ensayos preliminares con el fin de observar, medir, y obtener resultados viables, se desarrolló el siguiente procedimiento para la ejecución de los ensayos en la experimentación.

1. Procedimiento para obtener los coeficientes de reflexión:
 - a) Colocar tres sensores de oleaje, con una separación de una longitud de ola, tanto del generador de olas como de la estructura sumergida, función esta del periodo del oleaje correspondiente al ensayo, y separados entre sí de acuerdo con el periodo del oleaje del ensayo.
 - b) Se genera el oleaje y se mide la energía de la ola incidente y la reflejada en la estructura por cada uno de los 3 sensores de oleaje.
 - c) Se calcula el coeficiente de reflexión promediando las energías del oleaje incidente y reflejado.
2. Procedimiento para obtener los coeficientes de la transmisión:
 - a) Se genera oleaje para cada uno de los ensayos en tiempo suficiente para reproducir 100 olas.



- b) Con base en los datos de oleaje transmitidos por los sensores y registrados por el equipo de cómputo, se obtienen las alturas de la ola en aguas profundas (al pie del generador de oleaje), de la ola incidente (frente al rompeolas sumergido), y de la ola transmitida (después del rompeolas sumergido).
- c) Se calculan los coeficientes de transmisión con base en las alturas de ola incidentes (H_i) y transmitidos (H_t).

Programa de ensayos.

A continuación se presenta el programa de ensayos, delimitadas tanto en el periodo y altura de ola. (Tabla IV.7)

Tabla IV.7. Programa de ensayos.

TÁNDEM 1 (condiciones normales de oleaje)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
1	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 1	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66
TÁNDEM 1 (con sobrelevación por tormenta de 1m)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
2	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 1	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66
TÁNDEM 2 (condiciones normales de oleaje)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
3	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 2	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66



Tabla IV.7. Programa de ensayos. (continuación)

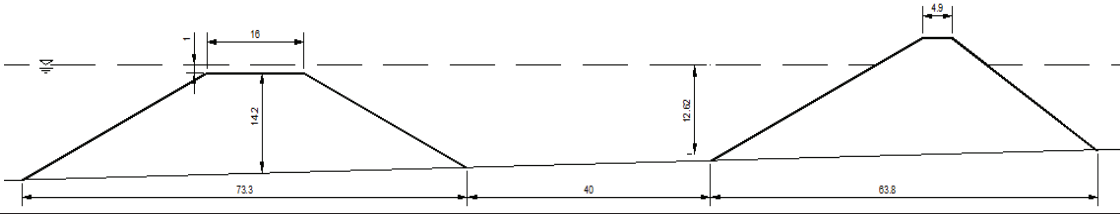
TÁNDEM 2 (con sobrelevación por tormenta de 1m)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
4	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 2	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66
TÁNDEM 3 (condiciones normales de oleaje)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
5	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 3	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66
TÁNDEM 3 (con sobrelevación por tormenta de 1m)				
Serie	Ensayo	Objetivo	TP (seg.)	HP (m)
6	1	Medición de periodos, alturas de ola incidente, conteo de olas que rebasan el rompeolas superficial y conteo de olas que rompen en rompeolas sumergido 3	10.75	4.59
	2		11.38	5.13
	3		12.02	5.76
	4		12.65	6.36
	5		13.28	7.05
	6		13.91	7.66

IV.8.3. Observación de los ensayos.

En esta primera serie de ensayos se tomaron en cuenta las características geométricas de la estructura, sumergencia y separación entre estructuras como se muestra en la Tabla IV.8.

**Rompeolas en TÁNDEM 1 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)**

Tabla IV.8. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 1

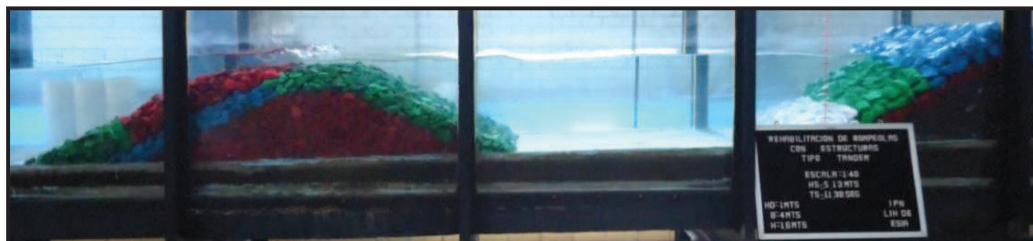


SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE ESTRUCTURAS (m)
1	1	10.75	4.59	16	1	40
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			

Ensayo 1. Se observó una rompiente incipiente sobre el rompeolas sumergido. El ascenso sobre el talud del rompeolas superficial se mantiene en la parte alta de la franja verde. (Figura IV.20)

Figura IV.20. Ensayo 1: Para $H = 4.59\text{m}$ y $T = 10.75\text{s}$

Ensayo 2. En este ensayo la mayoría de las olas tienen una rompiente parcial ante el rompeolas sumergido. Sobre el rompeolas superficial el ascenso del oleaje permanece en la parte baja de la franja azul. (Figura IV.21)

Figura IV.21. Ensayo 2: Para $H = 5.13\text{m}$ y $T = 11.38\text{s}$



Ensayo 3. Empezó a presentarse la rompiente de algunas olas sobre el rompeolas sumergido. Sobre el rompeolas superficial se da un ascenso del oleaje en la parte media de la franja azul. (Figura IV.22)



Figura IV.22. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. Se presenta la rompiente en olas de mayor tamaño sobre el rompeolas sumergido, en el talud del rompeolas superficial el ascenso se presenta en la parte media de la franja azul. (Figura IV.23)



Figura IV.23. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. En este ensayo la mayoría de las olas rompen sobre la estructura sumergida, el resto de las olas solo presentan una rompiente parcial. El ascenso del oleaje sobre el talud del rompeolas superficial se presenta aún en la parte alta de la franja azul, se observa que el agua empieza a salpicar del lado protegido. (Figura IV.24)



Figura IV.24. Ensayo 5: Para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$



Ensayo 6. En este ensayo casi todas las olas rompen en la estructura sumergida, se observa un incremento de ascensos sobre el talud del rompeolas superficial, dichos ascensos se desplazan a todo lo alto de la franja azul, aumenta la cantidad de agua que salpica del lado protegido sin que llegue a presentarse aun el rebase. (Figura IV.25)



Figura IV.25. Ensayo 6: Para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$

Rompeolas en TÁNDEM 1 (Con sobreelevación por tormenta de 1m)

En esta serie se toma una sobre elevación del nivel por tormenta de 1m. A continuación se muestra en la Tabla IV.9. las condiciones de estos ensayos.

Tabla IV.9. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 1

SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS (m)
2	1	10.75	4.59	16	2	40
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			

Ensayo 1. En este primer ensayo se observó una rompiente incipiente sobre el rompeolas sumergido. En el rompeolas superficial el ascenso de las olas incidentes se presenta en la parte alta de la franja verde. (Figura IV.26)

Figura IV.26. Ensayo 1: Para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$

Ensayo 2. En este ensayo sobre el rompeolas se empieza a presentar la rompiente pero tan solo con olas más grandes, el resto de las olas presentan una rompiente parcial. Las olas que inciden en el rompeolas superficial presentan un ascenso la parte media de la franja azul. (Figura IV.27)

Figura IV.27. Ensayo 2: Para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$

Ensayo 3. Se pudo observar que rompen la mayor parte de las olas que inciden en el rompeolas sumergido, el ascenso sobre el talud del rompeolas superficial es mayor, al ascender, el oleaje llega a la parte media de la franja azul no presentando rebase. (Figura IV.28)

Figura IV.28. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. Es evidente el aumento del número de olas que rompen en la estructura sumergida, en el rompeolas superficial el ascenso sobre el talud es mayor, se presenta en la parte alta de la franja azul y empieza a haber salpicaduras del oleaje sobre la corona. (Figura IV.29)

Figura IV.29. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. Las olas más grandes rompen totalmente sobre el rompeolas sumergido; el ascenso de la ola sobre la cara del rompeolas superficial es más intenso, se puede observar que los ascensos llegan a la parte alta de la franja azul pero sin la energía suficiente para rebasarlo. (Figura IV.30)

Figura IV.30. Ensayo 5: Para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$

Ensayo 6. Casi todas las olas rompen ante el rompeolas sumergido. El ascenso sobre el rompeolas superficial es mayor presentándose a todo lo alto de la franja azul. Con ascensos mayores se pueden observar ligeros rebases sobre la corona del rompeolas superficial. (Figura IV.31)

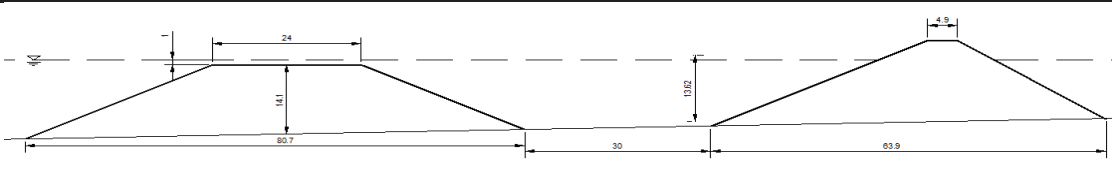
Figura IV.31. Ensayo 6: Para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$



Rompeolas en TÁNDEM 2 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)

Después de las observaciones realizadas en la estructura anterior se optó, por aumentar el ancho de la corona del rompeolas sumergido, y al mismo tiempo disminuir la distancia de separación entre ambas estructuras. En la Tabla IV.10. se muestra la figura de la estructura ensayada.

