



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

---

## SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

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

TESIS DE GRADO

### **"REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ROMPEOLAS PERMEABLES A TALUD NO REVASABLES CON OLEAJE IRREGULAR"**

PRESENTADA POR:

**ING. FELIPE DE JESUS LEYVA MUÑOZ**

QUÉ PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR:

M. en C. JAIME ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES



México, D.F., Febrero 2012



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 17:00 horas del día 17 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:

"Reflexión del oleaje en rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular."

Presentada por el alumno:

Leyva  
Apellido paterno

Muñoz  
Apellido materno

Felipe de Jesús  
Nombre(s)

Con registro: 

B	0	9	1	2	8	3
---	---	---	---	---	---	---

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. Juan Manuel Navarro Pineda

Dr. Oscar Cruz Castro

M. en C. Lucio Fragozo Sandoval

M. en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. en C. Pino Durán Escamilla



SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### *CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México D. F. el día 17 de noviembre del 2011, el que suscribe **Felipe de Jesus Leyva Muñoz** alumno del Programa de **Maestría en Ingeniería Civil** con número de registro B091283, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor 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 **Reflexión del oleaje en rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular**, 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 **felipe\_drako@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

**Felipe de Jesus Leyva Muñoz**



## Dedicatoria

*Muy especial para Vania Itzel Arellano Llamas y Patricia Leyva Muñoz †*



## Agradecimientos

*A Vania Itzel Arellano Llamas, AMOR mil gracias por todo el apoyo que me brindas día a día, y por estar siempre a mi lado.... TE AMO*

*A mis padres Marina Muñoz y Samuel Leyva, gracias por la vida y la dicha de ser su hijo; por todos los momentos hermosos de mi vida que siempre llevare en el corazón, GRACIAS.*

*A mi familia, Fabiola, María Teresa, Patricia, Antonio y Samuel, para ustedes hermanos muchas GRACIAS.*

*A mi suegra Norma Angélica, Juan Antonio y Tania, muchas GRACIAS.*

*A mis Compadres Kenia y Juan Ruperto; y Nairobi Lucia, mil GRACIAS.*

*A mis Profesores de Licenciatura: Rosalía Pérez Delgado y Abraham Caffani Gutiérrez que siempre me han brindado su apoyo, amistad y motivaron para estudiar la Hidráulica, GRACIAS.*

*A mis Profesores de Posgrado: M. en C: Norma J. Ruiz Castillejos, Dr. Oscar Cruz Castro, Dr. Mario Ulloa Ramírez, Dr. Juan Manuel Navarro Pineda, M. en C. Pino Durán Escamilla, por la orientación, amistad y el gran apoyo que me dedicaron, GRACIAS.*

*A los chicos de Control Escolar: Elizabeth, Nayeli, Luis, Memo, Pedro, Erik, amigos GRACIAS.*

*Al Dr. Jentsje W. Van der Meer, por todo su apoyo y sus apreciables comentarios para el desarrollo de esta tesis, GRACIAS.*



# Contenido

	Pág.
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
OBJETIVOS .....	5
OBJETIVO GENERAL .....	5
OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
HIPÓTESIS .....	5
<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....</b>	<b>6</b>
I.1 OLEAJE .....	6
I.1.1 Características del oleaje.....	6
I.1.2 Clasificación del oleaje.....	8
I.1.3 Teorías del oleaje.....	10
I.2 OLEAJE IRREGULAR.....	12
I.2.1 Análisis ola por ola (wave by wave).....	14
I.2.1.1 Método de cruces por cero (zero-up-crossing) .....	15
I.2.1.2 Método de espectros de energía .....	16
I.3 FENÓMENOS QUE MODIFICAN EL OLEAJE.....	17
I.3.1 Refracción.....	17
I.3.2 Difracción.....	18
I.3.3 Reflexión .....	19
I.3.4 Rompiente.....	19
I.3.1 Asomeramiento .....	22
I.4 OBRAS DE PROTECCIÓN.....	22
I.4.1 Rompeolas .....	23
I.4.1.1 Rompeolas a talud.....	24
I.4.1.2 Rompeolas permeables.....	24
<b>CAPÍTULO II. REFLEXIÓN DEL OLEAJE.....</b>	<b>25</b>
II.1 REFLEXIÓN DEL OLEAJE .....	25
II.1.1 Características de la reflexión del oleaje.....	25
II.2 INVESTIGACIONES DEL FENÓMENO DE REFLEXIÓN DEL OLEAJE .....	28
II.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA REFLEXIÓN.....	33
II.3.1 Método de Goda y Suzuki (1976) .....	34
II.3.2 Método de Mansard y Funke (1980) .....	35
<b>CAPÍTULO III. MODELO.....</b>	<b>39</b>



	Pág.
III.1 MODELACIÓN FÍSICA .....	39
<i>III.1.1 Selección de la escala del modelo .....</i>	<i>46</i>
III.2 INSTALACIONES Y EQUIPO .....	46
III.3 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS PARA MEDIR LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE .....	49
III.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO .....	50
III. 5 CALIBRACIÓN .....	57
<i>III. 5. 1 Calibración de los sensores de oleaje .....</i>	<i>57</i>
III. 5. 1. 1 Procedimiento de calibración de los sensores.....	58
<i>III.5. 2 Espaciamiento de los sensores de oleaje para la medición de la reflexión del oleaje .....</i>	<i>60</i>
III. 6 ENSAYOS.....	61
<i>III. 6. 1. Condiciones de los ensayos .....</i>	<i>62</i>
III. 6. 1.1 Procedimientos para los ensayos .....	63
III. 6. 1. 2 Instrumentación .....	64
III. 6. 1. 3 Recolección de datos.....	65
<i>III. 6. 2 Serie 1. Rompeolas de berma con roca de 2.56 toneladas.....</i>	<i>66</i>
<i>III. 6. 3 Serie 2. Rompeolas de berma con roca de 3.84 toneladas.....</i>	<i>67</i>
<i>III. 6. 3 Serie 3. Rompeolas clásico de tres capas con coraza de roca de 12 toneladas.....</i>	<i>69</i>
<i>III. 6. 4 Serie 4. Rompeolas clásico de tres capas con coraza de dolos de 19 toneladas. ....</i>	<i>71</i>
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....</b>	<b>73</b>
IV. 1 GRÁFICAS DE RESULTADOS.....	77
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>
V. 1 CONCLUSIONES .....	81
V. 2 RECOMENDACIONES.....	82
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>86</b>
ANEXO 1. PROGRAMA DE CÁLCULO PARA LA SEPARACIÓN DE SENSORES (BERESFORD, 1994). ....	86
ANEXO 2. CORRIDAS DEL PROGRAMA PARA CADA ENSAYO.....	89



## Lista de Figuras

	Pág.
FIGURA 1. CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE (U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2002). .....	8
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE CONFORME AL PERIODO, SEGÚN KINSMAN 1965 (C.F.E., 1983). .....	10
FIGURA 3. DIFERENTES FORMAS DEL PERFIL DE LAS OLAS PROGRESIVAS DE GRAVEDAD. (U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2002) .....	12
FIGURA 4. SUPERPOSICIÓN DE DIFERENTES ESTADOS DEL MAR. (MEDINA, 2009) .....	13
FIGURA 5. MÉTODO DE CRUCES POR CERO. (C.F.E., 1983) .....	16
FIGURA 6. REFRACCIÓN DEL OLEAJE. (C.F.E., 1983) .....	18
FIGURA 7. DIFRACCIÓN DEL OLEAJE. (C.F.E., 1983) .....	19
FIGURA 8. ROMPIENTE CONTINUA O DESLIZANTE (SPILLING). (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1975) ..	20
FIGURA 9. ROMPIENTE RODANTE (PLUNGING). (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1975) .....	20
FIGURA 10. ROMPIENTE ONDULANTE (SURGING). (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1975) .....	21
FIGURA 11. ROMPIENTE COLAPSANTE (COLLAPSING). (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1975) .....	21
FIGURA 12. REFLEXIÓN DEL OLEAJE. (VAN DER MEER, 1995) .....	26
FIGURA 13. ARREGLO UTILIZADO POR GODA Y SUZUKI (GODA & SUZUKI, 1976) .....	35
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LA MEDICIÓN DE ONDAS DE REFLEXIÓN (MANSARD & FUNKE, 1980) .....	36
FIGURA 15. CANAL DE OLEAJE DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (LIH) .....	47
FIGURA 16. GENERADOR DE OLEAJE. ....	47
FIGURA 17. EQUIPO DE COMPUTO .....	48
FIGURA 18. OLÓGRAFO. ....	48
FIGURA 19. SENSORES .....	49
FIGURA 20. DATOS REQUERIDOS PARA EL ARCHIVO DE CALIBRACIÓN .....	49
FIGURA 21. MANTENIMIENTO EFECTUADO AL AMORTIGUADOR DE OLEAJE DEL CANAL ANGOSTO DE OLEAJE DEL LIH, ESIA-UZ. 51	51
FIGURA 22. APLICACIÓN PINTURA DEL AMORTIGUADOR DE OLEAJE .....	51
FIGURA 23. COLOCACIÓN DEL AMORTIGUADOR EN EL FINAL DEL CANAL ANGOSTO DE OLEAJE .....	52
FIGURA 24. HABILITADO DEL NUEVO FIRME. ....	52
FIGURA 25. SELECCIÓN DE LAS ROCAS POR PESO CON AYUDA DE UNA BASCULA. ....	54
FIGURA 26. PESAJE DE ROCAS MANEJADAS EN EL MODELO DE ROMPEOLAS CLÁSICO DE ROCA DE 12 TON PROMEDIO .....	54
FIGURA 27. PREPARACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO, AGRUPACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO POR COLOR .....	54
FIGURA 28. PREPARACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO, APLICACIÓN DE PINTURA .....	55
FIGURA 29. DOLOS UTILIZADOS EN EL MODELO DE UN ROMPEOLAS DE TRES CAPAS CON CORAZA DE ELEMENTOS PREFABRICADOS, CON UN PESO DE 19 TON EN PROTOTIPO. ....	55
FIGURA 30. CONFIGURACIÓN DE LAS SECCIONES DE ROMPEOLAS DE BERMA ENSAYADOS EN EL MODELO. ....	56
FIGURA 31. CONFIGURACIÓN DE LAS SECCIONES DE ROMPEOLAS DE TRES CAPAS ENSAYADOS EN EL MODELO. ....	56
FIGURA 32. SELECCIÓN DE CANALES. ....	58
FIGURA 33. ARREGLO DE LA ESTRUCTURA Y LOS SENSORES EN EL CANAL DE OLEAJE. ....	62
FIGURA 34. SENSORES DE OLEAJE. ....	63
FIGURA 35. DISPOSICIÓN DE SENSORES DE OLEAJE EN EL CANAL ANGOSTO. ....	63
FIGURA 36. DISPOSICIÓN DE SENSORES DE OLEAJE EN EL CANAL ANGOSTO. ....	64
FIGURA 37. RECOLECCIÓN EN TIEMPO REAL DE LOS DATOS POR EL EQUIPO DE CÓMPUTO. ....	65
FIGURA 38. ROMPEOLAS BERMA ROCA 2.56 TON. ....	67
FIGURA 39. ROMPEOLAS BERMA ROCA 3.84 TON. ....	68
FIGURA 40. ROMPEOLAS BERMA ROCA 3.84 TON. ....	69
FIGURA 41. ROMPEOLAS CLÁSICO DE TRES CAPAS ROCA 12 TON .....	71



	Pág.
FIGURA 42. ROMPEOLAS CLÁSICO DE TRES CAPAS DOLOS 19 TON.....	72
FIGURA 43. VALORES DE KR VS ALTURA DE OLA.....	77
FIGURA 44. GRÁFICA DE KR MEDIDOS VS KR CALCULADOS CON LA FORMULA DE AHRENS.....	78
FIGURA 45. GRÁFICA DE KR MEDIDOS VS KR CALCULADOS CON LA FORMULA DE LOSADA.....	79
FIGURA 46. GRÁFICA DE KR MEDIDOS VS KR CALCULADOS CON LA FORMULA DE LOSADA UTILIZANDO LOS COEFICIENTES DE SOLITT Y CROSS.....	79
FIGURA 47. GRÁFICA DE KR MEDIDOS VS KR CALCULADOS CON LA FORMULA DE VAN DER MEER.....	80

## Lista de Tablas

	Pág.
TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS.....	8
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS POR SU PERIODO SEGÚN JOHNSON ET AL, 1978 (SILVA, 2005). ....	9
TABLA 3. COEFICIENTES A Y B, APLICABLES A LA FORMULA DE LOSADA Y GIMÉNEZ-CURTO. ....	30
TABLA 4. VALORES DE SEELIG Y AHRENS PARA EL CÁLCULO DE LA REFLEXIÓN. ....	30
TABLA 5. VALORES DE A Y B PARA LA FORMULA DE VAN DER MEER. (VAN DER MEER & ZANUTTIGH, 2007).....	31
TABLA 6. ESCALA DE LÍNEAS. (VERGARA, 1995) .....	42
TABLA 7. DIFERENTES ESCALAS Y SU RELACIÓN CON LA ESCALA DE LÍNEAS $E_L$ .....	45
TABLA 8. ESCALAS UTILIZADAS EN EL MODELO. ....	46
TABLA 9. RANGO DE PESOS DE ROCA UTILIZADOS EN EL ESTUDIO. ....	53
TABLA 10. NOMBRE Y DESCRIPCIÓN DE LOS CANALES POR SENSOR. ....	58
TABLA 11. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN POR SENSOR.....	59
TABLA 12. FORMATO DE ENSAYOS.....	61
TABLA 13. COEFICIENTES DE REFLEXION CALCULADOS PARA LA SERIE 1.....	66
TABLA 14. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN CALCULADOS PARA LA SERIE 2.....	68
TABLA 15. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN CALCULADOS PARA LA SERIE 3.....	70
TABLA 16. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN CALCULADOS PARA LA SERIE 4.....	72
TABLA 17. COEFICIENTES UTILIZADOS DE ACUERDO A LA FORMULACIÓN. ....	74
TABLA 18. VALORES DE KR (SERIE 1). ....	75
TABLA 19. VALORES DE KR (SERIE 2). ....	75
TABLA 20. VALORES DE KR (SERIE 3). ....	76
TABLA 21. VALORES DE KR (SERIE 4). ....	76



## Resumen

México es un país que cuenta con una extensa zona costera, razón por la cual tiene un gran potencial de desarrollo en diversas actividades como el Turismo, la Industria, el Comercio y en especial para los Sistemas Portuarios donde se conjuntan todas estas actividades.

Lo anterior resalta la importancia de realizar proyectos de investigación que ayuden a mejorar los Puertos ya existentes, ya que al optimizar y planear mejor el diseño de diversas estructuras de protección como los rompeolas, se prolonga la vida útil de estos.

La presente tesis tuvo como objetivo principal el estudio de la reflexión del oleaje en rompeolas permeables a talud no revasables sometidos a oleaje irregular, que provoca problemas tales como la formación de ondas estacionarias frente a los mismos, produciéndoles daños. Esto ocurre debido a que el oleaje incidente sumado al reflejado genera condiciones mayores a las de diseño, y al mismo tiempo se traduce en condiciones severas de navegación y agitación para las embarcaciones que entran y salen del Puerto.

Para este estudio se dispuso de un canal angosto dotado de un generador de oleaje irregular, donde se construyó un modelo físico reducido de fondo fijo sin distorsión, sobre el cual se reprodujeron cuatro secciones de rompeolas permeables a talud. Dos secciones de rompeolas de berma, con taludes 1.5:1 para lados mar y tierra, se probaron primero; y dos secciones de rompeolas clásicos (tres capas), con taludes 2:1 lado mar y 1.5:1 lado tierra, se probaron al final. Para la construcción de dichas secciones se habilitó material pétreo que constituyó las capas del núcleo, capa secundaria y coraza. Solo una sección de las dos de rompeolas clásico fue probada con dolos en la coraza, hechos con resina plástica. La reflexión del oleaje producida por cada sección probada, fue calculada con el método de Mansard y Funke.

Los resultados obtenidos del modelo demostraron que la sección con menor reflexión bajo las condiciones indicadas, fue el rompeolas clásico de tres capas con coraza de dolos. Esto se pudo contrastar con autores encontrados en el estado del arte como: Losada y Giménez-Curto; Sollitt y Cross; Seelig y Ahrens; y Van der Meer.



## Abstract

Mexico is a rich country with an extensive coastal area, which is the reason why it has a great development in different such as tourism, company work, market but specially for port system where all these activities gather.

The information above highlights the importance of making projects of research that help improve the already existing ports, since by optimizing and planning in a better way the design of different structures of protection such as breakwater, it prolongs the useful life of the these.

