INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS", ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

"ARRECIFES ARTIFICIALES DE ENROCAMIENTO PARA PROTECCIÓN DE PLAYAS"

TESIS DE GRADO

QUÉ PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:

ING. VANIA ITZEL ARELLANO LLAMAS

DIRECTOR:

M. EN C. JAIME ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES

MÉXICO, D.F. Enero de 2012

SIP-14

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 16:00 horas del día 28 del mes de noviembre del 2011 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:

"Arrecifes artificiales de enrocamiento para protección de playas."

Presentada por el alumno:

Arellano	LLamas	Vania Itzel
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro: B 0 9 1 2 8 4

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

Dr. Mario Ulloa Ramírez

Dr. Oscar Cruz Castro

M. en C. Lucio Fragoso Sandoval

M en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. en C. Pino Durán Escamilla

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA UNIDAD ZACATENCO I P N MÉXICO SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

NJRC/pgr.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F., el día 28 del mes noviembre del año 2011, la que suscribe Vania Itzel Arellano Llamas alumna del Programa de Maestría en Ingeniería Civil con número de registro B091284, adscrito a Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores y cede los derechos del trabajo intitulado "ARRECIFES ARTIFICIALES DE ENROCAMIENTO PARA PROTECCIÓN DE PLAYAS", 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 van_ia4@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Vania Itzel Arellano Llamas

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

A la M. en C. Norma J. Ruiz Castillejos, muchas gracias por su amistad y por el apoyo, tanto profesional como personal, que me brindo durante mi estancia en la SEPI – ESIA.

Al M. en C. Pino Duran, gracias por su amistad y por el apoyo que me brindo durante mi estancia en la Sección.

Al Dr. Juan Manuel Navarro, al Dr. Mario Ulloa, al Dr. Oscar Cruz, gracias por su orientación profesional y por su amistad.

Al M. en C. Lucio Fragoso, por su orientación profesional y por el apoyo que me brindo durante mi estancia.

Al personal administrativo de la SEPI – ESIA, por su amistad y por el apoyo brindado durante mi estancia en la Sección.

Al Ing. José Abraham Caffani y a la Ing. Rosalía Pérez, por su amistad y por el apoyo brindado.

Al M. en C. José Alfredo Vázquez, por el apoyo brindado durante mi estancia.

DEDICATORIAS

A *Norma Llamas,* por su gran esfuerzo, al ser más que mi madre y convertirse en una de mis mejores amigas. Gracias por el apoyo y por acompañarme en este recorrido, gracias por la paciencia. No encuentro más palabras para agradecerte, simplemente ¡te amo mamá!

A mis hermanas Kenia y Tania, por compartir conmigo grandes momentos que me han hecho llegar hasta este punto en mi vida, por ser mis confidentes y amigas; ¡las quiero! Es un gran privilegio para mí ser su hermana.

A Felipe Leyva mi pareja, mi compañero en este recorrido, gracias por tu apoyo y comprensión, por caminar a mi lado, por el amor que me brindas día a día. Gracias por tu esfuerzo, ¡te amo! ¡Corazón de melón!!

A Juan Cruz, por su esfuerzo y dedicación, ¡te quiero!

A mi niña Nairobi Lu, por ser la luz que ilumina mi vida, por mostrarme que lo único que se necesita para vivir son ganas y amor, por su gran esfuerzo. Gracias por llegar así, como señora gorda jajaja… ¡te adoro!

A mi cuñis Ruperto, por ser parte de mi familia, ¡te quiero!

A mis suegris, por el apoyo que nos brindan, ¡gracias!

A todos los camaradas, a los cuales no acabaría de enumerar, y a mi familia, gracias por los buenos momentos, por compartir conmigo los triunfos y fracasos, por el apoyo que me brindan, por los reventones, jajaja. Gracias por su amistad y cariño, pues esto nutre mi alma y me impulsa cada día. Es necesario que sepan que es para un privilegio compartir mi vida con ustedes, ¡Gracias a todos!

CONTENIDO

Pág.

GLOSARIO DE TÉRMINOS XI

ABSTRACT 1

RESUMEN 2

INTRODUCCIÓN 3

ANTECEDENTES 5

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 8

JUSTIFICACIÓN 8

OBJETIVOS: 9

HIPÓTESIS 9

METODOLOGÍA 9

CAPÍTULO I. GENERALIDADES. 10

I.1. DEFINICIÓN DEL OLEAJE 10

I.2. CARACTERISTICAS BÁSICAS DEL OLEAJE 11

I.3. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE 13

I.3.1. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD RELATIVA 13

I.3.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS OCEÁNICAS 14

I.4. TEORÍAS DEL OLEAJE 17

I.4.1. OLEAJE IRREGULAR 23

I.5. ESPECTROS DE OLEAJE 27

I.5. FENÓMENOS QUE MODIFICAN AL OLEAJE. 34

I.5.1. REFRACCIÓN 34

I.5.2. DIFRACCIÓN 35

I.5.3. ROMPIENTE 36

I.5.4. REFLEXIÓN 38

I.5.5. ASOMERAMIENTO 39

I.6. OBRAS DE PROTECCIÓN 39

I.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ROMPEOLAS 40

I.6.1.1. ARRECIFES ARTIFICIALES. 43

I.6.1.1.1. TIPOS DE ARRECIFES ARTIFICIALES 46

CAPÍTULO II. TRANSMISIÓN DEL OLEAJE 50

Pág.
II.1. ESTUDIOS SOBRE TRANSMISIÓN DEL OLEAJE 50
CAPÍTULO III. MODELO FÍSICO. 58
III. 1. ANÁLISIS DIMENSIONAL 60
III.1.1. CONDICIONES DE SIMILITUD 63
III.2. ESCALAS 65
III.3. EL MODELO 68
III.4. INSTALACIONES 71
III.5. EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN 71
III.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 74
III.6. ENSAYOS 81
III.6.I. OBSERVACIONES DE LOS ENSAYOS 86
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS. 99
IV.1. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN 100
IV.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 101
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 118
V.1. CONCLUSIONES 118
V.2. RECOMENDACIONES 120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 121

LISTA DE FIGURAS

Pág.
Figura 1. Evolución de un perfil de playa genérico. (Shore Protection Manual, 1984) 6
Figura 2. Representación de una onda de Airy. 11
Figura 3. Esquema local de velocidades y aceleraciones. (USACE, 1984) 12
Figura 4. Desplazamientos de las partículas de agua; aguas profundas, intermedias y bajas. (USACE, 1984) 13
Figura 5. Clasificación del oleaje conforme al periodo, según Kinsman (1965) 15
Figura 6. Comparación de ondas en diferentes teorías. (Universidad Europea de Madrid, 2009) 18
Figura 7. Onda solitaria. (Rosales, 2005) 20
Figura 8. Movimiento de las partículas liquidas. (Frias & Moreno, 1988) 21
Figura 9. Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. (Kamphuis, 2000) 22
Figura 10. Superficie del mar. 23
Figura 11. Representaciones del oleaje. 24
Figura 12. Perfil de onda del estado del mar irregular a partir de mediciones. 25
Figura 13. Parámetros del oleaje para un estado de mar aleatorio. 25

Pág.

Figura 14. Croquis del proceso de una onda aleatoria 26
Figura 15. Refracción del oleaje. (C.F.E., 1983)..... 35
Figura 16. De la Difracción (C.F.E., 1983). 36
Figura 17. Rompiente en "Spilling". 37
Figura 18. Rompiente tipo "Plungin". 37
Figura 19. Rompiente tipo "Surging". 38
Figura 20. Rompiente tipo "Collapsing". 38
Figura 21. Asomeramiento del oleaje. 39
Figura 22. Modelo Rectangular (concreto armado). 44
Figura 23. Modelo Jumbo (concreto armado). 44
Figura 24. Modelo Cubo (concreto armado). 44
Figura 25. Neumáticos con muerto de concreto. 45
Figura 26. Modelo con tubos de ferrocemento y abrazaderas de concreto. 45
Figura 27. Reef Ball. 45
Figura 28. Arrecifes de oportunidad. 47
Figura 29. Reef ball. 48
Figura 30. Modulo azteca. 48
Figura 31. Arrecifes modulares artificiales. 49
Figura 32. Parámetros de diseño en un rompeolas sumergido. 57
Figura 33. Transmisión del oleaje en un rompeolas sumergido. 69
Figura 34. Generador de oleaje HR Wallingford. 72
Figura 35. Equipo de cómputo para controlar el generador de oleaje. 72
Figura 36. Ológrafo y amplificador análogo-digital. 73
Figura 37. Sensores de oleaje. 73
Figura 38. Limpieza del amortiguador. 74
Figura 39. Colocación del amortiguador. 75
Figura 40. Corte de bovedillas. 76
Figura 41. Relleno con granzón. 76
Figura 42. Relleno con granzón. 76
Figura 43. Colocación de los niveles. 77
Figura 44. Colado de los tramos. 77
Figura 45. Pintado del canal. 78
Figura 46. Pintado de rocas. 79
Figura 47. Pintado de rocas. 79
Figura 48. Trazo del perfiles. 80
Figura 49. Relleno de núcleo para la estructura con B = 30 m. 80
Figura 50. Relleno de núcleo para la estructura con B = 40 m. 81
Figura 51. Colocación de los elementos de coraza para una B = 40 m. 81
Figura 52. Ensayo 1, Serie 4. 86
Figura 53. Ensayo 3, Serie 4. 87
Figura 54. Ensayo 5, Serie 4. 88

Figura 55. Ensayo 3, Serie 5..... 89
Figura 56. Ensayo 5, Serie 5..... 90
Figura 57. Ensayo 1, Serie 6..... 90
Figura 58. Ensayo 5, Serie 6..... 92
Figura 59. Ensayo 2, Serie 7..... 93
Figura 60. Ensayo 5, Serie 7..... 94
Figura 61. Ensayo 3, Serie 8..... 95
Figura 62. Ensayo 5, Serie 8..... 96
Figura 63. Ensayo 1, Serie 9..... 96
Figura 64. Ensayo 3, Serie 9..... 97
Figura 65. Ensayo 5, Serie 9..... 98

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Clasificación de las ondas por su periodo (según Johnson et. al., 1978) 14
Tabla 2. Fuerzas que generan el oleaje. (Frias & Moreno, 1988)..... 15
Tabla 3. Teorías del Oleaje. (Frias & Moreno, 1988)..... 19
Tabla 4. Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera. (Fuente: USACE, 2002). 42
Tabla 5.Dimensiones de las variables físicas utilizadas en Hidráulica. (C.F.E., 1983) 61
Tabla 6. Comparación de condiciones de similitud. (Vergara, 1995)..... 65
Tabla 7. Escalas en modelos Hidráulicos. (Vergara, 1995)..... 66
Tabla 8. Escala de líneas aplicadas al modelo. 68
Tabla 9. Pesos de roca. 71
Tabla 10. Pesos de roca. 78
Tabla 11. Nombre de los canales y su descripción..... 82
Tabla 12. Coeficiente de correlación para un Rc = 0.5m..... 83
Tabla 13. Coeficiente de correlación para un Rc = 1m..... 83
Tabla 14. Características de las señales utilizadas en los ensayos, (Prototipo). 84
Tabla 15. Datos obtenidos de los ensayos. 99
Tabla 16. Coeficientes de Transmisión..... 100
Tabla 17. Calculo de la longitud de onda. 103
Tabla 18. Calculo del coeficiente de transmisión..... 104
Tabla 19. Valores de la dispersión..... 116
Tabla 20. Correlación de los datos de acuerdo al autor..... 116

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 20 m. 105
Gráfica 2. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 30 m. 106
Gráfica 3. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 40 m. 106
Gráfica 4. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 0.5 m. 107
Gráfica 5. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 1 m. 108
Gráfica 6. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 20 m..... 109
Gráfica 7. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 30 m..... 109
Gráfica 8. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 40 m..... 110
Gráfica 9. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 0.5 m..... 111
Gráfica 10. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 1 m..... 112
Gráfica 11. Kt medidos vs Kt calculados, para Goda 1969. 112
Gráfica 12. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer 1990. 113
Gráfica 13. Kt medidos vs Kt calculados, para d´Angremond *et. al.* 1996. 114
Gráfica 14. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer 2000. 114
Gráfica 15. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer *et. al.* 2004. 115
Gráfica 16. Kt medidos vs Kt calculados, para todos los autores..... 117

GLOSARIO DE TÉRMINOS

K_t	Coeficiente de transmisión, adimensional.
R_c	Sumergencia (m).
H_i	Altura de ola incidente (m).
α	Ángulo del talud lado mar (grados).
β	Ángulo del talud lado tierra (grados).
H_s	Altura de ola significante (m).
L	Longitud de onda (m).
d_{50}	Diámetro medio de la roca (m).
g	Constante de gravedad g = 9.81 (m/seg^2).
π	Número π = 3.1416
T_p	Periodo pico (seg).
ξ	Número de Iribarren, adimensional.
H_t	Altura de ola transmitida (m).
h	Profundidad de desplante al pie de la estructura (m).
A_r	Área de la sección del rompeolas (m^2).
R_u	Run–up (m).
L_0	Longitud de la onda en aguas profundas (m).
S_{op}	Parámetro de rompiente.
d	Profundidad de desplante de la estructura (m).
f	Frecuencia del oleaje.
f_p	Frecuencia pico del oleaje.
$\bar{f}$	Frecuencia media del oleaje.
m_0	Momento de orden cero.
m_2	Momento de orden dos.

H_{m_o} Altura de la ola del momento de orden cero (m).

U Velocidad del viento (m/seg).

T_s Periodo significante (seg).

H_s Altura de ola significante (m).

x Fetch (Km).

ρ_a Densidad del aire, adimensional.

τ_o Fricción tangencial del viento.

T_{02} Periodo medio de orden dos (seg).

f_z Frecuencia media del oleaje.

T_p Periodo pico espectral (seg).

γ Factor de forma pico del espectro, adimensional.

λ Parámetro de forma espectral, adimensional.

K Número de onda, adimensional.

h Profundidad del agua (m), para el análisis espectral.

f_{01} Frecuencia modal del oleaje.

ABSTRACT

Mexico has an extensive coast line, which represent an important natural wealth that can be used in various productive sectors, such as fishing, freight and tourism, among others. Because the coast is one of the most dynamic ecosystems on our planet, it is affected by various environmental factors, like waves that constantly erode and change its shape, a main cause of sediment transport. Because of this it is important to research about coast line preservation.

This thesis describes the protection of beaches using artificial rubble mound reefs, by using a reduced physical model, which is proposed as an option for achieving the conservation and restoration of coastal areas for our country.

The main objective of this study was to determine the behavior of the transmission of waves for an artificial reef whith a trapezoidal cross section. Slopes of 2:1 on the sea side and a slope of 1.5:1 on the land side were used. The crest of this section was modified using three different lengths of 20, 30 and 40 meters. Also for these three conditions, we applied two differents submergence of a half a meter and a meter.

Tests were conducted in a narrow channel of waves, under irregular wave action. From the data obtained in the trials, we performed calculations of wave transmission coefficients and compared these with those obtained from the formulations of Goda, Van der Meer, and d'Angremond. With these values were made charts and graphs that helped the interpretation of the phenomenon under study.

We conclude that the structure that works more efficiently to reduce the transmission of the incident wave has a crest width of 40 m using a submergence of half a meter.

RESUMEN

México cuenta con una gran extensión de costas, que representan una importante riqueza natural que puede ser explotada en diversos sectores productivos, como: la pesca, el transporte de mercancías y el turismo, entre otros. Debido a que las costas es uno de los ambientes más dinámicos de nuestro planeta, se ven afectadas por diversos factores ambientales, entre los que se encuentra el oleaje, que continuamente erosiona y modifica su forma, a causa del transporte de sedimentos. Lo anterior marca la necesidad de realizar trabajos de investigación que traten sobre su preservación.

En la presente tesis se describe la opción de utilizar arrecifes artificiales de enrocamiento para la protección de playas, a través de un modelo físico reducido, el cual se propone como opción para lograr la conservación o recuperación de las zonas costeras de nuestro país.

El objetivo principal del trabajo fue determinar el comportamiento de la transmisión del oleaje, en una sección de arrecife artificial de tipo trapezoidal, con una pendiente lado mar de 2:1 y una pendiente lado tierra de 1.5:1. En dicha sección se modificó el ancho de coronamiento para tres longitudes diferentes que fueron de 20, 30 y 40 metros. Así mismo para estas tres condiciones de ancho de coronamiento, se aplicaron dos sumergencias diferentes, una de medio metro y otra de un metro.

Las pruebas fueron realizadas en un canal angosto de oleaje, bajo la acción de oleaje irregular. De los datos obtenidos en los ensayos, se realizaron cálculos de los coeficientes de transmisión del oleaje, y se compararon con los obtenidos de las formulaciones de Goda, Van der Meer, y d´Angremond. Con estos valores se realizaron tablas y gráficas que ayudaron a la interpretación del fenómeno de estudio.

Se concluye que la estructura que trabaja de manera más eficiente al reducir la transmisión del oleaje incidente es la que tiene un ancho de coronamiento de 40m, para una sumergencia de medio metro.

INTRODUCCIÓN

Las costas son de los ambientes más dinámicos de nuestro planeta, y estas se ven afectadas por diversos factores ambientales entre los que se encuentra el oleaje, que continuamente erosiona y modifica su forma, debido al transporte de sedimentos. Debido a ello y al potencial productivo con el que cuentan las costas de nuestro país, en el presente trabajo se aborda el estudio de la transmisión del oleaje en arrecifes artificiales de enrocamiento, a través de un modelo físico reducido, como opción para lograr la conservación o recuperación de las zonas costeras de nuestro país.

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, en este trabajo se desarrollaron cinco capítulos:

En el *capítulo I. Generalidades*; se abordan conceptos básicos para tratar el fenómeno en estudio, que es la transmisión del oleaje. Aquí destacan la definición y clasificación del oleaje, las teorías existentes para el estudio del oleaje, los fenómenos que lo modifican; entre otros conceptos necesarios para el desarrollo de esta investigación. En este capítulo también se define lo que es un arrecife artificial y se presenta su clasificación.

En el *capítulo II. Transmisión del Oleaje*; se abordan los estudios realizados por diferentes autores. Se destacan los estudios en modelos físicos para la transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos, ya que estos son los que se aplican en arrecifes artificiales.

Para cumplir los objetivos y comprobar la hipótesis planteada en este trabajo de investigación, fue necesaria la construcción, calibración y operación de un modelo físico reducido, lo cual se describe en el *capítulo III. Modelo.*

Una vez que se construyó y calibro el modelo, se llevaron a cabo los ensayos, procediéndose a realizar el procesamiento de los datos que fueron recabados

durante las pruebas, lo cual se presenta en el capítulo *IV. Análisis de resultados*, aquí mismo se presentan los resultados en forma de tablas y gráficas.

Partiendo de los resultados obtenidos de los ensayos, se realizaron una serie de conclusiones y recomendaciones, las cuales se presentan en el último capítulo de esta tesis, el cual lleva el nombre de: capítulo *V. Conclusiones y Recomendaciones*.

ANTECEDENTES

Los sedimentos de las playas son movilizados fundamentalmente por la rompiente del oleaje y por las corrientes que las propias olas generan, tanto a lo largo de la costa como en forma perpendicular a la misma. Estas corrientes, dentro de la zona de rompientes, usualmente generan un movimiento de sedimentos más importante que el generado por las corrientes marinas, por lo que debido a su mayor capacidad para transportar sedimentos, llegan a causar erosión costera. Por tal motivo las costas son uno de los ambientes más dinámicos de nuestro planeta, y se ven afectadas por diversos factores ambientales (oceanográficos) entre los que como ya mencionamos destaca el oleaje.

El perfil de una playa en equilibrio es producto del transporte y depósito de sedimentos en la costa, y por otro lado, del arrastre de sedimentos hacia la zona exterior de la playa. El movimiento del sedimento descrito para dicho perfil, es producido por el oleaje que se propaga desde aguas profundas. Aquí, el oleaje disipa su energía en el trayecto hacia la costa, generando corrientes longitudinales y transversales. Una consecuencia de dicha disipación es la erosión costera, que se acentúa durante una tormenta severa. Debido a que se genera una sobre – elevación por tormenta (storm surge), lo cual permite el impacto de olas de mayor tamaño sobre la playa. Durante estas condiciones el sedimento es sacado de la playa, transportado hacia la zona exterior y depositado en forma de una barra mar adentro (perfil de playa de "invierno").

En ausencia de tormentas, normalmente las olas restituyen el material erosionado haciendo desaparecer la barra y definiendo un perfil más suave o de "verano" (figura 1). (USACE, 1984) (Cruz, 2010)

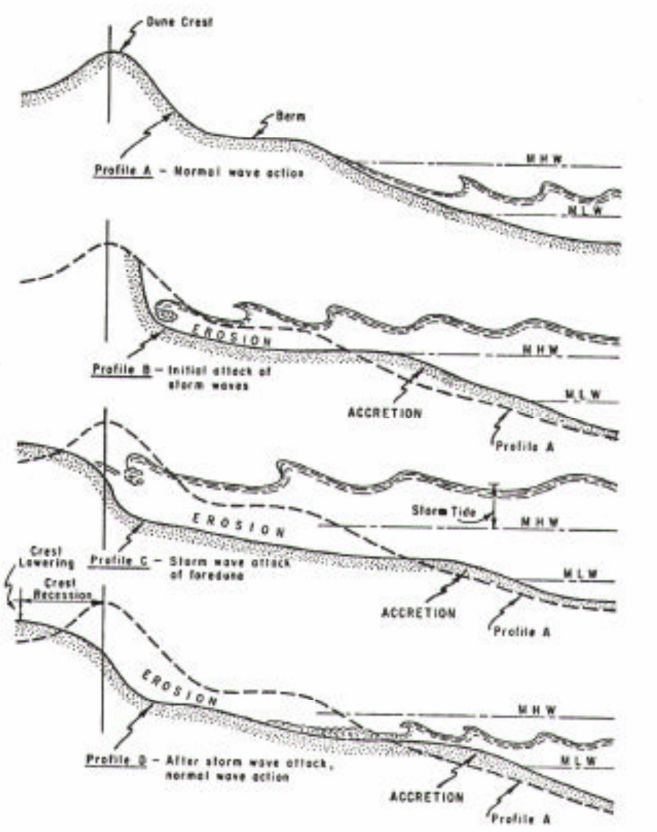


Figura 1. Evolución de un perfil de playa genérico. (Shore Protection Manual, 1984)

En resumen, las olas generan corrientes en dirección hacia la costa y hacia el mar, y que también trasladan sedimentos en lo que se denomina como transporte de sedimentos normal a la costa.

Las teorías que analizan el fenómeno del oleaje indican que las olas se acercan a la costa luego de transformar su altura y longitud de onda en la plataforma interior, para posteriormente romper y trasferir cantidad de movimiento a la columna de agua y así disipar su energía.

La transferencia de cantidad de movimiento produce un cambio en el nivel medio del mar dentro de la zona de rompientes. Esta sobreelevación o "wave setup" es proporcional a la altura de la ola por lo que es más intenso durante las tormentas.

La rompiente del oleaje genera corrientes paralelas a la costa en la medida que las olas rompan formando un ángulo con la línea de costa. Estas corrientes a lo largo de la costa (*longshore currents)* arrastran sedimentos en gran cantidad y son responsables de cambios importantes en las costas.

La rompiente del oleaje pone en movimiento sedimentos finos, arena y hasta cantos rodados, debido a la turbulencia propia de las olas cuando rompen. Las corrientes asociadas a las olas paralelas a la costa, transportan los sedimentos principalmente por arrastre, a este fenómeno se le denomina transporte de sedimentos a lo largo de la costa (*Longshore Sediment Transport)*.

Dado que las condiciones oceanográficas que afectan las playas dependen fuertemente de la meteorología es correcto decir que "las playas cambian tanto como lo hace el tiempo".

Debido a este fenómeno, el presente trabajo plantea el estudio de los arrecifes artificiales de enrocamiento, como una posibilidad para la disminución de la energía del oleaje que incide sobre las costas, con la intención de generar una zona de calma que disminuya la erosión y que al mismo tiempo propicie la regeneración en las costas. (USACE, 1984) (Cruz, 2010)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

México es un país que cuenta con una gran extensión de costas, estas tienen una extensión de 11, 592.77 km en su parte continental, sin incluir las islas (INE, 2007). Esta es una importante riqueza natural que puede ser explotada en diversos ámbitos productivos, entre los que se encuentran, la pesca, transporte de mercancías y turismo, entre otros. Este último es uno de los sectores que más captación de divisas aportan al país, por lo que resulta de gran importancia la preservación de nuestras costas, evitando su erosión, es decir, la pérdida de playas, que como consecuencia trae problemas en el sector turístico y al mismo tiempo repercute en la economía nacional.

En esta investigación se plantea la opción de utilizar arrecifes artificiales permeables como estructura de protección de playas, para así generar la disminución de las características de la ola (altura y periodo), propiciando zonas de calma en las que el transporte de sedimentos sea menor provocando la conservación de las playas, así como su recuperación.

JUSTIFICACIÓN

Los arrecifes artificiales han sido utilizados con éxito en algunos países de Europa y Sudáfrica, para la recuperación o formación de playas, así como en la protección de caminos e infraestructura.

Con base a lo anterior, esté trabajo de investigación tiene como objetivo principal, el estudio de los arrecifes artificiales permeables para proteger y preservar las playas Mexicanas, como Cancún. La intención fue determinar si este tipo de obras logran amortiguar parcialmente el oleaje y reducir de esta forma su energía, para así disminuir la altura de ola, creando una zona de calma, al actuar como obstáculo parcial en la trayectoria del oleaje.

Debido a que en nuestro país existe una gran cantidad de costas, que propician una captación significativa de divisas, es importante buscar soluciones técnicas que sean factibles y eficientes para lograr la conservación o recuperación de las zonas costeras de nuestro país.

OBJETIVOS:

1. Experimentar a través de un modelo físico reducido, el fenómeno de la transmisión del oleaje en secciones de arrecifes artificiales constituidos con enrocamiento.
2. En base al estudio optimizar el dimensionamiento de los arrecifes artificiales.

HIPÓTESIS

A través del empleo de un modelo físico reducido de arrecifes artificiales se pueden dimensionar estas estructuras para disminuir la erosión en las costas de México, al producir una zona de calma por el efecto del obstáculo parcial que este tipo de estructuras representa, con la consecuente disminución de la altura de ola transmitida.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo de la investigación es la siguiente:

1. Revisión del estado del arte:
   - Bibliotecas.
   - Publicaciones especializadas.
   - Bancos de información de Internet.
2. Análisis de la bibliografía revisada para seleccionar los documentos de interés.
3. Construcción, Calibración y Ensayo del modelo físico reducido de secciones de arrecifes artificiales de enrocamiento, que se llevó a cabo en el canal de oleaje angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco.
4. Análisis y procesamiento de los resultados obtenidos en el estudio.
5. Estructuración de conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

Este capítulo nos introduce a la dinámica de las olas, aquí se abordan los conceptos principales inherentes al comportamiento y tratamiento de este fenómeno.

Las olas representan un fenómeno típico de la Hidráulica Marítima y significan desde el punto de vista de la Ingeniería de Costas, de Puertos y de las Vías Navegables uno de los fenómenos físicos más relevantes.

Dentro de este contexto las olas interesan tanto en lo referente a su acción dentro de un recinto portuario y canales de acceso, como el que se produce sobre las estructuras de protección, típicamente los rompeolas, o en las costas de mares y estuarios.

Ya que las olas cubren un amplio espectro de frecuencias y sus características varían con el tiempo, implica que en todos los casos es necesario para su análisis tener en cuenta este proceso. Es por ello que la medición de un tren de olas en un punto determinado del mar u océano, es representativa solamente de ese instante de medición. En consecuencia, para conocer las características de las olas en un lugar dado, es necesario realizar mediciones sistemáticas por largos periodos, que permitan efectuar el análisis estadístico de su variabilidad en el tiempo. (Petroni, 2005).

I.1. DEFINICIÓN DEL OLEAJE

El oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre del agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida. El oleaje se define como el conjunto de ondas que se propagan en la superficie libre del agua. La más constante de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar; esta generación es producto de la variación de temperatura transmitida del agua al viento, provocando con esta variación el movimiento en las masas de aire, generándose corrientes de aire. Estas corrientes de aire soplando sobre el agua, le transfieren un poco de energía

al vibrar en la frontera entre ambos fluidos resultando de ello una onda, denominada ola de viento. (Silva, 2005) (USACE, 1984) (Ocaña, 2001).

I.2. CARACTERISTICAS BÁSICAS DEL OLEAJE

Las olas como ya se mencionó, son fluctuaciones del nivel del agua, acompañadas por las corrientes locales, aceleración y fluctuación de la presión. Su forma más simple es sinusoidal la cual se utiliza aquí para definir las propiedades más básicas del oleaje. (Kamphuis, 2000).

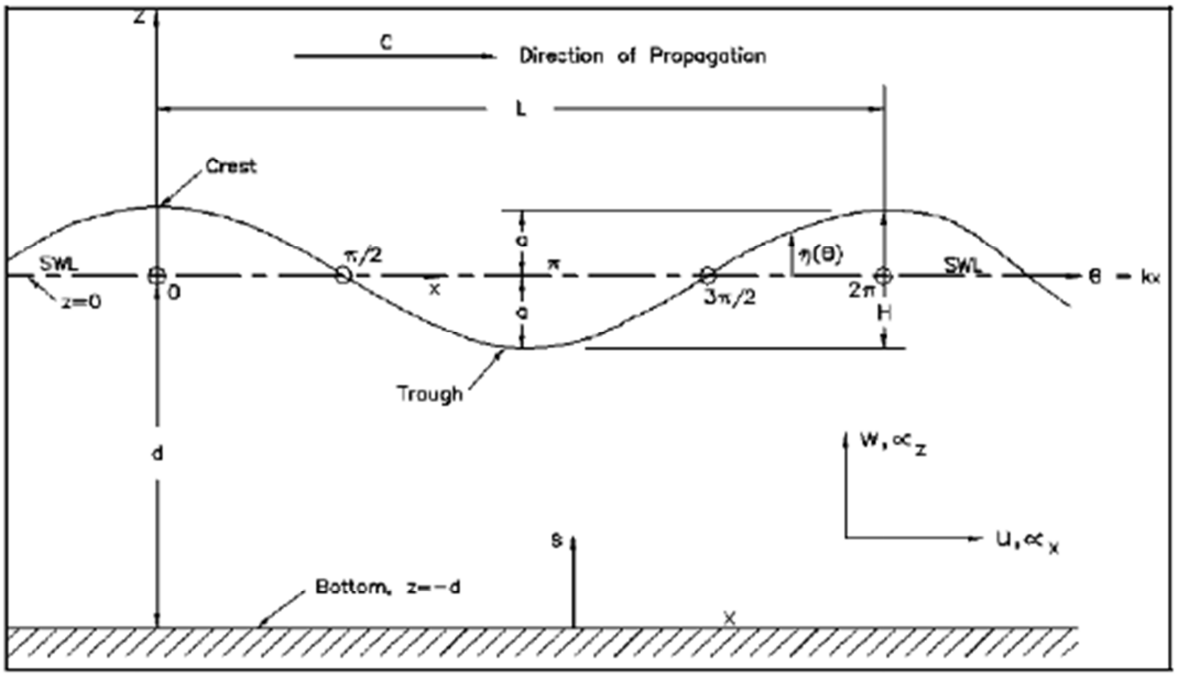


Figura 2. Representación de una onda de Airy.