Tabla IV.10. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 2



SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS (m)
3	1	10.75	4.59	24	1	30
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			

Ensayo 1. En este ensayo la mayoría de las olas presentan una rompiente parcial ante el rompeolas sumergido. En el rompeolas superficial el ascenso del oleaje se presenta en la parte alta de la franja verde. (Figura IV.32)

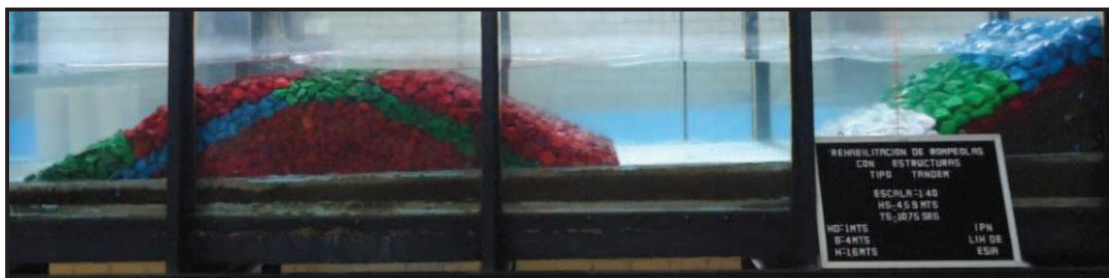


Figura IV.32. Ensayo 1: Para $H = 4.59\text{m}$ y $T = 10.75\text{s}$

Ensayo 2. Se observó en este ensayo que algunas olas empiezan a romper, el resto tan solo rompe parcialmente sobre el rompeolas sumergido. En el rompeolas superficial, se presenta tan solo un suave ascenso sobre el talud en la parte baja de la franja azul. (Figura IV.33)

Figura IV.33. Ensayo 2: Para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$

Ensayo 3. En este ensayo se pudo observar un aumento en el número de olas que rompen en la estructura sumergida, el resto de las olas solo presentan una rompiente parcial. En el talud del rompeolas superficial el ascenso del oleaje se encuentra en la parte media de la franja azul. (Figura IV.34)

Figura IV.34. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. En este ensayo se observó un claro aumento en el número de olas que rompen en la estructura sumergida. El ascenso del oleaje en el talud del rompeolas superficial, permanece en la parte media de la franja azul. (Figura IV.35)

Figura IV.35. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. Las olas rompen casi en su totalidad en la estructura sumergida, el ascenso que se presenta en el rompeolas superficial se da en la parte alta de la franja azul, y se empieza a notar que el oleaje salpica del lado protegido. (Figura IV.36)

Figura IV.36. Ensayo 5: Para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$

Ensayo 6. Aumentó considerablemente la rompiente del oleaje sobre el rompeolas sumergido, el ascenso del oleaje llegó a la corona sin que se presente el rebase, pero se notó un aumento en la cantidad de agua que salpica del lado protegido. (Figura IV.37)

Figura IV.37. Ensayo 6: Para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$



Rompeolas en TÁNDEM 2 (Con sobreelevación por tormenta de 1m)

En esta segunda estructura, de la misma forma que en la anterior, se probó con una sobreelevación por tormenta de un metro y respetando las características geométricas como se muestra en la Figura IV.11.

Tabla IV.11. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 2

SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE ESTRUCTURAS (m)
4	1	10.75	4.59	24	2	30
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			

Ensayo 1. Son pocas las olas que presentan por lo menos un inicio de rompiente sobre el rompeolas sumergido. El ascenso del oleaje en el rompeolas superficial llega hasta la parte alta de la franja verde. (Figura IV.38)



Figura IV.38. Ensayo 1: Para H= 4.59m y T= 10.75s

Ensayo 2. En este ensayo se empezó a notar que algunas olas rompen en la estructura sumergida; en el rompeolas superficial el ascenso del oleaje se presenta en la parte baja de la franja azul. (Figura IV.39)

Figura IV.39. Ensayo 2: Para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$

Ensayo 3. En la estructura sumergida se pudo observar la rompiente de las olas más grandes, el ascenso sobre el talud del rompeolas superficial alcanza la parte media de la franja azul. (Figura IV.40)

Figura IV.40. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. La mayoría de las olas rompen sobre la estructura sumergida, el ascenso del oleaje se presenta por arriba de la parte media de la franja, se puede observar que se presentan salpicaduras sobre la corona del rompeolas superficial. (Figura IV.41)

Figura IV.41. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. En este ensayo se incrementaron las olas que rompen sobre la estructura sumergida, en el rompeolas superficial se observa que por los ascensos del oleaje salpica el agua del lado protegido, pero sin que se presente aun el rebase. (Figura IV.42)

Figura IV.42. Ensayo 5: Para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$

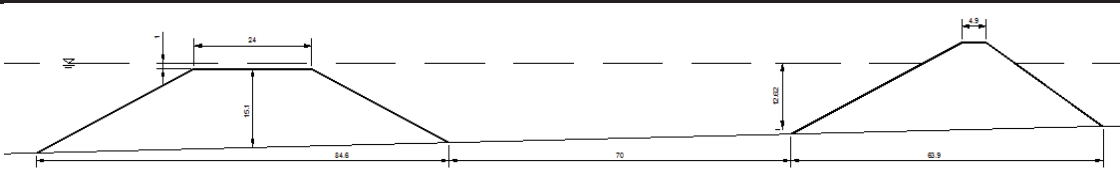
Ensayo 6. Se pudo observar en este ensayo que casi todas las olas rompen en la estructura sumergida. El ascenso del oleaje permanece en la parte alta de la franja azul del rompeolas superficial, el agua salpica del lado protegido, con olas más grandes se presenta un ligero rebase. (Figura IV.43)

Figura IV.43. Ensayo 6: Para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$

**Rompeolas en TÁNDEM 3 (Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)**

Por lo observado en las estructuras anteriores, se procedió a incrementar la separación entre ambas estructuras, y se mantuvo el ancho de la corona del rompeolas sumergido. La estructura se construyó con las características mostradas en la Tabla IV.12.

Tabla IV.12. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 3



SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS (m)
5	1	10.75	4.59	24	1	70
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			

Ensayo 1. Se pudo observar que la mayoría de las olas ante el rompeolas sumergido presentan una rompiente incipiente, el efecto de la rompiente se desplaza a lo largo de la corona del rompeolas sumergido. El ascenso en el talud del rompeolas superficial se tuvo hasta la parte alta de la franja verde. (Figura IV.44)

Figura IV.44. Ensayo 1: Para $H = 4.59\text{m}$ y $T = 10.75\text{s}$

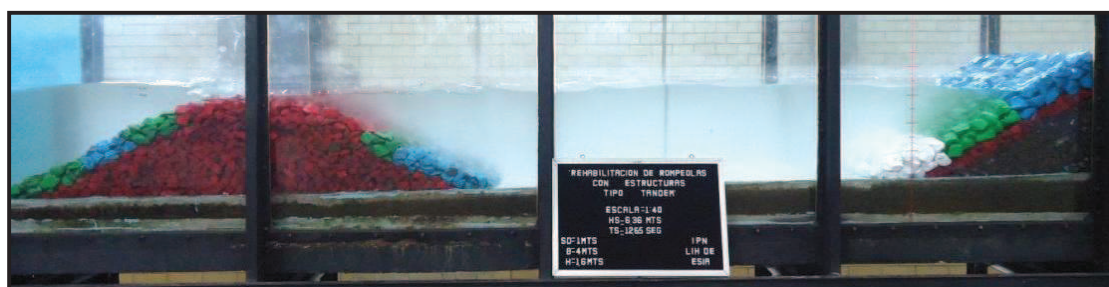
Ensayo 2. En este ensayo se notó que algunas olas empiezan a romper, el resto presentan una rompiente parcial. El ascenso de la ola permanece en la parte alta de la franja verde. (Figura IV.45)

Figura IV.45. Ensayo 2: Para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$

Ensayo 3. Con olas mayores se empieza a apreciar una rompiente parcial al llegar al rompeolas sumergido. Los efectos de esta rompiente se disipan a lo largo del claro que separa las estructuras, se aprecia un ascenso del oleaje en la parte baja de la franja azul del rompeolas superficial. (Figura IV.46)

Figura IV.46. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. En este ensayo se puede apreciar que las olas más grandes rompen en la estructura sumergida. El ascenso de la ola sobre el rompeolas superficial no cambió con respecto al ensayo anterior. (Figura IV.47)

Figura IV.47. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. Se observó en este ensayo que la mayoría de las olas rompen totalmente en la estructura sumergida; el ascenso del oleaje se presenta en la parte media de la franja azul. (Figura IV.48)



Figura IV.48. Ensayo 5: Para $H = 7.05\text{m}$ y $T = 13.28\text{s}$

Ensayo 6. En este ensayo rompen la mayoría de las olas sobre el rompeolas sumergido. El ascenso del oleaje sobre el talud del rompeolas superficial permanece en la parte media de la franja azul. (Figura IV.49)