The main objective of this thesis was to study the reflection of waves permeable breakwater on a slope basis on a regular wave generator that provokes problems such as the formation of clapotis, which at the same time causes damage. This is due to the incident of waves, added to the reflected one, generate conditions greater than the ones of design, at the same times this means that the conditions of navigation are severe for the vessel entering or leaving the port.

For this study and narrow flume provided with a generator of the regular waves was used, and a physical model was built reduced at the bottom steadily without distortion, in which four sections of permeable to slope breakwater were reproduced, two sections of berm breakwater, with slope 1.5:1 for both land and sea, were the first tested; and two sections of classic breakwater (three layers), which slopes 2:1 on the sea and 1.5:1 on the land, were tested in the end. For the constructions of such sections stonework was enabled which was one of the core layers, secondary layer and armour. Only one section of the two classic breakwaters was tested with dolos in the armour, made from plastic and resin. The reflection of the waves produced by an every section tested was calculated with a method by Mansard and Funke.

The outcome from these demonstrated that the section with less reflection on the indicated conditions was the classic breakwater of three layers with dolos in the armour. This was based on theories found in the state of the art by Losada and Giménez-Curto; Sollitt and Cross; Seelig and Ahrens; and Van der Meer.



## Introducción

Debido a que México es un país que cuenta con una extensa zona costera, donde se tiene un gran potencial de desarrollo en actividades económicas tales como el Turismo, la Industria, el Comercio y en especial para los Sistemas Portuarios donde se conjuntan todas estas actividades. Lo anterior resalta la importancia de realizar proyectos de investigación que ayuden a mejorar los Puertos ya existentes, ya que al optimizar y planear mejor el diseño de diversas estructuras de protección como los Rompeolas, se prolonga la vida útil de estos.

La reflexión es un fenómeno del oleaje que sí se presenta en gran medida puede provocar los siguientes problemas:

- Formación de ondas estacionarias (clapotis) frente a la estructura, las cuales son la combinación de las ondas reflejadas y ondas incidentes, que al unirse incrementan su altura por lo que su energía sería mayor al incidir sobre la estructura, pudiendo provocar daños, ya que el oleaje incidente sería mayor que el de diseño.
- Problemas en la entrada del Puerto, ya que la reflexión de oleaje genera condiciones mayores a las de diseño, y al mismo tiempo se traduce en condiciones severas de navegación y agitación para las embarcaciones que entran y salen.
- Provocar cambios en el perfil de playa, ocasionando así modificaciones en la línea de costa.

Lo anterior fundamenta la presente tesis, que se enfoca en el estudio de la reflexión del oleaje sobre rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular, con el objetivo de encontrar la sección con menor reflexión.

El presente trabajo se realizó para estudiar el fenómeno de la reflexión del oleaje, por medio de un modelo físico reducido en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la



Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. En dicho modelo se reprodujo oleaje irregular sobre cuatro secciones diferentes de rompeolas, con el objeto de determinar la sección con menor reflexión del oleaje.

Para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, ésta se dividió en cinco capítulos.

En el *capítulo I. Generalidades*; se exponen los conceptos básicos acerca del fenómeno de la reflexión del oleaje, detallando las características, clasificación y teorías del oleaje. Así mismo, se presentan los fenómenos generados por el oleaje en la naturaleza, mencionando las estructuras en las que la interacción del oleaje es importante, como los rompeolas permeables a talud.

En el *capítulo II. Reflexión del oleaje*; se describen las características de la reflexión, así como los primeros estudios sobre ella; además se muestran las formulaciones de los autores que estudiaron este fenómeno desde 1951 con *Miche*, hasta los artículos publicados por *Van der Meer* en el 2008. En este capítulo también se presentan los métodos para medir la reflexión en canales de oleaje, tales como el método elaborado por *Goda y Suzuki* en 1976 y el mejorado por *Mansard y Funke* en 1980.

En el *capítulo III. Modelo*; se explican las instalaciones, instrumentación, equipo y procedimientos utilizados en los ensayos del modelo físico reducido de fondo fijo sin distorsión, que se dispuso para este estudio. Donde se reprodujeron cuatro secciones de rompeolas permeables a talud. Dos secciones de rompeolas de berma, con taludes 1.5:1 para lados mar y tierra, y dos secciones de rompeolas clásicos (tres capas), con taludes 2:1 lado mar y 1.5:1 lado tierra. La reflexión del oleaje producida por cada sección probada, fue calculada con el método de *Mansard y Funke*.

En el *capítulo IV. Análisis de Resultados*; se calculó el valor de reflexión del oleaje para cada sección probada. Evaluando los datos obtenidos a través del estudio del modelo físico reducido. Realizando una comparativa entre los coeficientes de reflexión calculados en el modelo y de los coeficientes de reflexión de las formulaciones de los autores encontrados en el estado del arte.



En el *capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones*; una vez realizada la validación de los resultados del modelo con las formulaciones de otros autores; se desarrollaron las conclusiones basadas en las observaciones obtenidas en el modelo de las secciones estudiadas en el laboratorio. Así mismo, se presentan recomendaciones para ampliar el conocimiento del fenómeno de la reflexión del oleaje.



## Planteamiento del problema

El problema que generalmente encontramos asociado con la reflexión del oleaje es la *agitación*. Esta se produce cuando una ola reflejada queda atrapada dentro del Puerto causando problemas de agitación entre los barcos y las estructuras donde atracan. Esto también ocurre a la entrada del Puerto, donde la navegación de los barcos no sería favorable.

Por otro lado al considerar la reflexión del oleaje en la costa y sobre estructuras tales como los rompeolas; tendremos *problemas asociados a la socavación e inestabilidad de la estructura*.

Debido dicha problemática, es necesario considerar el estudio de la reflexión del oleaje como un parámetro importante en el diseño de estructuras de protección.



## Objetivos

### Objetivo general

Analizar el comportamiento de la reflexión del oleaje en rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular, para determinar la sección de rompeolas con menor reflexión.

### Objetivos particulares

1. Revisión del estado del arte relativo en el tema de estudio.
2. Construcción de un modelo físico reducido para probar varias secciones de rompeolas permeables a talud.
3. Determinar los coeficientes de reflexión del oleaje de los rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular.
4. Describir la magnitud de los coeficientes de reflexión que producen los rompeolas a talud no revasables, mediante el estudio de la reflexión del oleaje, con oleaje irregular.

### Hipótesis

Por medio de un estudio en modelo físico reducido se pueden determinar los coeficientes de reflexión del oleaje en diferentes secciones de rompeolas permeables a talud y determinar cuál de las estructuras analizadas produce una menor reflexión del oleaje.



## Capítulo I. Generalidades.

En este capítulo se describen los conceptos básicos del estudio realizado acerca del fenómeno de la reflexión del oleaje; describiendo sus características, clasificaciones y teorías empleadas. En cuanto al oleaje irregular, se presentan los análisis y métodos que describen al mismo. Por otro lado se describen los fenómenos del oleaje, de los cuales la reflexión se trata con mayor detalle.

Por último se hace mención de las estructuras, en las que la interacción del oleaje es muy importante, como lo son los rompeolas permeables a talud.

### I.1 Oleaje

El oleaje es la perturbación que se genera en la superficie del agua, por efecto de la fricción del viento sobre ésta; a la zona donde actúa el viento se le llama *Zona de Generación o Fetch*. En la cual se generan una serie de ondulaciones cuyas características como altura, frecuencia, fase y dirección son aleatorias e independientes. Este oleaje es conocido como *Oleaje Local o Mar de Viento (Sea)*.

Una vez generado y por la continua acción del viento sobre la zona, provoca que el oleaje salga de ella y se sulte, es decir, se unen las ondas de periodos cercanos. Al soldarse el oleaje se mueve en forma de bandas, por tal motivo concentran su energía para ciertos periodos. Este oleaje que se presenta normalmente en grupos de olas constituidas de dos a cuatro, seguidas por otras más pequeñas, estas ondas reciben el nombre de *Oleaje de Fondo u Oleaje Distante (Swell)*.

#### I.1.1 Características del oleaje

De acuerdo con la recopilación de (Silva, 2005) el estudio del oleaje se remonta a las culturas antiguas, como Grecia con Aristóteles; que en uno de sus tratados, señala la



importancia del viento en el desarrollo del oleaje. También se sabe que los romanos y los egipcios tenían idea de las interacciones del viento con el mar.

No obstante, los estudios sobre el oleaje con mayores contribuciones en nuestra era, se tuvieron en el siglo XIX con Airy y Stokes, en 1845 y 1847 respectivamente. Los cuales lograron su descripción de manera teórica, de la cual parten un sin número de estudios como el de Sverdrup-Munk-Bretschneider durante la segunda Guerra Mundial (entre 1939 y 1945). La necesidad de información para la planeación de operaciones militares, para el desembarco de Normandía, estimuló el interés en la predicción de las características del oleaje.

Los oceanógrafos H. U. Sverdrup y W. H. Munk combinaron relaciones teóricas y empíricas para desarrollar métodos de predicción de altura de la ola significativa. Después, el método fue utilizado para localizar mejores rutas marítimas. Poco más tarde la teoría de predicción mejoró hasta convertirse en el Método SMB, desarrollo por Sverdrup, Munk y Bretschneider.

El oleaje se caracteriza por:

1. Cresta. Es la parte alta de una onda.
2. Valle. Es la parte baja de la onda.
3. Altura de ola ( $H$ ). Es la distancia vertical entre una cresta y un valle consecutivo.
4. Profundidad ( $d$ ). Es la distancia vertical medida desde el nivel medio del mar al fondo.
5. Longitud de onda ( $L$ ). Es la distancia horizontal entre dos valles o dos crestas sucesivas.
6. Periodo ( $T$ ). Es el tiempo que tarda en pasar dos crestas o dos valles consecutivos por un mismo punto.
7. Celeridad de onda ( $C$ ). Es la relación de la longitud de la ola entre el periodo de la misma  $L/T$ .
8. Amplitud ( $a$ ). Es la desviación máxima desde el nivel medio de las ondas.

9. Frecuencia ( $f$ ). es el número de crestas o valles que pasan por un punto cada segundo o también conocida como la inversa del periodo  $1/T$ .

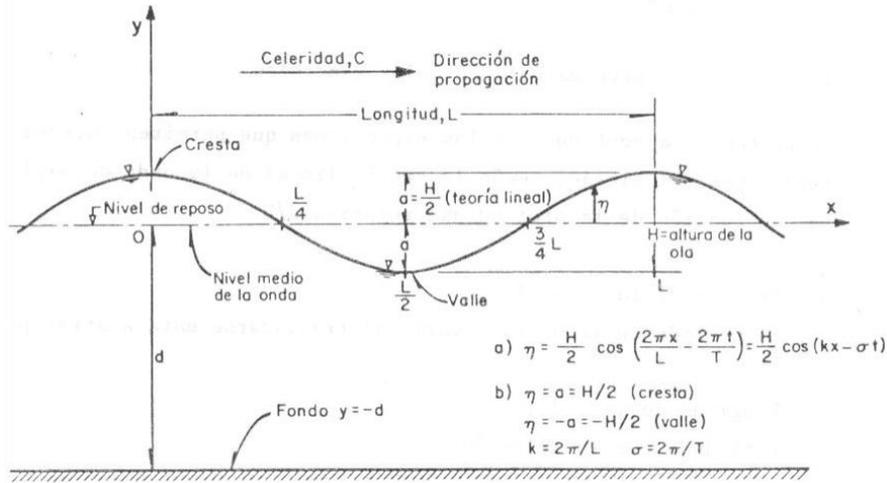


Figura 1. Características del Oleaje (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2002).

### I.1.2 Clasificación del oleaje

Hay muchas formas de clasificar el oleaje; las primeras clasificaciones fueron hechas a partir de observaciones y mediciones. Entre las más importantes están: por las fuerzas que las rigen, de gravedad (tabla 1), y de acuerdo con su periodo (tabla 2).

Tabla 1. Clasificación de las olas.<sup>1</sup>

Por las fuerzas que las rigen	De gravedad ( <i>capilares</i> )
Por las causas directas que la generan	Viento Maremotos
Por la duración de la acción de las fuerzas	Oscilación Forzada ( <i>viento</i> ) Oscilación libre
Por su frecuencia	Periódicas Solitarias
Por su desplazamiento	Estacionarias ( <i>clapotis</i> ) Traslación ( <i>desplazamiento de masa</i> ) Progresivas ( <i>sin desplazamiento de masa</i> )

<sup>1</sup> Tabla de elaboración propia con datos de (Ruiz, 2009).



Tabla 2. Clasificación de las ondas por su periodo según Johnson ET Al, 1978 (Silva, 2005).

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	centímetros	centímetros	Viento	Tension superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	de metros a cientos de metros	de centímetros 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

Por otro lado, el oleaje puede clasificarse por bandas de ondas de un espectro electromagnético, que constituyen el espectro de olas oceánicas. Dichos espectros se pueden reproducir en el laboratorio. El oleaje también se puede clasificar en dos categorías: de gravedad ordinaria y ondas de marea (Bustamante, et. al., 1976).

De esta última clasificación se tiene (figura 2):

1. Ondas capilares
2. Ondas de ultragravedad
3. Ondas de gravedad
4. Ondas de infragravedad
5. Ondas de periodo largo
6. Ondas de marea, y
7. Ondas de transmarea

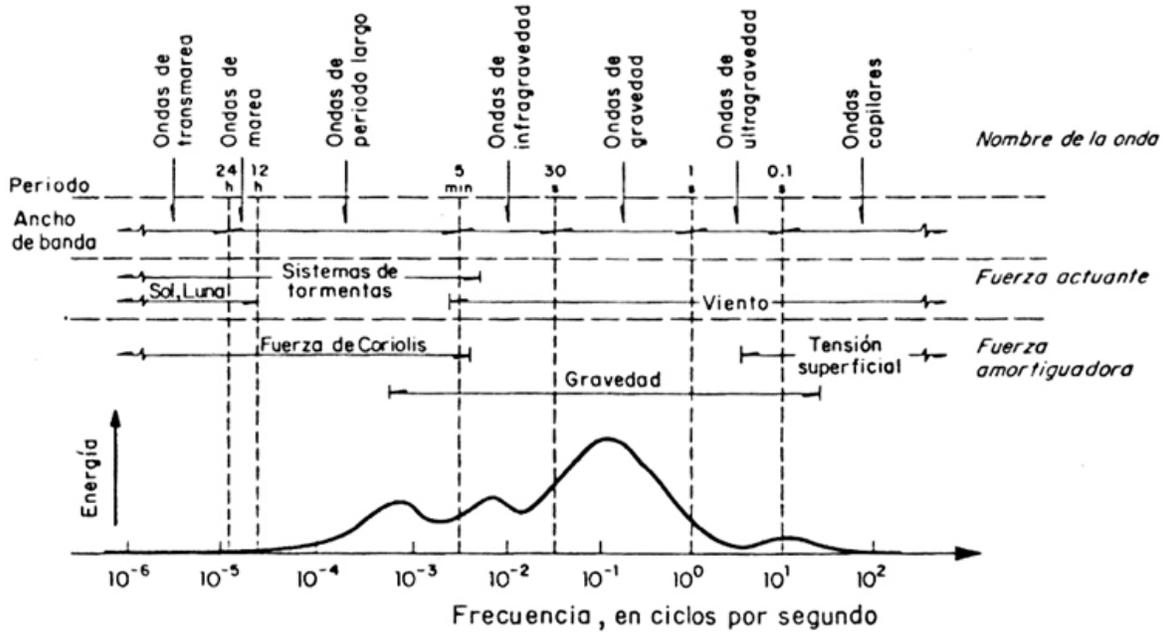


Figura 2. Clasificación del oleaje conforme al periodo, según Kinsman 1965 (C.F.E., 1983).

El oleaje de mayor interés en el diseño de estructuras portuarias es el generado por el viento. Estas olas están incluidas en las ondas de ultragravedad, gravedad e infragravedad, cuyo periodo oscila entre los 0.1 segundos a los 5.0 minutos.

Las olas dentro de esta clasificación poseen la mayor cantidad de energía, por lo que las estructuras que requiere un Puerto, se diseñan con estas condiciones.

### I.1.3 Teorías del oleaje

En el siglo XIX, se trató de realizar la descripción matemática del fenómeno del oleaje en la cual sus principales características son la irregularidad y aleatoriedad.

Las primeras aproximaciones trataron de ser descritas de la forma más simple como oleaje regular, que considera que las ondas mantienen su altura y tiempo de propagación.

Una de las primeras teorías fue la de Gerstner en 1802, quien presentó la “Teoría Trocoidal”, que consideraba ondas de amplitud finita; describiendo el perfil de la ola



adecuadamente, aunque dejando que desear en cuanto al movimiento orbital de las partículas. Esta teoría es compleja ya que no es de fácil aplicación.