Una onda progresiva puede ser representada por las variables x (espacial) y T (temporal) o por su combinación (de fase), definida como θ = kx - ωt, donde se describen ω y k en los párrafos siguientes. El valor de θ varía entre 0 y 2π. La figura 2 muestra los parámetros que definen una onda simple, y progresiva a medida que pasa un punto fijo en el océano. Una onda simple, puede ser completamente caracterizada por la altura de ola “H”, longitud de onda “L” y la profundidad del agua “d”. (USACE, 2002).

La altura de ola “H” se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle o seno de una ola determinada; por su parte la longitud “L” es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos; el periodo “T” se define como el tiempo que tarda en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivamente; la celeridad de la onda “C” es la velocidad con la cual se desplaza la ola, conocida como velocidad de fase o celeridad de onda, $C = L / T = \omega / k$, este parámetro se puede visualizar en la figura 2.

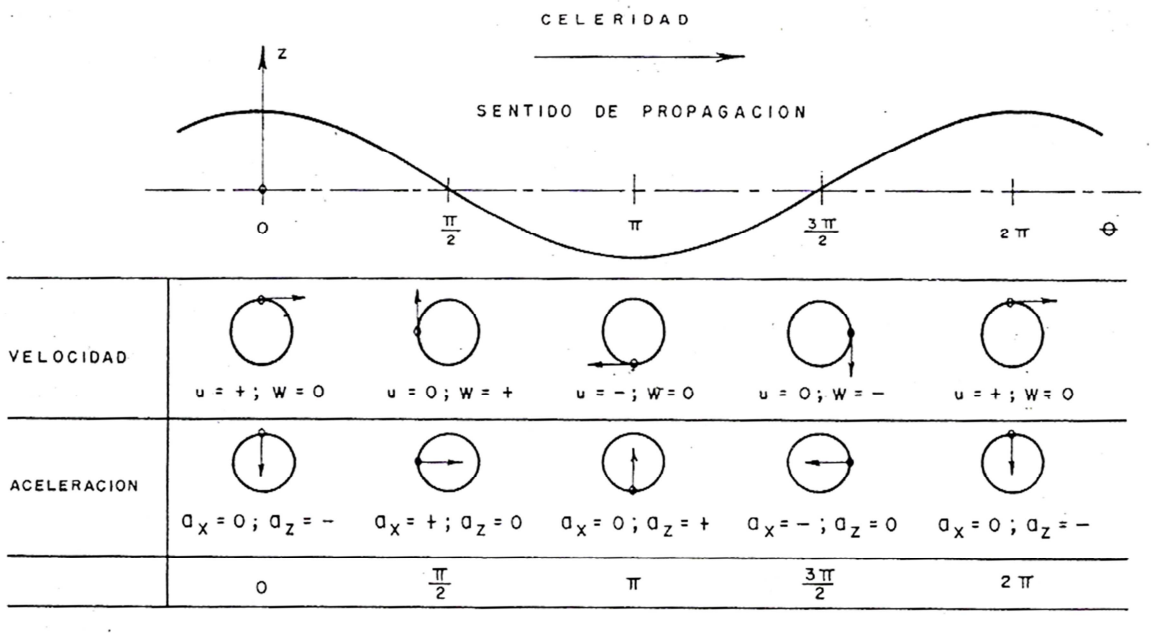


Figura 3. Esquema local de velocidades y aceleraciones. (USACE, 1984)

Otros parámetros de onda incluyen a $\omega = 2\pi / T$ la frecuencia angular, el número de onda $k = 2\pi / L$, la esbeltez de la ola $\varepsilon = H / L$, la profundidad relativa d / L, y la altura relativa H / d.

El desplazamiento que describen las partículas de agua a diferentes profundidades puede observarse en las figuras 3 y 4. (USACE, 2002) (Frias & Moreno, 1988) (Silva, 2005) (Cruz, 2010).

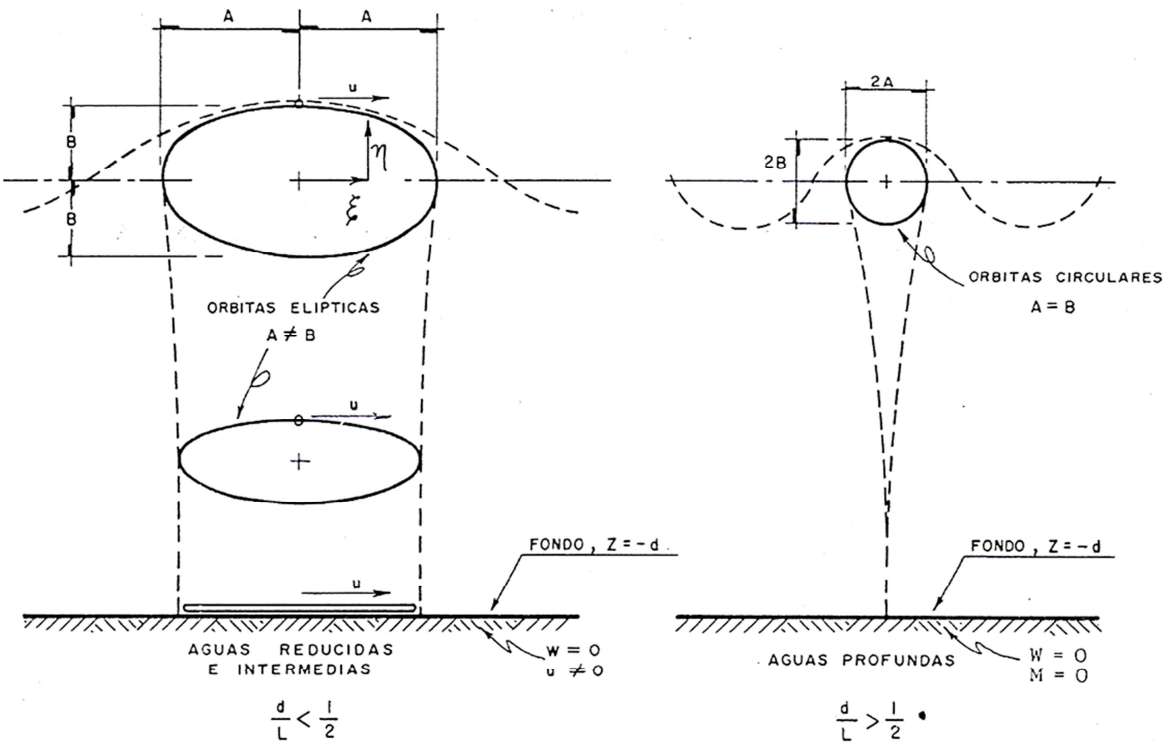


Figura 4. Desplazamientos de las partículas de agua; aguas profundas, intermedias y bajas. (USACE, 1984)

I.3. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE

Se puede considerar en base a las ideas planteadas que existen al menos tres formas de clasificar el movimiento oscilatorio que se presenta en el mar, las cuales corresponden a la profundidad relativa sobre la cual se propaga, la fuerza principal que lo genera y su periodo de onda. A continuación se describen con cierta profundidad cada una de estas clasificaciones. (Silva, 2005) (Ruiz, 2010).

I.3.1. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD RELATIVA

Teóricamente, el oleaje que se propaga en cualquier profundidad relativa d / L_0, frecuentemente se simplifica asumiendo que las ondas solo son dependientes de algunas de sus características como son: longitud (L), periodo (T) y profundidad (d). Esto conlleva a clasificar el oleaje dentro de tres rangos de aproximación según su profundidad relativa:

- *Aguas profundas*: Cuando la profundidad relativa d / L_0, es igual o mayor a la mitad de la unidad ($d / L_0 > 0.5$), el oleaje no experimenta modificaciones debidas a la profundidad.
- *Aguas poco profundas (aguas intermedias)*: Cuando la profundidad relativa d / L_0, se encuentra entre un rango que va de una vigésima parte de la unidad a la mitad de está ($0.5 < d / L_0 < 0.05$), el oleaje comienza a verse afectado por la acción del fondo.
- *Aguas someras:* Cuando la profundidad relativa d/ L_0, es igual o menor que una vigésima parte de la unidad ($d / L_0 < 0.05$), el oleaje está completamente controlado por la profundidad del agua.

Visto de otra forma, la clasificación del oleaje se puede realizar también utilizando el concepto de celeridad, que es una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda. (USACE, 2002)

I.3.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS OCEÁNICAS

Las ondas que componen un registro de oleaje son de una amplia gama de periodos, alturas y longitudes. De acuerdo con su periodo, fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente portan, se pueden distinguir los siguientes tipos de ondas, que se presentan en la tabla 1 y la figura 5.

Tabla 1. Clasificación de las ondas por su periodo (según Johnson et. al., 1978)

Nombre	Periodo	Longitud	Altura	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 10 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tension superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	centimetros	centimetros	Viento	Tension superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	de metros a cientos de metros	de centimetros a 15 metros	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s 30 min	100 a 200 m	pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala Planetaria	1 a 5 metros	Sismo, derrumbes, atraccion de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Mas de 24 h	-	0 a 12 metros	Oscilaciones climaticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

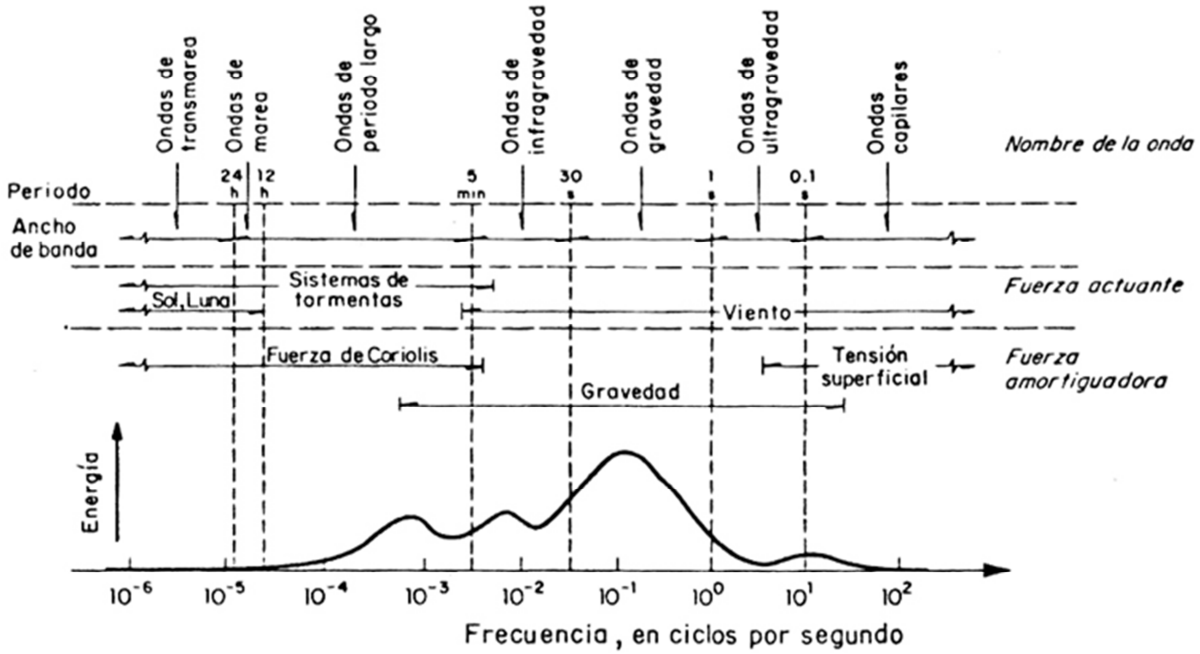


Figura 5. Clasificación del oleaje conforme al periodo, según Kinsman (1965)

Como se observa en la tabla 1 y la figura 5, las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas; una clasificación usa las fuerzas que generan al oleaje, y estas se resumen en la tabla 2, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica. Así por ejemplo:

Tabla 2. Fuerzas que generan el oleaje. (Frias & Moreno, 1988)

Por las fuerzas que las rigen	
Por las causas directas que la generan	Viento Maremotos
Por la duración de la acción de las fuerzas	Oscilación Forzada (*viento*) Oscilación libre
Por su frecuencia	Periódicas Solitarias
Por su desplazamiento	Estacionarias (*clapotis*) Traslación (*desplazamiento de masa*) Progresivas (*sin desplazamiento de masa*)

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan oleaje local y distante (sea and swell).

- Los maremotos o terremotos generan grandes ondas conocidas como *Tsunamis*, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.
- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas.

En ingeniería oceanográfica, se llama área de generación *(fetch)* a la región donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie libre del agua. Ahí el fenómeno es completamente aleatorio. El oleaje se propaga en diferentes direcciones, aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación. (Universidad de Cantabria, 2000)

De acuerdo con su génesis, se suelen distinguir dos tipos extremos de oleaje, entre las cuales existen un sin número de estados intermedios. Se denominan como, sea and swell, o su traducción al español como oleaje local y oleaje distante, respectivamente. (USACE, 2002)

- *Oleaje local o sea*: este tipo de oleaje se produce en la zona de generación de altamar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es muy difícil observar un periodo bien definido.
- *Oleaje distante o swell*: este es cuando el oleaje sale de la zona de generación y se propaga hacia la costa, en este trayecto hacia la costa el oleaje se modifica y adquiere características como longitud onda, altura de ola y periodo.

I.4. TEORÍAS DEL OLEAJE

El análisis teórico de la generación de oleaje se inicia a finales del siglo XVIII y principios del XIX, cuando una serie de investigadores sustentan varias teorías acerca de la forma y relación de las características del oleaje. (Bustamante et.al, 1976) (Silva, 2005).

Las teorías que describen el oleaje son aproximaciones a la realidad. Pueden describir bien aquellos fenómenos cuyas condiciones satisfagan las acepciones hechas en su derivación. Asimismo, pueden no describir otros fenómenos que violen esas acepciones. Al adoptar una teoría, ha de asegurarse de que el fenómeno de interés está descrito razonablemente bien por la teoría adoptada; la protección de las zonas costeras, que es uno de los objetivos del estudio del oleaje, depende de la habilidad para predecir los perfiles de la superficie del mar y movimientos del agua, así como la precisión de esas aproximaciones.

Como ya se mencionó con anterioridad, el oleaje se caracteriza por ser irregular y aleatorio, además de desarrollarse en tres dimensiones; por lo que su descripción matemática presenta ciertas dificultades. Sin embargo, se han desarrollado varias teorías para analizar matemáticamente el fenómeno, mismas que han ido evolucionando desde que hicieron su aparición. (Frias & Moreno, 1988).

Los principales iniciadores son Laplace (1779), que publico una teoría muy semejante a la hoy admitida, pero poco conocida de los especialistas, debido a que forma parte de sus estudios en otras disciplinas científicas, y Newton que formo su propia teoría, aunque presenta la dificultad de ser aplicable solo en casos muy particulares.

A pesar de sus brillantes antecesores, se considera como iniciador a Franz Von Gertsner (1802), que es el primero en elaborar un estudio teórico bastante cercano a la realidad, pues consideró en sus estudios una masa liquida de profundidad infinita, que no es sino un caso particular de las ecuaciones generales para una profundidad cualquiera. (Bustamante et.al, 1976).

En épocas posteriores se inician y aparecen muchos y variados estudios al respecto: Krumme (1911); Cornish (1912 – 1934); Defant (1929); Thorade, que en 1931, presenta una revisión a los estudios teóricos de las olas y hace una compilación de la literatura al respecto que cubre de 1687 hasta 1930; Patton y Marmer (1932) ; Lamb (1932) ; Horikawa (1978); Sarpkaya e Isaacson (1981); Dean y Dalrymple (1984); Dingemans (1997); Kinsman (1965); Ippen (1966); en la figura 6, es posible apreciar en qué tipo de Teorías trabajaron los autores antes mencionados.

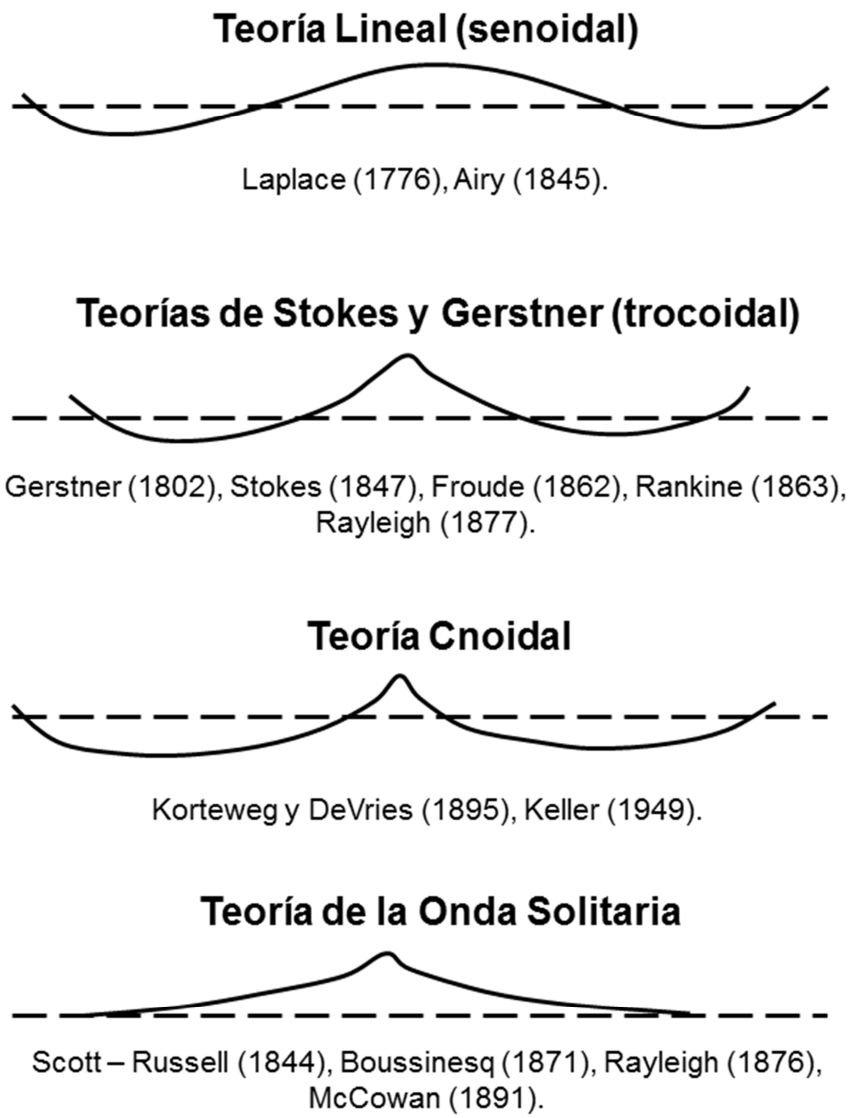


Figura 6. Comparación de ondas en diferentes teorías. (Universidad Europea de Madrid, 2009)

De todos los estudios realizados por los diversos autores, las teorías más representativas se muestran en la tabla 3. (Bustamante et.al, 1976) (Kamphuis, 2000).

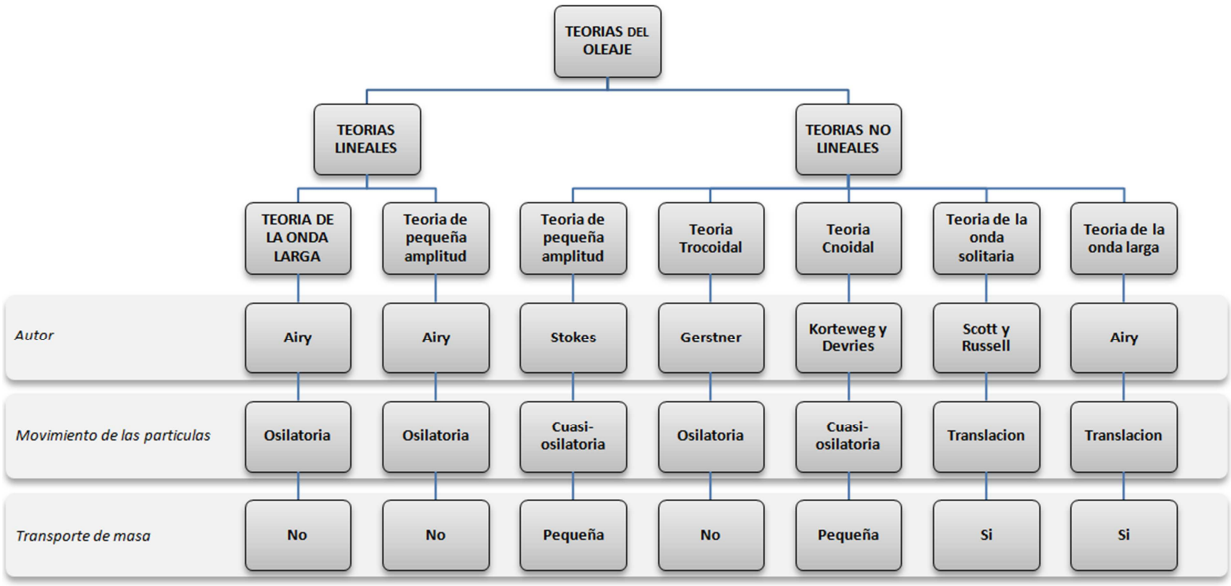


Tabla 3. Teorías del Oleaje. (Frias & Moreno, 1988)

Como se puede observar en la tabla 3, existen dos grupos para clasificar las teorías del oleaje, las cuales son: Teorías lineales y no lineales.

Dentro del grupo de las Teorías lineales, se encuentra la teoría más clásica, que es la desarrollada por Airy en 1845, se denomina “Teoría lineal de pequeña amplitud”, siendo su importancia notable debido a que se ajusta bastante bien al comportamiento real de las olas cuando se encuentran en profundidades infinitas, siendo además de fácil aplicación.

Dentro de la clasificación de las Teorías no lineales, se encuentran las siguientes: en 1802 Gerstner desarrollo la “Teoría Trocoidal” que fue la primera en considerar ondas de amplitud finita; para describir el perfil de la onda se considera adecuada, dejando mucho que desear en cuanto al movimiento orbital de las partículas. Por su parte Stokes en 1880 estableció una teoría, también de amplitud finita, la cual en sus aproximaciones de 3° y 4° orden describen ad ecuadamente el oleaje del mar profundo.

Las teorías mencionadas no presentan validez en aguas someras ya que no consideran la influencia del fondo del océano sobre el perfil de las ondas. La teoría de Korteweg o cnoidal (1895) merece especial mención en este sentido ya que es la que mejor define el funcionamiento ondulatorio en profundidades someras, aunque su principal obstáculo lo representa la dificultad práctica para su aplicación.

La teoría cnoidal tiene su límite de aplicación cuando se acerca la rompiente de la ola, en cuyo caso la teoría de la onda solitaria ofrece una buena aproximación y su manejo es relativamente sencillo.

La teoría de la onda solitaria desarrollada por Scott - Russell (1844) es aplicable cuando la ola se encuentra en el límite de la rompiente. Este tipo de onda es el caso de una onda cnoidal, pero su característica principal es que es una onda progresiva que se desplaza prácticamente sobre la superficie, es decir, la onda solitaria siempre está por encima del nivel medio del mar, como se observa en la figura 7. (Rosales, 2005)

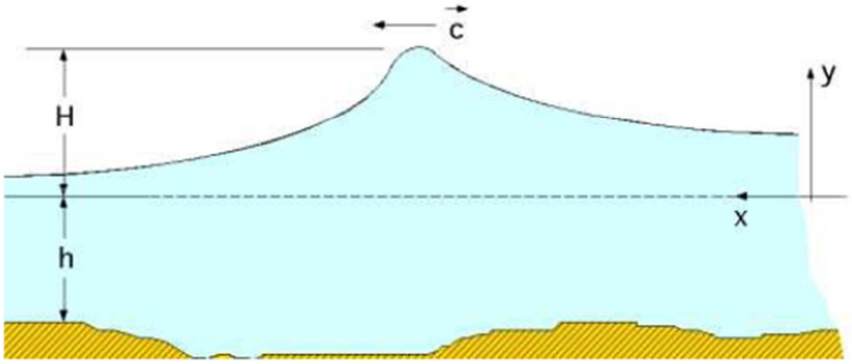


Figura 7. Onda solitaria. (Rosales, 2005)

La teoría que se aplica para oleaje que se encuentra en los límites entre la rompiente y las aguas de transición, es la teoría llamada *Función de corriente*. Esta teoría es una solución numérica a las ecuaciones hidrodinámicas que describen el movimiento del oleaje, siendo esta teoría similar a la de Stokes de orden superior.

En función del movimiento de las partículas liquidas las teorías se pueden agrupar en tres grupos (figura 8):

1. Oscilatorias: la partícula liquida describe orbitas cerradas (por ejemplo trocoidal).
2. Cuasi – oscilatorias: orbitas no cerradas con ligero movimiento neto en algún sentido o con pequeños desplazamientos de masas (por ejemplo teoría cnoidal).
3. De translación: el movimiento orbital es una translación con movimiento de masa; fenómeno típico de una ola rompiente (teoría de la onda solitaria).

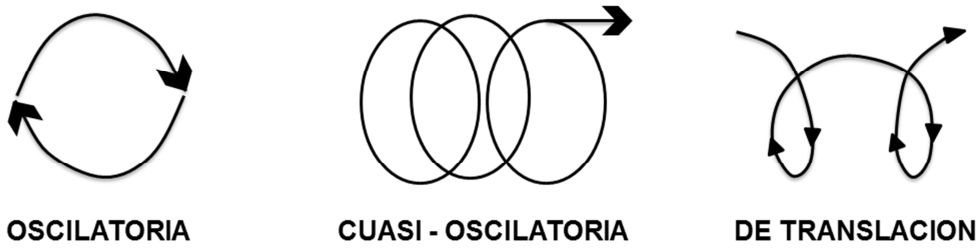


Figura 8. Movimiento de las partículas liquidas. (Frias & Moreno, 1988)

Le Méhauté, fue un investigador que se dio a la tarea de graficar la zonas de aplicación de cada teoría, basándose en los parámetros de altura de la ola (H), periodo del oleaje (T), profundidad (d) y gravedad (g), el gráfico de Le Méhauté (1976) la figura 9, muestra las áreas de validez para las diferentes teorías del oleaje. (Universidad Europea de Madrid, 2009), (Frias & Moreno, 1988), (Aranda, 2004).

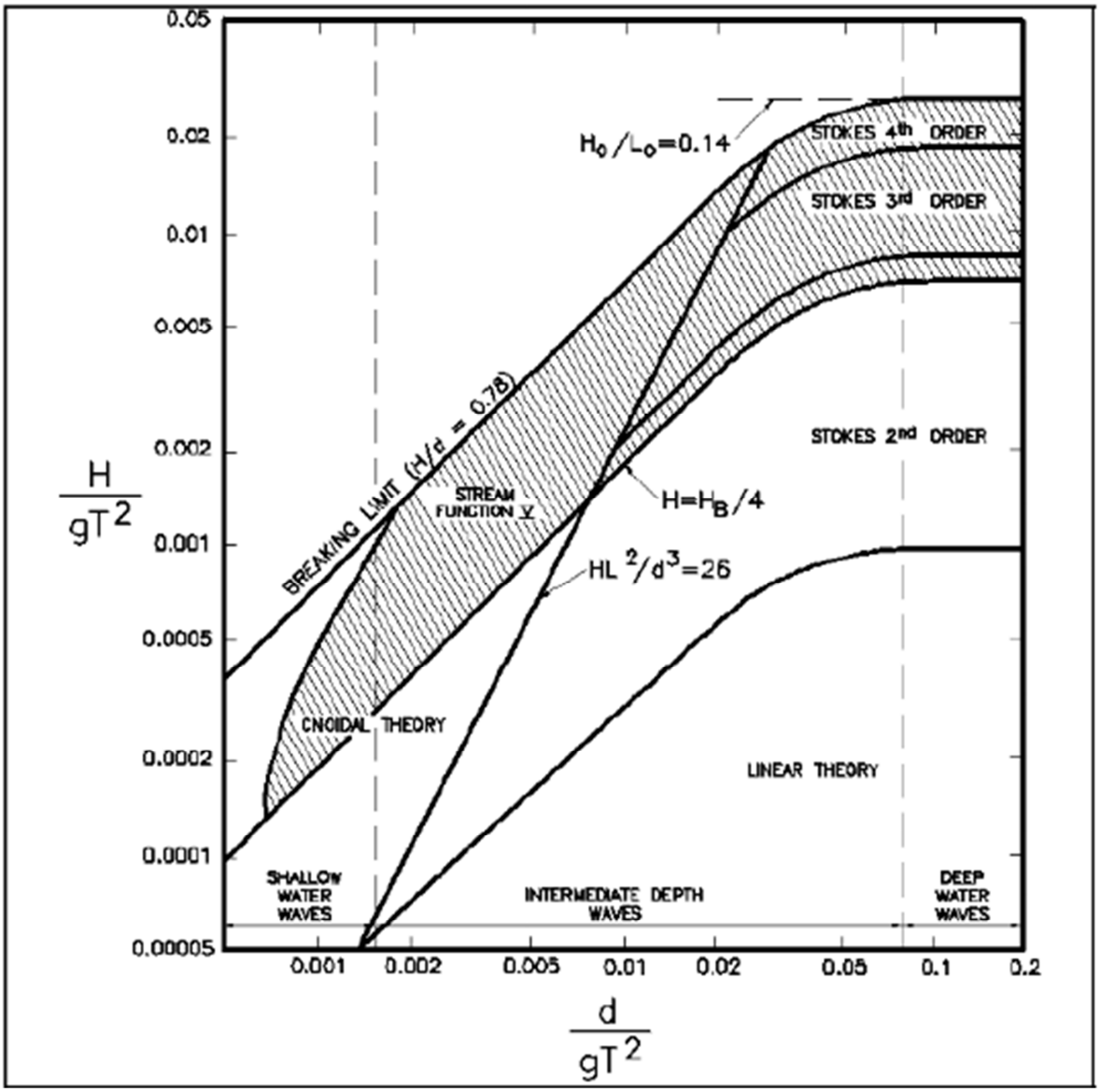


Figura 9. Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. (Kamphuis, 2000)

I.4.1. OLEAJE IRREGULAR

En la primera parte de este capítulo, las teorías del oleaje mencionadas suponen que las olas en la superficie del mar son casi sinusoidales, esto es, con altura, periodo y dirección constante (es decir, monocromáticas). Pero observaciones visuales de la superficie del mar (figura 10) y mediciones indican que la superficie del mar está compuesta de ondas de distintas alturas y periodos en movimiento, en diferentes direcciones. Una vez que se reconoce la variabilidad fundamental de la superficie del mar, es necesario para tratar las características de la superficie del mar hacerlo en términos estadísticos. Esto complica el análisis, pero describe de manera más realista la superficie del mar. Por lo que el termino *Oleaje irregular* puede ser usado para denotar el estado natural del mar en donde se espera que las olas tengan una variabilidad estadística, en contraste con las olas monocromáticas, donde sus características se asumen como constantes. (USACE, 2002)



Figura 10. Superficie del mar.