Figura IV.49. Ensayo 6: Para $H = 7.66\text{m}$ y $T = 13.91\text{s}$

Rompeolas en TÁNDEM 3 (Con sobreelevación por tormenta de 1m)

En esta serie de ensayos se consideró sobre elevación por tormenta. (Tabla IV.13)

Tabla IV.13. Características geométricas del rompeolas TÁNDEM 3

SERIE	ENSAYO	TP (seg)	HP (m)	ANCHO DE CORONA (m)	SUMERGENCIA (m)	SEPARACIÓN ENTRE ESTRUCTURAS (m)
6	1	10.75	4.59	24	2	70
	2	11.38	5.13			
	3	12.02	5.76			
	4	12.65	6.36			
	5	13.28	7.05			
	6	13.91	7.66			



Ensayo 1. En este ensayo pudimos observar que algunas olas presentan por lo menos un inicio de rompiente ante el rompeolas sumergido, en el talud de la estructura superficial las olas ascienden hasta la parte alta de la franja verde. (Figura IV.50)



Figura IV.50. Ensayo 1: Para $H= 4.59\text{m}$ y $T= 10.75\text{s}$

Ensayo 2. Se observó que en el rompeolas sumergido algunas olas rompen. El ascenso del oleaje se presenta en la parte baja de la franja azul del rompeolas superficial. (Figura IV.51)



Figura IV.51. Ensayo 2: Para $H= 5.13\text{m}$ y $T= 11.38\text{s}$

Ensayo 3. Aumentó el número de olas que rompen ante la estructura sumergida, el ascenso sobre el rompeolas superficial no pasa de la parte media de la franja azul. (Figura IV.52)



Figura IV.52. Ensayo 3: Para $H= 5.76\text{m}$ y $T= 12.02\text{s}$

Ensayo 4. En este ensayo se observó un incremento en el número de olas que rompen en la estructura sumergida, el ascenso de las olas en el rompeolas superficial permanece en la parte media de la franja azul. (Figura IV.53)

Figura IV.54. Ensayo 4: Para $H= 6.36\text{m}$ y $T= 12.65\text{s}$

Ensayo 5. Se observó que la mayoría de las olas rompen sobre la estructura sumergida, el ascenso del oleaje sobre el talud del rompeolas superficial pasa un poco arriba de la parte media de la franja azul. (Figura IV.55)

Figura IV.55. Ensayo 5: Para $H= 7.05\text{m}$ y $T= 13.28\text{s}$

Ensayo 6. En este ensayo casi todas las olas rompen en la estructura sumergida. El ascenso sobre el talud del rompeolas superficial tan solo ha salpicado un poco la corona, no existió rebase. (Figura IV.56)

Figura IV.56. Ensayo 6: Para $H= 7.66\text{m}$ y $T= 13.91\text{s}$



V. Procesamiento de resultados.

V.1. Análisis de información.

Al término de los ensayos, se realizó un análisis de los resultados con el objetivo de determinar cual de las estructuras resultó ser la más eficiente.

Para el análisis de resultados se elaboraron las tablas V.1. a la V.6 para realizar una comparación entre alturas de ola obtenidas de las mediciones de cada uno de los ensayos, y con los coeficientes de transmisión (K_T) calculados con las alturas de olas incidentes (H_i) y transmitidas (H_T).

Tabla V.1. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 1
(Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona del rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola incidente H_i (m)	Periodo de la ola incidente T_i (m)	Altura de ola transmitida H_T (m)	Periodo de la ola transmitida T_T (m)	Coefficiente de transmisión K_T
1	1	1.00	40.00	16.00	3.156	8.4876	1.748	6.9380	0.5540
	2				3.652	9.3477	2.032	7.2796	0.5564
	3				3.998	9.6386	2.278	7.3871	0.5698
	4				4.622	10.2331	2.552	7.4061	0.5521
	5				4.978	10.5810	2.746	7.9942	0.5516
	6				5.660	11.1312	3.080	7.8804	0.5442

Tabla V.2. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 1
(Con sobreelevación por tormenta de 1m)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona del rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola incidente H_i (m)	Periodo de la ola incidente T_i (m)	Altura de ola transmitida H_T (m)	Periodo de la ola transmitida T_T (m)	Coefficiente de transmisión K_T
2	1	2.00	40.00	16.00	3.470	8.4939	2.378	6.5965	0.6853
	2				3.862	9.2971	2.556	6.7357	0.6618
	3				4.446	9.6007	2.868	6.8305	0.6451
	4				4.624	9.7525	3.024	7.1341	0.6540
	5				5.498	10.4861	3.362	6.9127	0.6115
	6				5.746	10.7391	3.448	6.8938	0.6001



Tabla V.3. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 2
(Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona de rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola insidente Hi (m)	Periodo de la ola insidente Ti (m)	Altura de ola transmitida H _T (m)	Periodo de la ola transmitida T _T (m)	Coefficiente de transmisión K _T
3	1	1.00	30.00	24.00	3.234	8.3358	1.921	5.9913	0.5941
	2				3.736	9.2591	2.126	6.0090	0.5691
	3				4.080	9.4046	2.272	6.3815	0.5569
	4				4.664	9.9612	2.558	6.5902	0.5485
	5				4.962	10.3659	2.676	6.7546	0.5393
	6				5.612	11.0680	2.878	6.9507	0.5128

Tabla V.4. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 2
(Con sobre elevación por tormenta de 1m)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona del rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola insidente Hi (m)	Periodo de la ola insidente Ti (m)	Altura de ola transmitida H _T (m)	Periodo de la ola transmitida T _T (m)	Coefficiente de transmisión K _T
4	1	2.00	30.00	24.00	3.750	8.5318	2.346	6.7420	0.6256
	2				4.078	8.9682	2.574	6.7483	0.6312
	3				4.692	9.5501	2.908	7.0709	0.6198
	4				4.958	9.6070	3.034	6.7989	0.6119
	5				5.654	10.2205	3.312	6.8495	0.5858
	6				5.926	10.4355	3.360	6.9254	0.5670

Tabla V.5. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 3
(Condiciones normales de oleaje considerando N.M.M.)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona del rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola insidente Hi (m)	Periodo de la ola insidente Ti (m)	Altura de ola transmitida H _T (m)	Periodo de la ola transmitida T _T (m)	Coefficiente de transmisión K _T
5	1	1.00	70.00	24.00	3.132	8.4749	1.294	5.8464	0.4133
	2				3.586	9.1516	1.439	6.0033	0.4012
	3				3.946	9.4299	1.553	6.2676	0.3935
	4				4.506	10.0118	1.749	6.6345	0.3882
	5				4.730	10.3027	1.837	6.9507	0.3884
	6				5.402	10.8656	1.968	7.5768	0.3643



Tabla V.6. Características de oleaje en aguas intermedias y someras del TÁNDEM 3
(Con sobreelevación por tormenta de 1m)

Serie	Ensayo	Sumergencias (m)	Separación entre rompeolas X (m)	Ancho de corona del rompeolas sumergido B (m)	Altura de ola incidente H_i (m)	Periodo de la ola incidente T_i (m)	Altura de ola transmitida H_T (m)	Periodo de la ola transmitida T_T (m)	Coefficiente de transmisión K_T
6	1	2.00	70.00	24.00	3.220	8.4370	1.778	6.4700	0.5522
	2				3.476	8.9366	1.920	6.5586	0.5525
	3				4.002	9.5438	2.174	6.6534	0.5432
	4				4.244	9.7145	2.340	6.7167	0.5513
	5				4.864	10.2964	2.424	6.6914	0.4983
	6				5.122	10.6442	2.496	6.4574	0.4873

V.2. Presentación de resultados.

En base a lo encontrado en el estado del arte sobre rompeolas en tándem, se generaron diferentes comparaciones gráficas entre datos medidos y calculados. Basados en esta información, inicialmente se consideraron los registros de altura de ola incidente (H_i) y transmitida (H_T), se graficó la variación de altura de ola incidente (H_i/gT^2) contra la variación de altura de ola transmitida (H_T/gT^2), en la condición de nivel medio del mar (N.M.M.). (Figura V.1.) [Prasad y Otros, 2010]

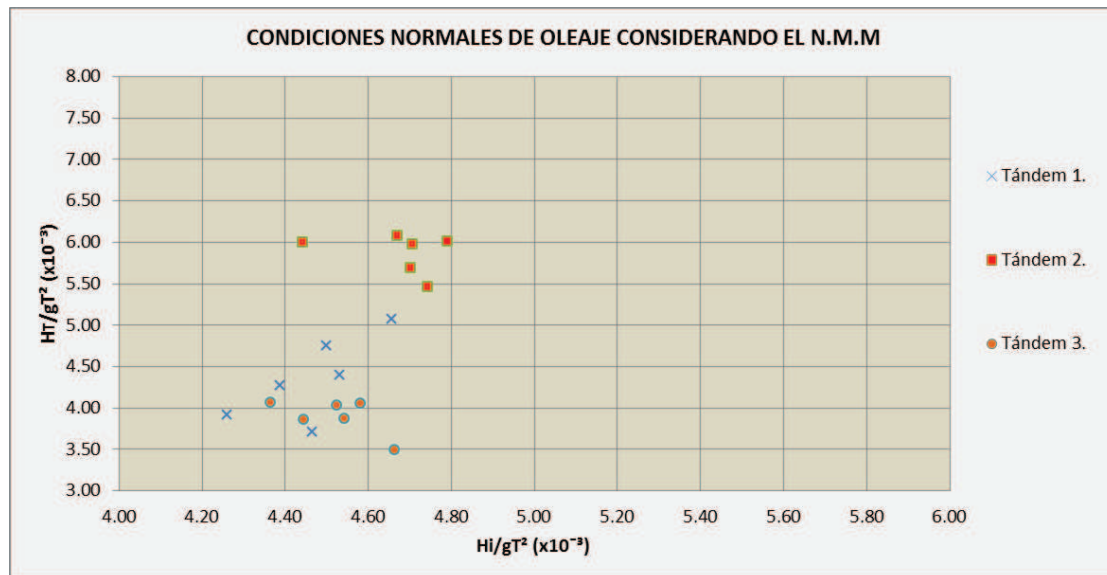


Figura V.1. Variación de altura de ola incidente y transmitida. (N.M.M.)