Por su parte Airy describe matemáticamente el fenómeno del oleaje, en su “Teoría lineal de pequeña amplitud” (1845), la cual describe bastante bien el comportamiento real de las olas, cuando se encuentran en profundidades infinitas, además de que su aplicación es muy sencilla.

Stokes en 1880, también estableció una teoría de amplitud finita, la cual en sus aproximaciones de 3° y 4° orden describe adecuadamente el oleaje en aguas profundas.

Estas teorías representan muy bien las olas en aguas profundas, pero en aguas reducidas no tienen validez ya que no consideran la influencia del fondo del mar sobre el perfil de las ondas. La teoría de Korteweg o Cnoidal representa muy bien el movimiento de las partículas en dichas aguas, aunque su aplicación no es práctica, ya que su determinación matemática es compleja. Por otro lado la teoría Cnoidal tiene un límite de aplicación al acercarse a la rompiente del oleaje.

La teoría de la Onda Solitaria<sup>2</sup> es la que mejor aproximación a la realidad tiene y su manejo es sencillo (Frias & Moreno, 1988).

En la figura 3, se presentan los perfiles que describiría una onda con las diferentes teorías del oleaje que existen.

---

<sup>2</sup> La teoría de la ola solitaria es la que mejor describe a los Tsunamis.

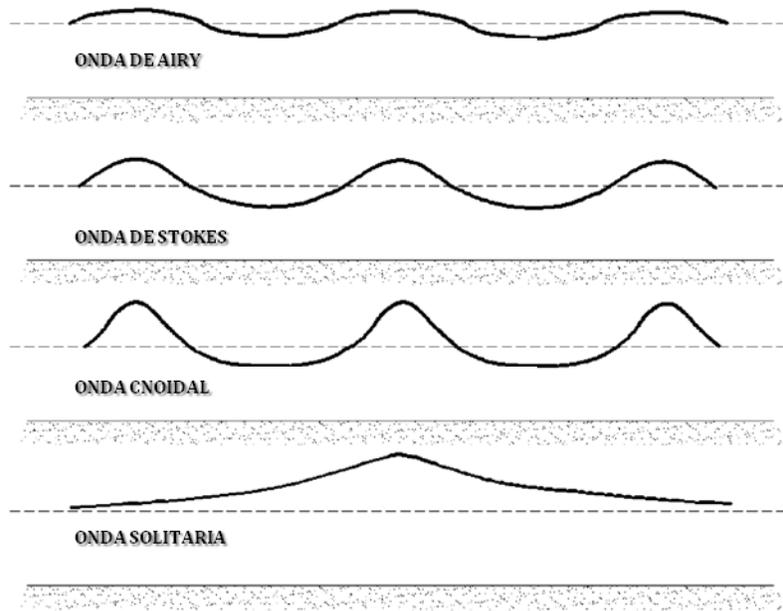


Figura 3. Diferentes formas del perfil de las olas progresivas de gravedad. (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2002)

## I.2 Oleaje Irregular

El termino oleaje irregular es utilizado para describir el estado real del mar, en el cual sus características son variables estadísticas; en contraste con las ondas regulares o monocromáticas, donde sus propiedades son constantes. El oleaje irregular puede ser reproducido en un laboratorio.

Las olas del mar no pueden ser regulares ya que no tienen periodicidad con respecto al tiempo, ya que el oleaje es un proceso aleatorio. El oleaje irregular se considera como el conjunto de olas viajando en diferentes direcciones ( $\theta_i$ ), con diferentes amplitudes ( $\alpha_i$ ), frecuencias ( $\sigma_i$ ) y fases ( $\varepsilon_i$ ), sin embargo puede descomponerse ya que se ha considerado como una superposición lineal de ondas armónicas simples, como se muestra en la figura 4 (Silva, 2005).

El *perfil de la ola* puede calcularse como (Silva, 2005):

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[ \frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $x, y$  Posición espacial de la onda
- $t$  Tiempo
- $a$  Amplitud
- $\sigma$  Frecuencia angular ( $2\pi/T$ )
- $T$  Periodo de la ola
- $g$  Aceleración de la gravedad
- $\theta$  Angulo de incidencia con respecto al eje  $x$
- $\varepsilon$  Fase

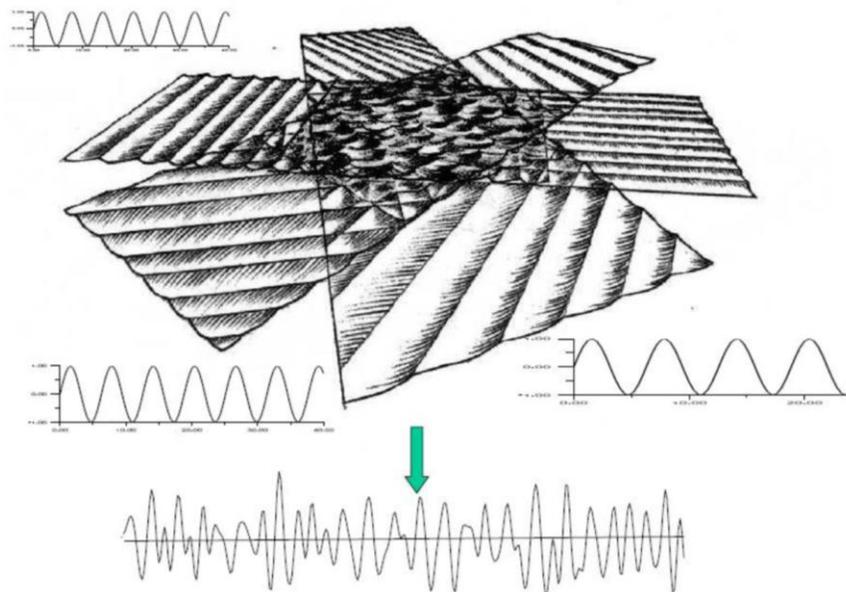


Figura 4. Superposición de diferentes estados del mar. (Medina, 2009)

El oleaje irregular se ha estudiado en base a predicciones estadísticas del oleaje y en los laboratorios suele reproducirse de dos maneras: (Ocaña, 2001).

1. Se supone la propagación de un tren de olas con diferentes alturas y periodos.



2. Se hace la superposición de varios trenes de olas regulares con sus respectivas alturas y periodos.

El oleaje irregular comparte la mayor parte de las características del oleaje regular, y conserva algunas particularidades como:

1. La cresta, el valle, la profundidad, la celeridad, la frecuencia mantienen su concepción.
2. La longitud de onda ( $L$ ), el periodo ( $T$ ) y la amplitud ( $a$ ) son variables.
3. La altura de ola ( $H$ ). Puede ser estimada por tres métodos:
  - a. Como la diferencia de niveles entre el punto más alto y el siguiente menor.
  - b. Como la distancia vertical entre la cresta y el valle significativo, despreciando las variaciones pequeñas del perfil.
  - c. Como la distancia vertical que hay entre una cresta y un valle entre dos puntos consecutivos de tiempo al cruzar el nivel de referencia o cero (zero-up-crossing<sup>3</sup>). Como se muestra en la figura 5, en una misma dirección ya sea hacia arriba o hacia abajo (zero-down-crossing).

Para su análisis existen dos métodos: ola por ola (wave by wave), y espectros de energía (o métodos espectrales). (Ocaña, 2001) (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2008), los cuales se describen a continuación.

### **I.2.1 Análisis ola por ola (wave by wave)**

El método ola por ola, utiliza las estadísticas de un registro de oleaje medido en la superficie del mar en un punto, a través de un dispositivo implementado en un mar irregular como una boya instrumentada o sensores de presión, que guardan los registros de las variaciones del nivel.

---

<sup>3</sup> También llamado nivel medio de la ola.



Estos registros deben contener muestras de intervalos fijos (normalmente cada segundo), de longitudes de ola finitas; estos son señales aleatorias que en apariencia exhiben muchos máximos y mínimos. Por ello se establecen criterios para distinguir las ondas individuales en el registro.

Para este método es necesario dividir los registros en segmentos, para obtener así ondas individuales. Cada onda tendrá su altura y periodo correspondiente, así mismo, podemos definir de manera independiente los segmentos, para después caracterizar estadísticamente su distribución.

Uno de los problemas más comunes al momento de definir una onda es cuando se presenta un máximo en el registro, ya que es tomado como la cresta y el mínimo como el valle. Por otro lado resulta más difícil definir las cuando se presentan dos crestas seguidas que están por debajo de la línea media de la onda.

Algo similar ocurre cuando el periodo de la ola es obtenido como el intervalo de tiempo entre cualquiera de dos valles o crestas vecinas; otra forma sería, estimar el periodo como el intervalo de tiempo entre cruces sucesivos del nivel medio del agua (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2008).

La principal limitación de este método es que no ofrece las direcciones de las cuales proviene el oleaje.

#### ***1.2.1.1 Método de cruces por cero (zero-up-crossing)***

Con este método, podemos definir una ola cuando cruza hacia arriba la línea cero o el nivel medio del agua y continúa hasta el siguiente punto de cruce. Cuando el cruce es hacia abajo, se denomina *zero-down-crossing*.

La altura de la ola se obtiene por la diferencia de la elevación más alta (cresta) y la más baja (valle), en el cruce sucesivo del nivel cero o nivel medio del agua.

La definición de la altura depende de la elección de si ocurre antes o después del cruce de una cresta. Teniendo en cuentas que se pueden presentar diferencias. Con método también se obtiene el periodo de la ola que corresponde a la altura definida como se indica en la figura 5 (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2008).

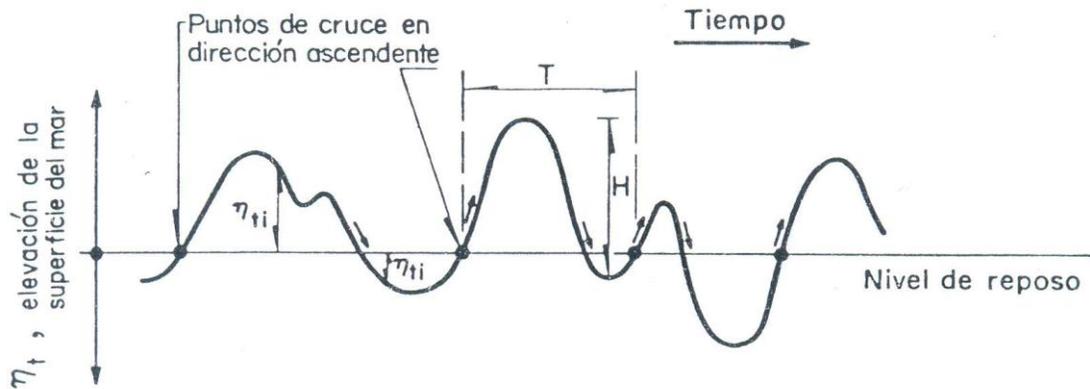


Figura 5. Método de cruces por cero. (C.F.E., 1983)

### 1.2.1.2 Método de espectros de energía

En este método un tren de oleaje irregular se separa en trenes de olas regulares, nombrando sus componentes para cada uno de ellos, con sus periodos y direcciones.

Al agruparlos en una gráfica, donde se obtiene la distribución de energía de acuerdo a su frecuencia se denomina *espectro de frecuencia*, cuando se agrupan por direcciones se conoce como *espectro direccional*. La combinación de ambos espectros es conocido como *espectro tridimensional*.

El método de espectros de energía, tiene la desventaja de que suele ser muy lineal y puede no llegar a representar ondas no lineales (U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2008) (Ocaña, 2001) (Marín, 2007) (Rosales, 2005).



### I.3 Fenómenos que modifican el oleaje

Los principales fenómenos que modifican al oleaje, ordenándolos por la forma en que se presentan son la refracción, la difracción, la reflexión, la rompiente y el asomeramiento. (Medina, 2009). Los cuales se explican a continuación:

#### I.3.1 Refracción

Se define como el cambio de dirección del oleaje por efecto del fondo, en el cual, el oleaje tiende a ser paralelo a las curvas batimétricas<sup>4</sup> del fondo del mar.

Esta transformación tiene lugar cuando un tren de ondas incidiendo oblicuamente sobre la costa encuentra una reducción 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, como se muestra en la figura 6. Por tanto, la refracción puede ser debida al efecto del fondo o a la presencia de una corriente.

Métodos para calcular la Refracción { *Analíticos (Método de conservación de la energía)*  
*Gráficos (Frentes de oleaje y Rayos de energía)*  
*Numéricos*

---

<sup>4</sup> La curvas batimétricas se obtienen a partir de unir puntos de igual profundidad del fondo del océano.

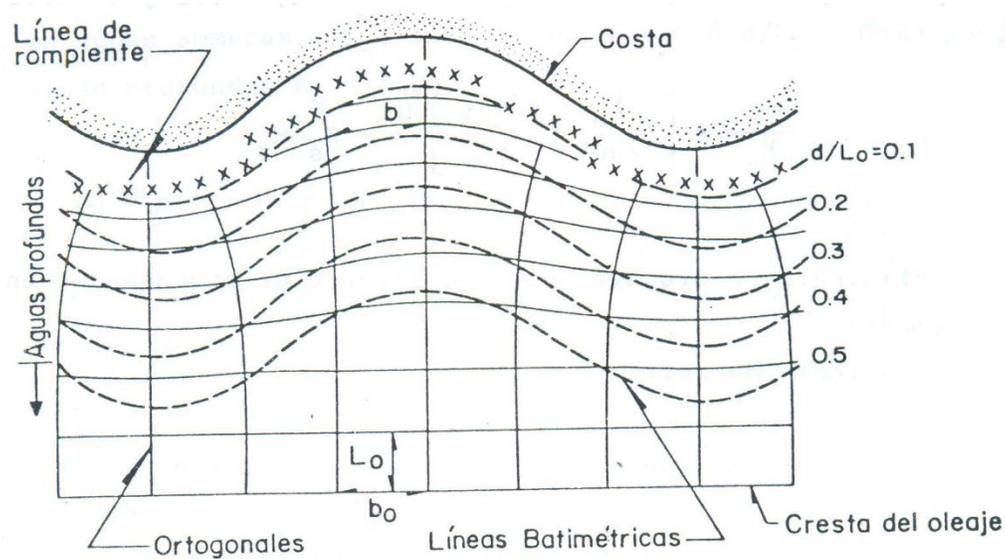


Figura 6. Refracción del oleaje. (C.F.E., 1983)

### I.3.2 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. 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, existirá una discontinuidad en la altura de la onda que pasará de la altura de la onda incidente a cero en el lado puerto del rompeolas. Ello da lugar a una cesión lateral de energía hacia la zona de sombra que suaviza la discontinuidad, este fenómeno se puede apreciar la figura 7. (Cruz, 2010) (C.F.E., 1983)

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 (figura 7).

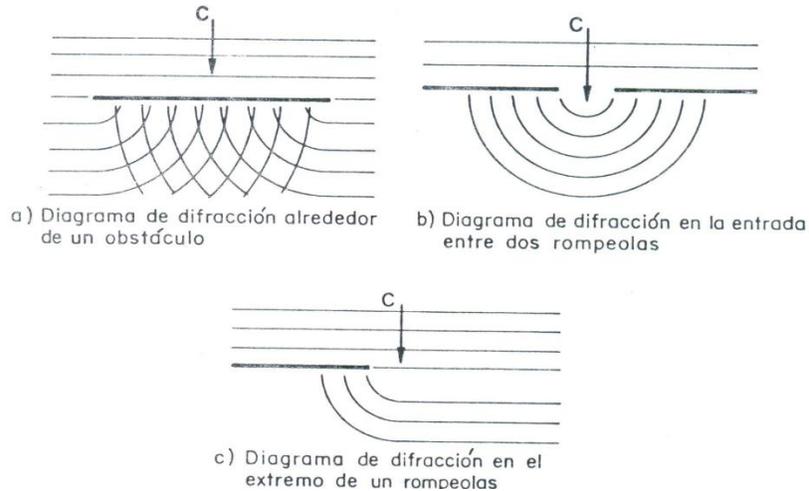


Figura 7. Difracción del oleaje. (C.F.E., 1983)

### I.3.3 Reflexión

Debido a que este es el fenómeno de estudio en esta tesis, se ha dedicado un capítulo para su descripción. Ver Capítulo II. Reflexión del oleaje.

### I.3.4 Rompiente

Este fenómeno se produce en las cercanías de la costa, debido al rompimiento de la ola, esto genera una zona de rompientes donde se producen la mayoría de los procesos litorales como el transporte de sedimentos.

Debido a que la ola reduce la velocidad con la que se aproxima (fenómeno de asomeramiento), éstas crecen en su cresta, desestabilizándose, y a causa de la velocidad en su componente horizontal, provocan que esta caiga, que es lo que conocemos como rompimiento de la ola.

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, un ejemplo de este tipo de rompiente se muestra en la figura 8.



Figura 8. Rompiente continua o deslizante (Spilling). (U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1975)

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, como se muestra en la figura 9.