La superficie del océano es una combinación de diversos componentes de las ondas. Estos componentes individuales son generados por el viento en diferentes regiones del océano y se propagan al punto de observación. Por lo que si se hacen mediciones en un punto fijo del mar no se repetirían los perfiles de onda (figura 11), siendo el registro de la superficie de la onda más bien irregular y

aleatoria (figura 12). Aunque de esta forma pueden identificarse olas individuales, existe una significativa variabilidad en el periodo y altura de una ola a otra. En consecuencia, las definiciones de altura de ola, periodo y duración deben ser estadísticas y simplemente indican la severidad de las condiciones del oleaje. (USACE, 2002)

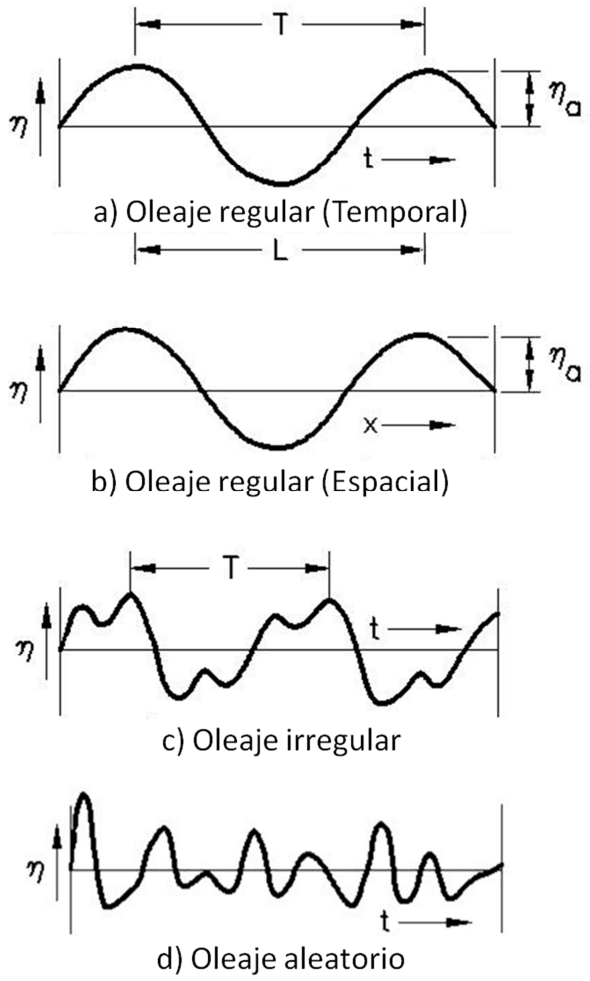


Figura 11. Representaciones del oleaje.

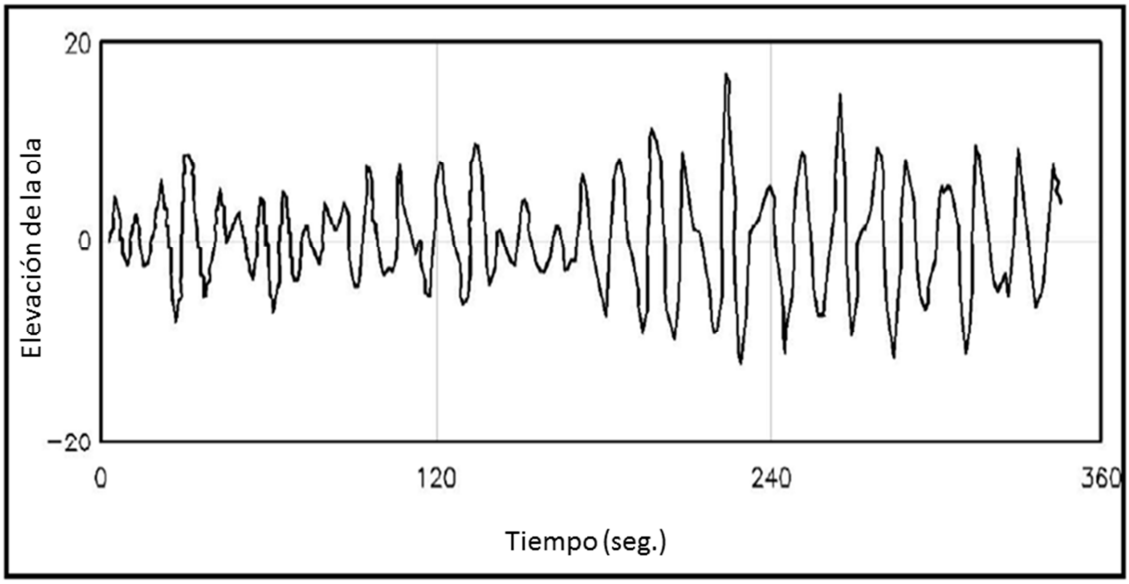


Figura 12. Perfil de onda del estado del mar irregular a partir de mediciones.

Las características importantes de los registros de campo, es decir, los parámetros de la onda que se utilizan para describir el oleaje irregular se definen en las figuras 13 y 14. El periodo pico y la dirección dominante son la media de las olas que caracterizan la periodicidad y dirección dominante del oleaje en el punto donde se mide. Sin embargo esta parametrización de la superficie del mar es solo un índice de una parte de las olas.

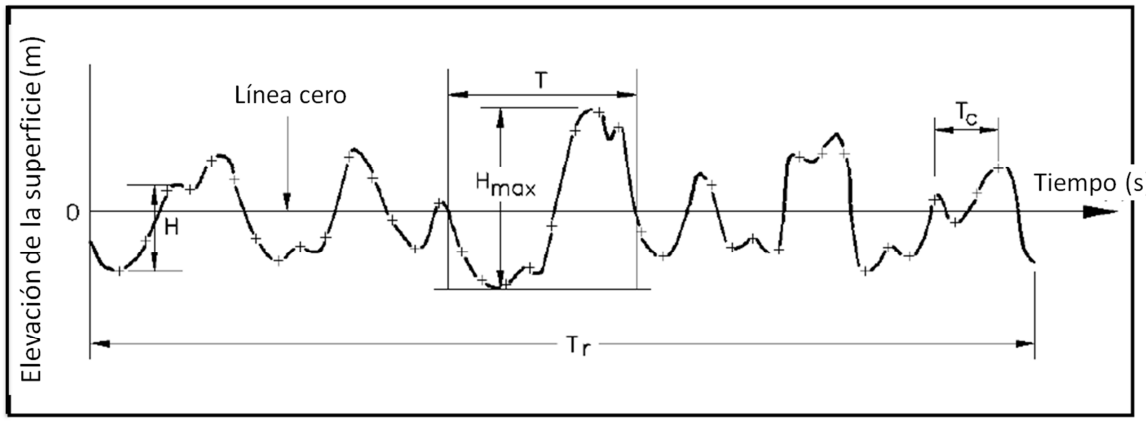


Figura 13. Parámetros del oleaje para un estado de mar aleatorio.

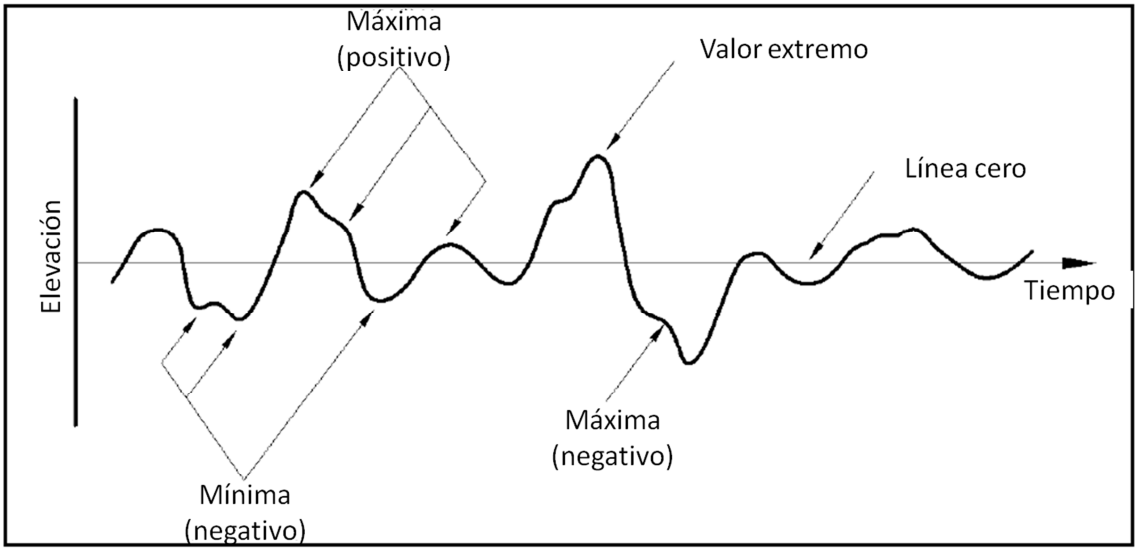


Figura 14. Croquis del proceso de una onda aleatoria

Las teorías de las ondas monocromáticas que se describen en la primera parte de este capítulo tienen dos usos principales. Uno de los usos es de estimar la cinemática y la dinámica asociada con una onda, esto es, la altura de la ola, el periodo pico y la dirección. La otra es cuando una ola individual se ha aislado de un registro para estimar la velocidad, aceleración, fuerza, etcétera.; asociado con este evento individual. (USACE, 2002)

Existen dos tratamientos para el oleaje irregular: los *métodos espectrales* y el de *tren de ondas* (*wave by wave*). Los métodos espectrales se basan en la transformada de Fourier de los datos obtenidos del registro en campo de la superficie del mar. En la actualidad este es el mejor enfoque para analizar matemáticamente un registro de la superficie del mar en dos y tres dimensiones.

El otro método utilizado, como ya se mencionó, es el de *onda por onda*, en este método se analiza un momento del registro de la superficie del mar en un punto, identificándose como olas a las ondulaciones, que se presentan en los registros estadísticos. Esta es una introducción muy natural a las ondas irregulares y se presentó por primera vez antes que el enfoque espectral. El principal inconveniente del análisis de onda por onda es que no dice nada acerca de la dirección del oleaje. Con este método lo que parece ser una sola onda en un

punto, puede ser en realidad la superposición de dos ondas locales menores con diferente dirección cada una, que se interceptaron en ese momento. (USACE, 2002)

I.5. ESPECTROS DE OLEAJE

Una descripción alternativa de las olas del mar, es por medio de métodos estadísticos, que para la descripción de las características naturales en tres dimensiones dependen del tiempo de los sistemas de onda real que se presentan. Una representación completa en 3-D de las olas del mar exige estudiar la superficie del mar como un tren de ondas irregulares con características aleatorias. Para cuantificar esta aleatoriedad de las olas del mar, la sección de ondas irregulares emplea teorías estadísticas y probabilísticas. Incluso con este enfoque, las simplificaciones son necesarias.

Un método consiste en transformar la superficie del mar utilizando la teoría de Fourier en suma de ondas sinusoidales simples y, a continuación se definen las características de una onda en términos de su espectro. Esta permite el tratamiento de la variabilidad de las ondas con respecto al período y dirección de viaje.

El segundo enfoque es el de describir un registro de olas en un punto como una secuencia de ondas individuales con diferentes alturas y períodos y luego considerar la variabilidad del campo de onda en términos de la probabilidad de ondas individuales.

A través del análisis de una gran cantidad de espectros de oleaje se ha encontrado que éstos presentan características similares que pueden ser relacionadas mediante el empleo de parámetros físicos: velocidad y duración del viento, *fetch* (distancia sin obstrucciones sobre la cual el viento sopla a través de la superficie de agua) y profundidad sobre la cual se propaga el oleaje.

Las formas del espectro de un estado de mar varían considerablemente; sin embargo, la forma del mismo no es arbitraria ya que existen muchas propiedades físicas del oleaje que están representadas en él. Un espectro de oleaje puede ser

generado sintéticamente, por medio de los parámetros que caracterizan su desarrollo. Los modelos espectrales están basados generalmente en uno o más parámetros. A continuación se describen los modelos más comunes para este propósito: (Silva, 2005).

- ***Espectro de Neuman***

  Neuman desarrollo un modelo espectral analítico, en 1953, que fue el primero en ser usado para el diseño ingenieril; éste está en función de la velocidad del viento medida a diez metros sobre el nivel medio del mar, U_{10}, y queda expresado como:

$$\boldsymbol{S(f) = 1.466\, H_{m_o}^2\, \frac{f_p^5}{f^6}\, exp\left[-3\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2}\right]} \qquad \textbf{Ec. 1}$$

  Donde H_{mo}, es la altura de ola del momento de orden cero, la cual es igual a la altura de ola significante, $H_s \approx H_{m_o} = 4\sqrt{m_o}$; f_p , es la frecuencia de pico espectral que puede ser obtenida a través de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{f_p = \sqrt{\frac{1}{6}}\, \frac{g}{\pi U_{10}}} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

- ***Espectro de JONSWAP***

  Hasselman et al (1953), propusieron el espectro JONSWAP, el cual fue generado con datos tomados a finales de la década de los sesentas por un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP, por sus siglas en inglés (*Joint North Sea Wave Proyect*).

  Este espectro fue generado para estados de mar formados por el viento, con *fetch* limitado y para una profundidad de agua indefinida. La expresión que representa este espectro es:

$$\boldsymbol{S_J(f) = S_P(f)\emptyset_{PM}\left(\frac{f}{f_p}\right)\emptyset_J(f, f_P, \gamma, \sigma)} \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Dónde:

$S_P(f)$ Es la ecuación de Phillips.
$\emptyset_{PM}(f/f_P)$ Es la función de forma de Pierson – Moskowitz.
$\emptyset_J$ Es el factor de forma de JONSWAP.

- ***Modelo de Phillips***

Phillips (1958), al estudiar la energía del oleaje en función de la velocidad del viento, observó lo que se conoce como estado de saturación de los componentes del oleaje, donde se produce un balance entre la energía suministrada por el viento y las pérdidas debidas a la disipación, y determinó que el espectro puede ser definido a partir de los siguientes parámetros: la frecuencia, la gravedad, la velocidad del viento y el *fetch*. Sin embargo, para tomar en consideración el efecto de saturación en el espectro de energía hizo depender su modelo de dos parámetros:

- La velocidad al cortante del viento
- El *fetch*

Éste es expresado por:

$$\boldsymbol{S(f) = \alpha\, g^2\, f^{-5}\, (2\pi)^{-4}} \qquad \textbf{Ec. 4}$$

Donde *g* es la aceleración de la gravedad y α depende del *fetch* y del viento.

- ***Espectro de Bretschneider***

Bretschneider (1959), asumiendo que un espectro es de banda angosta y que las alturas y periodos de la ola individuales siguen una distribución tipo Rayleigh, obtuvo la siguiente expresión para su modelo espectral:

$$S(f) = 0.1687\, H_s^2\, \frac{f_s^4}{f^5}\, exp\left[-0.675\left(\frac{f_s}{f}\right)^4\right] \quad \text{Ec. 5}$$

Donde $f_s = 1/T_s$

De dicho modelo es posible deducir que

$$T_s = 0.946\, T_p \quad \text{Ec. 6}$$

Donde T_p es el periodo pico espectral. Esta expresión iguala el modelo al propuesto por Pierson y Moskowitz.

- ***Espectro de Kitaigorodskii - Toba***

  En 1961, Kitaigorodskii presento un modelo espectral, que depende de la frecuencia y el fetch, dado por:

$$S(f) = \left(\frac{g^2}{f^5}\right) F(\bar{f}, \bar{x}) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde

$\bar{f} = \frac{f u_*}{g}$

$\bar{x} = \frac{gx}{u_*^2}$

u_* = velocidad de fricción del viento (cortante).

x = Fetch.

Toba (1973), con base en el trabajo de Kitaigorodskii (1961), encontró de forma empírica que la mejor aproximación a los túneles de viento eran proporcionados por la función espectral dada por:

$$S(f) = \beta u_* g f^{-4} \quad \text{Ec. 8}$$

$$u_* = \sqrt{\tau_0/\rho_a} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde ρ_a es la densidad del aire y τ_0 es la fricción tangencial del viento. A partir de datos de laboratorio, se determinó que $\beta = 0.02$.

- ***Espectro ITTC***

  En el congreso *International Towing Tank Conference* (1966, 1969 y 1962) se propusieron cambios al espectro de Pierson y Moskowitz en términos de la altura de ola significante y de la frecuencia media, $f_z = 1/T_{02}$, donde T_{02} es el periodo medio de orden dos.

$$\boldsymbol{S(f) = 1.272\, m_0 f_z^4 f^{-5}\, exp\left[-0.318\left(\frac{f_z}{f}\right)^4\right]} \qquad \textbf{Ec. 10}$$

- ***Espectro ISSC***

  En el International Ship Structures Congress de 1964, se sugirió una ligera modificación a la forma del espectro proporcionado por Bretschneider:

$$\boldsymbol{S(f) = 0.1107\, H_s^2\, \frac{f^{-4}}{f^5}\, exp\left[-0.4427\left(\frac{f_s}{f}\right)^4\right]} \qquad \textbf{Ec. 11}$$

  La relación entre la frecuencia de pico, f_p, y la frecuencia media $\bar{f}$ para el espectro ISSC es:

$$\boldsymbol{\bar{f} = 1.296\, f_p} \qquad \textbf{Ec. 12}$$

- ***Espectro de Pierson – Moskowitz***

  En 1964, Pierson y Moskowitz estudiaron los espectros del oleaje del Atlántico Norte y crearon una expresión que representa estados de mar completamente desarrollados generados por el viento. Es decir, su modelo no depende del Fetch, sino únicamente de la velocidad del viento.
  La expresión propuesta para generar el espectro es la siguiente:

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3}(2\pi)^{-4}\, g^2\, f^{-5} e^{-0.24\,(2\pi U_{19.5}\, f/g)^{-4}} \quad \textbf{Ec. 13}$$

Donde $U_{19.5}$ es la velocidad del viento a 19.5 metros sobre la superficie del mar.

- ***Espectro de Krylov***

  En 1966, Krylov propuso un modelo espectral que tiene como base la frecuencia media. Este modelo está definido por la siguiente expresión:

$$S(f) = \frac{\pi m_0}{\overline{f_0}} \left(\frac{f}{\overline{f_0}}\right)^{-7} e^{\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{f}{\overline{f_0}}\right)^{-4}\right)} \quad \textbf{Ec. 14}$$

  Donde

$$\overline{f_0} = \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{\sqrt{m_0/m_2}} \quad \textbf{Ec. 15}$$

- ***Espectro de Ochi – Hubble***

  Ochi y Hubble (1976) desarrollaron un modelo espectral de seis parámetros que consiste de dos partes: una para componente de energía de baja frecuencia y otra que cubre componentes de alta frecuencia. El espectro total es expresado como la combinación lineal de ambos componentes, los cuales se expresan en términos de tres parámetros cada uno, dicha combinación lineal hace posible modelar, aparentemente, casi todos los estados de mar que se presentan durante una tormenta y hace viable la representación de un doble pico espectral; por ejemplo oleaje distante (baja frecuencia), swell, y oleaje local (alta frecuencia). El espectro de Ochi y Hubble es el siguiente:

$$S(f) = \frac{\pi}{2}\sum_{j=1}^{2} \frac{\left[\frac{4\lambda_j+1}{4}(2\pi f_{0j})^4\right]^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_{sj}^2}{(2\pi f)^{4\lambda_j+1}}\, exp\left[-\left(\frac{4\lambda_j+1}{4}\right)\left(\frac{f_{0j}}{f}\right)^4\right] \quad \textbf{Ec. 16}$$

- ***Espectro de Wallops***

  Huang et al (1981) propusieron un modelo espectral de dos parámetros basándose en los datos del laboratorio de la NASA en Wallops Center. Dicho modelo espectral está expresado por medio de la siguiente expresión:

$$S(f) = \beta H_s f^{-m} f_p^m e^{-\frac{m}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)} \quad \text{Ec. 17}$$

- ***Espectro de Davidian et. al.***

  Davidian et al (1985) llegaron al modelo dado utilizando un procedimiento similar al de Krylov, pero considerando la frecuencia de pico espectral con la siguiente expresión:

$$S(f) = \frac{6.5\, m_0}{f_p} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-6.5} e^{-1.18\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5.5}} \quad \text{Ec. 18}$$

- ***Espectro TMA***

  Para aguas poco profundas, Bows et al (1985) asumieron la validez del espectro tipo Jonswap, expresado en función del número de onda *k*, e incluyeron el factor de transformación, $\emptyset_k(\omega_H)$, dado explícitamente por:

$$\emptyset(\omega_H) = tanh^2(kh)\left(1 + \frac{2kh}{senh\ 2kh}\right) \quad \text{Ec. 19}$$

Cabe mencionar que el significado de la simbología utilizada en las formulaciones de esta sección, se encuentra en el apartado de "*glosario de términos*".

I.5. FENÓMENOS QUE MODIFICAN AL OLEAJE.

Los principios científicos que gobiernan la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas reducidas se presentan en esta sección como una explicación breve del fenómeno. Los fenómenos principales que modifican el oleaje son los siguientes: (USACE, 2002)

1. Refracción.
2. Difracción.
3. Rompiente.
4. Reflexión.
5. Asomeramiento.

I.5.1. REFRACCIÓN

Se puede definir como el cambio de dirección del oleaje por efecto de fondo sobre su superficie libre, en el cual, el oleaje tiende a ser paralelo a las curvas batimétricas del fondo del mar.

Esta transformación tiene lugar cuando un tren de ondas incidiendo oblicuamente sobre la costa encuentra un cambio de profundidad. En ese caso una parte del frente de la onda viaja en aguas someras y, por tanto, con menor celeridad que el resto dando lugar a un cambio de dirección.

Análogamente, en presencia de una corriente, puede producirse un retraso de parte del frente con el consecuente cambio de dirección. Por tanto, la refracción puede ser debida al efecto del fondo o a la presencia de una corriente (figura 15).

$$\text{Métodos para calcular la Refracción} \begin{cases} \text{Analíticos (Método de conservación de la energia)} \\ \text{Gráficos} \left(\begin{matrix} \text{Método de los frentes de ola y} \\ \text{el Método de ortogonales} \end{matrix} \right) \\ \text{Numéricos} \end{cases}$$

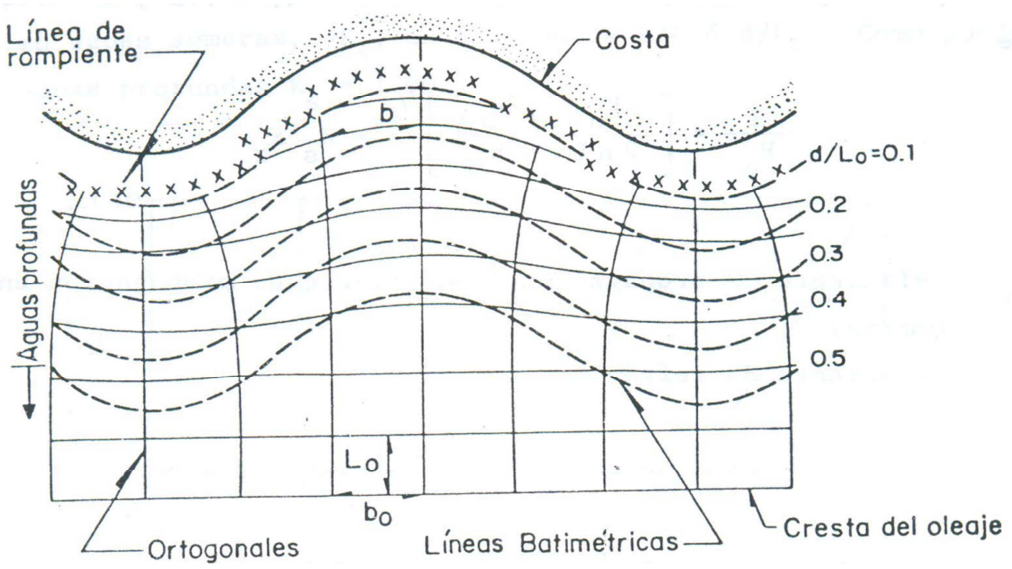


Figura 15. Refracción del oleaje. (C.F.E., 1983)

I.5.2. DIFRACCIÓN

La difracción se caracteriza por la transferencia lateral de energía a lo largo de la cresta y, por lo tanto, en la dirección perpendicular a la dirección predominante de la propagación cuando la amplitud presenta una discontinuidad o grandes variaciones. Puede producirse cuando las ondas se encuentran con una estructura o cuando efectos pronunciados de la refracción conducen a singularidades en la amplitud de la onda. La mejor forma de entender la difracción es pensar en un tren de ondas incidiendo normalmente sobre un rompeolas impermeable semi-infinito. Si no se produjera la transferencia o cesión de la energía (es decir, que no existiera flujo entre ortogonales) la región a sotavento del rompeolas quedaría en calma (figura 16). Sin embargo, suficientemente alejados del morro del rompeolas, la onda incidente se propagaría sin verse modificada en lo absoluto. Esto daría lugar a que en la línea de separación entre ambas regiones, que pasa por el morro del rompeolas, sí existiera una discontinuidad en la altura de la onda que pasara de la altura de la onda incidente a cero a sotavento del rompeolas. Ello da lugar a una cesión lateral de energía hacia la zona de sombra que suaviza la discontinuidad.

La difracción tiene especial importancia en el diseño portuario, en el estudio de propagaciones de las ondas, especialmente cuando se dan zonas de alta concentración de energía. (Universidad de Cantabria, 2000)

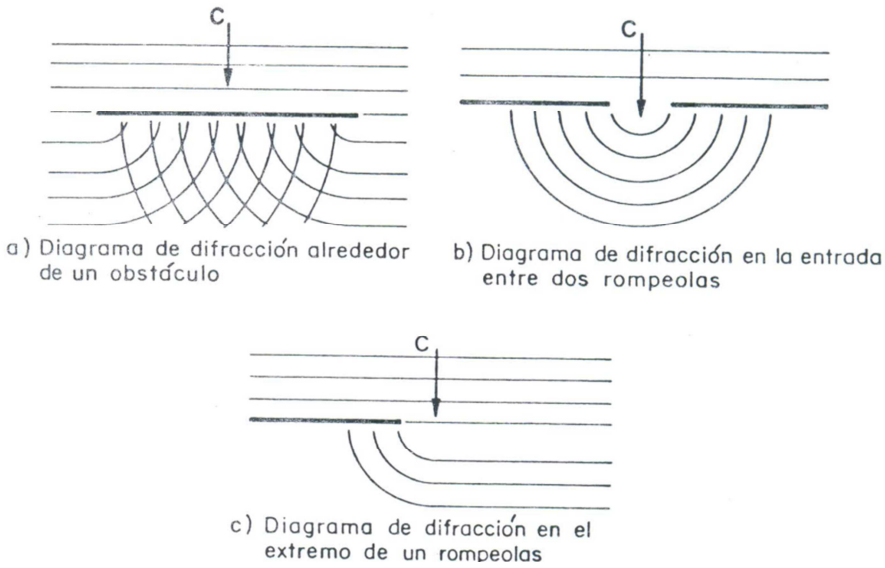


Figura 16. De la Difracción (C.F.E., 1983).

I.5.3. ROMPIENTE

Es el fenómeno más espectacular que se produce en las cercanías de la costa, en la zona de rompientes, debido a la rotura de la ola, produce la mayoría de los procesos litorales como: el transporte de sedimentos.

Debido al asomeramiento de las olas crecen en su cresta, desestabilizándose, a causa de la velocidad en su componente horizontal, cayendo, es decir, rompiendo. (USACE, 2002) (Cruz, 2010)

Hay cuatro tipos de rompientes:

1. Rompiente continua o deslizante (Spilling). Se caracteriza por romper suavemente, la onda deja tras ella la superficie llena de espuma, se presenta en playas de pendientes suaves (figura 17).



Figura 17. Rompiente en "Spilling".

2. Rompiente rodante (Plunging). La masa de agua en la cresta de la ola, se eleva y cae frente a ella, produciendo mucha espuma y turbulencia. A su vez, logra disipar la mayor parte de su energía en espacios cortos (figura 18).



Figura 18. Rompiente tipo "Plungin".

3. Rompiente ondulante (Surging). Este tipo de rompiente se presenta casi en la línea de costa, donde disipa su energía en el frente de la ola en forma de espuma que sube sobre la playa (figura 19).



Figura 19. Rompiente tipo "Surging".

4. Rompiente colapsante (Collapsing). Este tipo de rompiente es muy singular, ya que se lleva a cabo entré las rompientes tipo plunging y surging, pero la cresta no llega a romper, aunque produce espuma (figura 20).



Figura 20. Rompiente tipo "Collapsing".