De igual forma se consideró la variación de altura de ola incidente y transmitida en la consideración de sobreelevación por tormenta (S.P.T.) de 1m.

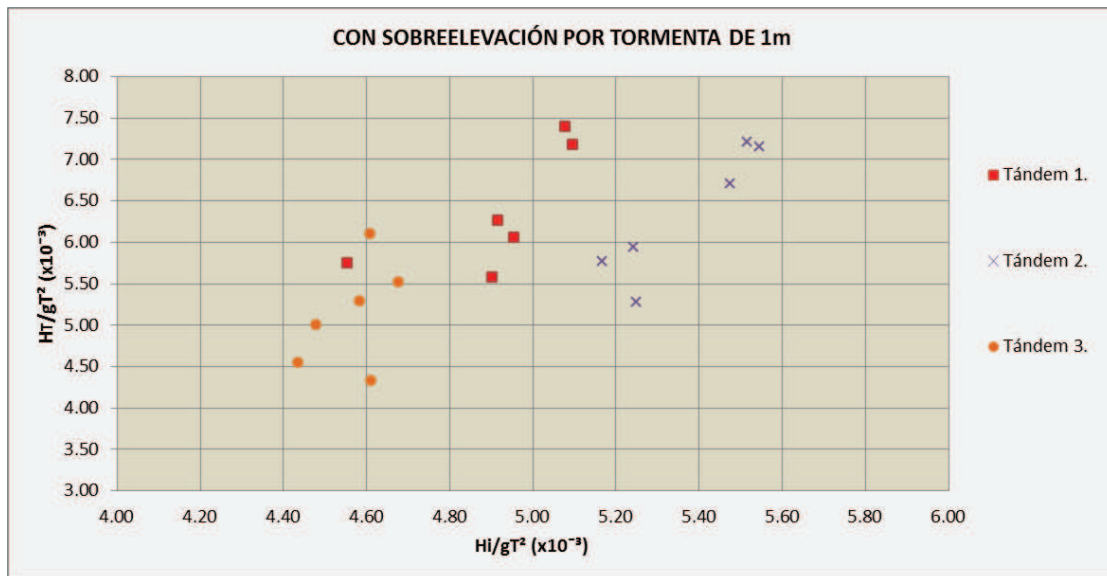


Figura V.2. Parámetros de altura de ola incidente y transmitida. (S.P.T.)

Seguido de esto, se procedió a graficar el ancho de corona relativo (B/H_i) correspondiente a cada rompeolas sumergido, contra los coeficientes de transmisión (K_t). En la Figura V.3 se muestra el gráfico con datos medidos para la condición de nivel medio del mar (N.M.M.)

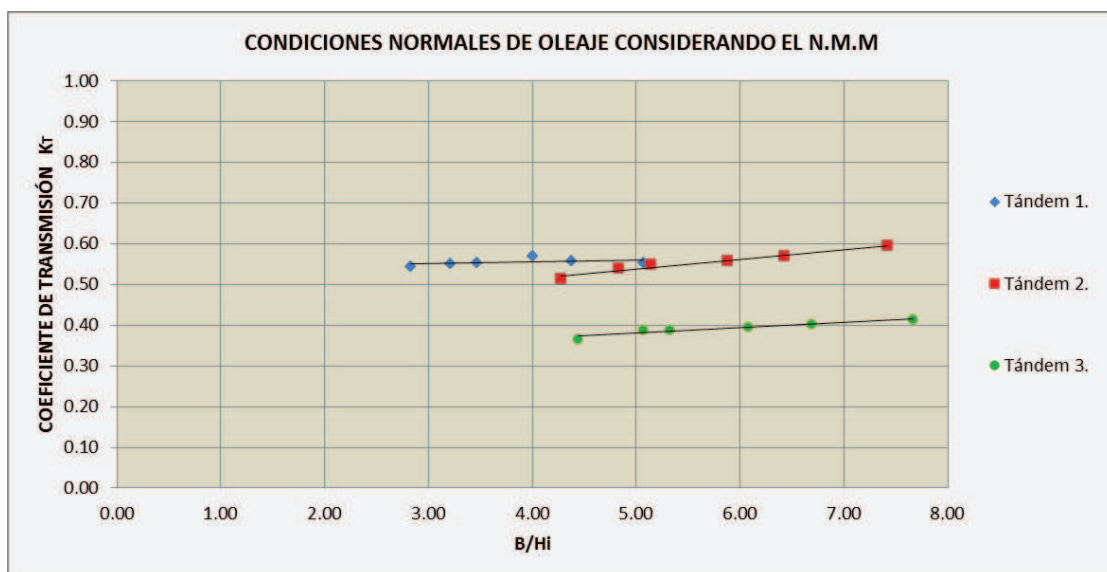


Figura V.3. Influencia del ancho de corona relativo. (N.M.M.)



De igual forma se graficó en la condición de la sobreelevación por tormenta de 1m. (Figura V.4.)

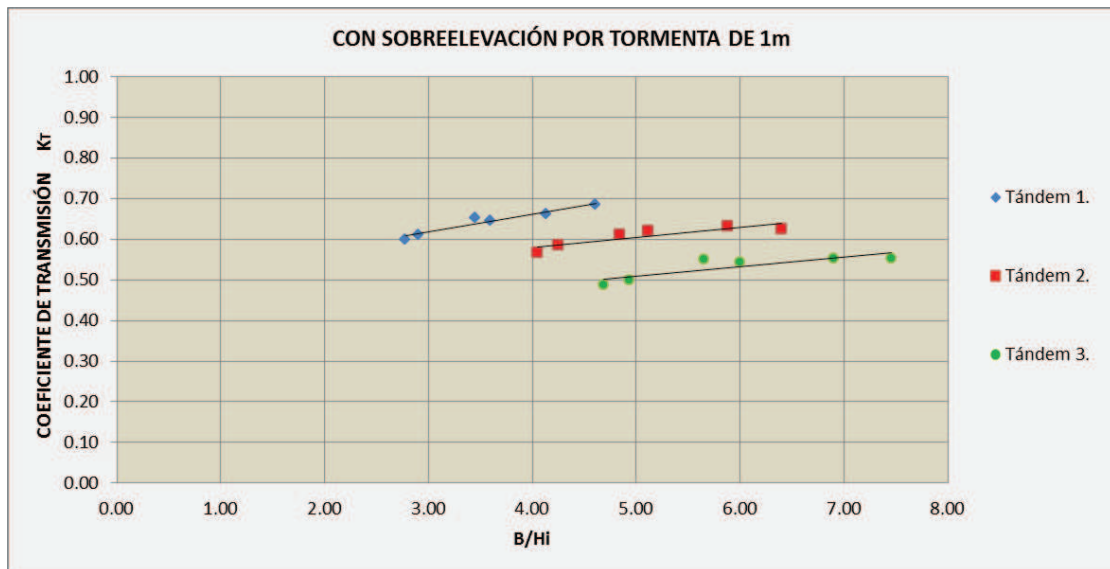


Figura V.4. Influencia del ancho de corona relativo. (S.P.T.)

Otra de las variantes fue el claro entre ambos rompeolas (X), para lo cual se gráfico la separación relativa contra los coeficientes de transmisión calculados. En la Figura V.5 se muestra el gráfico con datos medidos para la condición de nivel medio del mar (N.M.M.)