Figura 9. Rompiente rodante (Plunging). (U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1975)

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, como se ilustra en la figura 10.



Figura 10. Rompiente ondulante (Surging). (U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1975)

4. *Rompiente colapsante (Collapsing)*. Este tipo de rompiente es muy singular, ya que se lleva a cabo entre la rompiente rodante y la rompiente ondulante, pero la cresta no llega a romper, aunque produce espuma, como se ilustra en la figura 11.



Figura 11. Rompiente colapsante (Collapsing). (U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1975)

### I.3.1 Asomeramiento

En la naturaleza a medida que un tren de olas se aproxima a la costa, reduce su velocidad, y derivado de la disminución de la profundidad, la longitud de la ola se reduce; esto es producido cuando la profundidad es menos de la mitad de la longitud de la ola u onda (límite de aguas profundas). La velocidad disminuye, y al tener una energía constante, la onda expresa el cambio de profundidad adquiriendo mayor altura. A este proceso de transformación se la llama *asomeramiento o shoaling*.

## I.4 Obras de Protección

Las obras de protección son estructuras artificiales que construye el hombre para proteger un puerto, una playa, un río, etcétera.

Estas obras brindan protección, seguridad y tranquilidad a la zona puerto y/o una zona litoral. Estas obras pueden estar compuestas por elementos naturales (rocas de diferentes tamaños y pesos) o artificiales (cubos, cubos modificados, dolos, tetrápodos, etcétera).

De acuerdo con (Ruiz, 2010) , existen tres tipos de Estructuras:

### 1. Rompeolas

Son estructuras de enrocamiento de sección trapezoidal, construidas con la intención de generar una zona de abrigo, generalmente su ubicación es en mar adentro.

### 2. Escolleras

Son estructuras similares a los rompeolas, que sirven para encausar y proteger las bocas de los ríos y/o deltas, a su desembocadura con el mar.

### 3. Espigones

Son estructuras que tienen como finalidad proteger la costa de la erosión o del azolvamiento. Los espigones son construidos generalmente de manera perpendicular a la costa.

Existen tres tipos de secciones comunes para las obras de protección; trapezoidal, verticales y mixtos.

#### I.4.1 Rompeolas

Son estructuras para la protección de accesos y obras interiores de un Puerto, contra el oleaje procedente de aguas profundas.

Los rompeolas se han dividido en dos grupos, de acuerdo a la función que cumplen: los que amortiguan el oleaje y los que impiden el paso del oleaje (Frias & Moreno, 1988) .

El primer grupo son rompeolas que amortiguan el oleaje, corresponde a los rompeolas sumergidos, rompeolas flotantes y rompeolas neumáticos e hidráulicos.

El segundo grupo son rompeolas que impiden el paso del oleaje, corresponde a su vez a los rompeolas a talud, rompeolas de paramento vertical y rompeolas mixtos.

Existen otras clasificaciones para los rompeolas, de acuerdo a su forma estructural tenemos: rompeolas rígidos, rompeolas flexibles y rompeolas semirrígidos.

También de acuerdo a su material de construcción hay: rompeolas de concreto, rompeolas de enrocamiento, rompeolas de elementos artificiales (cubos, cubos modificados, dolos, tetrápodos, etcétera.) y rompeolas de contenedores (bolsacreto, sand tainer, cajones, etcétera).

La tesis se basó en rompeolas que impiden el paso del oleaje, con el análisis de rompeolas permeables a talud.



Los rompeolas están constituidos generalmente por tres capas:

1. *Núcleo*, cuyos elementos pétreos (rocas) son de tamaño y peso pequeño.
2. *Capa secundaria* (puede o no existir, de acuerdo al diseño de la estructura) que son elementos de mayor tamaño y peso que el núcleo.
3. *Coraza*, existen dos tipos: rocas de gran tamaño y peso; y elementos prefabricados como cubos, cubos modificados, dolos, tetrápodos, etcétera.

#### ***1.4.1.1 Rompeolas a talud***

Los *rompeolas a talud* son los más empleados en México, ya que el costo de construcción es menor a los de paramento vertical y el procedimiento constructivo es más fácil de realizar.

La sección transversal *trapezoidal* disipa en un mayor grado la energía del oleaje, ya que, la configuración del talud permite que la ola rompa en la estructura permitiendo así disminuir la energía del oleaje incidente.

#### ***1.4.1.2 Rompeolas permeables***

Los *rompeolas permeables* son los que permiten el paso del agua a través del cuerpo del rompeolas donde generalmente encontramos los construidos con rocas de gran tamaño o con elementos prefabricados.



## Capítulo II. Reflexión del oleaje.

En este capítulo se describe el fenómeno de la reflexión del oleaje; haciendo uso de los estudios que muestran las formulaciones de los investigadores de este fenómeno desde 1951 con *Miche*, hasta los artículos publicados por *Van der Meer* en el 2008.

Se muestran los métodos para medir la reflexión en canales de oleaje, tales como el método elaborado por *Goda y Suzuki* en 1976 y mejorado por *Mansard y Funke* en 1980.

### II.1 Reflexión del oleaje

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 a talud, como el caso de los rompeolas, presenta una reflexión menor que la de paramento vertical. Esto se debe a que la disminución progresiva de la profundidad hace que la ola rompa. Por otro lado los huecos que quedan entre los elementos que conforman la capa secundaria y la coraza acentúan la disipación (Fontirroig, 2009).

#### II.1.1 Características de la reflexión del oleaje

La reflexión del oleaje se define mediante el coeficiente complejo

$$R = |R| \cdot e^{-i\varepsilon} \quad \text{..... Ec. 2}$$

Donde

$R$  Coeficiente de reflexión

$e$  Número de Euler o constante de Napier

$\varepsilon = \arctg\left(\frac{R_I}{R_R}\right)$  El argumento del coeficiente complejo. Proporciona información sobre el desfase ficticio (este hace referencia al hecho de que no hay un único punto concreto donde se produce la reflexión, sino que esta se desarrolla a lo largo de un tramo del talud) entre la ola incidente y la reflejada.

$R_R$  Coeficiente del oleaje reflejado

$R_I$  Coeficiente del oleaje incidente

$|R| = \sqrt{R_R^2 + R_I^2}$  El módulo del coeficiente. Habitualmente se denomina coeficiente de reflexión ( $K_r$ ), y relaciona las alturas de ola incidente ( $H_i$ ) y reflejada ( $H_r$ ), de la siguiente forma: figura 12.

$$R = \frac{H_r}{H_i} \quad \text{.....Ec. 3}$$

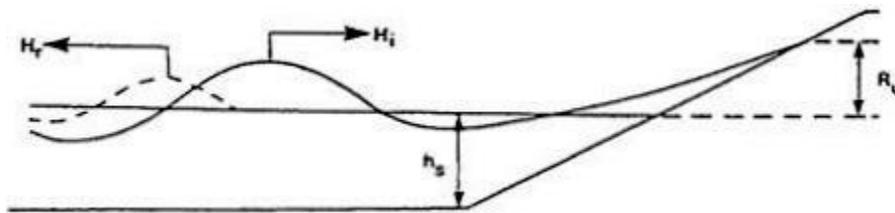


Figura 12. Reflexión del Oleaje. (Van der Meer, 1995)

En el caso de oleaje irregular, el coeficiente de reflexión se calcula a partir de los flujos de energía, que a la vez están relacionados con los espectros de oleaje de la siguiente forma:

$$|R| = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} = \sqrt{\frac{\int S_r(f)df}{\int S_i(f)df}} \quad \text{..... Ec. 4}$$



Donde

$E_r$  Energía reflejada

$E_i$  Energía incidente

$S_r$  Densidad de energía reflejada

$S_i$  Densidad de energía incidente

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía.

$$E_I = E_T + E_R + E_L \quad \text{.....Ec. 5}$$

Donde la energía de la ola incidente ( $E_I$ ), es igual a la adición de energía de la ola transmitida ( $E_T$ ), de la energía de la ola reflejada ( $E_R$ ) y de la energía perdida ( $E_L$ ) (C.F.E., 1983).

Se puede considerar que cuando una ola encuentra un obstáculo de pared inclinada o vertical, la energía que transporta se divide de la siguiente forma:

1. Una parte de la energía se disipa por la turbulencia generada al romper la ola.
2. Otra parte se disipa por fricción al contacto del talud de la estructura en función de la rugosidad de está.
3. La siguiente parte se transmite a través del obstáculo, cuando es permeable, como es en el caso de los rompeolas de enrocamiento. Considerando que se transmite a través del cuerpo del obstáculo, o bien por la corona, en el caso que se presente el overtopping
4. Por último, una parte de la energía es reflejada por el obstáculo y se propaga en sentido contrario al de la ola incidente. El encuentro de dos olas también da lugar a pérdidas por fricción interna.

Cuando se presenta la reflexión total se dice que la estructura no absorbe nada de la energía del oleaje. Cuando se presenta una reflexión parcial el oleaje que no se disipa,

es devuelto como un nuevo tren de olas que contiene la energía no disipada por la estructura natural o artificial.

La reflexión en términos de la ley de la conservación de la energía:

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad \text{..... Ec. 6}$$

La reflexión se evalúa como el coeficiente de la relación de la altura de la *ola reflejada* ( $H_r$ ), y la altura de la *ola incidente* ( $H_i$ ), denominado como coeficiente de reflexión:

$$K_R = \frac{H_r}{H_i} \quad \text{..... Ec. 7}$$

Varía desde el valor de 1.0 (reflexión total) a 0.0 (reflexión nula); en función de las características del oleaje: altura de ola, longitud, periodo; y de las características de la estructura: pendiente, rugosidad, permeabilidad.

De acuerdo con (C.F.E., 1983) las estructuras de enrocamiento son las que amortiguan más la energía del oleaje. Los factores más importantes en el amortiguamiento son: el tamaño de las rocas, el talud de la obra y la relación de vacíos. En la práctica se ha encontrado que a mayor tamaño de las rocas mayor eficiencia de amortiguamiento de la energía del oleaje; obteniéndose en mayor parte, por los elementos que conforman su coraza.

Para lograr un amortiguamiento óptimo, la coraza debe tener un espesor de tres veces el diámetro medio de las rocas que la conforman y una relación de vacíos del treinta por ciento (30%).

## II.2 Investigaciones del fenómeno de reflexión del oleaje

Una de las primeras soluciones empíricas fue desarrollada por *Miche en 1951*, quien introdujo la estimación empírica del coeficiente de reflexión en taludes. Asumiendo ondas monocromáticas e incidencia normal en una playa con pendiente constante obtuvo (U. de Cantabria, 2000):



$$K_R^2 = \begin{cases} 1 & \text{si } M \geq 1 \\ M & \text{si } M < 1 \end{cases} \quad \text{..... Ec. 8}$$

Donde:

$$M = \frac{16g^2 \tan^5 \beta}{2\pi H_o^2 \omega} \quad \text{..... Ec. 9}$$

$g$  Contante de gravedad

$\beta$  Pendiente de la playa

$H_o$  Altura de la ola en aguas profundas

$\omega$  Frecuencia angular

*Battjes en 1974*, derivó teóricamente la reflexión para pendientes suaves impermeables en términos del parámetro de similitud de rompiente o número de Iribarren, como sigue (Postma, 1989):

$$K_r = 0.1 \xi^2 \quad \text{..... Ec. 10}$$

Donde

$$\xi = I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad \text{..... Ec. 11}$$

$\alpha$  Pendiente de la playa

$H$  Altura de la ola

$L_0$  Longitud de la ola en aguas profundas

*Losada y Giménez-Curto en 1981*, desarrollaron un modelo exponencial para  $K_r$  sobre la base del parámetro de Battjes ( $\xi$ ), de la siguiente manera (Postma, 1989).

$$K_r = A [1 - e^{B \xi}] \quad \text{..... Ec. 12}$$



Donde

$A$  y  $B$  Coeficientes obtenidos a través de pruebas en laboratorio

La expresión anterior fue calibrada usando los datos para pendientes rugosas permeables que fueron tomadas de los experimentos realizados por Sollitt y Cross en 1972 y Gunbak en 1976 (Postma, 1989).

Tabla 3. Coeficientes  $A$  y  $B$ , aplicables a la formula de Losada y Giménez-Curto.

		A	B
Sollitt y Cross	1972	0.5030	-0.1248
Gunbak	1976	1.3508	-0.0710

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

$$K_r = \frac{A \xi^2}{(B + \xi^2)} \quad \text{..... Ec. 13}$$

Donde

$A$  y  $B$  Son constantes determinadas por pruebas el laboratorio para las siguientes condiciones:

Tabla 4. Valores de Seelig y Ahrens para el cálculo de la reflexión.<sup>5</sup>

A	B	Condicionante
1.00	5.60	pendientes suaves impermeables
0.60	6.60	roca de rugosidad permeable

Scheffer y Kohlhaseenn en 1986, efectuaron ensayos con oleaje regular e irregular, con una pendiente lisa de 1:1.7; donde observaron que no se presentaban diferencias significantes comparando la reflexión para oleaje regular con la reflexión para el espectro de oleaje con una frecuencia equivalente.

<sup>5</sup> Valores de  $A$  y  $B$ , tomados de (Postma, 1989), página 5.



Allsop y Hettiarachchi en 1989, realizaron una revisión de la fórmula de Seelig y Ahrens, evaluando para dos coeficientes: el primero, para pendientes impermeables, lisas y rugosas, y el segundo, para pendientes permeables construidas con roca, así como, con elementos artificiales, y paramentos verticales (muros verticales), permeables e impermeables.

Allsop y Channel en 1989, recalibraron la fórmula de Seelig y Ahrens, de datos obtenidos de ensayos realizados en un canal con pendientes permeables construidas de roca, introduciendo oleaje irregular.

Van der Meer y Zanuttigh en el 2006 desarrollaron una nueva fórmula para calcular el coeficiente de reflexión en función del número de Iribarren o parámetro de Battjes, basado en el periodo espectral  $T_{m1,0}$ ; definido por: (Van der Meer & Zanuttigh, 2006)

$$K_r = \tanh(a \cdot \xi_o^b) \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 14}$$

Los coeficientes  $a$  y  $b$ , de Van der Meer y Zanuttigh, están basados en ensayos realizados a diferentes estructuras como rompeolas clásicos, de berma; emergidos y sumergidos, donde los datos a través de un análisis estadístico se ajustan a los siguientes coeficientes, de acuerdo al tipo de roca utilizado. Los valores de  $a$  y  $b$  han sido obtenidos mediante el análisis de los valores medios de  $K_r$  por grupos de  $\xi_o$ , estos se muestran en la tabla 5. (Van der Meer & Zanuttigh, 2007).

Tabla 5. Valores de  $a$  y  $b$  para la formula de Van der Meer. (Van der Meer & Zanuttigh, 2007)

<i>Coefficientes a,b que se incluyen en la formula de van der Meer (2006)</i>			
	<i>a</i>	<i>b</i>	$\gamma_f$
<i>Roca permeable</i>	<i>0.12</i>	<i>0.87</i>	<i>0.40</i>
<i>Dolos</i>	<i>0.12</i>	<i>0.87</i>	<i>varios</i>
<i>Roca impermeable</i>	<i>0.14</i>	<i>0.90</i>	<i>0.55</i>
<i>Pendiente suave</i>	<i>0.16</i>	<i>1.43</i>	<i>1.00</i>

La investigación desarrollada por Van der Meer, lo llevó a relacionar la reflexión del oleaje en función de los siguientes parámetros adimensionales:

$$K_r = f \left( \frac{gT^2}{D_{50}}, \frac{R_c}{D_{50}}, \frac{B}{D_{50}}, \frac{d}{D_{50}}, \tan \alpha_{off}, \frac{D_{50}}{H_i}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{g} D_{50}^{1.5}} \right)$$

Los términos que considera (Van der Meer & Zanuttigh, 2008-A) (Van der Meer, Zanuttigh, & et., 2008-B) en relación a la reflexión del oleaje, describen las características de la estructura, como son: el bordo libre, el ancho de coronamiento, la profundidad de desplante, el ángulo del talud en la cara expuesta al oleaje. De la misma manera representa las características de los elementos que constituirán su coraza.

$\frac{gT^2}{D_{50}}$  Este parámetro adimensional involucra las características de la onda (principalmente la fuerza gravitatoria) en el término  $gT^2$  y  $D_{50}$  diámetro medio de los elementos de coraza.

$\frac{R_c}{D_{50}}$  El parámetro representa la relación donde  $R_c$  es bordo libre y  $D_{50}$  el diámetro medio de los elementos de coraza.

$\frac{B}{D_{50}}$  Este parámetro corresponde a la relación del ancho de la corona y el diámetro medio de los elementos de coraza.

$\frac{d}{D_{50}}$  El parámetro representa la profundidad de desplante de la estructura en relación con el diámetro medio de los elementos que la conforman.