I.5.4. REFLEXIÓN

La reflexión es el proceso en el cual parte de la energía no disipada de un determinado tren de olas, genera otro tren en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo, como una estructura sea natural (playas, bahías, etcétera.) o artificial (rompeolas, escolleras, diques, etcétera.) . Una estructura porosa en talud (como lo es el caso de los rompeolas), gracias a su configuración presenta una reflexión menor que la de paramento vertical. Esto debido por un lado a la disminución progresiva de la profundidad hace que la ola rompa, y por el otro debido a que los huecos generados por los elementos que conforman la capa exterior acentúan la disipación. (Fontirroig Hernández, 2009)

I.5.5. ASOMERAMIENTO

En la naturaleza a medida que un tren de olas se aproxima a la costa, derivado de la variación de la profundidad, se observa un cambio en la altura y en la longitud de la onda. A este proceso de transformación se la llama asomeramiento (shoaling), (figura 21).



Figura 21. Asomeramiento del oleaje.

I.6. OBRAS DE PROTECCIÓN

Estas estructuras tienen la función, no solo de generar una zona de aguas tranquilas en su lado a tierra y de mantener el calado de agua en el puerto, sino también de generar protección frente a la acción del oleaje, para las distintas áreas e instalaciones, zonas de acceso, zonas de maniobra y sobre el conjunto de obras interiores de servicio en general, para que así las embarcaciones realicen la transferencia de la carga con seguridad y rapidez.

Se tienen tres tipos de obras de protección, y estas son:

- *Rompeolas:* Este tipo de estructuras se utilizan para protección de puertos ubicados sobre las costas y son estructuras que se componen generalmente de tres capas (núcleo, capa secundaria y capa de coraza).
- *Escolleras:* Son aquellas que se utilizan en la protección de puertos de tipo fluvial; se encuentran en la desembocadura de los ríos y perpendiculares a la costa, con el fin de encausar el río, lo cual permite conservar el calado.

- *Espigones:* este tipo de estructuras son de poca longitud y se componen de dos capas, sirven para la protección de costas o protección marginal. Y pueden ser colocados en diversas formas, esto es, normal a la costa, paralelos, oblicuos, etcétera. (Chapapría, 1992)

I.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ROMPEOLAS

Los rompeolas se pueden clasificar de distintas formas, como son: (Ruiz, 2010) (Medina, 2009) (Rosales, 2005)

- Por su geometría:
  - A talud, es decir, son estructuras con forma trapezoidal y el talud lado mar es mayor que el talud lado tierra.
  - Paramento vertical, son estructuras elaboradas a base de cajones de concreto.
  - Mixtos, se refiere a la combinación de los dos anteriores.
- De manera estructural:
  - Flexibles: son estructuras permeables.
  - Rígidos: son estructuras impermeables (paramento vertical)
  - Semi-rígidos: es una combinación de los dos tipos de estructuras anteriores.
- Por los materiales de construcción:
  - Enrocamiento: en las estructuras compuestas por roca se debe verificar que los elementos cumplas con ciertas características de calidad.
  - Elementos artificiales: estos elementos son elaborados a base de concreto y tienen diferentes formas geométricas como tetrápodos, core-loc, cubos, dolos, etcétera.
- Por la acción que causan sobre el oleaje, existen dos tipos:
  a) Los que impiden el paso del oleaje.
  b) Los que amortiguan el oleaje.

En los rompeolas que impiden el paso del oleaje, se puede observar que al lado contrario del de incidencia del oleaje no existirá agitación alguna; en el caso de los que amortiguan el oleaje se observa que solo se consigue reducir las características del oleaje que incide, especialmente en cuanto a su altura.

a) Dentro de los rompeolas que impiden el paso del oleaje se puede establecer la siguiente clasificación tipológica: (Chapapría, 1992) (Ruiz, 2010) (S.C.T, 2001). (Wang et.al, 2008)
    - En los que rompen el oleaje: a talud.
    - Los que reflejan el oleaje: de paramento vertical.
    - Mixtos: una combinación de los anteriores.

b) Los rompeolas que amortiguan el oleaje se pueden clasificar en:
    - Sumergidos
    - Flotantes
    - Neumáticos o hidráulicos.

    Dentro de los rompeolas se encuentran los siguientes:
    - Enrocamiento.
    - Elementos artificiales.

Como se puede observar existen diversas estructuras que varían ya sea en forma o materiales de construcción y en su función principal, por lo que a continuación se muestra un resumen de los diferentes tipos de obras de protección (tabla 4): (Fuente: USACE, 2002)

Tabla 4. Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera. (Fuente: USACE, 2002).

Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera.		
Tipo de Estructura	**Objetivo**	**Función Principal**
Diques	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas	Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra
Muro vertical (espaldones)	Proteger tierra y estructuras contra inundaciones y rebase	Refuerzo de la parte del perfil de playa
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosiones	Refuerzo de la parte del perfil de playa
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión playera	Reducción de transporte longitudinal a la playa
Rompeolas no ligado a la playa	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura
Rompeolas arrecife	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la playa
Rompeolas sumergido	Prevenir erosión playera	Retardar el movimiento del sedimento mar adentro
Rompeolas	Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes	Disipación de energía de oleaje y/o reflexión del oleaje hacia mar adentro
Dren de playa	Prevenir erosión playera	Acumulación de material playero en la porción drenada de la playa
Relleno artificial de playa y dunas	Prevenir erosión playera y proteger contra inundaciones	Relleno artificial de la playa y duna para que sea erosionado en lugar del material naturalmente depositado
Rompeolas flotante	Proteger puertos y zonas de atraque contra oleaje de alta frecuencia	Reducción de alturas de ola por reflexión y atenuación
Escollera	Estabilizar canales de navegación en desembocaduras y bocas	Confinar corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras
Muro de conducción	Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger ataques contra corrientes	Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras

Tabla 4. Continuación…

Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera.		
Tipo de Estructura	**Objetivo**	**Función Principal**
Barreras para marea de tormenta	Proteger estuarios contra mareas de tormenta	Separación del estuario y el mar por medio de compuertas móviles
Protección contra socavación	Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente	Aumento de la resistencia contra erosión causada por el oleaje y corrientes

I.6.1.1. ARRECIFES ARTIFICIALES.

Los arrecifes artificiales tienen sus inicios en pueblos que se dedicaban a la pesca, debido a que ellos observaban que los peces eran más abundantes en las proximidades de objetos flotantes o hundidos, ya que se incrementaban las capturas en las cercanías a estos objetos; razón por la cual estos pueblos formaban los arrecifes artificiales mediante el empleo de materiales de oportunidad (ramas, palos, cerámica, piedras, etcétera.). (Seaman & Sprague, 1991).

La primera literatura científica sobre el uso de arrecifes artificiales, data del siglo XVIII y existen documentos de la Era Kansei de Japón (1789-1801), que hablan sobre el uso de este tipo de estructuras por pescadores. Estas estructuras también han sido ampliamente utilizadas en Estados Unidos durante los últimos 100 años. (Lewis & McKee, 1989) (Stone et. al., 1991) (Seaman & Sprague, 1991)

A partir de los años sesenta, se generalizaron las experiencias de construcción de arrecifes en todo el mundo (Estados Unidos, Japón, Australia y los países mediterráneos, entre otros), con diferentes planteamientos y objetivos como lo son la pesca profesional y deportiva, el buceo recreativo, etcétera.; por otro lado también se ha variado la utilización de materiales para la construcción de arrecifes artificiales, desde los más elementales a base de piedra, troncos o neumáticos (material de oportunidad), hasta elementos artificiales sofisticados construidos con diversos materiales como fibra de vidrio o concreto. También se han llegado a utilizar de forma empírica elementos como automóviles, autobuses, barcos y todo

tipo de material de desecho. En definitiva, vienen empleándose muchas formas, fabricadas en materiales diversos y con mayor o menor grado de sofisticación en su diseño y construcción como se muestra en las figuras siguientes (figuras 22-27). (Serra Peris & Medina Folgado, 1988) (Berenguer, 1995)

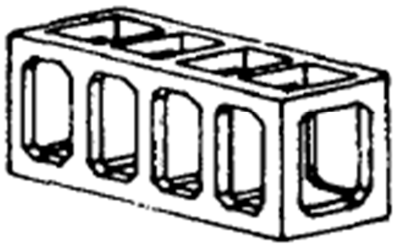


Figura 22. Modelo Rectangular (concreto armado).

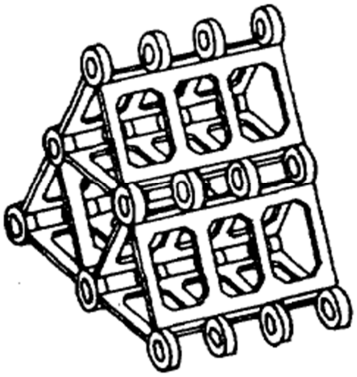


Figura 23. Modelo Jumbo (concreto armado).

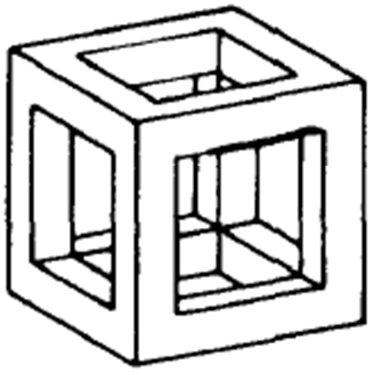


Figura 24. Modelo Cubo (concreto armado).



Figura 25. Neumáticos con muerto de concreto.

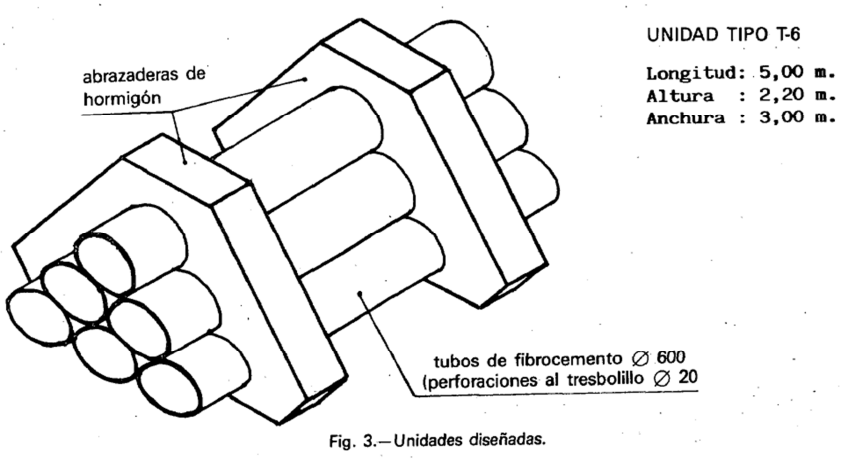


Fig. 3.—Unidades diseñadas.

Figura 26. Modelo con tubos de ferrocemento y abrazaderas de concreto.

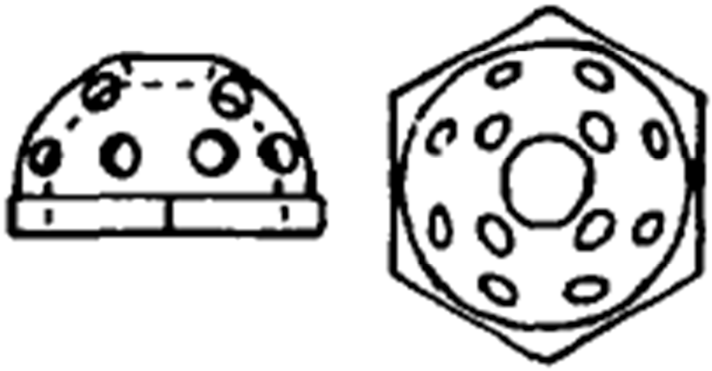


Figura 27. Reef Ball.

Pero es hasta los años ochenta cuando las investigaciones se centran en conocer la efectividad de los arrecifes artificiales para diferentes fines, como el fomento para la recuperación de la flora y fauna marina y para evitar la erosión costera, entre otros.

En la actualidad, más de 40 países los emplean, tan sólo en el continente americano hay más de 500 sitios donde existen este tipo de estructuras.

La EARRN (European Artificial Reef Resarcha Network) define a los arrecifes artificiales como estructuras sumergidas y situadas sobre el substrato (fondo marino) los cuales imitan algunas características de los arrecifes naturales.

I.6.1.1.1. TIPOS DE ARRECIFES ARTIFICIALES

Los arrecifes artificiales se pueden clasificar según su función, de la siguiente forma:

- *Arrecifes artificiales de protección:* Como su nombre indica son estructuras cuyo objetivo es proteger las costas de la erosión, por medio de la reducción de las características del oleaje incidente, debido a que este tipo de estructuras representan un obstáculo en la trayectoria del oleaje.
- *Arrecifes artificiales de producción:* Diseñados para proporcionar abrigo y albergar en sus huecos especies pesqueras, protegiéndolas en sus fases de reproducción y puesta. Este tipo de arrecifes artificiales están construidos por módulos con huecos, los cuales propician el desarrollo de organismos.
- *Arrecifes artificiales mixtos:* son aquellos que incorporan dentro del grupo de arrecifes artificiales de protección, núcleos de producción.

En función de los materiales utilizados en su construcción se pueden clasificar en:

- *Arrecifes de oportunidad:* Son aquellos construidos con materiales de oportunidad: llantas, coches, cubiertas, barcazas, chatarra, desechos de materiales de construcción, etcétera.; (figura 28). La mayoría de estos arrecifes no están diseñados para tener una larga duración en las adversas

condiciones marinas de corrosión, temporales, corrientes, etcétera. Por otro lado, estos elementos, a corto plazo, son más perjudiciales para el medio ambiente que los beneficios que proporcionan.

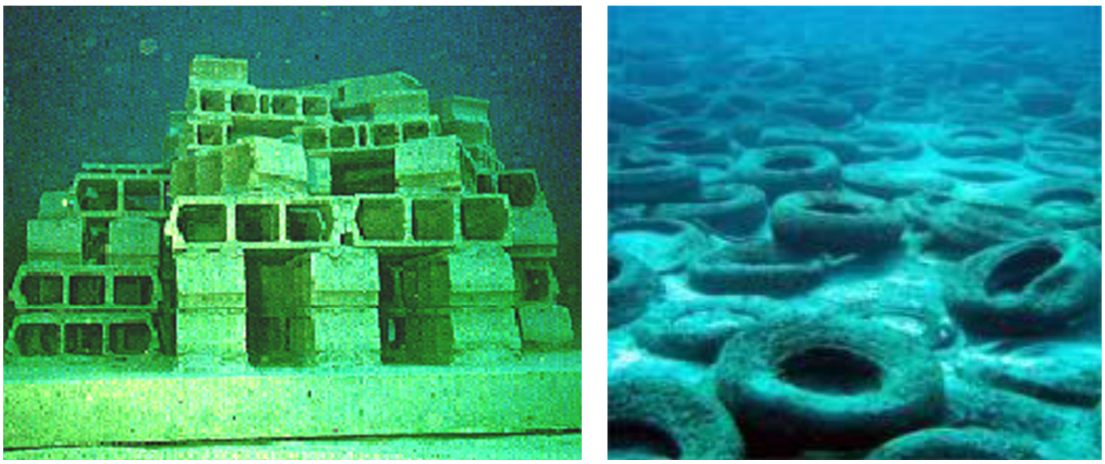


Figura 28. Arrecifes de oportunidad.

- *Arrecifes tipo módulos:* como los *"reef ball"* y los *"módulos azteca".*

  Los reef ball son unidades que asemejan a una semiesfera hueca, con agujeros de distintos tamaños y que por la técnica utilizada en su fabricación cada una sería única y diferente al resto. No llevan refuerzos de acero, sino que su resistencia se logra con aditivos especiales que además agregan resistencia a la abrasión. Por otro lado, en el diseños de sus agujeros, se ha tenido en cuenta no solo el servir de refugio a los peces, sino el de proporcionar estabilidad a las unidades frente a las corrientes, figura 29.



Figura 29. Reef ball.

Los módulos aztecas están compuestos de una mezcla de cemento y conchilla molida de moluscos, lo cual hace que se incremente la rugosidad de las superficies y proporciona un sustrato adecuado para la fijación de organismos como esponjas, corales, anémonas y ostiones, entre muchos otros. Los módulos tienen forma de campana y cuentan con cuatro extremidades que proporcionan estabilización y resistencia ante el embate del oleaje. Del mismo modo, se cubren parcialmente con rocas de distintos tamaños para que tenga un mejor equilibrio, figura (30).



Figura 30. Modulo azteca.

- *Unidades geométricas de hormigón:* Son arrecifes construidos con unidades de hormigón, construidos al efecto para evitar su deterioro por la corrosión marina. Su construcción es sencilla, con técnicas e instalaciones simples y no demasiado costosas. El diseño adoptado proporciona estabilidad frente al oleaje y las corrientes, con un bajo costo de construcción, transporte, instalación y mantenimiento. Se estima que con un buen diseño, la vida útil puede llegar a los 50 años, figuras 22, 23, 24, 26 y 31.



Figura 31. Arrecifes modulares artificiales.

CAPÍTULO II. TRANSMISIÓN DEL OLEAJE

La transmisión del oleaje puede caracterizarse por el coeficiente de transmisión Kt, definido como la relación de la altura de la ola transmitida y la altura de ola incidente, o como la raíz cuadrada del promedio de la energía de la ola transmitida en relación de la ola incidente.

$$K_t = \frac{H_{st}}{H_{si}} = \left(\frac{E_t}{E_i}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \textbf{Ec. 20}$$

II.1. ESTUDIOS SOBRE TRANSMISIÓN DEL OLEAJE

Diversos autores han realizado estudios para predecir la transmisión del oleaje que pasa a través de los rompeolas, algunos los han realizado sobre modelos numéricos y otros sobre estudios experimentales o de laboratorio para la obtención de resultados.

Debido a los objetivos de este trabajo solo se presentara el estado del arte relacionado con los estudios experimentales realizados por los autores que abordan el fenómeno de la transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos, ya que éstos son los que se aplican para el diseño y estudio de los arrecifes artificiales.

Goda *et. al.* (1979): llevaron a cabo una serie de estudios de laboratorio en un canal de oleaje, con oleaje regular. Los resultados de estos estudios mostraron que el coeficiente de transmisión está ligado con el parámetro sumergencia relativa (R_c / H_I). Goda *et. al.* (1967), también observaron que para una cresta del rompeolas con un ancho mayor, la transmisión del oleaje decrece; seguido de esto propusieron una formulación empírica para calcular el coeficiente de transmisión "K_T", y Goda en 1969, realizó una reformulación obteniendo la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{1}{2}\left(1 - \sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{\frac{R_c}{H_i}+\beta}{\alpha}\right)\right) \qquad \textbf{Ec. 21}$$

Donde el autor propone valores de α y β para estructuras de enrocamiento α=1.6 y β=0.5.

Seeling (1980): realizó estudios de laboratorio con estructuras lisas e impermeables para analizar el rebase del oleaje rompiente con oleaje regular e irregular. El encontró de acuerdo con Goda (1969), que la relación de sumergencia R_c / H_I, es el parámetro con mayor influencia para el coeficiente de transmisión. El autor también mostro, que la fórmula propuesta por Goda (1969), también es una aproximación válida para oleaje irregular.

Abdul Khader y Rai (1980): realizaron estudios de laboratorio en 2D para rompeolas sumergidos lisos e impermeables con formas geométricas diferentes. Los autores mostraron en su estudio que la altura relativa de coronamiento tiene una relación estrecha con la energía que se disipa.

Allsop (1983): realizó estudios experimentales en rompeolas de enrocamiento sumergidos, con el fin de estudiar la estabilidad, el overtopping y el coeficiente de transmisión en este tipo de estructuras. Las pruebas se llevaron a cabo usando oleaje irregular, donde se reprodujeron alturas y periodos diferentes. El modifico la formulación empírica para el cálculo del coeficiente de transmisión propuesta por Goda en 1969, introduciendo el parámetro R*, en lugar de R_c / H_I, para adaptarla a un modelo con medición de datos, resultando:

$$\boldsymbol{K_t = 0.5\left[1 - \sin\frac{\pi}{2\alpha}(\beta - R^*)\right]} \qquad \textbf{Ec. 22}$$

Donde

$$\boldsymbol{R^* = \frac{R_c}{H_s}\left(\frac{S}{2\pi}\right)^{1/2}} \qquad \textbf{Ec. 23}$$

Powell y Allsop (1985): desarrollaron curvas empíricas como guías de diseño para estimar los coeficientes de transmisión en rompeolas sumergidos y permeables con un 40% de porosidad.

Ahrens (1987): el objetivo de los estudios de laboratorio fue estudiar la estabilidad en los rompeolas sumergidos de enrocamiento tipo arrecife y los efectos de la transmisión y reflexión del oleaje sobre estos; el propuso la siguiente formulación para el cálculo del coeficiente de transmisión del oleaje:

$$K_t = \frac{1.0}{1.0+\left(\frac{H_s A_r}{L_p d_{50}^2}\right)^{0.592}} \qquad \text{Ec. 24}$$

Gómez Pina y Valdés (1990): ellos analizaron una serie de datos de laboratorio los cuales sugieren que el coeficiente de transmisión muestra una tendencia oscilatoria de acuerdo con el ancho relativo de cresta de la estructura (B / L_0). Ellos también encontraron, que para ambas condiciones de oleaje, rompiente y no rompiente, el coeficiente de transmisión está relacionado con el parámetro de Iribarren (ξ).

Van der Meer (1988, 1990 y 1991): usando datos previos de laboratorio encontró una nueva fórmula para el cálculo del coeficiente de transmisión del oleaje, esta fórmula empírica está basada en valores de la relación de la sumergencia. Los límites para la aplicación de esta formulación se encuentran entre los valores para el coeficiente de transmisión de 0.8 y 0.1, esta formulación no toma en cuenta directamente los efectos del ancho de coronamiento.

$$K_t = 0.46 + 0.3\ \frac{R_c}{H_s} \qquad \text{Ec. 25}$$

Daemen (1991): llevo a cabo pruebas en 2D en el canal de oleaje del laboratorio de Hidráulica de Delf bajo condiciones de oleaje irregular. Van der Meer (1991) y Van der Meer y Daemen (1994) propusieron una fórmula empírica para rompeolas sumergidos que relaciona el ancho de coronamiento, la sumergencia, la relación de esbeltez y la altura de ola incidente. Ellos encontraron una relación lineal entre el coeficiente de transmisión del oleaje K_t y la sumergencia.

$$K_t = a\ \frac{-R_c}{d_{50}} + b \qquad \text{Ec. 26}$$

Donde

$$a = 0.031\left(\frac{H_i}{d_{50}}\right) - 0.24 \qquad \text{Ec. 27}$$

Y para rompeolas tipo arrecife el coeficiente "*b*" es:

$$b = -2.6\left(\frac{H_i}{L_0}\right) - 0.05\left(\frac{H_i}{d_{50}}\right) + 0.85 \qquad \text{Ec. 28}$$

Siendo el rango de variación para el coeficiente de transmisión es de 0.15 a 0.6.

Davies and Kriebel (1992): llevaron a cabo un gran número de pruebas en 2D con dos diferentes tipos de estructuras (impermeables y de enrocamiento) las cuales fueron sometidas a la acción de oleaje regular e irregular. Ellos encontraron que no hay diferencias significativas en los coeficientes de transmisión entre los rompeolas sumergidos de enrocamiento y los rompeolas sumergidos impermeables.

d´Angremond *et. al.* (1996): realizaron un análisis de los datos obtenidos de estudios llevados a cabo por otros autores sobre la transmisión del oleaje [Seeling (1980), Allsop (1983), Daemrich y Kahle (1985), Powell y Allsop (1985), Van der Meer (1988), Daemen (1991)], y encontraron una nueva formulación para estimar la transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos permeables e impermeables.

$$K_t = -0.4\frac{R_c}{H_i} + 0.64\left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31}\left(1 - e^{-0.5\,\xi}\right) \qquad \text{Ec. 29}$$

Los límites de esta ecuación se encuentran en un rango para K_t de 0.075 a 0.80, y el parámetro de Iribarren está definido por la ecuación:

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{(S_{op})^{0.5}} \qquad \text{Ec. 30}$$

$$S_{op} = \frac{2\pi H_i}{(gT_p^2)} \qquad \text{Ec. 31}$$

Seabrook y Hall (1997, 1998): realizaron estudios de laboratorio en 2D y 3D con oleaje irregular, para determinar la transmisión del oleaje que hay en rompeolas sumergidos de enrocamiento. Ellos mostraron que la fórmula desarrollada por Ahrens (1987) y Van der Meer (1991), no es muy adecuada para pronosticar cuando el ancho de la cresta es muy grande. Seabrook y Hall (1998), observaron que la sumergencia y el ancho de coronamiento son los parámetros más importantes para la determinación del coeficiente de transmisión. Ellos propusieron una nueva fórmula para calcular el coeficiente de transmisión, en la cual toman en cuenta el efecto del ancho de coronamiento:

$$K_t = \left(e^{-0.56\left(\frac{R_c}{H_i}\right)-1.09\left(\frac{H_i}{B}\right)} + 0.047\left(\frac{B}{L_0}\cdot\frac{R_c}{d_{50}}\right) - 0.67\left(\frac{R_c}{B}\cdot\frac{H_i}{d_{50}}\right)\right) \qquad \text{Ec. 32}$$

Gironella y Sánchez – Arcilla (1999): analizaron algunos datos de modelos de rompeolas sumergidos en los que se estudiaba la transmisión del oleaje y el coeficiente de reflexión. Su expresión se basa en la relación de $\frac{R_c}{L_0}$ y el parámetro de Iribarren. Los autores aplicaron a estas series de datos una regresión multilineal y encontraron la siguiente ecuación:

$$K_t = C_1\left(\xi\frac{R_c}{L_0}\right) + C_2\frac{R_c}{L_0} + C_3 \qquad \text{Ec. 33}$$

Donde C_1= 6.43, C_2= 14.63, C_3= 0.52, el nivel de correlación que obtuvieron para esta ecuación fue de $R^2 = 0.98$.

Van der Meer *et. al*. (2000): probaron estructuras impermeables con diferentes anchos de coronamiento y observaron que el oleaje pasaba sobre este tipo de estructuras libremente. Razón por la cual en este tipo de estructuras el ancho de coronamiento no tiene gran influencia en la reducción del coeficiente de transmisión.

La primera conclusión para este nuevo análisis, es que el ancho de coronamiento B, puede o no tener influencia en el coeficiente de transmisión, ya que esta depende del tipo de estructura

Con la anterior conclusión se realizó un nuevo análisis del conjunto de datos totales, realizando modificaciones a la fórmula original, aunque conservaron la estructura original. La nueva fórmula fue dividida en dos partes, la primera para oleaje rompiente y la segunda para oleaje no rompiente. El rango en el que se pueden utilizar estas fórmulas, es para valores del coeficiente de transmisión que van desde 0.075 hasta 0.8.

$$K_t = -0.3\frac{R_c}{H_i} + 0.75[1 - exp(-0.5\xi)] \qquad para\ \xi_{op} < 3 \qquad \text{Ec. 34}$$

$$K_t = -0.3\frac{R_c}{H_i} + \left[\frac{B}{H_i}\right]^{-0.31} * [1 - exp(-0.5\xi)] * 0.75 \quad para\ \xi_{op} \geq 3 \qquad \text{Ec. 35}$$

Ocaña (2001): participo en la realización del proyecto de investigación titulado "Estudio experimental de rompeolas sumergidos con oleaje irregular", del cual se desprendió su tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. En dicho estudio se analizó la influencia de los siguientes parámetros, en la transmisión del oleaje: la sumergencia, el ancho de coronamiento, profundidad de desplante, influencia de la relación de esbeltez de la ola incidente, influencia de la porosidad y la estabilidad en este tipo de estructuras.

Roul y Faedo (2002): realizaron algunos estudios experimentales en el canal de IMAGE del Departamento de la Universidad de Padova, Italia, con la intención de entender mejor el comportamiento de los rompeolas sumergidos bajo la acción de oleaje rompiente. Ellos desarrollaron una formulación empírica para el cálculo del coeficiente de transmisión usando las dimensiones del bordo libre $(R_c + R_u)/H_i$ que fue propuesta por Davies y Kriebel (1992):

$$K_t = -0.0928\left(\frac{R_c+R_u}{H_s}\right)^2 + 0.1862\left(\frac{R_c+R_u}{H_s}\right) + 0.1176 \qquad \text{Ec. 36}$$

Melito y Melby (2002): llevaron a cabo estudios experimentales en 2D en un canal de oleaje donde investigaron el ascenso de la ola (run-up) y transmisión del

oleaje, en rompeolas constituidos por una sola capa de CORE-LOC. El experimento se limita a un único rompeolas sumergido en el que no se toma en cuenta el ancho de coronamiento. Ellos propusieron curvas para estimar el coeficiente de transmisión en rompeolas sumergidos de coraza de CORE-LOC.

Calabrese *et. al.* (2002 y 2003): llevaron a cabo una serie de modelos de laboratorio a gran escala de rompeolas sumergidos en “Grosser WellenKanal” de Hannover, Alemania. Los estudios fueron realizados bajo la acción de oleaje irregular y a gran escala, con el fin de verificar la precisión de las fórmulas existentes. Sus resultados muestran que la ecuación propuesta por d´Angremond et al (1996), es la de mejor precisión respecto a las otras. De los resultados obtenidos de sus estudios los investigadores obtuvieron una nueva ecuación para calcular el coeficiente de transmisión, siendo esta la siguiente:

$$K_t = a \cdot \frac{R_c}{B} + b \qquad \text{Ec. 37}$$

Donde

$$b = \alpha \cdot e^{-0.0845\frac{B}{H_i}} \qquad \text{Ec. 38}$$

$$\alpha = 1 - 0.562 \cdot e^{-0.0507\,\xi} \qquad \text{Ec. 39}$$

$$a = \beta \cdot e^{0.2568\frac{B}{H_i}} \qquad \text{Ec. 40}$$

$$\beta = 0.6957\frac{H_i}{h} - 0.7021 \qquad \text{Ec. 41}$$

Van der Meer et. al. (2004): recolecto más de 2300 datos de pruebas (de diferentes investigaciones) realizadas con modelos en 2D en los cuales se estudió la transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos de enrocamiento y se obtuvieron ecuaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de transmisión, con el fin de mejorar las fórmulas provistas por Van der Meer (1991) y d´Angremond *et al*. (1996), considerando el valor de la relación del ancho de coronamiento de la estructura entre la altura incidente B/H_i; a raíz de esto el

propuso una modificación en la ecuación para rompeolas sumergidos de enrocamiento y obtuvo la siguiente ecuación:

$$K_t = -0.35\,\frac{R_c}{H_i} + 0.51\left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.65} \cdot \left(1 - e^{-0.41\,\xi}\right) \qquad \text{Ec. 42}$$

Todos los autores mencionados anteriormente, comenzaron estudiando la transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos y bajo estos mismos conceptos se han estudiado los arrecifes artificiales, siendo los parámetros básicos de diseño, para ambos tipos de estructuras, los observados en la figura 32.