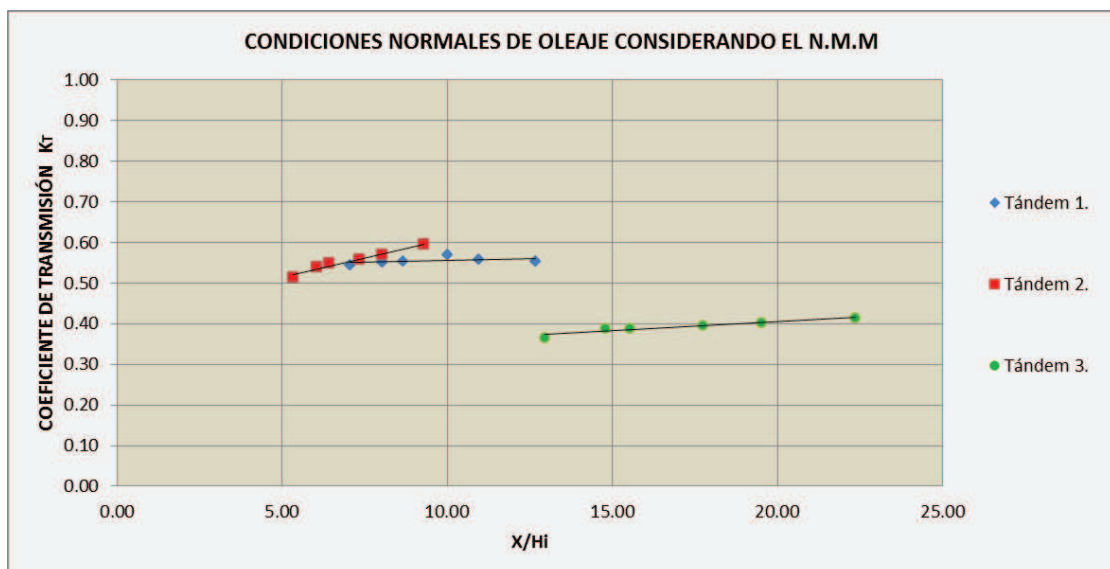


Figura V.5. Influencia de la separación relativa entre estructuras. (N.M.M.)



De igual forma se graficó considerando la sobreelevación por tormenta de 1m. (Figura V.6.)

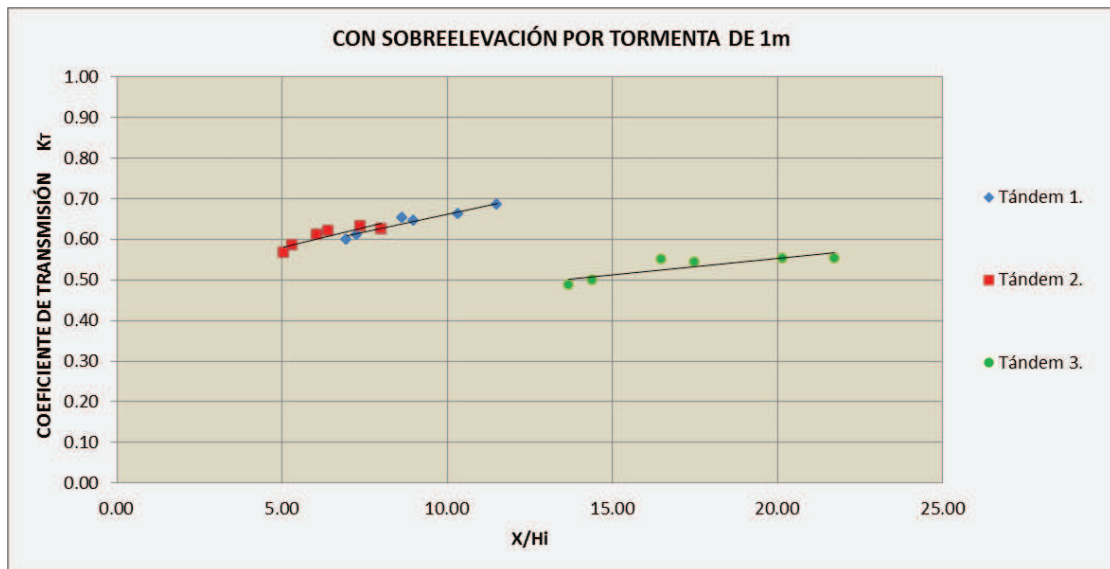


Figura V.6. Influencia de la separación relativa entre estructuras. (S.P.T.)

En la Figura V.7., se muestra la gráfica realizada considerando la influencia de la sumergencia, se graficó la sumergencia relativa (d_s/H_i), contra los coeficientes de transmisión calculados (K_T), para la condición de nivel medio del mar (N.M.M.)

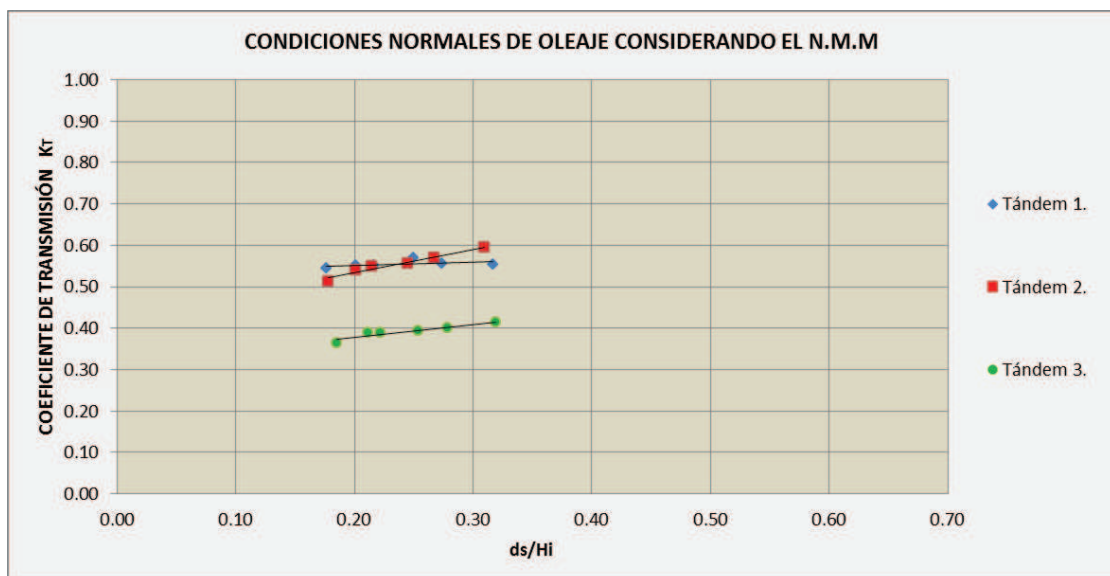


Figura V.7. Influencia de la sumergencia relativo. (N.M.M.)



De la misma manera se realizó otro gráfico considerando la sobreelevación por tormenta de 1m. (Figura V.8.)

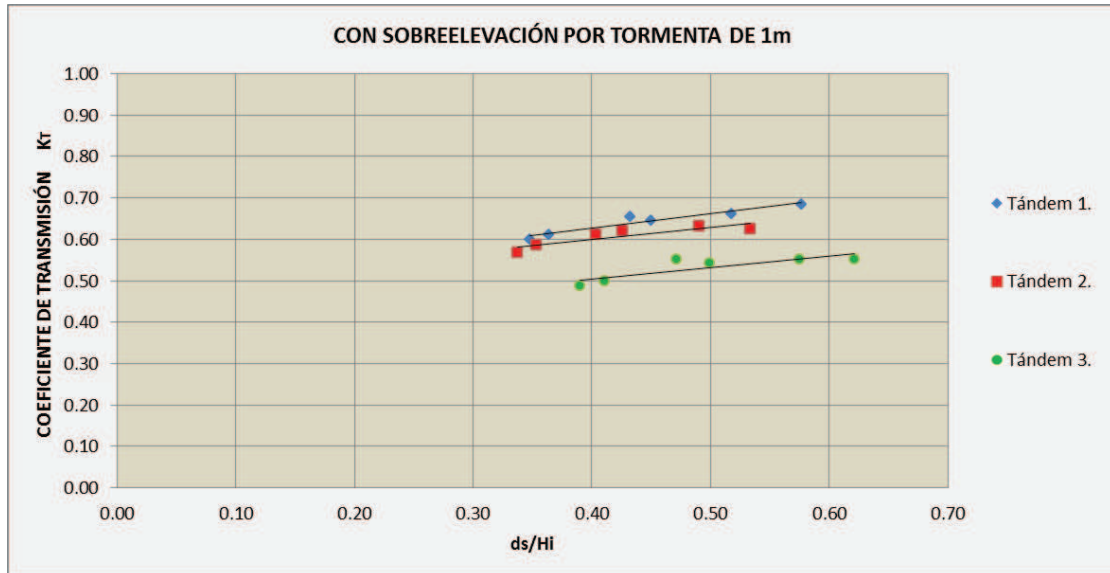


Figura V.8. Influencia de la sumergencia relativa. (S.P.T.)

Finalmente en la Figura V.9., se estableció una relación entre la profundidad de desplante de la estructura sumergida y la separación entre estas (X/h), contra el coeficiente de transmisión (K_T), para la condición de nivel medio del mar (N.M.M.) y para la sobreelevación por tormenta (S.P.T.).