$\tan \alpha_{off}$  Este parámetro se refiere al ángulo del talud que se forma con la horizontal en su lado mar o cara expuesta.

$\frac{D_{50}}{H_i}$  Este parámetro es la relación del diámetro medio de los elementos de coraza y la altura de ola incidente.

Van der Meer considera las características del medio en el que se suscita el fenómeno de la reflexión del oleaje; al tomar en cuenta la viscosidad cinemática, densidad del agua, en relación con el diámetro medio de los elementos de coraza.



$$\frac{\mu}{\rho\sqrt{g}D_{50}^{1.5}}$$

La primer parte del parámetro representa el movimiento de las ondas en reciprocidad a la densidad del fluido (para el caso representado es agua salada), así como a las fuerzas gravitatorias que se encargan de restaurarlas, ello en relación a el diámetro medio de los elementos de coraza que conforman la estructura. Como se expresa en las características de la reflexión del oleaje por medio de la ley de conservación de la energía en el punto número tres; en la que la pérdida de energía de la ola por transmisión dentro del cuerpo se considera como si fueran chorros de agua entre tuberías dentro de los espacios que hay entre los elementos que conforman el rompeolas.

### II.3 Métodos de medición de la reflexión

El análisis de la reflexión con un estado de mar irregular, puede describirse como la superposición lineal de un infinito número de componentes discretas cada uno con su propia frecuencia, amplitud y fase.

Otra forma de asumir el oleaje irregular es con cada velocidad de fase individual, que describe la relación de dispersión.

*Both Thornton y Calhoun en 1972*, desarrollaron los principios de los métodos de medición de la reflexión con dos sensores. (Goda & Suzuki, 1976)

*Zelt y Skjelbreia en 1992*, demostraron que al aumentar el número de sensores mejoraban la exactitud del método de Mansard y Funke, lo que se traducía en un error disminuido. La limitación en el uso de más de un sensor es que sea susceptible a errores producidos por oleajes parcialmente estacionarios. (Van der Meer & Zanuttigh, 2006)

Por otra parte, el cálculo utilizado para minimizar el error no es estrictamente correcto, aunque es aceptado debido a que a pesar de su inexactitud se acerca lo suficiente al valor adecuado (Postma, 1989).

### II.3.1 Método de Goda y Suzuki (1976)

Goda y Suzuki establecieron un método que consiste en medir simultáneamente las olas coexistentes (de dos trenes de olas progresivas moviéndose en dirección opuesta), en el cual se conoce su posición en el canal, en línea paralela a la dirección de propagación del oleaje, figura 13.

Basaron su análisis en el desplazamiento de la superficie libre del agua, a partir de *dos sensores* de oleaje en el cual, logran separar los espectros de oleaje coexistentes de oleaje incidente y oleaje reflejado. Mediante una serie de formulaciones, obtenemos de un tren de olas con cualquier frecuencia una amplitud incidente y una amplitud reflejada, representada por la densidad de energía donde obtenemos el espectro de energía del oleaje; todo esto, a partir de los datos obtenidos por los sensores.

Mediante un análisis de Fourier de estas dos señales se puede obtener las componentes del oleaje como la amplitud y la fase, por medio del cual puede la onda estacionaria resolverse en ondas incidentes y reflejadas (Goda & Suzuki, 1976) (Postma, 1989) (Díaz, 2006).

Las limitaciones y desventajas del Método de Goda y Suzuki, son que supone la teoría lineal del oleaje, lo que provoca que fenómenos no lineales generen errores. Cuando estos métodos son utilizados en laboratorios, el fondo del canal al ser horizontal y con la aparición de oleaje transversal y otras perturbaciones añaden *ruido*<sup>6</sup> a la señal.

El método propuesto por Goda y Suzuki indica que la distancia entre los sensores debe cumplir con ciertas condiciones. Este pierde precisión cuando la separación entre los sensores  $\Delta x$  es tal que  $2 \cdot \frac{\Delta x}{L} = n$ , siendo  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Además para (Mansard & Funke, 1980), el método de (Goda & Suzuki, 1976) presenta las siguientes limitaciones:

1. Gama limitada de frecuencias.

---

<sup>6</sup> Se entiende como ruido a los errores generados por interferencias, principalmente en la superficie del agua cuando hablamos del estudio de la reflexión.

- a. Si la separación entre los sensores es grande, el factor de coherencia que estima la estabilidad de fase relativa en cada banda de frecuencia del espectro disminuye a medida que aumenta la frecuencia, con lo que los cálculos de las reflexiones son menos confiables (Mansard & Funke, 1980).
  - b. Si la distancia es muy corta, entonces hay una pérdida de contraste en el análisis espectral del cruce.
2. Separación máxima entre sensores.
- a. Si el espacio “x” es tal que  $x/L = n/2$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ,  $L=$  longitud de onda), los valores de las reflexiones puede ser indeterminados, porque las ecuaciones propuestas tienen singularidades en estos valores.
3. Alta sensibilidad a los errores en la medición de las ondas debido a:
- a. Ondas transversales en el canal,
  - b. La interacción de las ondas no lineales,
  - c. Los armónicos debido a la no-linealidad,
  - d. El ruido en la señal, errores en la medición, etcétera.

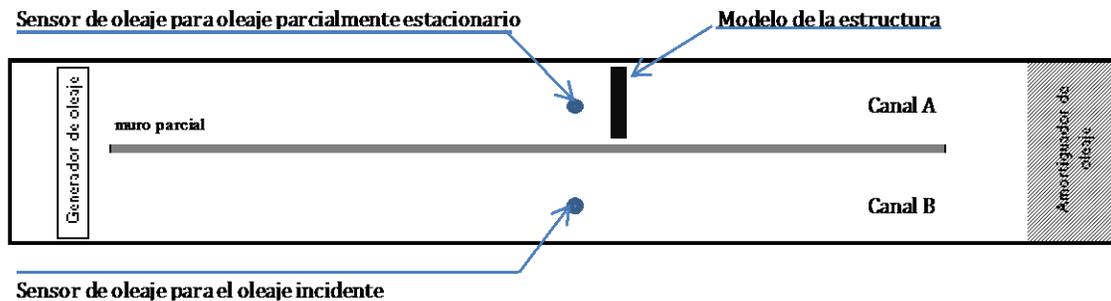


Figura 13. Arreglo utilizado por Goda y Suzuki (Goda & Suzuki, 1976).

### II.3.2 Método de Mansard y Funke (1980)

Mansard y Funke, presentaron un método con tres sensores, basado en el método de mínimos cuadrados. Introducen una variable de error la cual permite mediante la

aplicación de los mínimos cuadrados, minimizar el error al obtener el valor de la reflexión. Suponiendo la medición simultanea de tres puntos conocidos durante un tiempo  $t$ .

De acuerdo con Mansard y Funke, las ondas están viajando en una canal en sentido longitudinal y las reflejadas de una estructura o playa en la dirección opuesta, así es posible medir simultáneamente la superposición lineal de estas ondas en los puntos  $p = 1, 2, 3$ ; que están a una distancia razonable entre si y están en una línea paralela a la dirección de propagación de ondas (Mansard & Funke, 1980) (figura 14).

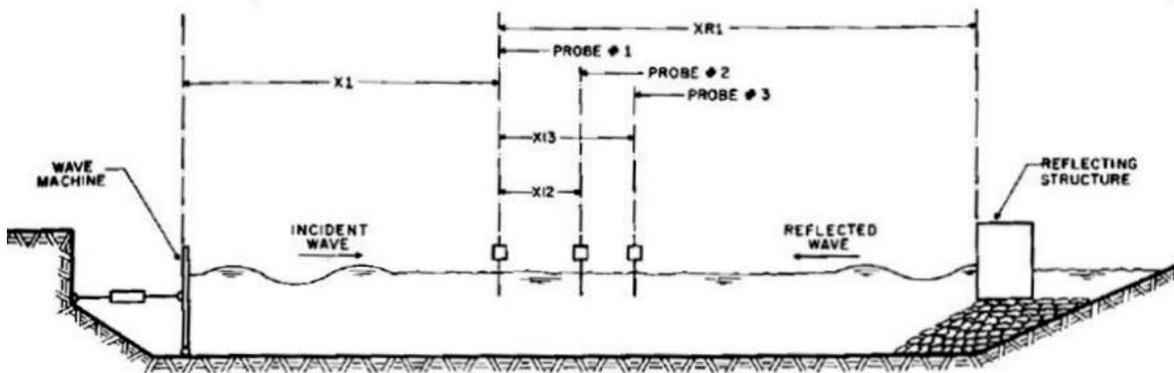


Figura 14. Distribución de la medición de ondas de reflexión (Mansard & Funke, 1980).

El perfil de la onda observada se describe para una de las posiciones del sensor, dada como la suma de las relaciones discretas y armónicas de los componentes de Fourier, como se muestra en la ecuación 14.

$$\eta_p(t) = \sum_{k=1}^N A_{p,k} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot t}{T} + \alpha_{p,k}\right) \quad \dots\dots\dots \text{Ec.15}$$

$A_{p,k}$  Coeficiente de Fourier para la frecuencia  $\frac{k}{T}$ .

$T$  Es la duración del perfil del oleaje, que se observa.

$\alpha_{p,k}$  Es la fase relativa para el tiempo de origen de una prueba.

$N$  Es el límite superior de la suma de la cual depende la frecuencia máxima significante componente de una serie.

Los coeficientes de Fourier y sus fases son obtenidos de la transformada de Fourier de la función:

$$\eta_p(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad \text{..... Ec.16}$$

Y se muestra en su forma polar

$$B_{p,k} = A_{p,k} \cdot e^{i\alpha_{p,k}} \quad \text{..... Ec.17}$$

O en su forma rectangular

$$B_{p,k} = [A_{p,k} \cdot \cos(\alpha_{p,k}) + i \cdot A_{p,k} \cdot \sin(\alpha_{p,k})] \quad \text{..... Ec.18}$$

Ya que la distancia entre varios sensores se conoce así como las componentes de las frecuencias individuales de un tren de olas, es posible calcular las relaciones de fase según lo registrado en cada uno de los tres sensores, la ecuación de una onda progresiva general es:

$$\eta_p(t) = \sum_{k=1}^N C_k \cdot \sin\left(-\frac{2\pi \cdot k \cdot t}{T} + \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L_k} + \theta_k\right) \quad \text{..... Ec.19}$$

Donde

- $\theta_k$  Es una fase arbitraria en relación con el espacio y el tiempo para la función.
- $x$  Es una variable de espacio medido desde el origen espacial de la función en una dirección de propagación de ondas.
- $L_k$  Es la longitud de la frecuencia  $\frac{k}{T}$ .

Las observaciones que se realizaron en el punto  $p$ , se pueden afirmar en términos de la suma de

1. Una ola incidente
2. Una ola reflejada



3. Una señal de ruido que puede ser causado por
  - a. Cruce de nodos
  - b. Bloqueo armónico
  - c. Falta de interacción lineal
  - d. Errores de medición

## Capítulo III. Modelo.

En este capítulo se presenta el modelo físico que se realizó en el canal angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (L.I.H.), de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco (E.S.I.A.-U.Z.), del Instituto Politécnico Nacional (I.P.N.).

### III.1 Modelación Física

El uso de modelos físicos o matemáticos aporta siempre información valiosa a la hora del diseño, y siempre a un costo inferior al de la obra en cuestión. Estudiar los efectos del oleaje sobre estructuras marítimas depende de gran cantidad de parámetros, y por tanto es muy difícil de modelar y reducir a fórmulas matemáticas precisas. Por lo tanto la modelación física resulta ser una técnica eficaz para la solución de muchos problemas presentes en el diseño de una obra marítima portuaria.

Los modelos físicos a escala, también conocidos como modelos reducidos, son una potente herramienta para el estudio de un gran número de fenómenos relacionados con los procesos y obras de Ingeniería Civil. La información que proporcionan los modelos reducidos es sumamente útil, siempre y cuando los ensayos se desarrollen en condiciones adecuadas, minimizando los efectos de escala, y las mediciones se lleven a cabo con el cuidado que exige todo proceso de este tipo.

Por otro lado aunque existe la modelación matemática y es de suma importancia, presenta en muchos casos dificultades a la hora de plantear y resolver las ecuaciones que rigen determinados fenómenos físicos de forma correcta y completa. Esto se debe a la complejidad de la formulación, o al conocimiento incompleto del fenómeno.

Por lo mencionado anteriormente, es necesario recurrir a simplificaciones que serán válidas en ciertas situaciones. Por lo que se necesita complementar los conocimientos adquiridos mediante el uso de *modelos físicos a escala*. Estos son también útiles como

base de verificación experimental de los modelos matemáticos y por sí solos constituyen una herramienta de investigación.

(Berenguer, 1995) Precisa que en cualquier caso, es necesario establecer las líneas teóricas que sustentan el uso de modelos reducidos y tener en cuenta las limitaciones en su aplicación, a fin de disponer de criterios claros sobre la validez de los resultados y las posibilidades de extrapolación, es decir, llevar al prototipo los resultados obtenidos en el modelo a escala.

Como explica (Vergara, 1995), un modelo físico reducido, representa a escala al objeto real o prototipo, tal como un fenómeno, una estructura, y cumple ciertas condiciones de similitud.

En el campo de la Ingeniería, los principales fenómenos que pueden abordarse mediante ensayos en modelos físicos reducidos son:

1. *Agitación debida al oleaje.* Se estudia la penetración del oleaje en las dársenas o zonas costeras, analizando la influencia de la dirección del oleaje y las características espectrales, se ensayan soluciones estructurales.
2. *Estructuras de protección costera.* Se realiza experimentalmente el diseño de la sección y los elementos estructurales. Se evalúan los esfuerzos debidos al oleaje, así como el comportamiento hidrodinámico tal como: reflexión, transmisión, rebase, entre otros.
3. *Estructuras a talud.* Aquí se revisan diseños de secciones y elementos estructurales. Principalmente características de estabilidad de las estructuras.
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.

Ya que el estudio presente es de carácter experimental, y comprende la revisión de secciones de rompeolas, se justifica el uso de un modelo físico reducido para el análisis de la reflexión.

Para el estudio de 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) recomienda utilizar una escala de líneas de 1:40, tabla 6. Por ello la selección de las escalas horizontal y vertical, se realiza de forma independiente, siendo este el máximo valor recomendado para modelos sin distorsión.



Tabla 6. Escala de Líneas. (Vergara, 1995)

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



Dentro de las escalas, y a partir del concepto de Fuerza, que es todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los cuerpos materiales, en este caso particular el oleaje, es decir, es una modelización matemática de la intensidad de las interacciones, junto con la energía del oleaje.

$$F_i = F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p \quad \text{..... Ec.20}$$

La ecuación 19 establece que la fuerza de inercia, es la sumatoria de diversas fuerzas, donde se tienen las fuerzas que predominan son:

1. Fuerzas de inercia  $F_i$
2. Fuerzas de gravedad  $F_g$
3. Fuerzas de viscosidad  $F_\mu$
4. Tensión superficial  $F_\sigma$
5. Fuerzas de elasticidad  $F_e$
6. Fuerzas de presión  $F_p$

Para poder lograr que el modelo sea a semejanza del prototipo, se idealizaría de la siguiente manera:

$$\frac{F_{ip}}{F_{im}} = \frac{(F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p)_p}{(F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p)_m} \quad \text{..... Ec.21}$$

Donde el subíndice  $p$  designa a las fuerzas actuantes en prototipo y el subíndice  $m$  en el modelo.

De lo anterior se aprecia que no es posible obtener una semejanza total entre modelo y prototipo, por las características de los fluidos utilizados, ya que no se pueden reproducir a escala. Por lo tanto se requiere emplear una semejanza parcial, en las que se reproduzcan adecuadamente solo las fuerzas dominantes en el fenómeno de estudio. Una cierta desviación en las fuerzas secundarias se traducirá como efectos de escala, al aplicar una semejanza parcial.