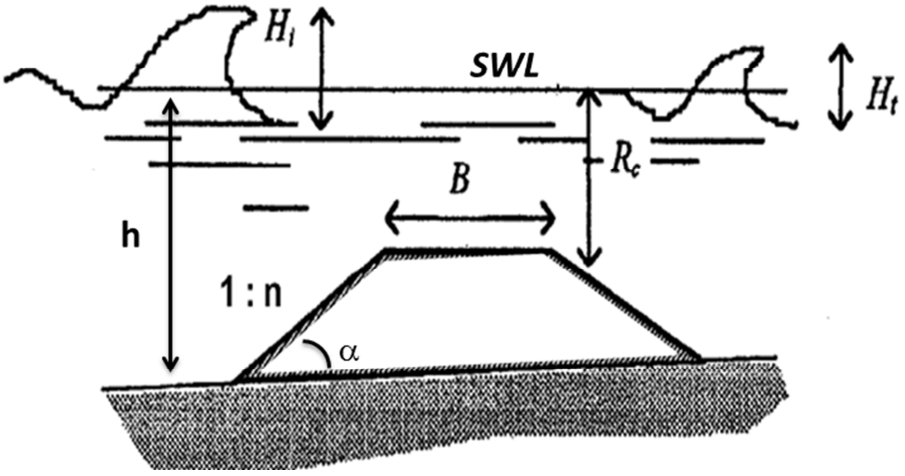


Figura 32. Parámetros de diseño en un rompeolas sumergido.

H_i = Altura de ola (incidente).

T_p = Periodo pico (incidente).

h = profundidad de desplante.

SWL = Nivel medio del mar.

D_n = W = Diámetro nominal o peso de los elementos de coraza (según la formulación).

B = Ancho de coronamiento.

R_c = Distancia del nivel medio del mar al coronamiento de la estructura (sumergencia).

α = Ángulo del talud (lado mar).

CAPÍTULO III. MODELO FÍSICO.

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos, por lo que es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como herramientas en la obtención de soluciones prácticas, por ello para resolver problemas de Ingeniería Hidráulica se utilizan diferentes procedimientos o técnicas, entre los que destacan los modelos matemáticos y modelos físicos. (Vergara, 1995)

En los modelos matemáticos se representan fenómenos físicos, en forma simplificada por un conjunto de ecuaciones que permiten describir el comportamiento de algunas variables del fenómeno representado, este tipo de modelos se utilizan en Hidráulica para resolver problemas en tuberías y canales.

En los modelos físicos se estudian a escala las condiciones del flujo de un prototipo, las cuales dependen de las fronteras y estructuras por las que fluye. (C.F.E., 1983)

Para entender mejor lo que es un modelo físico, es preciso aclarar a que se le llama *prototipo y modelo*, respectivamente. Se denomina ***prototipo*** a la obra, maquina o sistema de tamaño natural que se desea estudiar, y a su representación se le llama ***modelo***, esta última debe cumplir con determinadas leyes de similitud o semejanza.

En el campo de la Ingeniería hidráulica, los problemas principales que pueden abordarse mediante un modelo físico son:

1. Agitación debida al oleaje: Se miden la penetración del oleaje en las dársenas o zonas costeras, analizando la influencia de la dirección del temporal y las características espectrales, se ensayan soluciones estructurales.
2. Estructuras de protección costera: Se realiza el diseño de la sección y los elementos estructurales. Un punto importante es evaluar los esfuerzos

debidos al oleaje, así como el comportamiento hidrodinámico como: reflexión, transmisión, rebase, otros.

3. Estructuras en talud: Aquí se revisan diseños de secciones y elementos estructurales. Principalmente características reflejantes.
4. Estructuras con paramento vertical: Diseño de la sección y revisión de esfuerzos debidos al oleaje.
5. Rompeolas flotantes: Diseño estructural.
6. Rompeolas hidráulicos y neumáticos: Diseño estructural y dimensionamiento del dispositivo hidráulico y neumático.
7. Estuarios: Dimensionamiento de canales, erosión y sedimentación, cambios de corrientes, contaminación, influencia de nuevas estructuras.
8. Zonas litorales: Análisis del transporte litoral bajo la acción del oleaje y las corrientes. Influencia de estructuras costeras, erosión y regeneración de playas.
9. Modelos de Obras hidráulicas, penetración de oleaje (agitación), estabilidad de estructuras bajo la acción de olas, maniobras de embarcaciones, transporte litoral, erosión local por oleaje, flujo en ríos o canales, erosión local por corrientes, transporte de sedimentos en ríos y estuarios. (Vergara, 1995)

Las variables que intervienen en un modelo hidráulico o en general en estudios hidráulicos conviene relacionarlas entre sí para formar expresiones adimensionales; por este motivo, el análisis dimensional se presenta en un apartado especial.

Las condiciones de semejanza o similitud que se mencionaron anteriormente y que se deben cumplir son: la geométrica, la cinemática y la dinámica; sin embargo en algunos estudios no se respeta enteramente la similitud geométrica y se utilizan los llamados *modelos con distorsión*, los cuales tienen dos o tres escalas de longitud, cabe mencionar que la distorsión depende enteramente del tipo de modelo que se desea realizar. (C.F.E., 1983) (Hughes, 1993)

III. 1. ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional estudia la forma adecuada de obtener expresiones adimensionales, también denominadas números o parámetros adimensionales.

Ya que en un fenómeno físico se puede identificar el conjunto de magnitudes o variables que intervienen en él, es posible por medio del análisis dimensional encontrar la relación entre las variables, mediante una ecuación que debe ser dimensionalmente homogénea. De esta forma se reduce el número de las variables agrupándolas en números o parámetros adimensionales los cuales nos permiten dar una interpretación y presentación en forma de gráfica a los resultados experimentales.

En todas las ecuaciones que se utilizan para describir un fenómeno físico las variables que intervienen en ellas están relacionadas entre sí. Cada variable además de tener un valor numérico tiene una dimensión, es decir, una combinación de unidades con la cual se indica la forma como se define la variable. (C.F.E., 1983) (Vergara, 1995)

En general, las magnitudes físicas se clasifican en dos grupos: las básicas o fundamentales y las derivadas o secundarias. Las del primer grupo son la longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Las del segundo grupo son área (A), volumen (V), velocidad (v), gasto (Q), fuerza (F), o cualquier otra (X) en función de las primeras. En ingeniería las variables que se utilizan para resolver algún problema son las dimensiones básicas masa, longitud y tiempo o en su forma equivalente fuerza, longitud y tiempo; ambas están ligadas por la segunda Ley de Newton, que en función de dimensiones se escribe como:

$$[\boldsymbol{F}] = [\boldsymbol{MLT^{-2}}] \qquad \textbf{Ec. 43}$$

Los paréntesis rectangulares indican que se trata de una igualdad entre dimensiones y además se observa en la ecuación 43 que tres de las dimensiones son independientes. (C.F.E., 1983)

El sistema de dimensiones que generalmente se utiliza para resolver problemas con ayuda del análisis dimensional es el de [M, L, T]; en la tabla 5 es posible apreciar la variables así como su simbología y las dimensiones que utiliza.

Tabla 5.Dimensiones de las variables físicas utilizadas en Hidráulica. (C.F.E., 1983)

VARIABLE	SÍMBOLO	DIMENSIONES	
		M, L, T	F, L, T
Características geométricas			
Longitud	L	L	L
Perímetro mojado	P_m	L	L
Área	A	L^2	L^2
Volumen	V	L^3	L^3
Propiedades de los fluidos			
Masa	m	M	FT^2L^{-1}
Densidad	ρ	ML^{-3}	FT^2L^{-4}
Peso específico	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
Viscosidad cinemática	ν	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Viscosidad dinámica	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	FTL^{-2}
Módulo de elasticidad volumétrico u elástico	E_V	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Tensión superficial	σ	MT^{-2}	FL^{-1}
Características del flujo			
Velocidad	v	LT^{-1}	LT^{-1}
Aceleración	a	LT^{-2}	LT^{-2}
Presión	p	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Fuerza	F	MLT^{-2}	F
Esfuerzo cortante	τ	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Gasto	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Trabajo, energía	W, E	ML^2T^{-2}	FL
Momento	M	ML^2T^{-2}	FL
Potencia	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
Impulso	I	MLT^{-1}	FT
Otras			
Angulo	α	$ninguna$	$ninguna$
Pendiente	S	$ninguna$	$ninguna$
Velocidad angular, frecuencia	ω, f	T^{-1}	T^{-1}
Velocidad del sonido	c	LT^{-1}	LT^{-1}
Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}	LT^{-1}
Tiempo	t	T	T
Temperatura	T	θ	θ
Calor especifico	$c_p c_v$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$
Transporte de sedimento, en peso	G_s	MLT^{-3}	FT^{-1}
Transporte de sedimento, en volumen	Q_s	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Peso	w	MLT^{-2}	F

El teorema de π o Buckingham, que es fundamental en el análisis dimensional, establece que: (C.F.E., 1983)

"Toda ecuación dimensionalmente homogénea en la que intervienen magnitudes físicas, A_1,A_2,……,A_n, que se expresan en función, es decir que cada una de ellas es dependiente de B_1,B_2,……,B_m; magnitudes fundamentales, puede reducirse a una relación entre π_1, π_2, ……, π_{n-m} números adimensionales".

Con base en lo anterior y si se aplica el teorema π para estudiar un flujo cualquiera dentro de un conducto de forma arbitraria, sin considerar transferencia de calor ni las propiedades químicas del fluido, se tiene que las variables que intervienen pueden agruparse en tres tipos de variables que son: (Vergara, 1995)

1. Variables de frontera o geométricas:
    a. Transversales de la sección
    b. Longitudinales del conducto
    c. Rugosidad
    d. Otras
2. Variables del flujo:
    a. Presión
    b. Velocidad
    c. Aceleración debida a la gravedad
3. Variables del fluido:
    a. Dinámica
    b. Tensión superficial
    c. Módulo de elasticidad
    d. Densidad

Aplicando y sustituyendo estas variables en la ecuación homogénea del teorema π se obtienen los siguientes parámetros:

- **Número de Euler** $= \boldsymbol{E = v^2\rho/p}$ **Ec. 44**
- **Número de Froude** $= \boldsymbol{F_r = v^2/yg}$ **Ec. 45**

- **Número de Reynolds** $= \boldsymbol{R_e} = \boldsymbol{yv\rho/\mu}$ **Ec. 46**
- **Número de Weber** $= \mathbf{S} = \boldsymbol{y\,v^2\rho/\sigma}$ **Ec. 47**
- **Número de Cauchy** $= \boldsymbol{C} = \boldsymbol{v^2\rho/E}$ **Ec. 48**

Donde cada uno de ellos es independiente entre sí y cuyo significado físico es el siguiente:

- *E*: relaciona las fuerzas de inercia con las de presión. En trabajos de orden práctico el valor de *E* se toma como $v/(2p/\rho)^{1/2}$
- F_r: relaciona las fuerzas de inercia con las de gravedad. Se acostumbra tomarlo como el valor de $v/(gy)^{1/2}$
- R_e: relaciona las fuerzas de inercia con las de viscosidad. Se acostumbra usarlo como vy/u
- *W:* relaciona las fuerzas de inercia con las de tensión superficial.
- *C*: relaciona las fuerzas de inercia con las de elasticidad. Si el módulo de elasticidad volumétrica se asocia a la velocidad, se transforma en v / c, denominándose número de Mach.

III.1.1. CONDICIONES DE SIMILITUD

Para poder transferir los datos obtenidos de un modelo al prototipo o viceversa es necesario que los dos sistemas de flujo sean hidráulicamente similares, es decir, estos deben cumplir tres condiciones de similitud o semejanza entre ellos y estas son la de *similitud geométrica, cinemática y dinámica*.

La *similitud geométrica*, se refiere al cumplimiento de la relación entre dimensiones homologas entre prototipo y modelo, esto es que sean iguales, la escala de líneas debe ser la misma en el sentido horizontal y en el vertical. A los modelos que se llevan a cabo bajo esta condición se les conoce como modelos *sin distorsión*. Cabe mencionar que los modelos *con distorsión* son aquellos cuando dos o más magnitudes semejantes se relacionan con dos o más escalas diferentes, es decir, se utilizan dos escalas diferentes para relacionar sus

dimensiones geométricas, teniéndose una escala para las longitudes verticales y otra para las longitudes horizontales.

La *similitud cinemática* se cumple cuando las curvas de distribución de velocidades son homologas en el modelo y en el prototipo, esto es, las curvas de distribución de velocidades en secciones homologas deben ser geométricamente semejantes para que se cumpla esta condición. Por lo que el modelo y el prototipo deben tener una escala de líneas y también una escala de tiempos que cumpla con esta condición.

En la *semejanza dinámica* las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo están relacionadas entre sí mediante un valor fijo, el cual se denomina como escala de fuerzas. (C.F.E., 1983)

Si se considera que para el fenómeno de estudio, las fuerzas actuantes de verdadero interés son las de inercia y viscosidad, resulta entonces que la función homogénea dependerá únicamente del número de Reynolds (R_e). De manera semejante, considerando solamente la existencia de las fuerzas de inercia y elasticidad, las de inercia y tensión superficial, las de inercia y gravitación, el sistema modelo prototipo se regirá bajo el criterio de Cauchy, de Weber y de Froude, respectivamente, resultando así la tabla 6 de condiciones de similitud. (Vergara, 1995)

Tabla 6. Comparación de condiciones de similitud. (Vergara, 1995)

Característica (Escala de)	Condición de Similitud de Froude	Condición de Similitud de Euler	Condición de Similitud de Weber	Condición de Similitud de Cauchy
	$E_v = (E_g E_L)^{\frac{1}{2}}$	$E_v = (E_\rho{}^{-1} E_P)^{\frac{1}{2}}$	$E_v = (E_\rho{}^{-1} E_L{}^{-1} E_\sigma)^{\frac{1}{2}}$	$E_v = (E_\rho{}^{-1} E_E)^{\frac{1}{2}}$
$Longitud\ (E_L)$	$E_L{}^2$	$E_L{}^2$	$E_L{}^2$	$E_L{}^2$
$Área\ (E_A)$	$E_L{}^3$	$E_L{}^3$	$E_L{}^3$	$E_L{}^3$
$Volumen\ (E_V)$	$\left(E_L / E_g\right)^{\frac{1}{2}}$	$E_L{}^2 / E_v$	$\left(E_L{}^3 E_\rho / E_\sigma\right)^{\frac{1}{2}}$	$E_L \left(E_\rho / E_E\right)^{\frac{1}{2}}$
$Tiempo\ (E_t)$	$\left(E_L / E_g\right)^{\frac{1}{2}}$	$E_L{}^2 / E_v$	$\left(E_L{}^3 E_\rho / E_\sigma\right)^{\frac{1}{2}}$	$E_L \left(E_\rho / E_E\right)^{\frac{1}{2}}$
$Velocidad\ (E_v)$	$(E_L E_g)^{\frac{1}{2}}$	E_v / E_L	$\left(E_\sigma / E_L E_\rho\right)^{\frac{1}{2}}$	$\left(E_E / E_\rho\right)^{\frac{1}{2}}$
$Gasto\ (E_Q)$	$(E_L{}^5 E_g)^{\frac{1}{2}}$	$E_L E_v$	$\left(E_L{}^3 E_\sigma / E_\rho\right)^{\frac{1}{2}}$	$E_L \left(E_E / E_\rho\right)^{\frac{1}{2}}$
$Fuerza\ (E_F)$	$E_L{}^3 E_\gamma$	$E_\rho E_v{}^2$	E_σ / E_L	$E_E E_L{}^2$
$Presión\ (E_\rho)$	$E_\gamma E_L$	$E_\rho E_v{}^2 / E_L{}^2$	E_σ / E_L	E_E
$Pendiente\ (E_s)$	1	1	1	1

III.2. ESCALAS

En esta sección se describirán la forma en la que se determinó la escala a utilizar para la construcción del modelo físico de las secciones del arrecife, razón por la cual resulta pertinente establecer a que se le llama *escala*.

Se llama *escala* a la razón de la semejanza entre el objeto original (prototipo) y su representación (modelo), en otras palabras se refiere a la reducción o amplificación, de manera proporcional, de las dimensiones que tienen los objetos, obteniendo una representación igual en la forma, pero no en el tamaño.

En la selección de escalas es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible. El efecto de escala se puede definir 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 modelo.

En la tabla 7, se encuentran los rangos de escalas lineales empleados para diversos modelos, así como la distorsión máxima admisible, tanto para modelos de fondo fijo como para modelos de fondo móvil.

Tabla 7. Escalas en modelos Hidráulicos. (Vergara, 1995).

Modelos de:	Escalas Lineales	Observaciones
1. Obras Hidráulicas		
Vertedores, tanques, amortiguadores, rápidos y túneles.	de 1:20 a 1:70	Modelos sin distorsión y de fondo fijo.
Cárcamos de bombeo y compuertas.	de 1:5 a 1:30	
Conductos cerrados con flujo a superficie libre.	de 1:10 a 1:25	
Flujo alrededor de estructuras.	de 1:5 a 1:25	
2. Penetración de oleaje (Agitación)		
Con olas de corto periodo (oleaje).	de 1:60 a 1:200	Modelos sin distorsión de fondo fijo. Escala recomendable 1:100
Con olas de periodo medio y largo.	1:100 (escala recomendada de 1:50 a 1:100)	Para modelos sin distorsión, y de valor usual de esta de 3 a 5 de fondo fijo.
3. Estabilidad de estructuras bajo la acción de olas		
A dos dimensiones.	de 1:20 a 1:60	Modelos sin distorsión de fondo fijo.
A tres dimensiones.	de 1:40 a 1:80	Escala recomendable 1:30. En grandes canales se han empleado escalas de hasta 1:1. Es recomendable usar oleaje irregular.

Tabla 7. Continuación…

Modelos de:	Escalas Lineales	Observaciones
4. Maniobras de embarcaciones Atracadas y libres (maniobrabilidad).	de 1:100 a 1:150	Modelos sin distorsión de fondo fijo. Es recomendable usar oleaje irregular.
5. Transporte litoral	de 1:60 a 1:50	Modelos de fondo fijo con trazador. Modelos de fondo móvil. Recomendable la distorsión de hasta 5.
6. Erosión local por oleaje	de 1:100 a 1:80	Modelos de fondo móvil sin distorsión.
7. Flujo en ríos y canales	Ex de 1:250 a 1:1000, Ey de 1:50 a 1:100	Modelos con distorsión de fondo fijo. Distorsión máxima de 10.
8. Erosión local por corrientes	de 1:20 a 1:60	Modelos de fondo móvil sin distorsión.
9. Transporte de sedimentos	Ex de 1:100 a 1:500, Ey de 1:50 a 1:100	Modelos de fondo móvil, con distorsión recomendable de 5
10. Estuarios	Ex de 1:200 a 1:2000, Ey de 1:50 a 1:100	Modelos distorsionados con fondo fijo. Distorsión máxima admisible 10 y de 5 para modelos de fondo móvil.

Con base en las consideraciones y recomendaciones antes citadas, como son la condición de similitud, los rangos de escalas sugeridos para algunos modelos, las limitaciones geométricas del canal de oleaje angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA - UZ y los requerimientos del generador de oleaje, se propuso un modelo en dos dimensiones, sin distorsión y de fondo fijo. El modelo está regido por las fuerzas de inercia y gravitacionales, debido a esto las escalas para el mismo se basan en el número de Froude.

Lo anterior dio como resultado la selección de una escala de líneas de 1:20, la cual está dentro de lo recomendado en el estado del arte. Otras escalas utilizadas en la construcción del modelo son las que se muestran en la tabla 8:

Tabla 8. Escala de líneas aplicadas al modelo.

Escalas	Relación	Escala en el Modelo
Escalas de líneas	$E_L = E_L$	$E_L = 1:20$
Escala de líneas horizontal	$E_{LH} = E_L$	$E_{LH} = 1:20$
Escala de líneas vertical	$E_{LV} = E_L$	$E_{LV} = 1:20$
Escala de tiempos	$E_T = E_L^{1/2}$	$E_T = 1:4.47$
Escala de velocidades	$E_C = E_L^{1/2}$	$E_C = 1:4.47$
Escala de fuerzas	$E_F = E_L^{3}$	$E_F = 1:8000$
Escala de pesos	$E_W = E_L^{3}$	$E_W = 1:8000$

III.3. EL MODELO

El modelo que se realizó para este trabajo es el de un *arrecife artificial* de enrocamiento, con el fin de estudiar la transmisión del oleaje en este tipo de estructura, y examinar si este tipo de obras logran amortiguar parcialmente el oleaje y reducir de esta forma su energía al disminuir la altura de la ola, lo cual podría ayudar a disminuir la erosión en las costas.

Como se mencionó en el capítulo II, dicho fenómeno lo han estudiado diversos autores y ellos han establecido y coincidido en los parámetros que intervienen en el estudio de la transmisión (ver capítulo II), razón por la cual, la selección de los parámetros así como el rango a variar en este modelo, se realizó con base en los datos revisados en el estado del arte, siendo estos los siguientes:

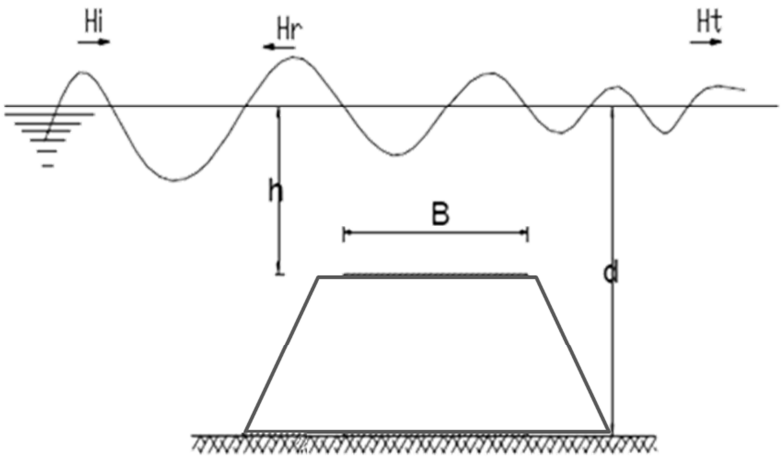


Figura 33. Transmisión del oleaje en un rompeolas sumergido.

- Sumergencia “h ó R_c ”
- Ancho de coronamiento “B ó Ac”
- a = Ángulo del talud
- d = profundidad de desplante.

Las secciones se construyeron con forma trapecial, y los taludes usados en la estructura son, los recomendados en el estado del arte:

- Lado mar = 2:1
- Lado tierra = 1.5:1

Se utilizaron dos sumergencias diferentes (dimensiones en prototipo), las cuales se propusieron en base a los datos obtenidos por Ocaña (2001).

- R_c = 0.5 m.
- R_c = 1.0 m.

Los anchos de coronamiento se propusieron atendiendo a las recomendaciones encontradas en el estado del arte, siendo estos de: (dimensiones en prototipo).

- Ac = 20 m.
- Ac = 30 m.
- Ac = 40 m.

Y la estructura se desplanto a una profundidad d = 3 m, (dimensiones en prototipo), basado en la información encontrada en el estado del arte.

El peso de la roca (prototipo) se obtuvo con la fórmula de Hudson modificada, la cual es válida para rompeolas sumergidos. (USACE, 1984) (van der Meer, 1995)

$$\boldsymbol{W_B = \frac{1}{10} W \frac{H_D}{d_2}} \qquad \textbf{Ec. 49}$$

dónde:

W_B = el peso del elemento de coraza a una profundidad (d), en toneladas.

W = peso del elemento de coraza obtenido de la fórmula de Hudson, en toneladas.

H_D = altura de la ola de diseño, en metros.

d_2 = la profundidad sobre la corona del rompeolas sumergido, R_c (sumergencia).

Como se puede observar, para poder utilizar dicha formulación se requiere introducir el peso del elemento de coraza, para un rompeolas superficial, el cual se obtuvo con la fórmula de Hudson, y dicha fórmula se muestra a continuación. (Cruz, 2010)

$$\boldsymbol{W = \frac{\gamma H^3}{K_D(\rho_r - 1)^3 \cot \alpha}} \qquad \textbf{Ec. 50}$$

dónde:

W = peso del elemento de coraza obtenido de la fórmula de Hudson, en toneladas.

γ = peso específico del elemento, en ton/m^3.

H = altura de la ola de diseño, en metros.

K_D = coeficiente de estabilidad de acuerdo al tipo de elemento, adimensional.

ρ_r= densidad relativa del elemento, adimensional.

α= ángulo del talud en el lado sin protección (lado mar), en grados.

Los elementos utilizados en la construcción del modelo fueron de roca natural, con peso específico de 2.57 ton/m^3, y el peso de dichos elementos fue obtenido de

acuerdo al cálculo realizado con las formulaciones mencionadas anteriormente, tomando en cuenta las características de altura de ola de diseño, así como las diferentes sumergencias. Siendo las condiciones para la selección del peso de los elementos de coraza a utilizar en el modelo las que se muestran en la tabla 9:

Tabla 9. Pesos de roca.

Estructura	Profundidad de desplante (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Altura de la ola de diseño (m)	Peso de la coraza en Prototipo (ton)		Peso de la coraza en Modelo (gr)
					Rompeolas superficial	Rompeolas sumergido	
I	3.00	0.50	20.00	3.47	2.70	1.87	233.75
	3.00	1.00	20.00	3.47	5.40	1.87	233.75
II	3.00	0.50	30.00	3.47	2.70	1.87	233.75
	3.00	1.00	30.00	3.47	5.40	1.87	233.75
III	3.00	0.50	40.00	3.47	2.70	1.87	233.75
	3.00	1.00	40.00	3.47	5.40	1.87	233.75

III.4. INSTALACIONES

Se utilizó el Canal de oleaje angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (L.I.H.), ubicado en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. El cual tiene las siguientes características:

- Largo = 24.45 metros.
- Ancho = 0.66 metro.
- Profundidad = 0.90 metro.

III.5. EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN

A continuación se describe el equipo e instrumentación utilizada:

1. Generador de oleaje de la empresa HR Wallingford (figura 34), tiene la capacidad de reproducir oleaje regular e irregular.

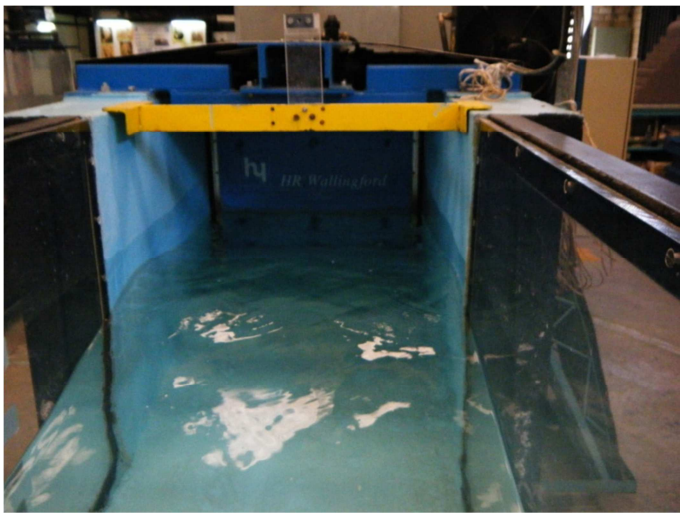


Figura 34. Generador de oleaje HR Wallingford.

2. Equipo de cómputo para controlar el generador de oleaje; el equipo que se observa en la parte izquierda de la figura 35 opera la paleta del generador y el equipo de la derecha procesa los datos obtenidos de las mediciones registradas por los sensores a través del ológrafo.

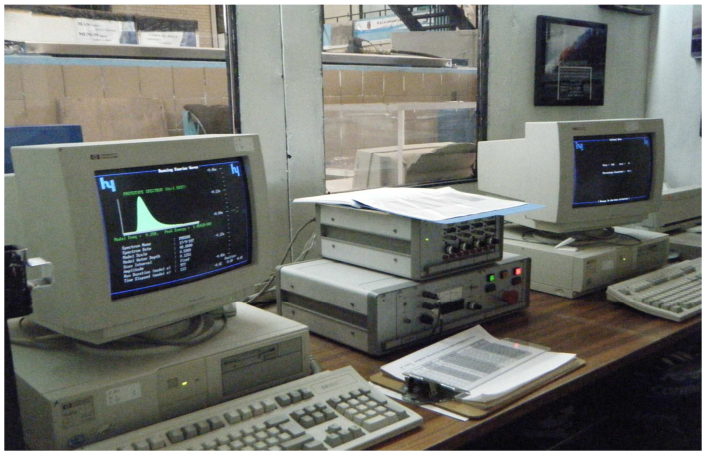


Figura 35. Equipo de cómputo para controlar el generador de oleaje.

3. Ológrafo (figura 36): se encarga de amplificar las señales transmitidas a través de los sensores colocados en el canal de oleaje angosto, registrando la variación en el nivel del agua.

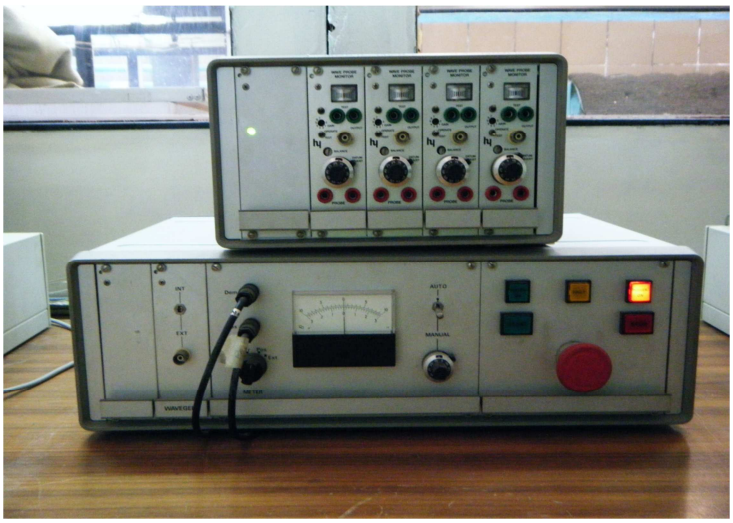


Figura 36. Ológrafo y amplificador análogo-digital.