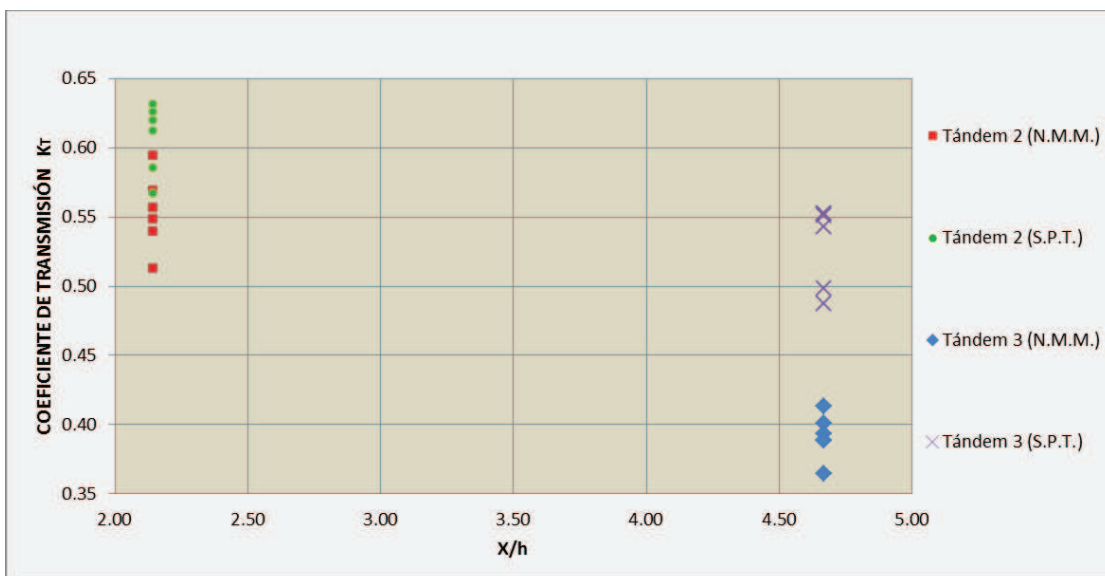


Figura V.9. Influencia de la profundidad de desplante de la estructura sumergida.



VI. Conclusiones y recomendaciones.

De las gráficas presentadas en el capítulo anterior, a continuación se presentan las siguientes conclusiones derivadas del estudio:

1. De la figuras V.1 podemos concluir que, para las alturas de oleaje incidentes relativas de los tándem 1 y 3 presentan un altura de ola transmitida relativa similar, pero aun así los valores más bajos son del tándem 3, por lo tanto es más eficiente este sistema.
2. Para las alturas de ola incidentes relativas de los tándem 1 y 2, se puede observar en la figura V.2., que presenta una altura de ola transmitida relativa similar, lo cual nos indica que no hay una reducción de la altura de ola transmitida, pero con lo que respecta al tándem 3 para el mismo orden de altura de ola incidente relativa, se aprecia una reducción significativa de la altura de ola transmitida relativa, lo cual indica que esta última estructura es más efectiva que las dos anteriores.
3. De la figura V.3 y V.4 se observó que con un incremento en el ancho relativo (B/H_i) de la corona del rompeolas sumergido se da una reducción en el coeficiente de transmisión de la ola entre el 25 y 30% para la condición de nivel medio del mar (N.M.M), por lo que respecta a la sobreelevación por tormenta se presenta una reducción entre 17 y 19%.
4. En la figura V.5., se puede apreciar que con un incremento en la separación relativa (X/H_i) entre las estructuras se presenta un decremento entre el 29 y 31% del coeficiente de transmisión de la ola, esto para la consideración de nivel medio del mar, y con sobreelevación por tormenta (figura V.6.) disminuye entre el 14 y el 19%.
5. En la figura V.7., considerando la sumergencia relativa (d_s/H_i), se presenta una reducción en el coeficiente de transmisión de la ola entre el 29 y el 30% para la condición de nivel medio del mar, y en la condición con sobreelevación por tormenta (figura V.8.), se presenta un decremento entre el 14 y 19%.



6. De la figura V.9., se puede concluir que para la relación $X/h= 2.14$ y rompeolas en tándem 2 los coeficientes de transmisión varían de 0.51 a 0.63, por lo que respecta a la relación de $X/h= 4.67$ y rompeolas en tándem 3, esta relación es de 0.36 a 0.55, observándose una reducción entre el 13 y el 29%, lo cual nos indica que la estructura en tándem 3 es más efectiva al reducir el oleaje.
7. De observaciones en los ensayos, se pudo apreciar que el ascenso del oleaje (run-up) se incrementa con un aumento en la profundidad del agua y el periodo de la ola, pero decrece con un incremento en la esbeltez de la ola y la separación entre los rompeolas. El run-up es del 12 a 42% inferiores a los de un rompeolas convencional, con base en el estado del arte.
8. De los resultados aportados por el estudio, se confirma la hipótesis planteada de este trabajo: "A través de un modelo físico reducido se pueden dimensionar el sistema en tándem para reducir sustancialmente el rebase del oleaje sobre rompeolas superficiales", con lo que podemos concluir que la hipótesis planteada fue comprobada satisfactoriamente.

Con base a los resultados del estudio, se proponen las siguientes recomendaciones.

1. Es necesario ampliar el estudio abocado al análisis del ascenso del oleaje (run-up) y de igual forma del descenso del oleaje (run-down), ya que en este estudio solo se realizaron observaciones, lo que permitiría conocer más a fondo el comportamiento de la ola transmitida sobre el rompeolas superficial.
2. Es importante incrementar el tiempo de ensayo para probar también la estabilidad del sistema en tándem.
3. De acuerdo a los análisis realizados, y al estado del arte se sugiere analizar diferentes geometrías del rompeolas superficial, así como diferentes separaciones entre ambas estructuras.



Bibliografía

1. **[Andersen y Burcharth, 2001]** Andersen T. L. y Burcharth Hans F. (2001) **Overtopping And Rear Slope Stability of Reshaping Breakwaters. COPEDEC VI**, Colombo, Sri Lanka. Pp 1-14. http://vbn.aau.dk/fbspretrieve/356908/COPEDEC_-_OVERTOPPING_AND_REAR_SLOPE_SATABILITY_OF_RESHAPING_BREAK_WATERS
2. **[Battjes, 1974]** Battjes J. A. (1974), **Surf Similarity, Proceedings of the 14th International Coastal Engineering Conference**, American Society of Civil Engineers Vol. 1.
3. **[Beresford-A, 1994]** Beresford P.J. (1994). **WAVEGEN. Programa de control del Generador de Olas. Manual del usuario. Reporte IT 411. HR.** Wallingford.
4. **[Beresford-B, 1994]** Beresford P.J. (1994) **HR-WAVES. Programa de adquisición y análisis de información. Manual del usuario. Reporte IT 410. HR.** Wallingford.
5. **[Bruun, 1989]** Bruun P. (1989), **Port Engineering**. Gulf Publishing Company, Houston: Volumen I Cuarta Edición.
6. **[C.E.T.M.E.F. y Otros, 2007]** CIRIA, CUR, CETMEF (2007). **The Rock Manual**. The use of rock in Hydraulic Engineering (2nd edition). C683, Chapter V COROA, London.
7. **[Chakrabartis y Cooley, 1977]** Chakrabartis S. K. y Cooley, R. P. (1977), **Statistical Distribution of Periods And Heights of Ocean Waves**, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 9, pp 320-735.



8. **[Cifuentes y Otros, 2000]** Cifuentes Lemus J. L., Frías M. y Torres García P. (2000). **El océano y sus recurso, Vol III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería**, Cáp. IX. Las mareas, su energía y su utilización, Transmisión del oleaje por la presencia del arrecife artificial, pp. 69-80.
9. **[Cox y Clark, 1992]** Cox J. C. y Clark G. R. (1992). **Desing Development of Tandem Breakwater System for Hammond Indiana**, Proceedings of Conference on Coastal Structures and Breakwaters, Institution of Civil Engineers (I.C.E.) pp 111-121.
10. **[D.A.C.E., 1984]** Department of the Army Corps Of Engineers (1984). **Shore Proteccion Manual**, Coastal Engineering Research Center, Corps of Enginners, Vol.2 Cap. 2. pp. 1-5.
11. **[D.A.U.S., 1995]** Department of the Army, U.S. (1995) Engineer Manual, Desing of Coastal Revetments, Seawalls, and Bulkheads. Army Corps of Engineers, Engineering and Desing. Junio 1995, Chapter 2.
12. **[D.G.P, 2000]** Dirección General de Puertos (2000), **Manual de Dimensionamiento Portuario**, Capítulo V, pp. 39.
13. **[D.G.P, 2001]** Dirección General de Puertos (2000), **Catastro Portuario Nacional**, S.C.T.
14. **[E.T.S.E.C.C.P., 2002]** Escola Técnica Superior d'Enginyria de Camins, Canals i Ports (1995). **INGINYERIA MARÍTIMA: Interacción olas-estructuras**, España 1995. Obtenida el 17 Abril 2010, de: <http://assig-camins.upc.es/op/omc/Olas%20-%20Estructuras.pdf>



15. **[Franco y Otros, 1994]** Franco L., De Gerloni M., Van Der Meer J. W., (1994) **Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters.** Chapter 75. Pp. 1030-1045. Proceedings of the twenty-fourth international conference, Edit. By Billy L. Edge, Edit. ASCE (American Society of Civil Engineers), Vol. 1, 2, 3.
16. **[Frías y Moreno, 1986]** Frías A. y Moreno C. G. (1986), Ingeniería de Costas, Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria A. C., pp 77-160, 217-272.
17. **[Goda, 2000]** Goda Y. (2000) **Random Seas and Desing of Maritime Structures**, University of Tokio Press, Japan, World Scientific Press, Advanced Series On Ocean Engineering, Vol. 15, 443p.
18. **[González y Nápoles, 2006]** González Thomás Arturo y Nápoles Valdes Juan E. (2006), **Solitones, una no-linealidad no tan solitaria**, Universidad de la Cuenca del Plata, Argentina. <http://www.cidse.itcr.ac.cr/revistamate/ContribucionesV7n12006/Solitones/index.html>
19. **[Govaere, 1998]** Govaere Vicarioli Georges Andre (1998). **Tesis Profesional. "Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables"**, México, D.F., División de estudios de posgrado UNAM.
20. **[Hebsgaard y Otros, 1998]** Hebsgaard M., Juhl J. y Sloth P. (1998). **Wave Overtopping of Mound Breakwaters.** Pp. 2235. Conference Proceedings of Coastal Engineering, Edit. By Billy L. Edge, Edit. ASCE (American Society of Civil Engineers), Vol. 1, 2, 3.
21. **[Herbich, 1990]** Herbich John B. (1990). **Wave Phenomena and Coastal Structures**, Handbook of Coastal and Ocean Engineering, McGraw-Hill, Vol. 1.