Si se considera únicamente la acción directa del oleaje, las variables que intervienen en el estudio, de la reflexión del oleaje en los rompeolas son:

- H      Altura de ola
- T      Periodo de la ola y su distribución respecto al tren de olas incidentes (para el caso de estudio, oleaje irregular), incluyendo el tipo de acción
- p      Peso de los elementos
- $\alpha$     Ángulo del talud del rompeolas
- $\rho_e$     Densidad de los elementos
- $\rho_a$     Densidad del agua de mar
- $\delta = \frac{\rho_e}{\rho_a}$  Densidad relativa de los elementos
- $\varphi$     Forma de los elementos, asociada a la trabazón de los mismo (para el caso de la estructura con coraza de dolos)
- e      Espesor de las capas de material que integran la estructura

Y ya que las fuerzas de gravedad y de inercia en el oleaje son predominantes, a través del análisis de similitud se tendrá:

$$\frac{F_{ip}}{F_{im}} = \frac{F_{gp}}{F_{gm}} \dots\dots\dots \text{Ec.22}$$

Considerando la fuerza de inercia

$$F_i = m * a = V/T/g \dots\dots\dots \text{Ec.23}$$

Y la fuerza gravedad como

$$F_g = m * g = V^2/g * L \dots\dots\dots \text{Ec.24}$$



Al actuar ambas al mismo tiempo se tiene que:

$$\frac{V_m^2}{g_m L_m} = \frac{V_p^2}{g_p L_p} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.25}$$

Siendo

$V$  Velocidad típica del fenómeno

$g$  Aceleración de la gravedad

$L$  Longitud típica del fenómeno

Al revisar las variables que se tienen, se tiene como resultado de este análisis por las fuerzas de inercia y de gravedad, la relación de estas, se conoce como número de Froude ( $F_n$ ),

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.26}$$

Al ser igual en el modelo y prototipo constituye la Ley de Similitud de Froude. De lo anterior se obtienen las siguientes escalas a partir de dicho criterio, tabla 7.

**Tabla 7. Diferentes escalas y su relación con la escala de líneas  $E_L$ .**

Escalas	Relacion
Escala de Lineas	$E_L = E_L$
Escala de Longitud de la Ola	$E_{LH} = E_L$
Escala de Altura de la Ola	$E_{LV} = E_L$
Escala de Periodo de la Ola	$E_T = E_L^{1/2}$
Escala de Celeridades de la Ola	$E_C = E_L^{1/2}$
Escala de Fuerzas	$E_F = E_L^3$
Escala de Pesos	$E_W = E_L^3$

### III.1.1 Selección de la escala del modelo

Para realizar los ensayos de reflexión del oleaje, se propuso un modelo sin distorsión y de fondo fijo. Con base a lo anterior se selecciono la **escala de líneas de 1:40**, debido a la geometría y dimensiones del canal y a los requerimientos del generador de oleaje. De la tabla 7 se pueden determinar las siguientes escalas de utilidad en el estudio del modelo, tabla 8.

Tabla 8. Escalas utilizadas en el Modelo.

Escalas	Relacion	Escala en el Modelo
Escala de Lineas	$E_L = E_L$	$E_L = 1:40$
Escala de Longitud de la Ola	$E_{LH} = E_L$	$E_{LH} = 1:40$
Escala de Altura de la Ola	$E_{LV} = E_L$	$E_{LV} = 1:40$
Escala de Periodo de la Ola	$E_T = E_L^{1/2}$	$E_T = 1:6.32$
Escala de Celeridades de la Ola	$E_C = E_L^{1/2}$	$E_C = 1:6.32$
Escala de Fuerzas	$E_F = E_L^3$	$E_F = 1:64000$
Escala de Pesos	$E_W = E_L^3$	$E_W = 1:64000$

### III.2 Instalaciones y equipo

A continuación se enlistan y describen las instalaciones y el equipo empleado:

1. Canal de oleaje angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (L.I.H.).
2. Generador hidráulico de oleaje irregular.
3. Computadora para controlar el generador de oleaje.
4. Computadora para control del equipo de medición del oleaje.
5. Ológrafo.
6. Sensores de oleaje.

## 1. Canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (L.I.H.).

Este canal se encuentra en las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Sus dimensiones son 24.45 metros de largo, por 0.66 metros de ancho, y 0.90 metros de profundidad. El canal está constituido por muros de tabique repellados y dos secciones transparentes con acrílico para apreciar el fenómeno a representar (figura 15).



Figura 15. Canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica (LIH).

## 2. Generador hidráulico de oleaje irregular.

El generador tiene la capacidad de reproducir oleaje regular e irregular y onda solitaria, con alturas y periodos aleatorios; y diferentes espectros de oleaje, figura 16.

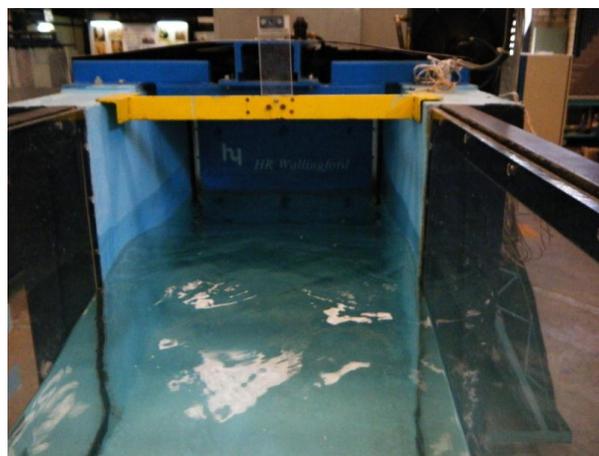


Figura 16. Generador de oleaje.

### 3. Equipo de cómputo para controlar el generador de oleaje.

En la figura 17, se observa el equipo que opera el generador de oleaje y el equipo que procesa los datos obtenidos de los sensores a través del ológrafo.



Figura 17. Equipo de Computo.

### 4. Ológrafo

El ológrafo registra la variación en el nivel del agua enviando señales analógicas al equipo de cómputo en donde se hace el procesamiento de datos, figura 18.

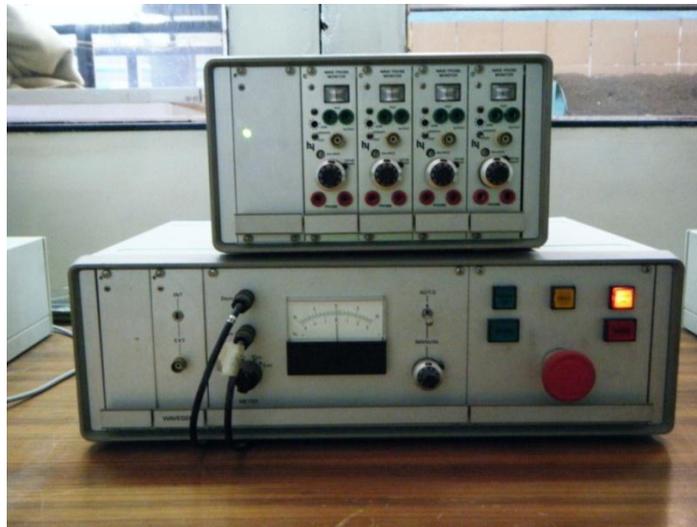


Figura 18. Ológrafo.

## 5. Sensores de oleaje.

Los sensores registran las variaciones del nivel del agua en secciones de interés para registrarlas, para el estudio se utilizaron tres sensores como lo indica el método de Mansard y Funke en la evaluación de la reflexión del oleaje, figura 19.



Figura 19. Sensores.

### III.3 Preparación de los ensayos para medir la reflexión del oleaje

El coeficiente de reflexión en la estructura se reduce con ondas de periodo largo (baja frecuencia) y crece cuando hay ondas de periodo corto (alta frecuencia). Para la calibración y el análisis espectral requieren de orden y espaciamiento de los sensores que se colocan en el canal, así como, de la profundidad (tirante de agua). Esto se ilustra en la figura 20.

	Prototipo	Modelo
Factor de Escala	40.000	40.000
Profundidad del agua	19.360 m.	0.480 m.
X1	6.240 m.	0.156 m.
X2	16.000 m.	0.400 m.
X3	9.760 m.	0.244 m.

Figura 20. Datos requeridos para el archivo de calibración.

El tirante que se tomará para efecto de cálculo es el del sensor numero 2.

Los sensores deben de cumplir con los siguientes puntos:

- a. Se asume que la profundidad es constante para el análisis
- b. Los sensores se localizaran en el área donde la pendiente del fondo sea mínima.
- c. Los sensores no deben de interferir con el generador de oleaje o con la estructura, tomando como distancia mínima tres veces la longitud de la onda (3L).
- d. Se asume una teoría lineal donde los sensores no puedan posicionarse en las áreas de rompiente, y no hacer pruebas de reflexión con estados de mar altos donde la rompiente sea inevitable.

#### **III.4 Construcción del modelo**

Se dispuso de un canal angosto de oleaje para el modelo de fondo fijo sin distorsión, en el cual se reprodujeron cuatro secciones de rompeolas permeables a talud. Dos secciones de rompeolas de berma con taludes 1.5:1 lado mar y 1.5:1 lado tierra; y dos secciones de rompeolas clásico o de tres capas, con taludes 2:1 lado mar y 1.5:1 lado tierra. Para lo anterior se habilitó el material que constituiría las capas de núcleo, capa secundaria y coraza de material pétreo, para las dos secciones de rompeolas de berma y una de rompeolas clásico o de tres capas. Solo para la sección de coraza de dolos, éstos fueron fabricados con resina plástica. Es importante mencionar y resaltar que las dimensiones físicas del canal de oleaje influyeron en la selección de la escala del modelo.

Además, se realizó el mantenimiento del amortiguador de oleaje; el cual se retiro del canal. Se lavaron las fibras que componen su interior, a las rejas de su estructura se les retiro la pintura que tenia dañada con cardas montadas en un esmeril, figura 21.



Figura 21. Mantenimiento efectuado al amortiguador de oleaje del canal angosto de oleaje del LIH, ESIA-UZ.

Una vez despintadas se limpiaron para poderles aplicar dos capas de pintura: una de base y otra de esmalte alquidálico anticorrosivo, figura 22.



Figura 22. Aplicación pintura del amortiguador de oleaje.

Ya pintado el amortiguador fue introducido en el extremo final del canal como se aprecia en la figura 23.



Figura 23. Colocación del amortiguador en el final del canal angosto de oleaje.

En forma simultánea se retiró el material de la estructura anterior y se demolieron los firmes del perfil playero que se encontraban en el fondo del canal angosto de oleaje.

También se habilitó un firme de dos pendientes, el cual representó la pendiente del fondo marino donde se construyen los rompeolas como obras de protección; éste fue dispuesto de mortero cemento-arena, en una proporción 1:2; de 2 cm de espesor. La pendiente más cercana a tierra fue de 1:50 con una longitud de 7.60 m y una pendiente de transición de 1:100 de 7.88 m de longitud para poder ligar con el fondo del canal que representa la zona de aguas profundas, figura 24.

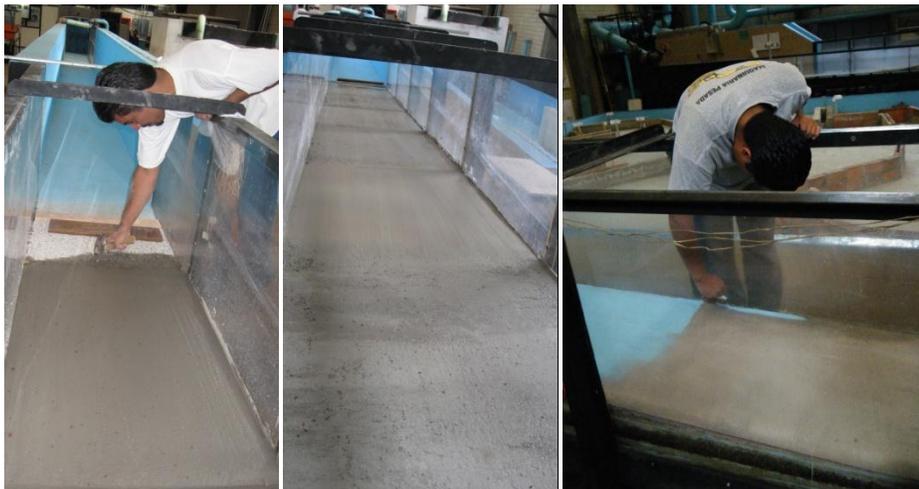


Figura 24. Habilitado del nuevo firme.

Posteriormente, se procedió al diseño de los rompeolas utilizando la fórmula de Hudson para coraza de roca y dolos; para los dos rompeolas de berma se aplicaron dos rangos de coraza de 1.28 a 3.84 ton y de 2.56 a 5.12 ton. Encontrando que los elementos de enrocamiento de la capa secundaria y núcleo según (C.F.E., 1983), fueron  $W/10$  a  $W/20$  y  $W/200$  a  $W/4000$  respectivamente, donde  $W$  es el peso de los elementos de coraza; el material de enrocamiento empleado en la construcción del modelo tiene un peso específico de  $2.57 \text{ ton/m}^3$ .

Ya que se tenían rocas, disponiendo de material suficiente para las cuatro estructuras y para obtener material de menor tamaño la roca fue llevada a una trituradora de una mina de roca en Lago de Guadalupe, Estado de México; material que posteriormente se seleccionó y clasificó de acuerdo a los rangos establecidos por el diseño de los rompeolas y en función de la escala de pesos, quedando de la siguiente manera, tabla 9:

Tabla 9. Rango de pesos de roca utilizados en el estudio.

Estructura	Peso de las rocas	
	Prototipo (ton)	Modelo (gr)
Rompeolas de berma de 2.56 ton	1.28 - 3.84	20.00 - 60.00
Rompeolas de berma de 3.84 ton	2.56 - 5.12	40.00 - 80.00
Rompeolas Clásico de roca de 12	12.00	140.63 - 234.38
Rompeolas Clásico de dolos de 19	19.00	296.88

Las rocas empleadas fueron pesadas una por una, con báscula electrónica, respetando los rangos antes establecidos; las rocas que se encontraron en estos rangos fueron separadas, para ser pintadas posteriormente en cuatro colores: azul, blanco, rojo y verde, esto fue para identificarlas en el caso que se presentaran movimientos en la estructura durante los ensayos, figuras 25, 26, 27 y 28.



Figura 25. Selección de las rocas por peso con ayuda de una bascula.



Figura 26. Pesaje de rocas manejadas en el modelo de rompeolas clásico de roca de 12 ton promedio.



Figura 27. Preparación del material pétreo, agrupación del material empleado por color.



Figura 28. Preparación del material pétreo, aplicación de pintura.

Así mismo, se dispuso de dolos elaborados con resina y un alma de acero para dar un peso promedio de 296.88 gramos, equivalentes a 19 toneladas en prototipo; de igual manera se pintaron con los mismos cuatro colores para visualizar si presentaban movimiento en el talud de la estructura durante los ensayos, figura 29.

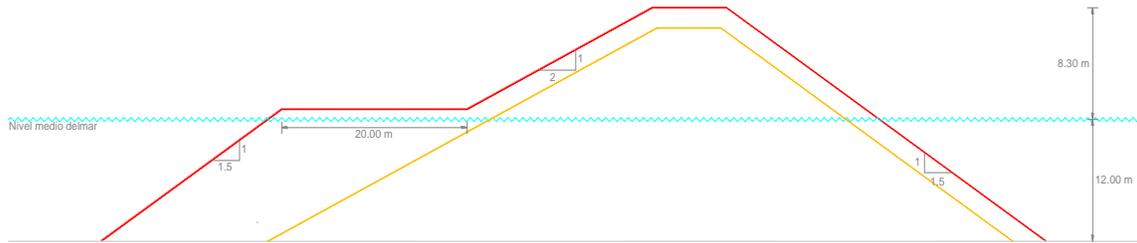


Figura 29. Dolos utilizados en el modelo de un rompeolas de tres capas con coraza de elementos prefabricados, con un peso de 19 ton en prototipo.

Ya habilitado el canal, se continuó con la elaboración de los escantillones, se trazaron en las ventanas del canal con crayones las líneas correspondientes a la sección geométrica de la estructura a ensayar, como están representadas en las figuras 30 y 31.

### Rompeolas de Berma

Coraza de roca de 1.28 a 3.84 ton



### Rompeolas de Berma

Coraza de roca de 2.56 a 5.12 ton

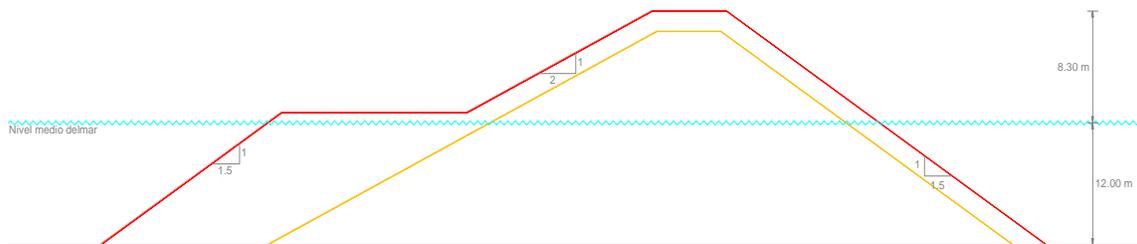
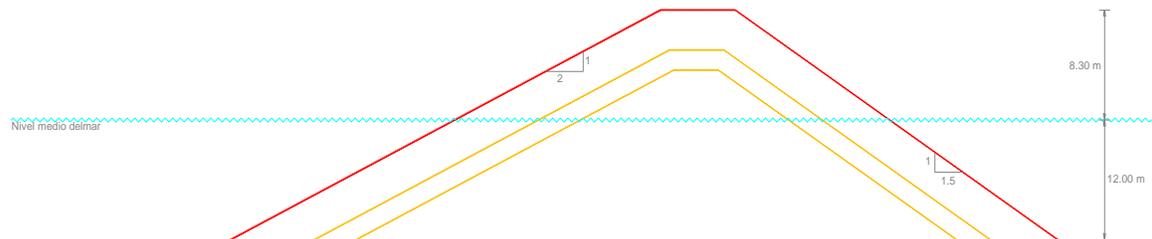


Figura 30. Configuración de las secciones de rompeolas de berma ensayados en el modelo.