4. Sensores de oleaje (figura 37): registran las variaciones del nivel del agua en la sección donde se coloquen.

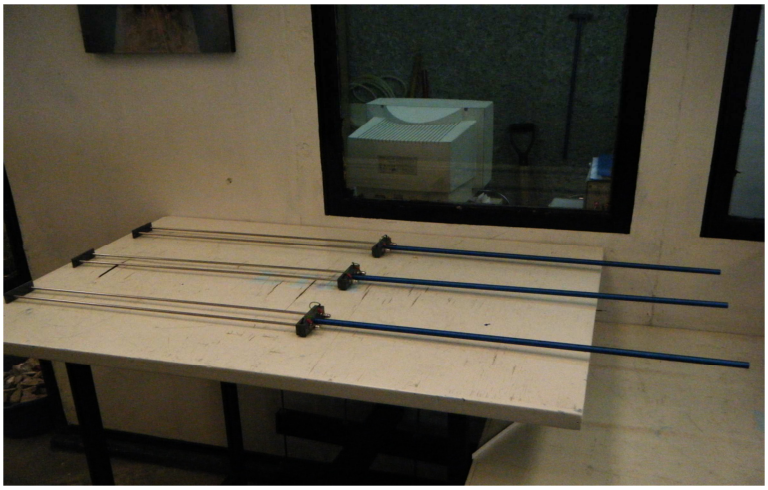


Figura 37. Sensores de oleaje.

Cabe mencionar que el equipo de generación del oleaje, utiliza un programa denominado HR WAVEGEN, el cual permite la simulación de las condiciones de oleaje del mar, de una manera flexible y variada. Este programa es capaz de generar oleaje regular, oleaje irregular y la ola solitaria. Por lo que respecta al oleaje irregular, éste puede generar las señales de oleaje utilizando dos métodos; el de ruido blanco filtrado digitalmente, que puede ser por registros simples o múltiples, y el de la transformada rápida de Fourier.

El oleaje irregular producido por el programa WAVEGEN, puede ajustarse a una de las varias formas espectrales estándar con las que esté cuenta, entre las que podemos encontrar el espectro de Pierson – Moskowitz, el de Neuman, el de JONSWAP, etcétera; o bien por un espectro generado por el usuario. (Beresford., 1994)

El equipo de medición de oleaje, trabaja con un programa que se llama HR WAVES, integrado por tres módulos, el cual está diseñado para recolectar y analizar señales análogas de datos. Los tres programas CAL, SPEC y WARP están comprendidos por, un programa de calibración de sensores de oleaje, un programa de análisis espectral y un programa de análisis estadístico, respectivamente. (Beresford, 1994)

III.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para llevar a cabo la construcción del modelo fueron necesarias varias actividades, las cuales se describen brevemente a continuación:

1. Habilitado del canal de oleaje.

Para el habilitado del canal de oleaje fue necesario comenzar por la demolición de la estructura que se había probado anteriormente. Posteriormente se retiró el amortiguador de oleaje para darle mantenimiento, se lavó el tezontle, se pintó el amortiguador y se colocó nuevamente (figuras 38 y 39).



Figura 38. Limpieza del amortiguador.



Figura 39. Colocación del amortiguador.

Una vez terminada la actividad anterior se procedió a realizar el trazo del perfil playero, con una pendiente 1:400, en una longitud de 6.98 m y otro tramo de 6.04 m de transición con una pendiente de 1:100 el cual une el fondo de canal con el perfil playero.

Ya con el trazo de la pendiente del firme se inició el relleno con granzón (figuras 41 y 42), para llevar a cabo esta actividad se colocó una barrera hecha por dos bovedillas que se cortaron a la medida del canal (figura 40), se apisono el material y se dejaron 7mm para el colado del firme. Se introdujeron dos tubos de PVC con diámetro de 1 1/2“, para evitar el represamiento y que el nivel del agua durante los ensayos regresara al nivel cero, y así obtener mediciones adecuadas del fenómeno en estudio.



Figura 40. Corte de bovedillas.



Figura 41. Relleno con granzón.



Figura 42. Relleno con granzón.

Para el colado del firme se colocaron niveles, para realizar el colado por tramos y evitar grietas (figura 43), se colaron en total 6 tramos, el material utilizado fue: arena cemento y agua en una relación de 2 a 1 arena – cemento. Una vez colado

y curado fue necesario pulir el firme debido a que la rugosidad a escala podría provocar efectos parásitos en el modelo, pudiendo propiciar esto alteraciones en la medición de la transmisión, ver figura 44.



Figura 43. Colocación de los niveles.



Figura 44. Colado de los tramos.

Después de estas actividades se procedió a pintar el canal de oleaje con pintura de alberca (figura 45).

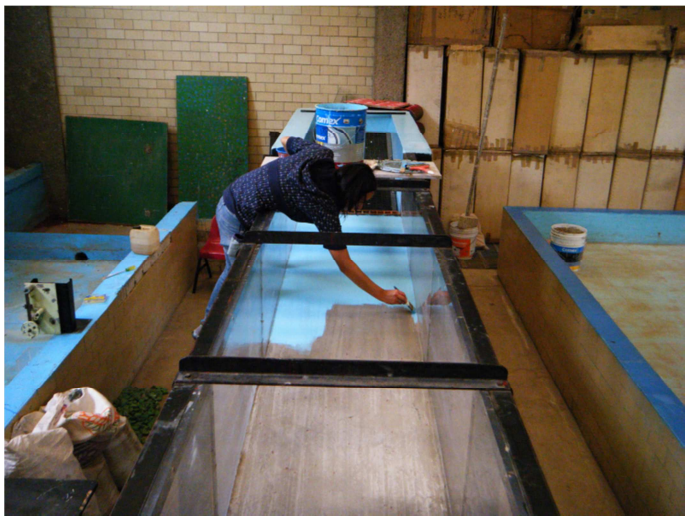


Figura 45. Pintado del canal.

2. Selección de los pesos de roca

Se realizó el acopio y selección del material, clasificándolo en un rango de peso que va desde los 175 gr hasta los 290 gr (pesos en modelo). El cual abarca el peso que se necesitaba de roca obtenido mediante cálculo (tabla 10):

Tabla 10. Pesos de roca.

Estructura	Ancho de corona (m)	Peso de la coraza en Prototipo (ton)	Peso de la coraza en Modelo (gr)
I	20.00	1.87	233.75
	20.00	1.87	233.75
II	30.00	1.87	233.75
	30.00	1.87	233.75
III	40.00	1.87	233.75
	40.00	1.87	233.75

Después de seleccionar la roca se pintó en cuatro colores diferentes, verde, blanco, rojo y azul, para identificar las secciones y si se presentaba algún daño en la estructura, aunque éste no es uno de los objetivos del modelo, puedo observarse su funcionamiento mientras se ensayaba, ver figuras 46 y 47.



Figura 46. Pintado de rocas.



Figura 47. Pintado de rocas.

3. Construcción de las secciones del rompeolas

Para llevar a cabo la construcción de las secciones del rompeolas, primero se realizó el trazo del perfil de una de las tres diferentes secciones que se ensayaron, ver figura 48.



Figura 48. Trazo del perfiles.

Una vez trazados los perfiles se comenzó el relleno del núcleo de la estructura con un ancho de coronamiento de 20 m (prototipo), esto debido a que las estructuras se fueron ensayando de la más pequeña a la más grande, en las figuras 49 y 50 es posible ver el proceso de construcción.



Figura 49. Relleno de núcleo para la estructura con B = 30 m.



Figura 50. Relleno de núcleo para la estructura con B = 40 m.

Una vez listo el relleno del núcleo se procedió a la colocación de los elementos de coraza, separando la coraza en franjas de colores, pues como ya se mencionó anteriormente con este tipo de acomodo es posible visualizar si la estructura sufria algún tipo de daño, ver figura 51.



Figura 51. Colocación de los elementos de coraza para una B = 40 m.

Una vez lista la estructura fue posible comenzar con los ensayos para la obtención de los datos necesarios para el cálculo de coeficiente de transmisión.

III.6. ENSAYOS

Para realizar los ensayos fue necesario primero calibrar los sensores de oleaje. En el presente trabajo, se realizaron dos calibraciones diferentes, ya que se tuvieron

dos sumergencias, la de un metro y la de medio metro. El procedimiento que se siguió para la calibración de los sensores es el siguiente:

- Se utilizaron tres sensores para medir los niveles de la superficie de agua, a los cuales se les asignó un número de canal, con un nombre para facilitar su identificación, dichos sensores se denominaron como se observa en la tabla 11:

Tabla 11. Nombre de los canales y su descripción.

Canal	Nombre	Descripción
Canal 0	Sensor A.P.	Sensor de Aguas Profundas
Canal 1	Sensor A.I.	Sensor de Aguas Intermedias
Canal 2	Sensor A.R.	Sensor de Aguas Reducidas

  En el programa *HR Waves* se seleccionaron 5 canales, tres fueron usados para recibir las señales de los sensores y dos los últimos son utilizados por el programa para poder enviar las señales, los canales que se utilizaron fueron los siguientes: 0, 1, 2, 8 y 9.
- Después de haberse declarado los canales a utilizar, se procedió a realizar el escaneo de los canales por el equipo de cómputo. Para lo cual se seleccionó un escaneo por lecturas múltiples.
- Se crea un archivo de calibración en el programa *CAL,* dentro del paquete *HR Waves*. El cual se utilizó en la medición del oleaje que se reprodujó por el generador.
- Se acomodaron los tres sensores de la siguiente forma, el sensor cero se colocó en aguas profundas, el sensor uno se puso al pie de la estructura y el sensor dos quedo después de la estructura.
- Una vez colocados los sensores se procedió a realizar el primer escaneo de los canales.
- En este punto cabe aclarar que los sensores tienen orificios a lo largo de la varilla de soporte los cuales están a una distancia de 2 cm entre ellos. Después del primer escaneo se bajaron los sensores dos orificios. Esto se hace para medir la cresta de la ola, esta medición tiene un valor positivo; este valor se ingresa en el archivo de calibración.

- Después se regresan los sensores a su punto inicial donde se fija en el programa como el cero. Este es el nivel medio.
- Se mueven nuevamente los sensores, pero ahora se suben dos orificios, aquí se está midiendo el valle de la ola, y esta medición tiene un valor negativo.
- Se regresan los sensores por última vez a su posición inicial, es decir al nivel medio.
- Se obtienen las rectas de calibración con sus correspondientes coeficientes de correlación de los sensores (mientras el valor del coeficiente de correlación sea más cercano a la unidad, la dispersión entre los datos es menor). Los resultados para el coeficiente de correlación de la calibración para las estructuras ensayadas con medio metro de sumergencia se observan en la tabla 12, mientras que los valores del coeficiente de correlación de la calibración para las estructuras ensayadas con un metro de sumergencia se observan en la tabla 13.

Tabla 12. Coeficiente de correlación para un Rc = 0.5m.

Canal	Nombre	Coeficiente de correlación
Canal 0	Sensor A.P.	0.9997
Canal 1	Sensor A.I.	0.9666
Canal 2	Sensor A.R.	0.9984

Tabla 13. Coeficiente de correlación para un Rc = 1m.

Canal	Nombre	Coeficiente de correlación
Canal 0	Sensor A.P.	0.9992
Canal 1	Sensor A.I.	0.9879
Canal 2	Sensor A.R.	0.9972

- Se procede a salir del programa *CAL*, guardando en el disco duro del equipo, el archivo de calibración.
- Se concluye que la calibración de los canales fue buena y se imprime la calibración de los sensores de oleaje.

Por lo que respecta al oleaje generado en los ensayos del modelo, este fue oleaje irregular. La elección del espectro utilizado en los ensayos, se debió en primera instancia, a que el programa del equipo de cómputo tiene disponibles siete espectros diferentes, por lo que de entre estos, se propuso utilizar el espectro de Pierson – Moskowitz para la generación del oleaje, debido a que este espectro reproduce más adecuadamente las condiciones de oleaje que se presenta en las zonas marítimas de México, ya que cuenta con una energía mayor y una zona de generación más amplia (fetch), en comparación a los otros espectros con los que cuenta el equipo. Las señales de oleaje que se reprodujeron durante los ensayos son las que se observan en la tabla 14:

Tabla 14. Características de las señales utilizadas en los ensayos, (Prototipo).

Serie	Ensayo	Nombre de la Señal	Periodo incidente (seg)	Altura incidente (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Observaciones
4	1	PREEF 1	5.08	0.75	0.50	20.00	Estructura 1
	2	PREEF 2	5.74	1.03			
	3	PREEF 3	6.63	1.37			
	4	PREEF 4	7.75	1.71			
	5	PREEF 5	8.29	2.39			
5	1	PREEF 6	4.86	0.89	1.00	20.00	Estructura 1
	2	PREEF 7	5.73	1.29			
	3	PREEF 8	6.79	1.61			
	4	PREEF 9	7.23	2.18			
	5	PREEF 10	8.26	2.79			
6	1	PREEF 1	5.15	0.75	0.50	30.00	Estructura 2
	2	PREEF 2	5.88	1.08			
	3	PREEF 3	6.89	1.55			
	4	PREEF 4	7.89	2.03			
	5	PREEF 5	8.28	2.66			
7	1	PREEF 6	4.95	0.93	1.00	30.00	Estructura 2
	2	PREEF 7	5.83	1.36			
	3	PREEF 8	6.99	1.82			
	4	PREEF 9	7.35	2.49			
	5	PREEF 10	8.26	3.03			
8	1	PREEF 1	5.04	0.77	0.50	40.00	Estructura 3
	2	PREEF 2	5.77	1.08			
	3	PREEF 3	6.70	1.43			
	4	PREEF 4	7.38	1.71			
	5	PREEF 5	7.60	2.19			
9	1	PREEF 6	5.06	0.91	1.00	40.00	Estructura 3
	2	PREEF 7	5.86	1.30			
	3	PREEF 8	6.64	1.52			
	4	PREEF 9	6.91	2.02			
	5	PREEF 10	7.54	2.37			

A continuación se muestran las condiciones y procedimiento bajo las que se llevaron a cabo los ensayos para obtener el coeficiente de transmisión que presentan las estructuras:

a) Para la generación de las señales de oleaje se utilizó el espectro de Pierson– Moskowitz, como ya se mencionó anteriormente.
b) En los ensayos se reprodujeron 400 olas.
c) Cada estructura se sometió a un total de 2000 olas.
d) En todos los ensayos se midió la transmisión del oleaje sobre las secciones.
e) En todos los ensayos se midió el oleaje en tres puntos diferentes, esto es, al pie del generador de oleaje, al pie de la estructura y después de la estructura. Para así obtener la información del oleaje incidente y del oleaje transmitido.

Procedimiento para obtener los coeficientes de reflexión:

a) Se colocan tres sensores de oleaje entre el generador de oleaje y el rompeolas sumergido a una distancia no mayor de una longitud de ola (función ésta del periodo de oleaje correspondiente al ensayo) y separados entre sí de acuerdo con el periodo de 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 tres sensores de oleaje.
c) Se calcula el coeficiente de reflexión promediando las energías de oleaje incidente y reflejado.

Ensayos para medir los coeficientes de transmisión:

a) Se generó oleaje para cada uno de los ensayos en tiempo suficiente para reproducir 400 olas.
b) Con base en los datos del 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 la ola incidente (H_I) y de la ola transmitida (H_T).

c) Se calculan los coeficientes de transmisión en base a las alturas de ola incidente (H_I) y transmitidas (H_T).

III.6.I. OBSERVACIONES DE LOS ENSAYOS

En esta sección se realizara una breve reseña de los fenómenos observados durante la realización de los ensayos definitivos, los cuales abarcan las series que van de la 4 a la 9; ya que las tres primeras series se utilizaron para calibrar el modelo.

- Descripción de los ensayos de la serie 4 para la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 20 m y una sumergencia (R_c) de medio metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Se aprecia que el oleaje incidente no tiene una disminución significativa en sus características (altura y periodo), conservando gran parte de su energía. Razón por la cual, cuando el oleaje pasa la estructura, esté produce agitación en el lado protegido por la estructura, figura 52.

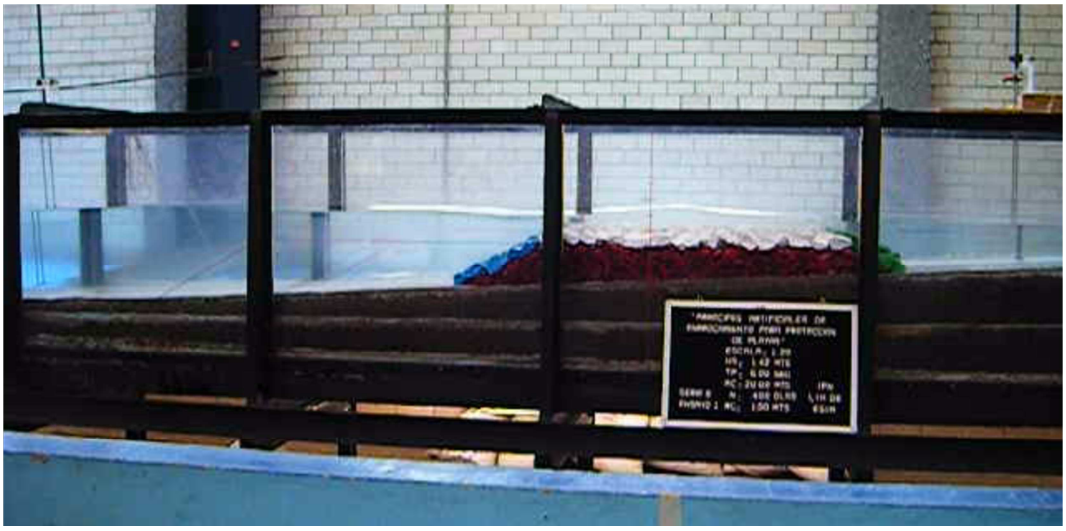


Figura 52. Ensayo 1, Serie 4.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas

Se aprecia una disminución en las características (altura y periodo) del oleaje, pero es mínima. Se presenta un rompimiento parcial del oleaje, pero aún conserva energía ya que se genera agitación en el lado tierra de la estructura.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas

Se observa descenso de la ola (Run-down) en el talud lado mar de la estructura, pero no hay desplazamiento en los elementos de coraza. La ola presenta un rompimiento parcial, y se percibe una disminución en las características del oleaje (altura y periodo), pero este aún genera agitación en el lado tierra, lo cual se aprecia en la figura 53.



Figura 53. Ensayo 3, Serie 4.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas

Se observa que la disminución en las características de la ola (altura y periodo), debido a la estructura y el obstáculo que ésta representa en su trayectoria, es aproximadamente de un 30%, pero aún se sigue presentando agitación en el lado tierra de la estructura.

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas

Se aprecia el descenso de la ola (Run-down) en el talud lado mar de la estructura, descubriéndose una tercera parte del talud, pero no hay movimiento en los elementos de coraza. Visualmente parece que la estructura provoca una disminución importante en las características del oleaje, figura 54.



Figura 54. Ensayo 5, Serie 4.

- Serie 5 de la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 20 m y una sumergencia (R_c) de un metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Durante este ensayo no se aprecia una disminución sustancial en las características (altura y periodo) del oleaje.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas.

Se observa que hay una disminución en las características de la ola, pero no parece significativa; en las olas de mayor altura es posible apreciar que en la cresta se forma un pico, pero la ola no llega a romper.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas

Se distingue que las olas con mayor altura presentan un rompimiento parcial, pero la ola aún tiene energía ya que se genera agitación en el lado tierra de la estructura, figura 55.



Figura 55. Ensayo 3, Serie 5.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas

En este ensayo se distingue que un mayor número de olas presentan un rompimiento parcial, aunque se aprecia una disminución en las características del oleaje, este tiene fuerza por lo que aún se presenta agitación en el lado tierra de la estructura.

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas

En este ensayo se presenta descenso de la ola (Run-down) en el talud lado mar de la estructura, pero no se descubren los elementos de coraza. Se observa que el oleaje disminuye sus características al pasar sobre la estructura, pero conserve gran parte de su energía, ya que provoca agitación en el lado tierra de la estructura, figura 56.



Figura 56. Ensayo 5, Serie 5.

- Serie 6 de la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 30 m y una sumergencia (R_c) de medio metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Se observa una disminución en las características del oleaje (altura y periodo), y en las olas más grandes se presenta un rompimiento parcial, que recorre todo el ancho de coronamiento de la estructura, como se ilustra en la figura 57.



Figura 57. Ensayo 1, Serie 6.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas.

Se nota que la estructura genera una disminución considerable en las características del oleaje (altura y periodo), cuando inciden olas con mayor altura se presenta un pequeño descenso de la ola (Run-down) sobre el talud lado mar de la estructura.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas.

Se aprecia que para estas condiciones de oleaje el descenso de la ola (Run-down) se vuelve a presentar en el talud lado mar de la estructura y en ocasiones se descubren las rocas en el hombro de la estructura, pero no hay desplazamiento en los elementos de coraza.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas.

Se observa que las características del oleaje (altura y periodo) disminuyen considerablemente por el efecto de fricción que se produce entre el oleaje y la corona de la estructura a su paso.

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas.

En este ensayo se puede ver que el rompimiento del oleaje comienza en el hombro de la estructura y recorre todo el ancho de la corona; se presenta descenso de la ola (Run-down), el cual descubre el hombro de la estructura, sin provocar desplazamiento en los elementos de la coraza. Visualmente se aprecia que la transmisión del oleaje es alrededor del 50%, en relación al oleaje incidente, figura 58.



Figura 58. Ensayo 5, Serie 6.

- Serie 7 de la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 30 m y una sumergencia (R_c) de un metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Se observa que la estructura disminuye el periodo de la ola, pero no se percibe el efecto que causa sobre la altura, no se presenta rompimiento en el oleaje.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas.

En este ensayo ya se advierte que la estructura comienza a tener un efecto sobre el oleaje incidente, ya que en las olas con mayor altura se aprecia un rompimiento parcial, como se aprecia en la figura 59.



Figura 59. Ensayo 2, Serie 7.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas.

En este ensayo ya se presenta rompiente del oleaje, el cual recorre toda la estructura, pero se disipa al sentir el nuevo cambio de profundidad al pasar la estructura completa.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas.

Se observa que el rompimiento de las olas es más frecuente y va acompañado en algunas ocasiones del descenso de la ola (Run-down) sobre el talud lado mar de la estructura, este efecto no alcanza a mover los elementos de coraza.

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas.

Se denota que las características del oleaje disminuyen considerablemente, pero aunque la gran mayoría de las olas rompen, se puede apreciar un poco de agitación en el lado tierra de la estructura, debido a que con la sumergencia de un metro y estas características del oleaje (altura y periodo), la ola aún pasa con energía, figura 60.



Figura 60. Ensayo 5, Serie 7.

- Serie 8 de la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 40 m y una sumergencia (R_c) de medio metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Se advierte una disminución considerable en las características de la ola (altura y periodo), debido a la fricción que genera la estructura en el oleaje, y en el lado tierra de la estructura no se percibe agitación. En las olas de mayor altura es posible apreciar que en la cresta se forma un pico.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas.

Se observa una disminución importante en las características de la ola (altura y periodo), así como el rompimiento de las olas con mayor altura, cuando la ola se encuentra con la estructura esta rompe comenzando desde el hombro y recorriendo aproximadamente la mitad de la estructura.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas.

Se aprecia para este ensayo que el rompimiento de las olas se presenta con mayor frecuencia, y va desde el hombro de la estructura y recorre aproximadamente tres cuartas partes de ancho de la corona, figura 61.



Figura 61. Ensayo 3, Serie 8.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas.

Se percata que a pesar de que el oleaje incidente es mayor, existe una disminución en las características de la ola, y el rompimiento del oleaje se presenta con mayor frecuencia logrando disipar gran parte de su energía, por lo que ya no se aprecia agitación en el lado protegido (lado tierra).

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas.

En este ensayo es posible notar que se presenta descenso de la ola (Run-down) en el talud lado mar de la estructura, pero no se descubren los elementos de coraza, tampoco hay movimiento en los elementos; y la mayor parte de las olas rompen al encontrar el obstáculo que la estructura representa en su trayectoria, como se puede apreciar en la figura 62.



Figura 62. Ensayo 5, Serie 8.

- Serie 9 de la sección de un arrecife artificial, con un ancho de coronamiento (B) de 40 m y una sumergencia (R_c) de un metro.

Ensayo 1 T= 6 seg. H_s = 1.42 m. N = 400 olas.

Se percibe una reducción en la altura de ola transmitida, respecto a la altura de ola incidente, pero no hay rompimiento del oleaje, también se alcanza a observar que debido a la fricción causada por la estructura en el oleaje incidente en la cresta se le forma un pico, como se aprecia en la figura 63.



Figura 63. Ensayo 1, Serie 9.

Ensayo 2 T= 7 seg. H_s = 1.94 m. N = 400 olas.

Se observa que las olas más grandes comienzan a tener una afectación por la fricción con la estructura, presentando un rompimiento parcial, la cual le ayuda a disipar gran parte de su energía, por lo que no se aprecia agitación en el lado tierra de la estructura.

Ensayo 3 T= 8 seg. H_s = 2.54 m. N = 400 olas.

Se advierte que el efecto de la estructura sobre el oleaje, es mayor para estas condiciones de altura y periodo, pero aún no rompen totalmente las olas, y es posible visualizar que en la cresta de la ola se forma un pico, lo cual es posible visualizar en la figura 64.



Figura 64. Ensayo 3, Serie 9.

Ensayo 4 T= 9 seg. H_s = 3.22 m. N = 400 olas.

Se descubre que las olas presentan un rompimiento parcial más frecuentemente, este inicia en el hombro de la estructura y recorre toda la corona. Es posible apreciar visualmente que la altura de ola transmitida es menor que la incidente.

Ensayo 5 T= 10 seg. H_s = 3.97 m. N = 400 olas.

Se nota que la mayor parte de las olas que inciden sobre la estructura rompen, iniciando en el hombro de la estructura y barriendo la corona completa, a pesar de esto no se aprecia agitación en el lado tierra, figura 65.



Figura 65. Ensayo 5, Serie 9.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Una vez que se realizaron los ensayos de las estructuras descritas en el apartado del modelo (capitulo III), y que se obtuvieron las mediciones de las alturas de olas que incidían sobre las estructuras y las alturas de olas que se transmitían sobre ellas ver tabla 15, se procedió a realizar el análisis de resultados, partiendo de la obtención del coeficiente de transmisión lo cual se describe en el siguiente apartado.

Tabla 15. Datos obtenidos de los ensayos.

Serie	Ensayo	Periodo incidente (seg)	Altura incidente (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Observaciones	Altura de ola incidente (m)	Altura de ola transmitida (m)
4	1	5.08	0.75	0.50	20.00	Estructura 1	0.7478	0.4250
	2	5.74	1.03				1.0250	0.5638
	3	6.63	1.37				1.3690	0.7349
	4	7.75	1.71				1.7124	0.8932
	5	8.29	2.39				2.3940	1.1490
5	1	4.86	0.89	1.00	20.00	Estructura 1	0.8929	0.7131
	2	5.73	1.29				1.2870	0.8693
	3	6.79	1.61				1.6060	1.0010
	4	7.23	2.18				2.1800	1.3090
	5	8.26	2.79				2.7860	1.5550
6	1	5.15	0.75	0.50	30.00	Estructura 2	0.7491	0.3292
	2	5.88	1.08				1.0790	0.4065
	3	6.89	1.55				1.5480	0.5474
	4	7.89	2.03				2.0320	0.6706
	5	8.28	2.66				2.6644	0.7993
7	1	4.95	0.93	1.00	30.00	Estructura 2	0.9311	0.5654
	2	5.83	1.36				1.3580	0.7247
	3	6.99	1.82				1.8150	0.8227
	4	7.35	2.49				2.4870	1.0670
	5	8.26	3.03				3.0300	1.2490
8	1	5.04	0.77	0.50	40.00	Estructura 3	0.7661	0.2586
	2	5.77	1.08				1.0770	0.3456
	3	6.70	1.43				1.4260	0.4421
	4	7.38	1.71				1.7056	0.5117
	5	7.60	2.19				2.1856	0.6120
9	1	5.06	0.91	1.00	40.00	Estructura 3	0.9114	0.4622
	2	5.86	1.30				1.3010	0.6210
	3	6.64	1.52				1.5200	0.7144
	4	6.91	2.02				2.0220	0.9111
	5	7.54	2.37				2.3710	1.0300

IV.1. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN

Para la obtención de los coeficientes de transmisión (tabla 16) se introdujeron los datos obtenidos de las lecturas que se registraron con los equipos de medición durante los ensayos, en la siguiente expresión:

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

Dónde:

H_I = altura de ola incidente, H_s o $H_{1/3}$ (altura de ola significante del tren de olas).

H_T = altura de ola transmitida sobre la estructura.

K_T = coeficiente de transmisión.

Tabla 16. Coeficientes de Transmisión.