22. **[I.C.E., 1992]** Institution of Civil Engineers of London (1992), **Coastal structures and breakwaters**. Obtenida el 2 de Abril de 2010, de: http://books.google.com.mx/books?id=DRmLsq-pK8IC&pg=PA111&lpg=PA111&dq=breakwater+tandem&source=bl&ots=MnHX6P-94&sig=SBovJZyA4sX_1wE-3PkrZLecBUQ&hl=es&ei=fogSTOTfPIyINuef6L0L&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CBQQ6AEwAA#v=onepage&q=breakwater%20tandem&f=false.
23. **[I.I.E.-C.F.E., 1983]** Instituto de Investigaciones Eléctricas C.F.E., Manual de Diseño de Obras Civiles, **Hidrotecnia**, A.2.13 Hidráulica Marítima, C.F.E., (1983).
24. **[Juhl y Sloth, 1994]** Juhl J. y Sloth P. (1994), **Wave Overtopping of Breakwaters Under Oblique Waves**, Chapter 86, pp. 1182. Proceedings of the twenty-fourth international conference of Coastal Engineering, Edit. By Billy L. Edge, Edit. ASCE (American Society of Civil Engineers), Vol. 1, 2, 3.
25. **[M.H.L., 2011]** Manly Hydraulics Laboratory. **Wave Data Recording**. New South Wales. Sydney, Australia. Obtenida el 8 Marzo de 2011, de <http://mhl.nsw.gov.au/www/wavestat.htmlx>
26. **[Möller y Otros, 2002]** Möller J., Oumeraci H. y Schüttrumpf H. (2002). **Overtopping Flow Parameters on the Inner Slope of Sea Dikes**, pp. 2116-2117. Conference Proceeding of Coastal Engineering, Edit. By Jane McKee Smith, U. S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vol. 1, 2, 3.
27. **[Moskowitz y Pierson, 1964]** Moskowitz y Pierson W. J. (1964), **A proposed Spectral Form for Fully-Developed Wind Seas Based on the Theory of S. A. Kitaigorodskii**, Journal for Geophysical Research, Vol. 69, No. 24, pp. 5181-5189



28. **[Neumann y Pierson, 1966]** Neumann G. and Pierson W. J. (1966), **Principles of physical Oceanography**, Prentice Hall, New Jersey.
29. **[N.O.A.A., 2011]** Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO (2011), **Google Earth**.
30. **[Ocaña, 2001]** Ocaña Espinoza de los Monteros Karina G. (2001), **Tesis de Maestría: Modelación Física de Rompeolas Sumergidos con Oleaje Irregular**, I. P. N.-E. S. I. A., Sección de Estudios de Postgrado e Investigación, pp. 22-30, 68-83, 84-91.
31. **[Prasad y Otros, 2010]** S. K. M. Prasad, K. G. Shirlal y S. Rao. **Stability of Tandem Breakwater**. Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division. Obtenida el 14 de Marzo de 2010, de <http://www.ieindia.org/publish/cv/1103/nov03cv3.pdf>.
32. **[Rosales, 1999]** Rosales Sierra Víctor (1999), **Tesis de Maestría: Caracterización del oleaje aplicada a Tuxpan, Veracruz**, I.P.N.-E.S.I.A., Sección de Estudios de Postgrado e Investigación, pp. 1-4.
33. **[Rosales, 2005]** Rosales Cornejo Oscar Jesús (2005), **Tesis de Maestría: Transmisión del oleaje irregular en rompeolas superficiales permeables a talud**, I.P.N.-E.S.I.A., Sección de Estudios de Postgrado e Investigación, pp. 1-3.
34. **[Ruíz, 2011]** Ruiz y Zurvia Flores Jaime Roberto, **Notas del curso de obras marítimas I**, Maestría en Ingeniería Hidráulica, I.P.N.-E.S.I.A. Unidad Zacatenco., Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, México D.F.
35. **[S.C.T., 1989]** S. C. T. (1989), **Características Generales del Oleaje**, Tomo I y II, Texto para el curso latinoamericano de capacitación en hidráulica marítima portuaria.



36. **[S.C.T., 2002]** Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2002), Centro SCT Campeche. **Proyecto de estabilización de zona de playa para la protección de la carretera Carmen-Campeche Km 46+000 – 46+500**, Capítulo 2: Análisis de oleaje y mareas. <http://www.reefball.com/map/campeche/11-02sct-memsf.htm>

37. **[Syarahan, 2003]** Perdana Siri Syarahan (2003). **Innovative Approaches for Physical Considerations in Research and Development of coastal Protection Structures**. Pp 14-23. http://www.penerbit.utm.my/syarahan/pdf/03/siri3_teks.pdf.

38. **[U.C., 2000]** Universidad de Cantabria (2000). **Obras. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.)**. Documento de Referencia Volumen III, Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas. Santander, Diciembre 2000.

39. **[U.S.A.C.E., 1984]** US Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington: Volume I.

40. **[U.S.A.C.E., 2001]** US Army Corps Of Engineers (USACE) (2001), **Coastal Engineering Manual**, Water Wave Mechanics, Cap. II. pp. 1-7

41. **[Van Der Meer, 1988]** J.W. Van Der Meer. (1988), **Rock Slopes and Gravel Beaches under Random Wave Attack**. Doctoral Thesis, Delft Hydraulics, Delf, Netherlands, p 80.

42. **[Van Der Meer, 1998]** J.W. Van Der Meer. (1988). **Application and stability criteria for rock and artificial units**. Published as Chapter 11 in "Dikes and revetments. Design, maintenance and safety assessment". Editor Krystian W. Pilarczyk, Balkema, Rotterdam. September 1988.



43. **[Van Get, 2002]** Van Gent Marcel. **Wave Overtopping Events at Dikes.** Pp. 2203-2215. Conference Proceeding of Coastal Engineering, Edit. By Jane McKee Smith, U. S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vol. 1, 2, 3.
44. **[Vergara, 1993]** Vergara Sánchez Miguel A. (1993), Técnicas de modelación en hidráulica, Alfa Omega, México D.F., pp. 7-9, 37-60.
45. **[VOWS, 2000]** VOWS INGRAM, David (2000) Violent Overtopping of waves at Seawalls (VOWS), the center for Mathematical Modeling and Flow Analysis (CMMFA), The United Kingdom.



GLOSARIO

Altura de ola incidente: Distancia vertical entre la cresta y el valle o el seno de una ola determinada.

Altura de ola significativa: Es la altura de ola promedio del tercio de las alturas de las olas más grandes de un tren de olas.

Altura de ola transmitida: Altura de ola medida después de la estructura.

Amplitud de ola: Distancia que una partícula se aleja de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud es equivalente a la mitad de la altura de la ola.

Ascenso del oleaje (run-up): Ascenso máximo del agua sobre el talud en una estructura (en este caso rompeolas), medido por la distancia vertical del nivel medio del mar al punto máximo de desplazamiento sobre el talud.

Berma: Área o parte del perfil de un rompeolas a menudo construida para apoyar la estructura lado mar.

Canal de oleaje angosto: Instalación utilizada en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica en donde se realizó la parte experimental de esta tesis, en donde se lleva a cabo la reproducción de oleaje regular e irregular con un equipo de generación.

Capa secundaria: Segunda capa de enrocamiento de un rompeolas la cual protege al núcleo para impedir que sea arrastrada por el embate del oleaje, consiste en piezas sueltas de roca cuyo peso varía dependiendo de las especificaciones de proyecto.

Celeridad de la ola: Velocidad con la que se desplaza la ola.

Coefficiente de reflexión: Coeficiente que se obtiene de relacionar la altura de ola reflejada con la altura de ola incidente.



Coefficiente de transmisión: Es el resultado de la relación entre la altura de ola transmitida con la altura de ola incidente.

Condiciones hidrodinámicas: Condiciones que se presentan debido al comportamiento de los fenómenos marítimos (viento, oleaje, mareas y corrientes).

Coraza: Capa principal de protección de una estructura, constituye la defensa primordial ante el embate de las olas, formada por rocas de mayor peso o elementos artificiales, su peso varía dependiendo de las especificaciones del proyecto.

Daño: Condición que se presenta cuando los elementos de la coraza son desplazados de su posición inicial en la parte donde incide el oleaje sobre el rompeolas.