### Rompeolas de tres capas

Coraza de roca de 12.00 ton



### Rompeolas de tres capas

Coraza de dolos de 19.00 ton

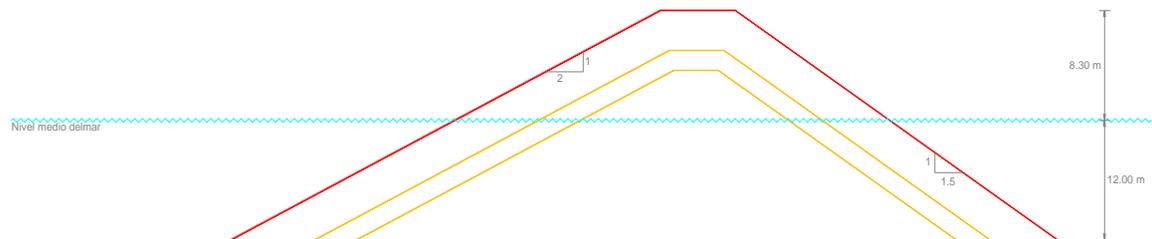


Figura 31. Configuración de las secciones de rompeolas de tres capas ensayados en el modelo.



Las actividades que se realizaron en la construcción de las secciones de los rompeolas, son las siguientes:

1. Se colocó material de núcleo suficiente para llegar a las guías marcadas en la ventana del canal. Una vez en alcanzado el nivel se acomodó el material con una regla de madera que hacia coincidir las marcas de una ventana a otra, evitando la compactación del material.
2. Posteriormente se colocó roca de coraza para los rompeolas de berma, utilizando la regla de madera, evitando la compactación del material.
3. Para el rompeolas clásico o de tres capas, se colocaron las rocas de la capa secundaria, hasta llegar al nivel indicado en las ventanas del canal angosto. Para cerrar el rompeolas clásico, se colocó roca de coraza con un peso promedio de 12 ton en prototipo, equivalente a 187,5 gr en modelo.
4. Por último, para uno de los rompeolas clásicos se colocó la capa de coraza de dolos de forma aleatoria.

### **III. 5 Calibración**

Para poder asegurar que la calidad de los datos obtenidos mediante los ensayos fuera adecuada, se necesitó realizar la calibración de la instrumentación empleada. Como los sensores, ya que deben de cumplir ciertos lineamientos como: número de sensores a utilizar, identificación de los canales por los cuales se obtuvieron los datos, etcétera.

#### **III. 5. 1 Calibración de los sensores de oleaje**

Para poder medir la reflexión del oleaje y basados en el método de Mansard y Funke (1980), se utilizaron tres sensores, asignándoles un número de canal, con un nombre para su fácil identificación de acuerdo a su posición en el canal. Dichos sensores se identificaron de la siguiente manera, tabla 10:

Tabla 10. Nombre y descripción de los canales por sensor.

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

### III. 5. 1. 1 Procedimiento de calibración de los sensores

En el ológrafo se seleccionaron 5 canales, tres fueron usados por los sensores y dos los últimos son utilizados por el software para poder enviar los resultados, estos canales fueron 0, 1, 2, 8 y 9; como se muestra en la figura 32.

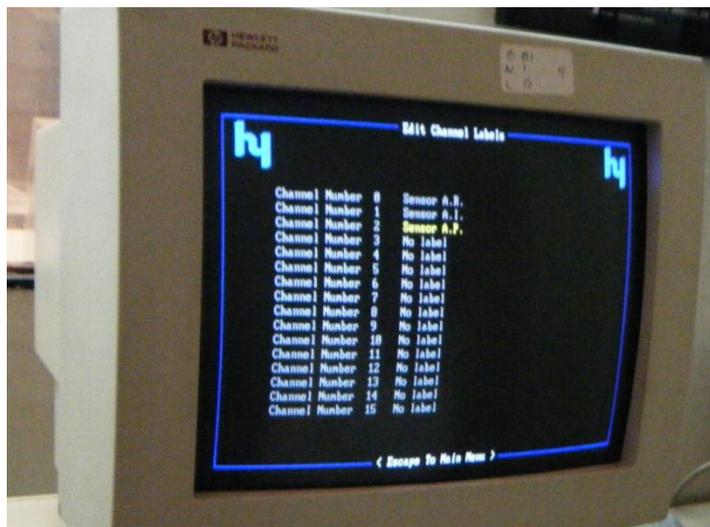


Figura 32. Selección de canales.

Después de haber declarado los canales a utilizar, se procedió al escaneo de los canales por el equipo de cómputo, donde se selecciono un escaneo por múltiples lecturas.

Una vez identificados, etiquetados y escaneados los sensores se realizó el procedimiento de calibración de la siguiente forma:

1. Se crea un archivo de calibración en el programa **CAL** dentro del paquete **HR Waves**. El cual se utilizará en la medición del oleaje a reproducir por el generador.
2. Los sensores tienen orificios a lo largo de su varilla de soporte; se acomodaron los tres sensores con diez orificios por debajo de la base.
3. Se escanean los canales.
4. Se bajan los sensores dos orificios que tienen un espaciamiento de 4 cm lo cual corresponde a 1.60 m en escala de líneas de 1:40 en el prototipo. Aquí se midió la cresta de la ola (con valor positivo). Se ingresa el valor en el archivo de calibración.
5. Se regresan los sensores a su punto inicial donde se fija en el programa como 0. Este será el nivel medio.
6. Se suben los sensores 4 cm, aquí corresponde a -1.60 m, ya que se está midiendo el valle de la ola (con valor negativo).
7. Se regresan los sensores por última vez a su posición inicial.
8. Se obtienen las rectas de calibración de cada sensor con sus correspondientes coeficientes de correlación, donde como resultado los valores de los coeficientes de correlación quedaron muy cercanos a 1, tabla 11.

Tabla 11. Coeficiente de correlación por sensor.

Canal	Nombre	Coeficiente de correlación
Canal 0	Sensor A.R.	0.999140
Canal 1	Sensor A.I.	0.999011
Canal 2	Sensor A.P.	0.995670

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

Cabe mencionar que el equipo no realiza análisis de datos en tiempo real, es decir no realiza mediciones y procesa datos al mismo tiempo, por ello primero se realiza la recolección de datos y luego se procede al procesamiento de los mismos (Beresford, 1994).

### **III.5.2 Espaciamiento de los sensores de oleaje para la medición de la reflexión del oleaje**

Para poder determinar la distancia entre sensores por el método de Mansard y Funke (1980), se requiere un pequeño programa de cálculo, donde la separación se da en base al periodo de la ola. Este programa fue realizado por (Beresford, 1994) Ver Anexo 1.

El cálculo del espaciamiento entre sensores, requiere de la frecuencia, que es la inversa del periodo ( $F = \frac{1}{T}$ ); del intervalo de muestreo ( $I = \frac{T}{8}$ ); también se precisaron que fueran 2048 datos por recolectar en 32 bandas de frecuencia, para que se definiera un espectro completo de energía que requiere el método de Mansard y Funke, se eligió que se evaluara por medio del espectro de Pierson-Moskowitz.

En 1964 Pierson Moskowitz, proponen una forma de espectro de energía para oleaje totalmente desarrollado (O. T. D.), basados en el análisis dimensional y en medidas directas de oleaje. El espectro de Pierson-Moskowitz es utilizado para generar oleaje de potencia semejante al real, con una única dirección de oleaje, por lo que las olas tienen frentes de longitud igual a la anchura del equipo de generación. Es el espectro más utilizado hoy en día en la mayoría de los laboratorios mundiales.

En cualquier caso, el espectro de Pierson-Moskowitz, reproduce oleaje de características similares a las que se presentan en las costas de México.

Los resultados arrojados por el programa se pueden observar en el Anexo 2, para cada ensayo. Se presentan los datos obtenidos por el programa de manera sintética en la tabla 12, en la cual se muestran los datos de espaciamiento para cada sensor y las frecuencias.

Tabla 12. Formato de ensayos.

Señal del Oleaje	Periodo (M) (seg)	Periodo (P) (seg)	Altura (M) (cm)	Altura (P) (m)	Intervalo de Muestreo (M) (seg)	Intervalo de Muestreo (P) (seg)	Separación de sensores (M)			Periodos validos para los sensores		
							X <sub>1-3</sub> (cm)	X <sub>1-2</sub> (cm)	X <sub>2-3</sub> (cm)	X <sub>1-3</sub> (cm)	X <sub>1-2</sub> (cm)	X <sub>2-3</sub> (cm)
PMOSK8	1.00	6.32	3.98	1.59	0.1249	0.7900	40.0	15.6	24.4	4 - 9	8 - 15	6 - 12
PMOSK9	1.10	6.95	4.80	1.92	0.1373	0.8688	44.6	18.8	25.8	4 - 9	8 - 15	6 - 13
PMOSK10	1.20	7.59	5.73	2.28	0.1500	0.9488	49.3	22.5	26.9	4 - 10	7 - 15	7 - 14
PMOSK11	1.30	8.22	6.70	2.68	0.1624	1.0275	53.9	26.3	27.5	4 - 10	7 - 15	7 - 15
PMOSK1	1.40	8.85	7.78	3.11	0.1749	1.1063	58.4	30.5	27.9	4 - 10	7 - 15	7 - 16
PMOSK2	1.50	9.49	8.93	3.60	0.1875	1.1863	63.0	35.1	27.9	4 - 11	7 - 15	8 - 17
PMOSK3	1.60	10.12	10.13	4.05	0.2000	1.2650	67.5	39.8	27.7	4 - 11	6 - 15	9 - 18
PMOSK4	1.70	10.75	11.48	4.59	0.2125	1.3438	72.0	44.7	27.3	4 - 11	6 - 15	9 - 20
PMOSK5	1.80	11.38	12.83	5.13	0.2246	1.4225	76.4	49.7	26.7	4 - 11	6 - 15	10 - 21
PMOSK6	1.90	12.02	14.40	5.76	0.2381	1.5025	80.9	55.0	25.9	4 - 12	6 - 15	11 - 23
PMOSK7	2.00	12.65	15.90	6.36	0.2502	1.5813	85.3	60.2	25.1	4 - 12	6 - 15	12 - 24

### III. 6 Ensayos

Para poder obtener los datos de los ensayos se necesitó la reproducción de oleaje irregular por medio del espectro de Pierson-Moscowitz, realizándose un total de 44 ensayos, para las 4 estructuras, es decir, 11 ensayos por cada una de ellas.

Para poder realizarlos se requirieron de alturas, periodos, intervalo de muestreo, así como la separación de los sensores para cada ensayo y las frecuencias para los que es válida la separación entre ellos. Un factor importante fue el periodo a reproducir quedando acotado entre un rango de 1.00 a 2.00 segundos con incrementos de una decima; estos parámetros fueron calculados para el modelo y para el prototipo; como se presenta en la tabla 12.

### III. 6. 1. Condiciones de los ensayos

En todos los ensayos se utilizó el espectro de Pierson-Moskowitz.

Para cada ensayo se reprodujo oleaje en tiempo suficiente y requerido por el equipo para que realice la medición, teniendo en cuenta que es variable para cada ensayo.

En cada uno de los ensayos se dispuso de tres sensores; en la parte media del canal, entre la paleta y la estructura; a una profundidad en prototipo de 19.36 m, donde los sensores a través del programa del equipo de cómputo calcularon con base al Método de Mansard y Funke los coeficientes de reflexión del oleaje, figura 33.



Figura 33. Arreglo de la estructura y los sensores en el canal de oleaje.



Figura 34. Sensores de oleaje.

### III. 6. 1.1 Procedimientos para los ensayos

Ensayos para obtener el coeficiente de reflexión del oleaje

Con el objeto de conocer el grado de reflexión de los rompeolas, se procedió de la siguiente manera:

1. Se colocaron tres sensores de oleaje entre el generador de oleaje y el rompeolas, separados entre sí a una distancia mayor de una longitud de ola, función del periodo del oleaje correspondiente para cada ensayo, figuras 34 y 35.



Figura 35. Disposición de sensores de oleaje en el canal angosto.

2. Se genera oleaje y se mide la energía de la ola incidente y la reflejada en la estructura para cada uno de los tres sensores de oleaje, figura 36.

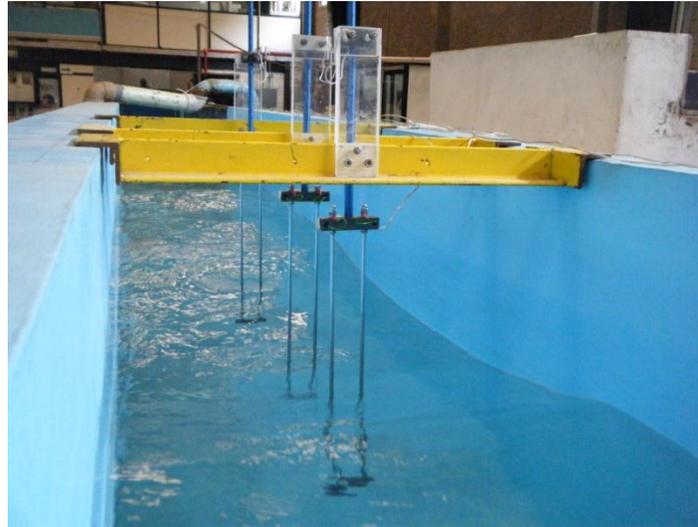


Figura 36. Disposición de sensores de oleaje en el canal angosto.

3. Se calcula el coeficiente de reflexión promediando las energías del oleaje incidente y reflejado.
4. El proceso se repite para las distintas configuraciones de rompeolas.

### III. 6. 1. 2 Instrumentación

Para medir el oleaje incidiendo sobre la estructura (rompeolas), se colocaron dos sensores de oleaje de tipo resistivo, uno al pie del rompeolas y el otro sensor cerca de la paleta del generador; las señales analógicas transmitidas por los sensores de oleaje, se amplificaron a través de un ológrafo, para luego enviarse a un convertidor de señales analógico/digital (A/D), con el que cuenta el equipo de cómputo; ya digitalizadas se analizaron con un programa de cómputo y se envían a una impresora.

### III. 6. 1. 3 Recolección de datos

Para poder hacer el análisis de la reflexión del oleaje por las estructuras se procede a recopilar todos los datos necesarios que fueron registrados por el equipo de cómputo para poder realizar el cálculo del coeficiente de reflexión del oleaje.

El equipo necesita un total de 2048 datos para poder tener así definido un espectro completo que fue reproducido para cada señal de oleaje.

El intervalo de muestreo se suaviza pidiendo datos a los sensores cada ciertas fracciones de segundo (0.05), llamando a esto el *intervalo de muestreo* o *intervalo de escaneo*. En la figura 37, se muestra como el equipo recolectaba los datos.



Figura 37. Recolección en tiempo real de los datos por el equipo de cómputo.

Una vez registrada la información, el equipo procesó los datos dando los resultados de los coeficientes de reflexión para cada una de las estructuras ensayadas, enviando los datos procesados a la impresora.

### III. 6. 2 Serie 1. Rompeolas de berma con roca de 2.56 toneladas.

En la serie 1, se realizaron 11 ensayos para un rompeolas de berma con coraza de roca de 2.56 toneladas, en los cuales se obtuvieron las alturas de ola incidente ( $H_i$ ) y las alturas de ola reflejadas ( $H_r$ ), para las cuales se calculó el coeficiente de reflexión utilizando la ecuación 3, tabla 13 y figura 38.

Tabla 13. Coeficientes de reflexión calculados para la Serie 1.

Rompeolas Berma con Roca 2.56 ton					
Serie 1					
Ensayo	Hs	Tp	Hi	Hr	Kr
	(m)	(seg)			
1	1.39	0.819	1.4210	0.3331	0.2344
2	1.804	0.9165	1.7560	0.3931	0.2239
3	2.036	0.9949	2.0340	0.5098	0.2506
4	2.394	1.054	2.2530	0.5155	0.2288
5	2.946	1.125	2.8860	0.6716	0.2327
6	3.548	1.251	3.4160	0.8831	0.2585
7	3.814	1.276	3.6850	0.8906	0.2417
8	4.172	1.376	4.4160	1.2930	0.2928
9	4.804	1.465	4.9420	1.4680	0.2970
10	5.54	1.557	5.5870	1.6100	0.2882
11	6.025	1.621	5.8630	1.5170	0.2587

Para esta primera serie de ensayos se pudo observar en los ensayos, una incidencia del oleaje muy moderada; en la cual las olas pequeñas no generaron una reflexión alta del oleaje, pasado algunos minutos se mostraba unas olas más grandes que si generaban mayor reflexión.