Serie	Ensayo	Periodo incidente (seg)	Altura incidente (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Observaciones	Altura de ola incidente (m)	Altura de ola transmitida (m)	K_T
4	1	5.08	0.75	0.50	20.00	Estructura 1	0.7478	0.4250	0.57
	2	5.74	1.03				1.0250	0.5638	0.55
	3	6.63	1.37				1.3690	0.7349	0.54
	4	7.75	1.71				1.7124	0.8932	0.52
	5	8.29	2.39				2.3940	1.1490	0.48
5	1	4.86	0.89	1.00	20.00	Estructura 1	0.8929	0.7131	0.80
	2	5.73	1.29				1.2870	0.8693	0.68
	3	6.79	1.61				1.6060	1.0010	0.62
	4	7.23	2.18				2.1800	1.3090	0.60
	5	8.26	2.79				2.7860	1.5550	0.56
6	1	5.15	0.75	0.50	30.00	Estructura 2	0.7491	0.3292	0.44
	2	5.88	1.08				1.0790	0.4065	0.38
	3	6.89	1.55				1.5480	0.5474	0.35
	4	7.89	2.03				2.0320	0.6706	0.33
	5	8.28	2.66				2.6644	0.7993	0.30
7	1	4.95	0.93	1.00	30.00	Estructura 2	0.9311	0.5654	0.61
	2	5.83	1.36				1.3580	0.7247	0.53
	3	6.99	1.82				1.8150	0.8227	0.45
	4	7.35	2.49				2.4870	1.0670	0.43
	5	8.26	3.03				3.0300	1.2490	0.41
8	1	5.04	0.77	0.50	40.00	Estructura 3	0.7661	0.2586	0.34
	2	5.77	1.08				1.0770	0.3456	0.32
	3	6.70	1.43				1.4260	0.4421	0.31
	4	7.38	1.71				1.7056	0.5117	0.30
	5	7.60	2.19				2.1856	0.6120	0.28
9	1	5.06	0.91	1.00	40.00	Estructura 3	0.9114	0.4622	0.51
	2	5.86	1.30				1.3010	0.6210	0.48
	3	6.64	1.52				1.5200	0.7144	0.47
	4	6.91	2.02				2.0220	0.9111	0.45
	5	7.54	2.37				2.3710	1.0300	0.43

IV.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para la mejor comprensión del fenómeno de transmisión del oleaje sobre las estructuras estudiadas, se utilizaron los parámetros adimensionales que se consideran de mayor influencia para este fenómeno, los cuales se obtienen de relacionar las principales características de la estructura y del oleaje que incide sobre ella, algunos de estos parámetros se obtuvieron de la expresión que se muestra a continuación, la cual fue utilizada por Dattari (Ocaña, 2001):

$$K_T = f\left(\frac{H_I}{L}, \frac{d}{L}, \frac{B}{L}, \frac{d_s}{d}, S, s, p\right)$$

Dónde:

L = longitud de la ola incidente

d = profundidad del agua al pie de la estructura.

B ó Ac = ancho de la corona de la estructura

d_s ó Rc = sumergencia

S = parámetro que caracteriza la forma de la sección transversal de la estructura.

s = talud de la estructura.

p = porosidad del rompeolas.

H_I / L = relación de esbeltez de la ola incidente.

d / L = profundidad relativa del agua.

Ac / L = ancho relativa de la corona.

d_s / d = profundidad relativa de la corona sumergida.

También se utilizó el parámetro Rc / H_I que es la altura relativa de coronamiento, este parámetro es utilizado por Van der Meer.

Para validar los datos que se obtuvieron en las mediciones, se realizó el cálculo de los coeficientes de transmisión con las formulaciones propuestas por los siguientes autores:

- Goda 1969 *(Ec. 21)*.
- Van der Meer 1990 *(Ec. 25).*
- d´Angremond *et. al.* 1996 *(Ec. 29).*
- Van der Meer *et. al.* 2000 *(Ec. 34 y 35)*.
- Van der Meer *et. al.* 2004 *(Ec. 42).*

Se eligieron estos autores ya que los parámetros utilizados por ellos son similares a los empleados en este trabajo de investigación (ver capitulo II).

Los datos obtenidos de los estudios realizados se procesaron y se presentan a continuación en tablas y gráficas, ya que es la mejor manera para realizar las observaciones e interpretar los datos obtenidos.

Cabe mencionar que para obtener algunos de los parámetros antes mencionados fue necesario obtener la longitud de la ola “L”, y los valores obtenidos se muestran en la tabla 17, y en la tabla 18 se muestran los cálculos realizados para los diferentes autores, así como los parámetros utilizados.

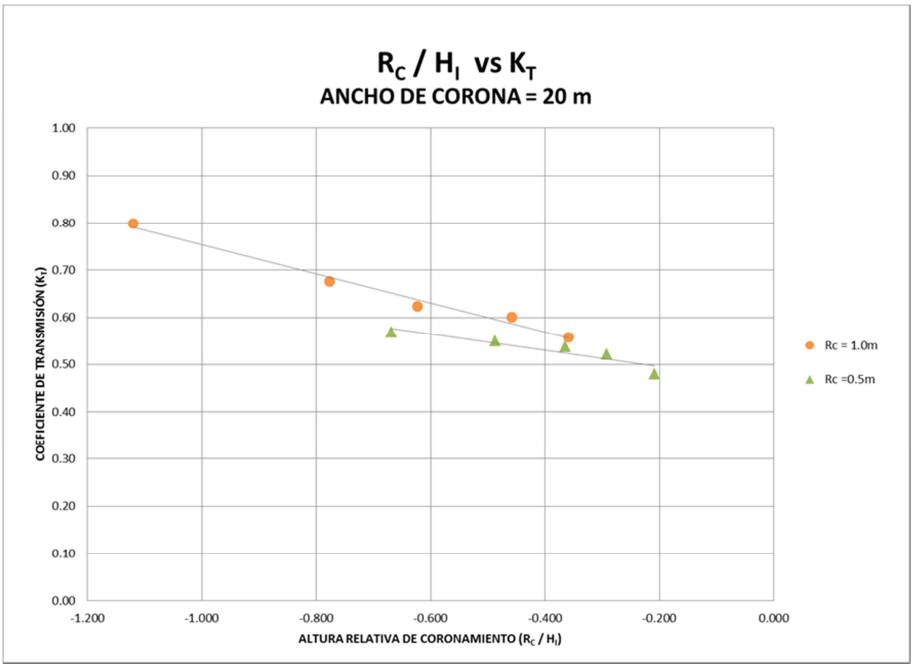
Tabla 17. Calculo de la longitud de onda.

Serie	Ensayo	Periodo incidente (seg)	Altura incidente (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Observaciones	d (m)	Lo (m)	d/Lo	Condicional	L (m)
4	1	5.08	0.75	0.50	20.00	Estructura 1	3.00	40.23	0.07	Aguas Intermedias	25.52
	2	5.74	1.03					51.39	0.06	Aguas Intermedias	29.00
	3	6.63	1.37					68.55	0.04	Aguas Intermedias	34.14
	4	7.75	1.71					93.76	0.03	Aguas Someras	42.06
	5	8.29	2.39					107.26	0.03	Aguas Someras	44.98
5	1	4.86	0.89	1.00	20.00	Estructura 1	3.00	36.83	0.08	Aguas Intermedias	24.34
	2	5.73	1.29					51.15	0.06	Aguas Intermedias	29.00
	3	6.79	1.61					71.92	0.04	Aguas Intermedias	35.28
	4	7.23	2.18					81.50	0.04	Aguas Someras	39.21
	5	8.26	2.79					106.45	0.03	Aguas Someras	44.81
6	1	5.15	0.75	0.50	30.00	Estructura 2	3.00	41.44	0.07	Aguas Intermedias	26.10
	2	5.88	1.08					53.98	0.06	Aguas Intermedias	30.15
	3	6.89	1.55					74.02	0.04	Aguas Someras	37.37
	4	7.89	2.03					97.21	0.03	Aguas Someras	42.82
	5	8.28	2.66					106.91	0.03	Aguas Someras	44.91
7	1	4.95	0.93	1.00	30.00	Estructura 2	3.00	38.27	0.08	Aguas Intermedias	24.93
	2	5.83	1.36					53.08	0.06	Aguas Intermedias	29.57
	3	6.99	1.82					76.25	0.04	Aguas Someras	37.93
	4	7.35	2.49					84.24	0.04	Aguas Someras	39.87
	5	8.26	3.03					106.33	0.03	Aguas Someras	44.79
8	1	5.04	0.77	0.50	40.00	Estructura 3	3.00	39.66	0.08	Aguas Intermedias	24.93
	2	5.77	1.08					51.95	0.06	Aguas Intermedias	29.57
	3	6.70	1.43					69.95	0.04	Aguas Intermedias	34.71
	4	7.38	1.71					84.96	0.04	Aguas Someras	40.04
	5	7.60	2.19					90.02	0.03	Aguas Someras	41.21
9	1	5.06	0.91	1.00	40.00	Estructura 3	3.00	39.94	0.08	Aguas Intermedias	25.52
	2	5.86	1.30					53.49	0.06	Aguas Intermedias	30.15
	3	6.64	1.52					68.83	0.04	Aguas Intermedias	34.14
	4	6.91	2.02					74.40	0.04	Aguas Someras	37.47
	5	7.54	2.37					88.71	0.03	Aguas Someras	40.91

Tabla 18. Calculo del coeficiente de transmisión.

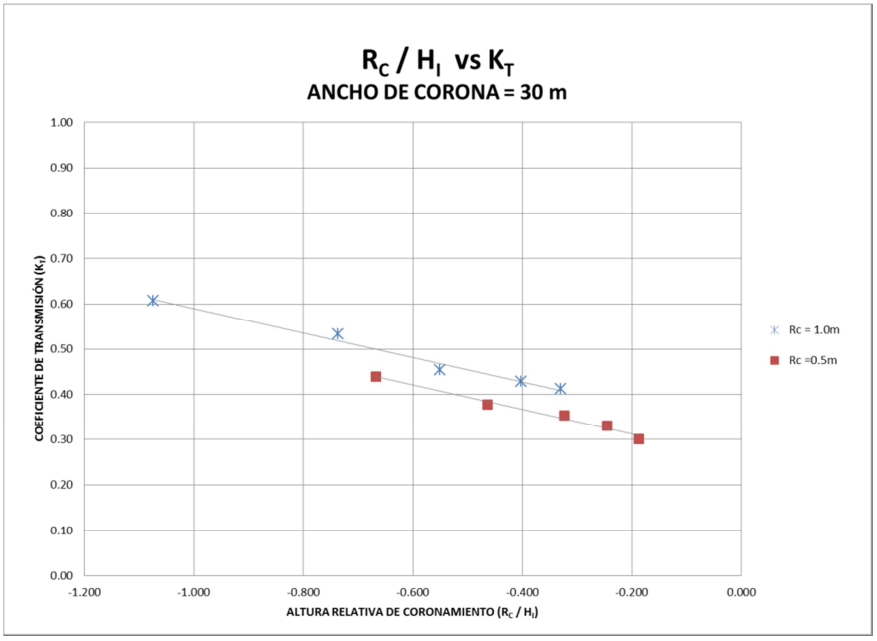
Serie	Ensayo	T_l (seg)	H_l (m)	H_T (m)	Rc (m)	B (m)	d (m)	L (m)	B / H_l	Rc / H_l	Rc / B	H_l / d	S_{op}	ξ_{op}	K_T	K_T Goda (1969)	K_T van der Meer. (1990)	K_T d´Angremond et. al. (1996)	K_T van der Meer et. al. (2000)	K_T van der Meer et. al. (2004)
4	1	5.08	0.748	0.425	-0.50	20.00	3.00	25.52	26.75	-0.669	-0.025	0.249	0.019	3.67	0.57	0.58	0.66	0.46	0.43	0.28
	2	5.74	1.025	0.564	-0.50	20.00	3.00	29.00	19.51	-0.488	-0.025	0.342	0.020	3.55	0.55	0.49	0.61	0.41	0.39	0.23
	3	6.63	1.369	0.735	-0.50	20.00	3.00	34.14	14.61	-0.365	-0.025	0.456	0.020	3.55	0.54	0.43	0.57	0.38	0.38	0.20
	4	7.75	1.712	0.893	-0.50	20.00	3.00	42.06	11.68	-0.292	-0.025	0.571	0.018	3.71	0.52	0.40	0.55	0.37	0.38	0.18
	5	8.29	2.394	1.149	-0.50	20.00	3.00	44.98	8.35	-0.209	-0.025	0.798	0.022	3.35	0.48	0.36	0.52	0.35	0.38	0.17
5	1	4.86	0.893	0.713	-1.00	20.00	3.00	24.34	22.40	-1.120	-0.050	0.298	0.024	3.22	0.80	0.79	0.80	0.64	0.56	0.44
	2	5.73	1.287	0.869	-1.00	20.00	3.00	29.00	15.54	-0.777	-0.050	0.429	0.025	3.16	0.68	0.63	0.69	0.53	0.49	0.33
	3	6.79	1.606	1.001	-1.00	20.00	3.00	35.28	12.45	-0.623	-0.050	0.535	0.022	3.35	0.62	0.56	0.65	0.49	0.47	0.29
	4	7.23	2.180	1.309	-1.00	20.00	3.00	39.21	9.17	-0.459	-0.050	0.727	0.027	3.06	0.60	0.48	0.60	0.44	0.43	0.25
	5	8.26	2.786	1.555	-1.00	20.00	3.00	44.81	7.18	-0.359	-0.050	0.929	0.026	3.10	0.56	0.43	0.57	0.42	0.43	0.23
6	1	5.15	0.749	0.329	-0.50	30.00	3.00	26.10	40.05	-0.667	-0.017	0.250	0.018	3.73	0.44	0.58	0.66	0.44	0.40	0.27
	2	5.88	1.079	0.407	-0.50	30.00	3.00	30.15	27.80	-0.463	-0.017	0.360	0.020	3.54	0.38	0.48	0.60	0.37	0.36	0.21
	3	6.89	1.548	0.547	-0.50	30.00	3.00	37.37	19.38	-0.323	-0.017	0.516	0.021	3.46	0.35	0.41	0.56	0.34	0.34	0.17
	4	7.89	2.032	0.671	-0.50	30.00	3.00	42.82	14.76	-0.246	-0.017	0.677	0.021	3.47	0.33	0.38	0.53	0.33	0.34	0.15
	5	8.28	2.664	0.799	-0.50	30.00	3.00	44.91	11.26	-0.188	-0.017	0.888	0.025	3.17	0.30	0.35	0.52	0.32	0.34	0.14
7	1	4.95	0.931	0.565	-1.00	30.00	3.00	24.93	32.22	-1.074	-0.033	0.310	0.024	3.21	0.61	0.77	0.78	0.60	0.53	0.41
	2	5.83	1.358	0.725	-1.00	30.00	3.00	29.57	22.09	-0.736	-0.033	0.453	0.026	3.13	0.53	0.61	0.68	0.49	0.45	0.31
	3	6.99	1.815	0.823	-1.00	30.00	3.00	37.93	16.53	-0.551	-0.033	0.605	0.024	3.25	0.45	0.53	0.63	0.44	0.42	0.25
	4	7.35	2.487	1.067	-1.00	30.00	3.00	39.87	12.06	-0.402	-0.033	0.829	0.029	2.92	0.43	0.45	0.58	0.39	0.39	0.21
	5	8.26	3.030	1.249	-1.00	30.00	3.00	44.79	9.90	-0.330	-0.033	1.010	0.028	2.97	0.41	0.42	0.56	0.38	0.38	0.20
8	1	5.04	0.766	0.259	-0.50	40.00	3.00	24.93	52.21	-0.653	-0.013	0.255	0.019	3.60	0.34	0.57	0.66	0.42	0.38	0.26
	2	5.77	1.077	0.346	-0.50	40.00	3.00	29.57	37.14	-0.464	-0.013	0.359	0.021	3.48	0.32	0.48	0.60	0.36	0.34	0.20
	3	6.70	1.426	0.442	-0.50	40.00	3.00	34.71	28.05	-0.351	-0.013	0.475	0.020	3.51	0.31	0.43	0.57	0.33	0.33	0.17
	4	7.38	1.706	0.512	-0.50	40.00	3.00	40.04	23.45	-0.293	-0.013	0.569	0.020	3.54	0.30	0.40	0.55	0.32	0.32	0.15
	5	7.60	2.186	0.612	-0.50	40.00	3.00	41.21	18.30	-0.229	-0.013	0.729	0.024	3.22	0.28	0.37	0.53	0.30	0.31	0.14
9	1	5.06	0.911	0.462	-1.00	40.00	3.00	25.52	43.89	-1.097	-0.025	0.304	0.023	3.32	0.51	0.78	0.79	0.60	0.52	0.42
	2	5.86	1.301	0.621	-1.00	40.00	3.00	30.15	30.75	-0.769	-0.025	0.434	0.024	3.21	0.48	0.63	0.69	0.48	0.44	0.31
	3	6.64	1.520	0.714	-1.00	40.00	3.00	34.14	26.32	-0.658	-0.025	0.507	0.022	3.37	0.47	0.58	0.66	0.45	0.42	0.28
	4	6.91	2.022	0.911	-1.00	40.00	3.00	37.47	19.78	-0.495	-0.025	0.674	0.027	3.04	0.45	0.50	0.61	0.40	0.38	0.23
	5	7.54	2.371	1.030	-1.00	40.00	3.00	40.91	16.87	-0.422	-0.025	0.790	0.027	3.06	0.43	0.46	0.59	0.38	0.37	0.21

Una vez obtenidos los datos de los ensayos y después de haberlos procesado, se graficaron, con el fin de visualizar los resultados de los ensayos y así tener un mejor panorama acerca del fenómeno estudiado.



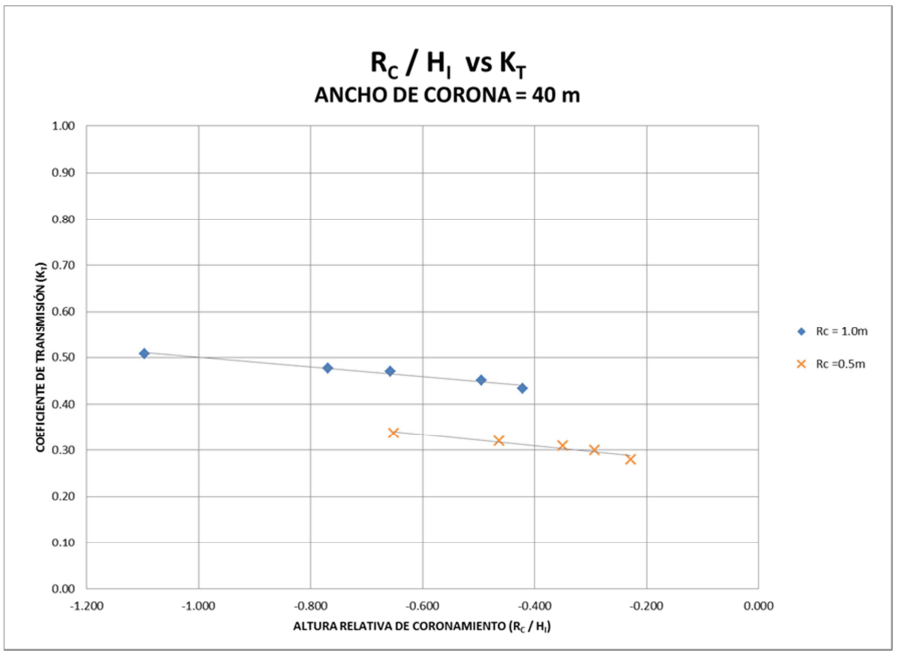
Gráfica 1. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 20 m.

En la gráfica 1, se aprecia que la reducción en el coeficiente de transmisión para esta estructura se encuentra en un rango entre 0.48 y 0.80, y que la trasmisión del oleaje es menor cuando la estructura tiene una sumergencia de medio metro, ya que para esta condición el coeficiente de transmisión se encuentra en un rango entre 0.48 y 0.57, mientras que cuando la estructura tiene una sumergencia de un metro la variación en el coeficiente de transmisión se encuentra en un rango que va de 0.56 a 0.80.



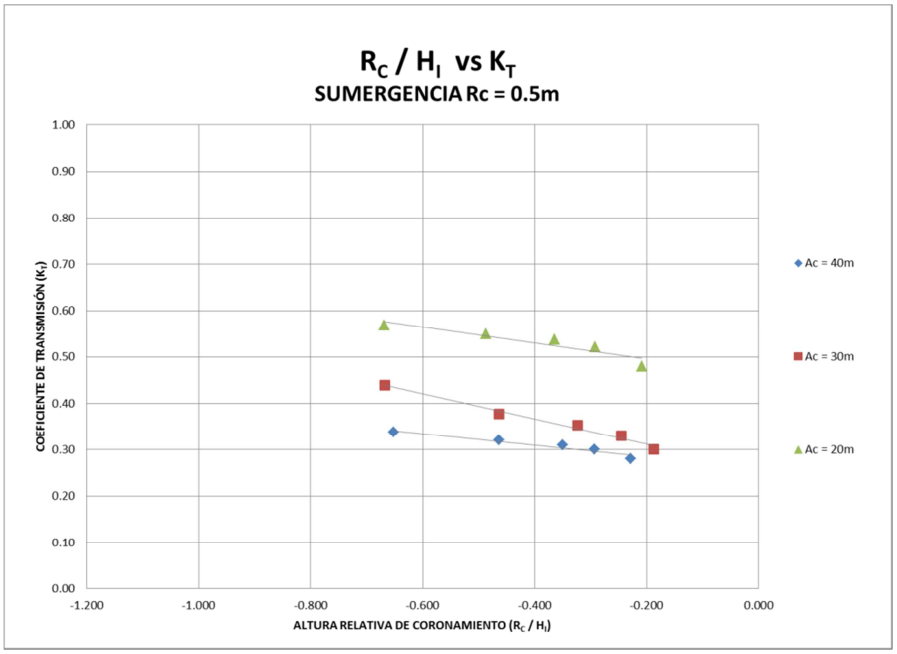
Gráfica 2. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 30 m.

En la gráfica 2, es posible visualizar que los valores del coeficiente de transmisión para la estructura de 30m de ancho de coronamiento, varían desde 0.30 hasta 0.60, también se observa que la estructura funciona de una manera eficiente cuando tiene una sumergencia menor.



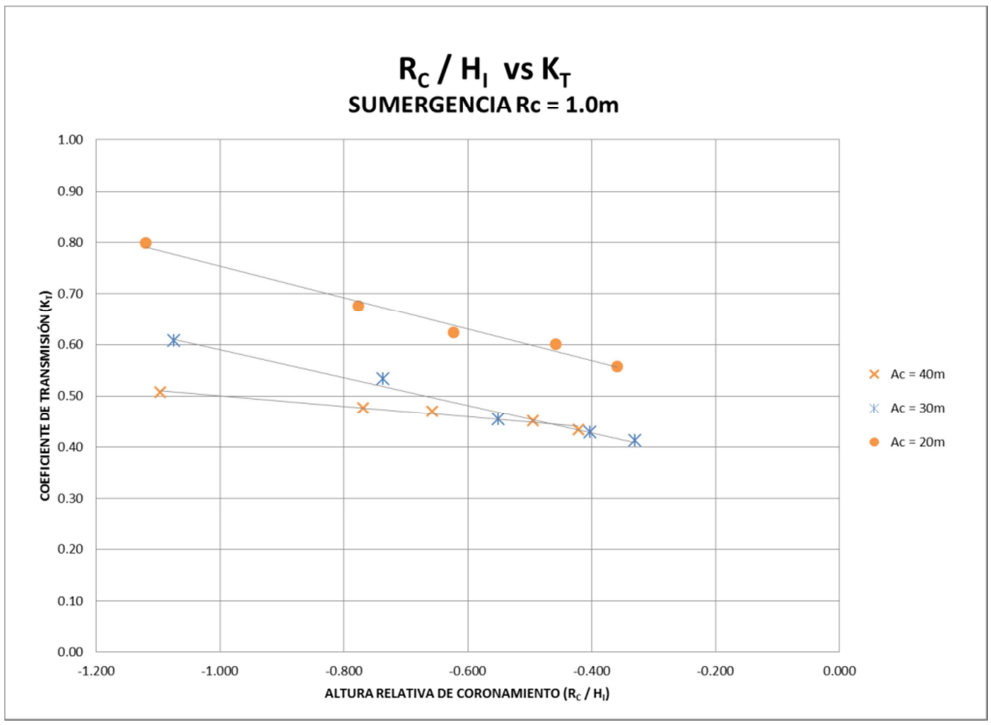
Gráfica 3. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 40 m.

En la gráfica 3, podemos distinguir que el coeficiente de transmisión para un ancho de coronamiento de 40m es mayor para la sumergencia de un metro, a diferencia del coeficiente de transmisión para la misma estructura con una sumergencia de medio metro. También se puede ver que el rango de variación del coeficiente de transmisión aún con la diferencia de sumergencias es poco, ya que éste se encuentra entre los valores que van desde 0.30 hasta 0.50.



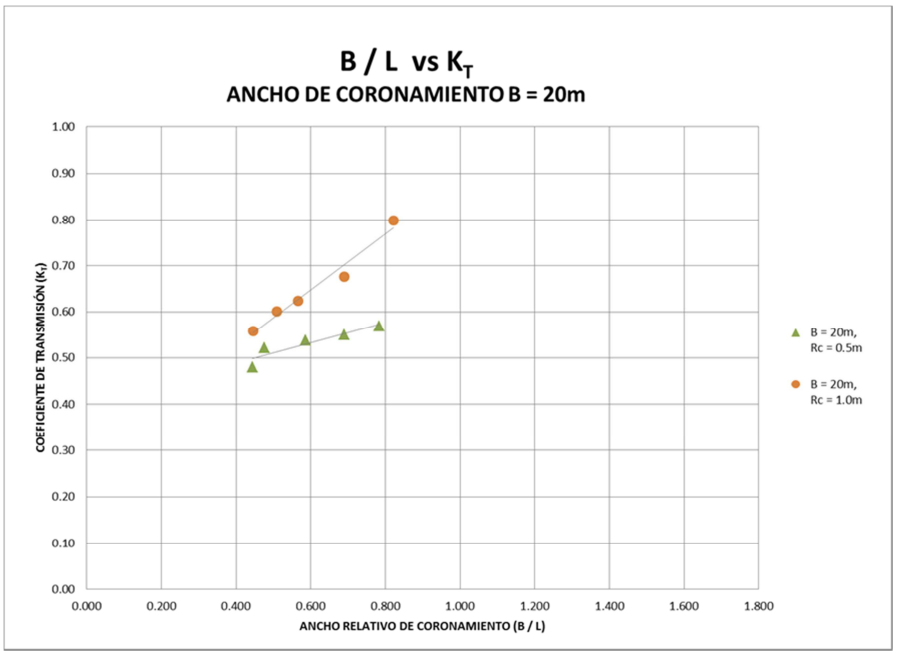
Gráfica 4. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 0.5 m.

En la gráfica 4, se nota que el coeficiente de transmisión para la sumergencia de medio metro varia en un rango que va desde 0.30 hasta 0.60, siendo la estructura con 40m de ancho de coronamiento la que presenta un menor coeficiente de transmisión.



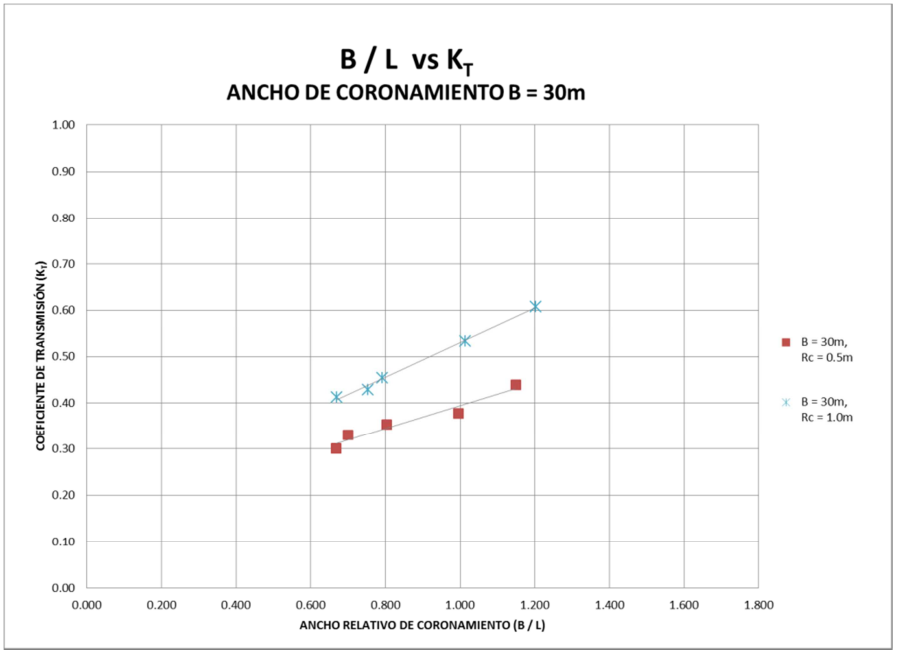
Gráfica 5. Altura relativa de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 1 m.

En la gráfica 5, se presenta un rango de variación para el coeficiente de transmisión con una sumergencia de 1m, que va desde 0.40 hasta 0.80, también podemos apreciar que para esta misma sumergencia, la estructura que presenta un coeficiente de transmisión menor es la que tiene un ancho de coronamiento de 40m, aunque la estructura con un ancho de coronamiento de 30m presenta valores muy semejantes.



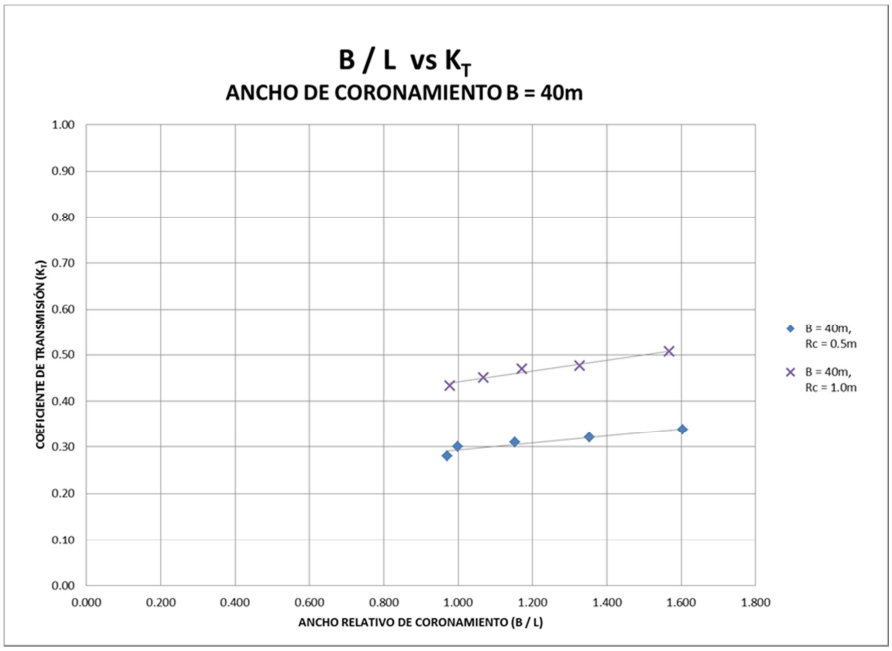
Gráfica 6. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 20 m.

En la gráfica 6, se observa que el coeficiente de transmisión es menor para la sumergencia de medio metro, el cual va desde 0.48 hasta 0.57.