Deflector de oleaje: Estructura artificial cuya función principal es impedir que el oleaje incidente rebase a un rompeolas reflejando a dicho oleaje, puede ser de concreto ciclópeo o de cualquier otro material similar.

Descenso del oleaje: Descenso del agua sobre el talud de la estructura, medido por la distancia vertical del nivel medio del mar al punto más bajo de desplazamiento sobre el talud.

Difracción: Fenómeno que se produce cuando las olas inciden sobre la barrera natural o artificial que impiden parcialmente su paso a la zona posterior del mismo, ocasionando una transferencia de energía lateral de una zona a otra.

Efecto de escala: Diferencia resultante entre las condiciones del modelo y el prototipo, causadas por la imposibilidad de cumplir simultáneamente con todos los criterios de similitud del modelo.

Ensayo: Reproducción controlada de un fenómeno en laboratorio, con el fin de observar, entender y medir los efectos y características que en él se producen.



Escollera: Estructura que se construye principalmente en la desembocadura de los ríos en forma convergente, ayuda a desazolvar la bocana al aumentar la velocidad de la corriente reduciendo el área de salida del flujo de agua, evitando el depósito de material.

Espectro de oleaje: Relación de la distribución de la energía de las ondas con respecto a sus frecuencias, representándose gráficamente.

Espigón: estructura que se construye generalmente en forma perpendicular a la línea de costa, nos ayuda a proteger las playas equilibrándola a conveniencia, lo cual nos sirve para atrapar el transporte litoral o retardar su acción sobre la costa.

Fondo fijo: Zona de desplante del rompeolas, la cual es impermeable sin movimiento en el modelo.

Fuerza de Coriólis: Fuerza por unidad de masa que se genera por el movimiento de la rotación de la tierra.

Generador de oleaje: equipo con el que se genera oleaje regular e irregular así como la ola solitaria por medios hidráulicos y mecánicos controlados por computadora.

Lado mar: Parte anterior del rompeolas, en el cual el oleaje incide.

Lado tierra: Parte posterior del rompeolas donde se crea una zona de calma relativa.

Longitud de la ola: Distancia horizontal que se tiene entre dos crestas o dos valles sucesivos.

Marea: Movimiento periódico y oscilatorio del ascenso y descenso del nivel del mar, debido a la fuerza gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre la tierra, y de la fuerza de inercia de la tierra debido al movimiento de rotación, por la fuerza centrífuga y el efecto de Coriólis.



Modelo físico reducido: Representación física a escala del prototipo de una estructura o fenómeno, que cumple con las tres leyes de similitud, la geometría, la cinemática y la dinámica.

Modelo matemático: Representación de un fenómeno en la cual se pretende resolver un problema mediante técnicas matemáticas.

Modelo analógico: Es aquel en donde dos fenómenos físicos de diferente naturaleza son descritos por ecuaciones análogas.

Núcleo: Capa interior de una obra de protección costera, cuya función es la de soportar el peso de las demás capas, que bien puede ser capa secundaria y coraza o bien únicamente esta última.

Número de Froude: Relación adimensional de las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad para un flujo dado.

Número de Reynolds: relación adimensional de las fuerzas de inercia y la fuerza viscosa en un fluido en movimiento.

Obras de protección: son estructuras que se encuentran de manera exterior en un puerto, por lo que están en contacto directamente con la energía del oleaje.

Ola: es una onda que se describe en la superficie del agua en movimiento.

Oleaje de tormenta: Es aquel que se produce debido a los fuertes vientos que genera una tormenta tropical con velocidades superiores a los 50km/hr.

Oleaje irregular: Sistema de olas compuesto por una combinación de olas simples de distinto periodo, altura, dirección, etc.

Ológrafo: Equipo electrónico que registra y amplifica las señales que se encargan de enviar los sensores de oleaje.

Periodo de la ola: Es el intervalo de tiempo en segundos que tardan en pasar dos crestas o dos valles de una ola por un mismo punto.



Profundidad del agua: es el tirante de agua que se mide desde el fondo hasta el nivel medio del mar (N.M.M.)

Programa de ensayos: Planeamiento de las características de un fenómeno a reproducir en condiciones controladas en el laboratorio, en base al número de series, ensayos y diferentes condiciones para estudiar dicho fenómeno.

Prototipo: Es el objeto estudiado y del cual se obtienen los datos para su diseño a través de un modelo físico reducido.

Puerto: Es el conjunto de instalación y organizaciones que permiten al hombre aprovechar una zona de las costa más o menos favorable para realizar operaciones de intercambio de mercancía entre el medio terrestre y marítimo.

Rebase del oleaje (overtopping): Fenómeno que se genera cuando el ascenso de la ola sobre la cara del rompeolas rebasa la arista del coronamiento, sobrepasando la cota de diseño del rompeolas.

Reflexión: se presenta cuando la energía que posee el oleaje se disipa total o parcialmente hacia el mar cuando esta es interceptada por una estructura artificial o un obstáculo natural.

Refracción: Fenómeno que se presenta cuando el oleaje se aproxima a la costa, ocasionando que los frentes de ola se desplacen a diferentes velocidades, esto depende de la profundidad, provocando que la cresta se deforme en su proyección horizontal.

Relación de esbeltez: Relación existente entre la altura y la longitud de una ola (H/L).

Rompeolas: Estructura artificial que puede ser construida de distintos tipos de materiales, ya sea de enrocamiento o de elementos artificiales prefabricados. Su función principal es generar una zona de abrigo o calma al interior del recinto portuario.

Rompeolas en tándem: Se le llama así a un par de rompeolas construidos en paralelo funcionando juntas como una unidad.



Rompeolas sumergido: Es la estructura de protección costera cuyo nivel de coronamiento de su última capa se encuentra por debajo del nivel medio del mar.

Rompeolas superficial: Es la estructura de protección costera, cuyo nivel de coronamiento se encuentra por encima del nivel medio del mar.

Rompiente: Se presenta cuando una ola alcanza un estado crítico y puede ser motivada por la relación de esbeltez, por el efecto de fondo, la transferencia de energía del viento sobre la superficie libre del agua o por la forma de la estructura sobre la cual rompe.

Sensor de oleaje: equipo electrónico para efectuar la medición del oleaje reproducido en los ensayos dentro de un canal de oleaje, enviando las señales al ológrafo para ser amplificadas y registradas.

Señal de oleaje: Datos de oleaje generados a través del software, de las características de las olas a escala para la reproducción de estas dentro del canal.

Trasmisión del oleaje: Efecto asociado con la permeabilidad y las características geométricas en una estructura, presentándose a través del cuerpo o por rebase del mismo, generándose así agitación en la parte protegida.

WAVEGEN: Software utilizado por el generador de oleaje, el cual es capaz de simular condiciones de oleaje de acuerdo a los requerimientos del usuario.



NOMENCLATURA

B	:	Ancho de la corona del rompeolas.
B/L	:	Ancho relativo de la corona del rompeolas.
C	:	Celeridad o velocidad de propagación de la ola.
C _n	:	Porcentaje de excedencia.
d	:	Profundidad del agua.
d _s	:	Sumergencia
D _{n50}	:	Diámetro medio o nominal de la roca de la capa de coraza.
E	:	Energía total de la ola.
E _F	:	Escala de fuerzas.
E _H	:	Escala de alturas de ola.
E _{LO}	:	Escala de longitudes de ola.
E _{LH}	:	Escala de líneas horizontal.
E _{LV}	:	Escala de líneas vertical.
E _T	:	Escala de periodos.
E _W	:	Escala de pesos.
f	:	Frecuencia de ola, $f= 1/T$.
g	:	Aceleración de la fuerza de gravedad (m/s^2).
h	:	Nivel de coronamiento.
H	:	Altura de ola.
H _i	:	Altura de la ola incidente.
H _o	:	Altura de la ola en aguas profundas.
H _s	:	Altura de ola significativa.
H _T	:	Altura de la ola transmitida.
H _{MAX}	:	Altura de ola máxima de un registro dado.
Ir	:	Número de Iribarren.
L	:	Longitud de oleaje
L _i	:	Longitud de la ola incidente.
n	:	número de elemento de cada capa.
N	:	Número de elementos por unidad de área.
R _c	:	Elevación de la estructura por encima del nivel del agua (freeboard).
R _U	:	Ascenso de la ola (run-up).
R _d	:	Descenso de la ola (run-down).
s	:	Pendiente del talud del rompeolas.
t	:	Tiempo.
T	:	Periodo de la ola.



$T_{1/3}$:	Periodo de ola significativa.
$T_{1/10}$:	Periodo de ola un décimo.
T_{MAX}	:	Periodo de ola máxima.
W	:	Peso de los elementos
X	:	Separación entre rompeolas.

Letras griegas

η	:	Variación del perfil de la ola.
γ	:	Peso específico del agua.
ρ	:	Densidad del agua.
ρ_r	:	Densidad de la roca.
γ_s	:	Peso específico de los elementos de enrocamiento.
α	:	Ángulo de inclinación del talud de la estructura.
π	:	Número pi
ξ	:	Parámetro de similitud de rompiente o número de Iribarren.
ξ_m	:	Parámetro de similitud de rompiente en aguas profundas.
ξ_o	:	Parámetro de similitud de rompiente basado en el periodo espectral.