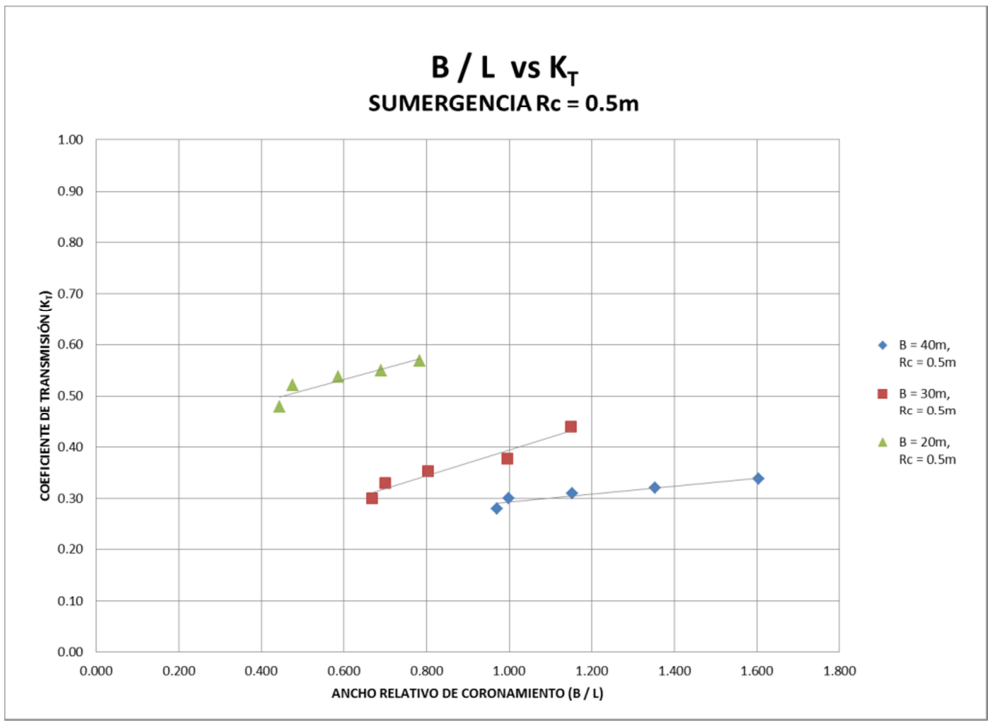
Gráfica 7. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 30 m.

En la gráfica 7, para el ancho de coronamiento de 30m, se percibe que la estructura trabaja de manera más eficiente cuando tiene una sumergencia de medio metro; encontrándose el coeficiente de transmisión entre los valores que van desde 0.30 hasta 0.44.



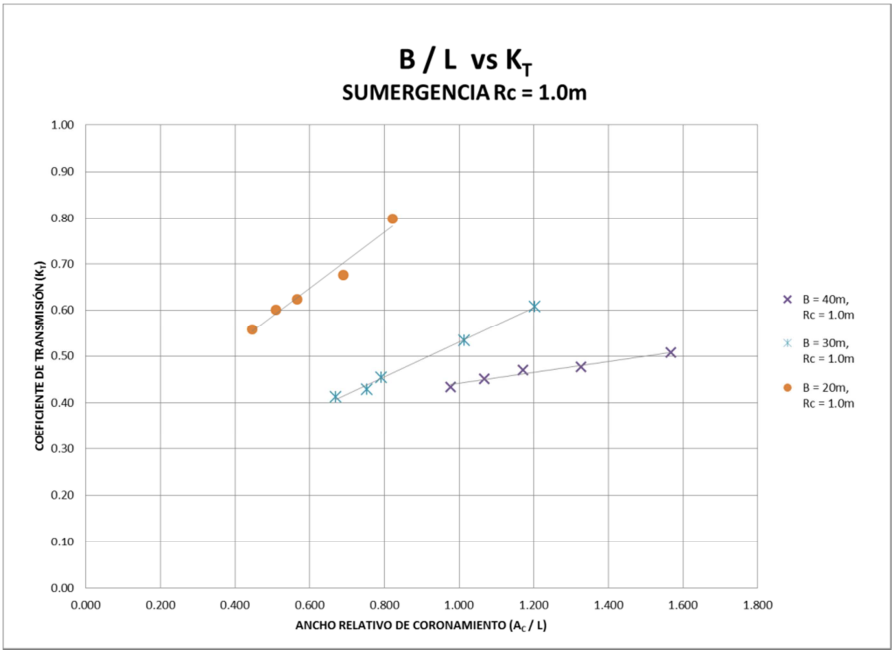
Gráfica 8. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para un ancho de coronamiento de 40 m.

De la gráfica 8, podemos denotar que el coeficiente de transmisión es menor cuando la estructura está a una sumergencia de medio metro, encontrándose el coeficiente de transmisión en un rango de variación que va desde 0.28 hasta 0.34. Mientras que con la sumergencia de un metro el rango de variación va desde el 0.43 hasta 0.51.



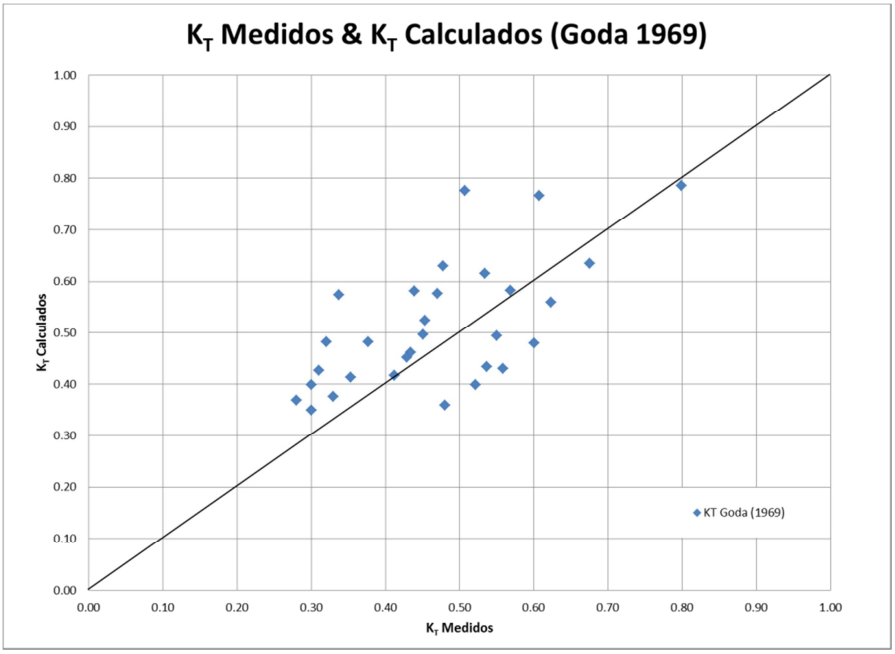
Gráfica 9. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 0.5 m.

En la gráfica 9, se observa que para una sumergencia de medio metro la estructura que logra una mayor disipación de energía es la que tiene un ancho de coronamiento de 40m, y el rango de variación del coeficiente de transmisión para esta estructura va de 0.28 a 0.34, y la que tiene la menor disipación de energía es la que tiene un ancho de coronamiento de 20m, y el coeficiente de transmisión se encuentra en un rango entre 0.48 y 0.57.



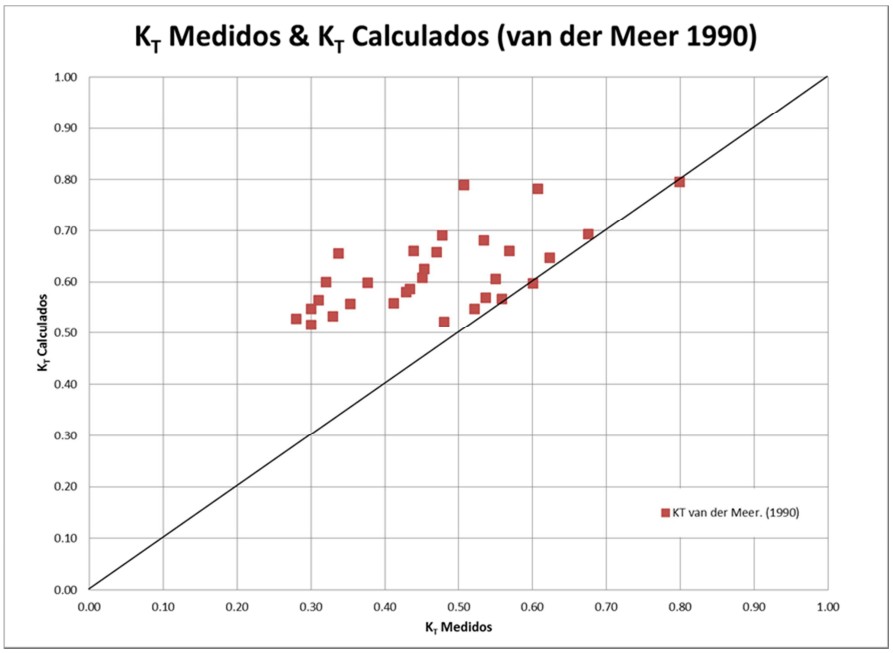
Gráfica 10. Ancho relativo de coronamiento vs Kt, para una sumergencia de 1 m.

En la gráfica 10, se puede apreciar que para la sumergencia de un metro la estructura que funciona mejor al reducir el coeficiente de transmisión, es la que tiene un ancho de coronamiento de 40m, y su rango de variación va de 0.44 a 0.51.



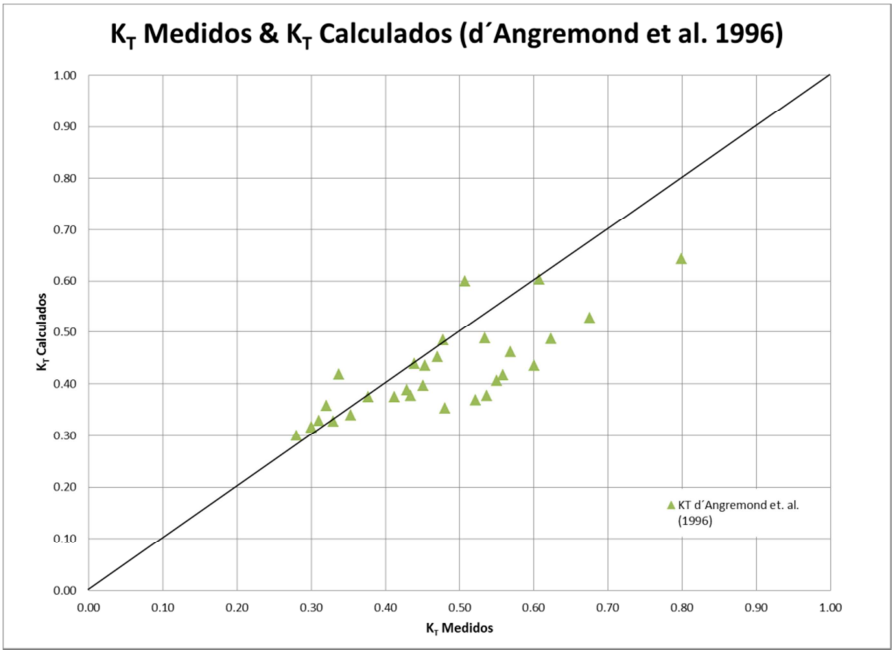
Gráfica 11. Kt medidos vs Kt calculados, para Goda 1969.

En la gráfica 11, observamos que los datos obtenidos del laboratorio en comparación con los datos calculados mediante la formulación de Goda se encuentran con una dispersión media, ya que los datos se localizan en la vecindad cercana a la línea de tendencia.



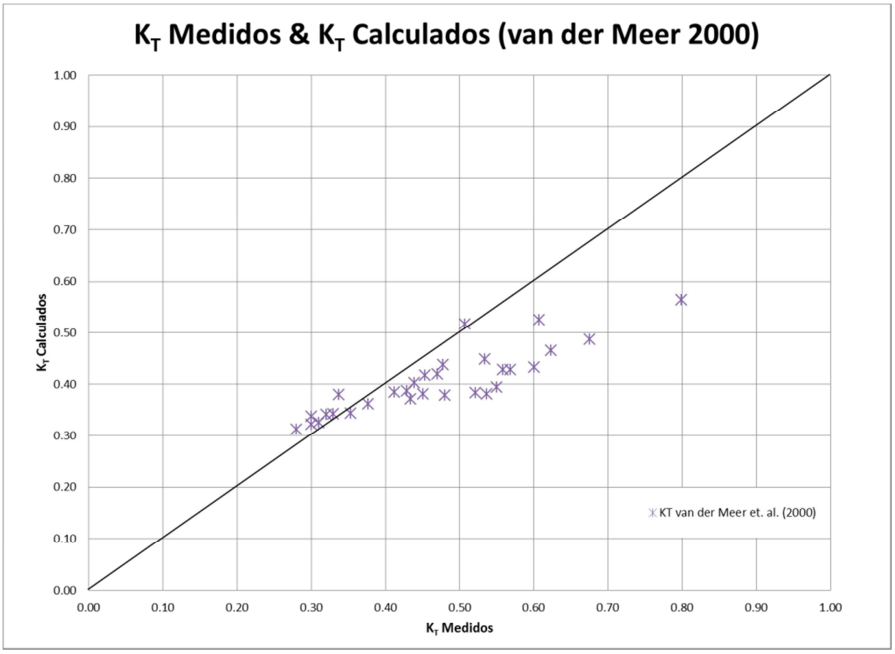
Gráfica 12. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer 1990.

En la gráfica 12, se distingue que la tendencia de los datos se encuentran medianamente dispersos en relación de la línea de tendencia y que estos están solo agrupados en el lado de los datos medidos.



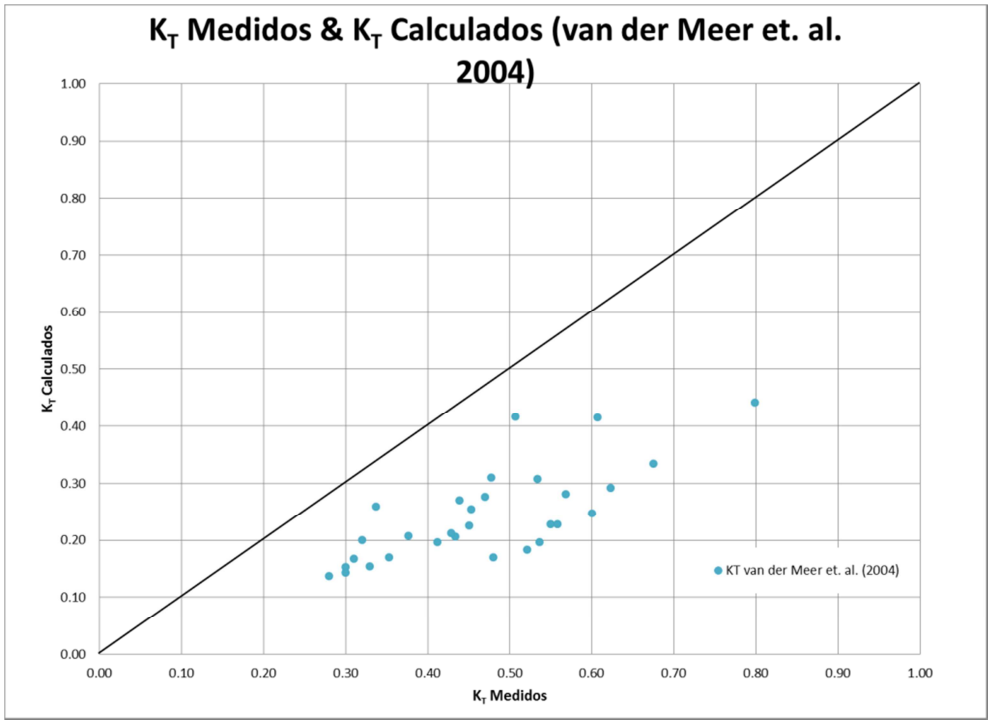
Gráfica 13. Kt medidos vs Kt calculados, para d´Angremond *et. al.* 1996.

En la gráfica 13, se puede apreciar que la dispersión de los datos es baja, y que estos se encuentran cercanos a la línea de tendencia, aunque en su mayoría estos se sitúan del lado de los datos medidos para el coeficiente de transmisión.



Gráfica 14. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer 2000.

En la gráfica 14, se percibe que la tendencia de los datos es hacia el lado de los datos medidos para el coeficiente de transmisión, y estos tienen una dispersión media ya que se encuentran en la vecindad de la línea de tendencia.



Gráfica 15. Kt medidos vs Kt calculados, para Van der Meer *et. al.* 2004.

En la gráfica 15, se aprecia que los datos tienen una dispersión alta, ya que estos no tocan en ningún momento la línea de tendencia. También se puede observar que los datos se encuentran en su totalidad del lado de los valores medidos para el coeficiente de transmisión.

Además de la interpretación visual, se realizó un análisis numérico para obtener el valor de la dispersión de los datos respecto a la línea de tendencia entre los datos medidos y los datos calculados, y los valores obtenidos para la dispersión se muestran en la tabla 19.

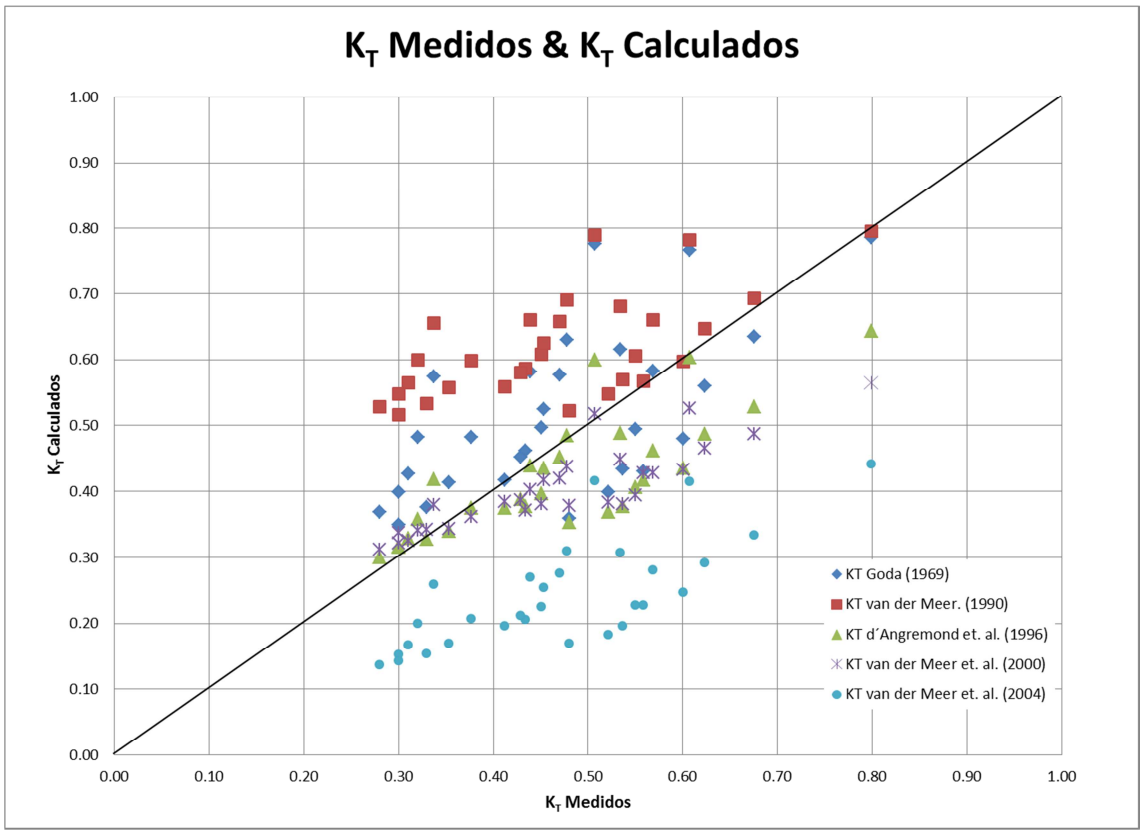
Tabla 19. Valores de la dispersión.

K_T Goda (1969)	K_T Van der Meer (1990)	K_T d´Angremond et al. (1996)	K_T Van der Meer et al. (2000)	K_T Van der Meer et al. (2004)
0.06	0.67	0.07	0.12	1.53

También se llevó a cabo un análisis para obtener la correlación que había entre los puntos graficados por diferentes métodos, y los valores obtenidos se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Correlación de los datos de acuerdo al autor.

Autor	Regresión R^2				
	Exponencial	Lineal	Logarítmica	Potencial	Polinómica de 3er grado
K_T Goda (1969)	0.398	0.401	0.382	0.390	0.427
K_T Van der Meer (1990)	0.402	0.402	0.381	0.387	0.431
K_T d´Angremond et al. (1996)	0.660	0.638	0.614	0.657	0.652
K_T Van der Meer et al. (2000)	0.783	0.766	0.743	0.779	0.772
K_T Van der Meer et al. (2004)	0.577	0.554	0.531	0.581	0.573



Gráfica 16. Kt medidos vs Kt calculados, para todos los autores.

Basados en las observaciones de las gráficas 11 a la 15, y en los resultados que se muestran en las tablas 19 y 20, es posible concluir con ayuda de la sobreposición de todos los datos, gráfica 16, que las formulaciones que nos proporcionan valores con una mejor correlación respecto a los datos medidos son las propuestas por los siguientes autores, d´Angremond *et. al.* (1996) y Van der Meer *et. al.* (2000).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo se puntualizan las conclusiones y recomendaciones, que se desprendieron del estudio de transmisión del oleaje para arrecifes artificiales de enrocamiento, que se realizó en el Canal angosto de oleaje del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (L.I.H.), ubicado en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

V.1. CONCLUSIONES

Una vez procesados los datos que se obtuvieron de los ensayos y después de presentarlos en forma gráfica para facilitar la apreciación de los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

1. Para el cálculo del coeficiente de transmisión deben tomarse en cuenta las formulaciones aplicables, para los datos con los que se cuenta.
2. De las gráficas 1 a la 3, en donde se relaciona la Altura relativa de coronamiento vs Coeficiente transmisión, y se presentan en relación con el ancho de coronamiento; Se apreció que en el caso de los tres anchos de coronamiento (20 m, 30 m y 40 m), las estructuras presentan una mayor disipación de energía cuando tienen una sumergencia de medio metro.
3. De las gráficas 4 y 5, en las cuales se relacionó la Altura relativa de coronamiento vs Coeficiente de transmisión, y se presentan respecto a la sumergencia de las estructuras, se observó que la estructura que disipa una cantidad mayor de energía es la que tiene un ancho de coronamiento de 40 m.
4. Cuando se revisa el comportamiento de las estructuras a través de los resultados graficados en las tablas de la 1 a la 5, en donde se relaciona la Altura relativa de coronamiento vs Coeficiente transmisión, se puede apreciar que para las estructuras de 30 m y 40 m, con una sumergencia de un metro, estas convergen durante las primeras etapas de los ensayos, en donde el oleaje aún no es severo. Para estas mismas estructuras, y con una sumergencia de medio metro, se puede apreciar que aunque los

puntos no convergen, los resultados obtenidos para la estructura con un ancho de coronamiento de 30 m, varían en un rango no mayor al 10%, respecto a los datos obtenidos para la estructura con un ancho de coronamiento de 40 m.

5. De las gráficas 6 a la 8, en donde se relaciona la Ancho relativo de coronamiento vs Coeficiente transmisión, y se presentan en relación con el ancho de coronamiento de las estructuras; se observó que en el caso de los tres anchos de coronamiento (20 m, 30 y 40 m) las estructuras presentan una mayor disipación de energía para la sumergencia de medio metro.
6. De las gráficas 9 y 10, en las cuales se relacionó la Ancho relativo de coronamiento vs Coeficiente transmisión, y se presentan respecto a la sumergencia de las estructuras, se notó que la estructura que disipa una cantidad mayor de energía es la que tiene un ancho de coronamiento de 40 m.
7. De las gráficas 11 a la 15 se observó que las formulaciones que presentaban una mejor tendencia en relación con los datos medidos fueron las propuestas por los autores d´Angremond *et. al.* (1996).
8. Basándose en los puntos del 2 al 6 se pude concluir que la estructura que disipa mayor cantidad de energía es la que tiene las siguientes características, ancho de coronamiento de 40 m y sumergencia de medio metro, ya que el coeficiente de transmisión para estas características se encuentra en el siguiente rango, de 0.28 al 0.34.
9. Con base en las observaciones realizadas por los diferentes autores que han estudiado la transmisión del oleaje en estructuras sumergidas, y en el análisis de los resultados de este trabajo, se puede concluir que los parámetros que tienen mayor influencia en la disminución del coeficiente de transmisión son *la sumergencia (Rc) y el ancho de coronamiento (B)*.

V.2. RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones y al análisis de los resultados de este trabajo se establecieron las siguientes recomendaciones:

1. Realizar pruebas con otros elementos de coraza de la estructura, ya sea con diferentes pesos de roca o distintos elementos artificiales; con el fin de extender la gama de pruebas.

2. Efectuar pruebas con anchos de coronamiento mayores, pero bajo las mismas condiciones que se presentaron en este trabajo de investigación, con el fin de observar si el coeficiente de transmisión disminuye significativamente o si es que conservaría una tendencia similar.

3. Llevar a cabo pruebas con secciones diferentes, como las escalonadas o de berma, para así analizar la transmisión del oleaje en este tipo de estructuras, y a su vez observar si éstas pueden provocar un rompimiento mayor del oleaje, y de esta forma disipar un porcentaje mayor de energía. Debido a que este tipo de pruebas podrían ampliar la gama de secciones, aplicables a la regeneración y protección de zonas costeras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aranda, C. M. (2004). Estudio Numerico experimental de la dinámica de la Zona Cercana a la Costa. 21-50.

Berenguer, J. M. (Abril de 1995). Estudios experimentales en el proyecto y la regeneracion de playas. *Ingenieria del Agua, 2*(extraordinario), 143.

Beresford. (1994). *HR WAVES - Data Acquisition and Analysis Software Program. User Manual.* Inglaterra: HR Wallingford Ltd.

Beresford. (1994). *WAVEGEN - Wave Generator Control Software Program. User Manual.* Inglaterra: HR Wallingford Ltd.

Bustamante et.al. (1976). *Ingeniería Marítima.* México: Ediciones Temas Marítimos, S. de R.L.

C.F.E. (1983). *Manual de Diseño de Obras Civiles* (Vol. A.2.13. Hidrotecnia). (I. d. Eléctricas, Ed.) México: Comisión Federal de Electricidad.

Chapapría, V. E. (1992). *Obras Marítimas.* Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Cruz, O. (2010). *Apuntes de Ingeniería de Costas de la Maestria en Ingenieria Civil, SEPI - ZAC.* México.

Fontirroig Hernández, H. (16 de Mayo de 2009). Calibración del canal de oleaje CIEM para un ensayo de estabilidad de dique en talud. (U. P. Cataluña, Ed.) Cataluña, España.

Frias, A., & Moreno, G. (1988). *Ingenieria de Costas.* México: LIMUSA.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2003). *Metodología de la Investigación* (Tercera ed.). México: Mc Graw Hill.

Hughes, S. A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engieering. En *Advanced Series on Ocean Engieering* (Vol. 7). World Scientific.

Kamphuis, J. W. (2000). *Introduction to Coastal Engineering and Management.* Canada: World Scientific.

Lewis, R., & McKee, K. (1989). Artificial reefs: Fish habitat improvement Fishing; California, Southern. State of California, Resources Agency, Dept. of Fish and Game (Sacramento California).

Medina, J. M. (2009). *Ingeniería Marítima y Costera.* Madrid, España: Nautilus.

Ocaña, K. G. (2001). *Tesis de Maestria: Modelación Fisica de Rompeolas Sumergidos con Oleaje irregular.* México, D.F: SEPI - ZAC.

Ortiz Uribe, F. G., & Garcia Nieto, M. d. (2008). *Metodología dela Investigación, El Proceso y sus Técnicas.* Mexico, D.F.: Limusa.

Petroni, R. V. (2005). *Hidráulica Marítima y de Estuarios.* Buenos Aires: DUNKEN.

Rosales, O. J. (2005). *Tesis: "transmisión del oleaje irregular en rompeolas superficiales permeables a talud".* México: SEPI - UZ.

Ruiz y Zurvia Flores, J. R. (2009). Apuntes de Hidrodinamica Maritima de la Maestria en Ingenieria Civil, SEPI - ZAC. México.

Ruiz, J. R. (2010). *Apuntes de Obras Portuarias de la Maestria en Ingenieria Civil, SEPI - ZAC.* México.

S.C.T, D. G.-C. (2001). *Manual de Dimencionamiento Portuario.* México: Dirección General de Puertos.

Salles Afonso de Almeida, P., & Silva Casarín, R. (s.f.). *Infraestructura de Protección Costera.* UNAM Instituto de Ingenieria.

Seaman, W., & Sprague, L. (1991). Artificial Habitat Practices in Aquatic Systems. Academic Press, Inc. San Diego, USA.

Serra Peris, J., & Medina Folgado, J. R. (1988). Arrecifes Artificiales (II). *Revista de Obras publicas.*, 211 a 220.

Silva Casarín, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje.* México, D.F.: Instituto de Ingenieria, UNAM.

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje.* México: Instituti de Ingeniería.

Stone et. al. (1991). Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries. W. Seaman Jr. and L. M. Sprague Academic Press.

Universidad de Cantabria. (2000). Transformacion del oleaje en las proximidades de la costa. En *Documento de referencia* (Vol. 1, págs. 24-26).

USACE. (1984). *SHORE PROTECTION MANUAL.* Washington, DC 20314: DEPARTMENT OF THE ARMY.

USACE. (2002). *COASTAL ENGINEERING MANUAL.* Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

van der Meer, J. W. (1995). *Conceptual design of rubble mound breakwaters.*

Vergara, M. A. (1995). *Tecnicas de Modelacion en Hidraulica.* Mexico, D. F.: Alfaomega.

Wang et.al, C. (2008). *Very Large Floating Structures.* Taylor & Francis e- Library.

PAGINAS DE INTERNET

s.f. http://www.mailxmail.com/curso-como-desarrollar-tesis-profesional/elaborar-protocolo-tesis (último acceso: 5 de Diciembre de 2009).

Instituto Nacional de Ecología. *INE.* 15 de Noviembre de 2007. www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/312/marinosedo.html.

Universidad Europea de Madrid. «Scribd.» s.f. http://www.scribd.com/doc/16289653/Apuntes-de-oleaje (último acceso: Noviembre de 2009).