Figura 38. Rompeolas Berma Roca 2.56 ton.

En esta serie como se puede observar en la tabla 13, los valores del coeficiente de reflexión del oleaje varían entre 0.22 a 0.29.

### III. 6. 3 Serie 2. Rompeolas de berma con roca de 3.84 toneladas.

Esta estructura presenta una configuración muy similar a la primera, solo que las rocas de la coraza tienen mayor peso, para así tener una porosidad mayor por el acomodo de los elementos en los taludes del rompeolas. De la misma manera se realizaron 11 ensayos para un rompeolas de berma con coraza de roca de 3.84 toneladas, se obtuvieron las alturas de ola incidente y reflejada para esta serie, teniendo los siguientes resultados, tabla 14 y figura 39.

Tabla 14. Coeficientes de reflexión calculados para la Serie 2.

Rompeolas Berma con Roca 3.84 ton					
Serie 2					
Ensayo	Hs (m)	Tp (seg)	Hi	Hr	Kr
1	1.39	0.819	1.3820	0.3662	0.2650
2	1.804	0.9165	1.6750	0.4204	0.2510
3	2.036	0.9949	1.9460	0.4999	0.2569
4	2.394	1.054	2.2120	0.5644	0.2552
5	2.946	1.125	2.8040	0.7239	0.2582
6	3.548	1.251	3.3620	0.9421	0.2802
7	3.814	1.276	3.7100	0.9859	0.2657
8	4.172	1.376	4.3240	1.2230	0.2828
9	4.804	1.465	4.9430	1.3820	0.2796
10	5.54	1.557	5.5360	1.4040	0.2536
11	6.025	1.621	5.8260	1.0790	0.1852



Figura 39. Rompeolas Berma Roca 3.84 ton.

En las series de los rompeolas de berma se observó una disminución en los coeficientes de reflexión, ya que los rompeolas de berma (Van der Meer y otros autores los han estudiado), trabajan por estabilidad dinámica modificando su perfil y con ello reducen la reflexión del oleaje en su cara expuesta a la incidencia del oleaje.

En la figura 40 se puede observar la modificación del perfil al termino de los ensayos y en la tabla 14 se apreciación dicha disminución.



Figura 40. Rompeolas Berma Roca 3.84 ton.

### III. 6. 3 Serie 3. Rompeolas clásico de tres capas con coraza de roca de 12 toneladas.

Para poder contrastar los resultados de las secciones de berma, se consideró la estructura clásica del rompeolas de tres capas con coraza de enrocamiento, para esta disposición se dispuso de rocas de peso entre 140.63 y 234.38 gramos en modelo equivalentes en prototipo a 12 toneladas; como en las dos secciones anteriores, 11 ensayos se realizaron, se calcularon los coeficientes mediante la ecuación 3 para el cálculo de la reflexión del oleaje a partir de datos de oleaje incidente y oleaje reflejado en la estructura, en donde se puede apreciar tabla 15, que se presentaron en esta serie el valor más pequeño y el más grande de los coeficientes de reflexión en comparación de las otras dos series.

Tabla 15. Coeficientes de reflexión calculados para la Serie 3.

Rompeolas Clásico (Tres Capas) con Roca 12 ton					
Serie 3					
Ensayo	Hs	Tp	Hi	Hr	Kr
	(m)	(seg)			
1	1.39	0.819	1.3870	0.2645	0.1907
2	1.804	0.9165	1.6780	0.3104	0.1850
3	2.036	0.9949	1.9630	0.3987	0.2031
4	2.394	1.054	2.2410	0.4345	0.1939
5	2.946	1.125	2.7840	0.5560	0.1997
6	3.548	1.251	3.3680	0.7318	0.2173
7	3.814	1.276	3.6750	0.8825	0.2401
8	4.172	1.376	4.2930	1.1860	0.2763
9	4.804	1.465	4.8590	1.4100	0.2902
10	5.54	1.557	5.5280	1.6850	0.3048
11	6.025	1.621	5.9200	1.9050	0.3218

En esta serie se observó en el primer ensayo un coeficiente considerablemente bajo ya que en la mayoría de los ensayos de las estructuras pasadas, los coeficientes oscilaban arriba de 0.20. Para el segundo ensayo se presento un valor más pequeño de 0.1850 el oleaje que incidía sobre la estructura eran olas pequeñas, menores de dos metros las cuales no llegaban a presentar reflexión significativa.

Sin embargo, en esta estructura en particular al aumentar el tamaño de las olas entre dos y tres metros de altura aumentaba el porcentaje de reflexión del oleaje. Al continuar elevando la altura de ola; la respuesta del rompeolas era favorable aunque se tuvieron valores del coeficiente de reflexión del oleaje alrededor de 0.30, figura 41.



Figura 41. Rompeolas Clásico de Tres Capas Roca 12 ton.

#### III. 6. 4 Serie 4. Rompeolas clásico de tres capas con coraza de dolos de 19 toneladas.

Esta última estructura presentó una configuración del rompeolas clásico de tres capas, con la variante en sus elementos de coraza: presentando elementos artificiales de concreto denominados dolos. Sobre esta estructura se realizaron 11 ensayos, con elementos de coraza de dolos de 19 toneladas en prototipo. En los ensayos se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Coeficientes de reflexión calculados para la Serie 4.

Rompeolas Clásico (Tres Capas) con Dolos 19 ton					
Serie 4					
Ensayo	Hs	Tp	Hi	Hr	Kr
	(m)	(seg)			
1	1.39	0.819	1.3730	0.2864	0.2086
2	1.804	0.9165	1.6770	0.3347	0.1996
3	2.036	0.9949	1.9550	0.4313	0.2206
4	2.394	1.054	2.2510	0.4687	0.2082
5	2.946	1.125	2.8030	0.5965	0.2128
6	3.548	1.251	3.3930	0.7387	0.2177
7	3.814	1.276	3.7450	0.8699	0.2323
8	4.172	1.376	4.3390	1.0930	0.2519
9	4.804	1.465	4.8950	1.2990	0.2654
10	5.54	1.557	5.5830	1.5590	0.2792
11	6.025	1.621	5.9780	1.7830	0.2983

La sección de rompeolas probada presentó una eficiencia importante en la reducción de la reflexión, logrando tener valores menores a los que se presentaron en el rompeolas de tres capas de coraza de roca ensayado en la serie anterior de este estudio.

Esta estructura amortiguo de manera eficiente las olas mayores a 2 metros en prototipo, al tener una mayor porosidad entre los elementos, figura 42.



Figura 42. Rompeolas Clásico de Tres Capas Dolos 19 ton.



## Capítulo IV. Análisis de resultados.

En un análisis preliminar se consideraron los siguientes autores utilizando sus formulaciones, ya que los parámetros que manejan son muy similares a los empleados en los ensayos realizados:

1. Losada y Giménez-Curto (1981)
  - a. Sollitt y Cross (1972)
2. Seelig y Ahrens (1981)
3. Van der Meer (2006)

Los parámetros utilizados son:

1. Altura de ola significativa ( $H_s$ ).
2. Periodo ( $T_p$ ).
3. Angulo del talud lado mar ( $\alpha$ )
4. Relación de esbeltez para oleaje irregular ( $s$ ).

$$s = \frac{2 \cdot \pi \cdot H_s}{g \cdot T_p} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 27}$$

5. Parámetro de similitud de rompiente ( $\xi$ ).

$$\xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{s}} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 28}$$

Se hizo uso de las formulaciones encontradas en los estudios de reflexión del oleaje en estructuras de protección, comparando con las obtenidas en el laboratorio, presentando los siguientes resultados para cada serie en las tablas 17, 18, 19 y 20. En las cuales por cada serie se registraron las alturas de ola y periodos correspondientes a cada ensayo.

De los resultados se evaluó la relación de esbeltez para oleaje irregular con la ecuación 26, así mismo se calculó el parámetro de similitud de rompiente (ecuación 27), que es el parámetro principal, el cual utilizan los autores con sus respectivos coeficientes, tabla 16; para calcular el coeficiente de reflexión.

Tabla 17. Coeficientes utilizados de acuerdo a la formulación.

<i>Coeficientes</i>			
Seelig & Ahrens 1981			
<i>A</i>	0.75	<i>B</i>	15
Van der Meer			
<i>a</i>	0.12	<i>b</i>	0.87
Losada et. al. 1976			
<i>A</i>	1.35	<i>B</i>	-0.07
Sollitt y Cross 1972			
<i>A</i>	0.50	<i>B</i>	-0.12

Aplicando las formulaciones: para Losada et. al. (ecuación 11), Sollitt y Cross (ecuación 11), Seelig y Ahrens (ecuación 12) y Van der Meer (ecuación 13); a las cuales se aplicaron los coeficientes de la tabla 17. Tenemos a continuación las tablas 17 a la 20 correspondientes a cada serie de ensayos; se puede apreciar las alturas que se presentaron con su respectivo período; como el oleaje fue irregular, la relación de esbeltez se calculó para las diferentes condiciones de oleaje y también el parámetro de similitud de rompiente. Donde se introdujeron los taludes lado mar 2:1, para los rompeolas de tres capas o clásico, y 1.5:1 para los rompeolas de berma; una vez desarrollados todos estos cálculos se obtuvieron los valores de los coeficientes de reflexión para cada autor, realizando así una comparación entre los valores del coeficiente de reflexión medido y el determinado con las distintas formulaciones.

Tabla 18. Valores de Kr (Serie 1).

Valores de Kr (Serie 1)									
Rompeolas Berma con Roca 2.56 ton									
Ensayo	Hs (m)	Tp (seg)	s	$\xi$	Kr				
					Serie 1	Ahrens	Losada y Giménez-Curto		Van der Meer
					WR		Losada et al.	Sollitt y Cross	
1	1.3900	5.1761	0.0332	3.6572	0.2345	0.3535	0.3089	0.1843	0.3547
2	1.8040	5.7923	0.0344	3.5924	0.2239	0.3469	0.3041	0.1817	0.3497
3	2.0360	6.2878	0.0330	3.6708	0.2506	0.3549	0.3099	0.1849	0.3557
4	2.3940	6.6613	0.0346	3.5863	0.2289	0.3462	0.3037	0.1815	0.3492
5	2.9460	7.1100	0.0373	3.4507	0.2328	0.3319	0.2935	0.1760	0.3386
6	3.5480	7.9063	0.0364	3.4965	0.2585	0.3368	0.2970	0.1779	0.3422
7	3.8140	8.0643	0.0376	3.4398	0.2417	0.3307	0.2927	0.1756	0.3377
8	4.1720	8.6963	0.0353	3.5466	0.2928	0.3421	0.3007	0.1799	0.3461
9	4.8040	9.2588	0.0359	3.5189	0.2971	0.3392	0.2986	0.1788	0.3439
10	5.5400	9.8402	0.0366	3.4826	0.2882	0.3353	0.2959	0.1773	0.3411
11	6.0250	10.2447	0.0368	3.4768	0.2587	0.3347	0.2955	0.1771	0.3406

En la tabla 18 se observa que se encuentran en un rango muy cerrado del parámetro de similitud de rompimiento de 2.58 a 2.75. Para los valores calculados de la reflexión del oleaje por el equipo del generador de 0.22 a 0.29, para Ahrens entre 0.22 y 0.25; para Losada y otros de 0.22 a 0.23; a su vez para Sollitt y Cross los valores varían entre 0.13 y 0.14, y finalmente para Van der Meer, de 0.26 a 0.28.

Tabla 19. Valores de Kr (Serie 2).

Valores de Kr (Serie 2)									
Rompeolas Berma con Roca 3.84 ton									
Ensayo	Hs (m)	Tp (seg)	s	$\xi$	Kr				
					Serie 2	Ahrens	Losada y Giménez-Curto		Van der Meer
					WR		Losada et al.	Sollitt y Cross	
1	1.3300	5.1508	0.0321	3.7205	0.2649	0.3599	0.3136	0.1868	0.3595
2	1.7570	5.7133	0.0345	3.5905	0.2511	0.3467	0.3040	0.1817	0.3495
3	2.0930	6.3832	0.0329	3.6754	0.2569	0.3554	0.3103	0.1850	0.3561
4	2.3710	6.7182	0.0336	3.6344	0.2551	0.3512	0.3072	0.1834	0.3529
5	2.9580	7.1669	0.0369	3.4712	0.2582	0.3341	0.2951	0.1768	0.3402
6	3.4620	7.8242	0.0362	3.5029	0.2802	0.3375	0.2974	0.1781	0.3427
7	3.8120	8.2729	0.0357	3.5297	0.2657	0.3403	0.2994	0.1792	0.3448
8	4.5240	8.8417	0.0371	3.4628	0.2828	0.3332	0.2944	0.1765	0.3395
9	4.8300	9.2841	0.0359	3.5190	0.2796	0.3392	0.2986	0.1788	0.3439
10	5.5920	10.0425	0.0355	3.5376	0.2535	0.3411	0.3000	0.1795	0.3454
11	6.1310	10.0867	0.0386	3.3934	0.1852	0.3257	0.2892	0.1737	0.3341

En la tabla 19 se muestran los datos obtenidos en la serie 2, en esta serie se presenta una divergencia mayor en los valores del coeficiente de reflexión del oleaje de 0.18 a 0.28, en estos ensayos podemos observar, comparando con la serie anterior, que se presenta una reflexión menor, en relación de los rompeolas de berma.

Tabla 20. Valores de Kr (Serie 3).

Valores de Kr (Serie 3)									
Rompeolas Clásico (Tres Capas) con Roca 12 ton									
Ensayo	Hs (m)	Tp (seg)	s	$\xi$	Kr				
					Serie 3	Ahrens	Losada y Giménez-Curto		Van der Meer
					WR		Losada et al.	Sollitt y Cross	
1	1.4900	5.1382	0.0361	2.6298	0.1907	0.2367	0.2301	0.1407	0.2713
2	1.8170	5.7442	0.0353	2.6624	0.1850	0.2407	0.2327	0.1422	0.2741
3	2.0290	6.0830	0.0351	2.6680	0.2031	0.2414	0.2331	0.1425	0.2746
4	2.3240	6.6929	0.0332	2.7429	0.1938	0.2505	0.2390	0.1458	0.2809
5	2.8870	7.2174	0.0355	2.6538	0.1997	0.2396	0.2320	0.1418	0.2734
6	3.4510	7.6788	0.0375	2.5825	0.2173	0.2308	0.2263	0.1386	0.2673
7	3.7070	8.2286	0.0351	2.6701	0.2401	0.2416	0.2333	0.1425	0.2748
8	4.3100	8.7785	0.0358	2.6418	0.2763	0.2381	0.2310	0.1413	0.2724
9	4.9450	9.6254	0.0342	2.7043	0.2902	0.2458	0.2360	0.1441	0.2777
10	5.4530	10.4659	0.0319	2.8001	0.3049	0.2575	0.2435	0.1483	0.2857
11	5.7980	10.3964	0.0344	2.6975	0.3217	0.2450	0.2354	0.1438	0.2771

En la tabla 20, se aprecia que los valores obtenidos por las formulaciones varían mínimamente; pero en los valores obtenidos en laboratorio se presentaron los valores más altos en comparación de las dos secciones anteriores, con un valor de 0.3217.

Tabla 21. Valores de Kr (Serie 4).

Valores de Kr (Serie 4)									
Rompeolas Clásico (Tres Capas) con Dolos 19 ton									
Ensayo	Hs (m)	Tp (seg)	s	$\xi$	Kr				
					Serie 4	Ahrens	Losada y Giménez-Curto		Van der Meer
					WR		Losada et al.	Sollitt y Cross	
1	1.4900	5.1634	0.0358	2.6428	0.2087	0.2383	0.2311	0.1413	0.2724
2	1.7940	5.7771	0.0344	2.6947	0.1996	0.2446	0.2352	0.1437	0.2769
3	2.0390	6.2429	0.0335	2.7314	0.2206	0.2491	0.2381	0.1453	0.2800
4	2.3500	6.6486	0.0340	2.7097	0.2082	0.2465	0.2364	0.1443	0.2781
5	2.8370	7.1669	0.0354	2.6584	0.2128	0.2402	0.2323	0.1420	0.2738
6	3.4890	7.6914	0.0378	2.5726	0.2137	0.2296	0.2255	0.1381	0.2664
7	3.6860	8.1022	0.0360	2.6366	0.2323	0.2375	0.2306	0.1410	0.2719
8	4.2500	8.7848	0.0353	2.6623	0.2519	0.2407	0.2326	0.1422	0.2741
9	4.8640	9.6127	0.0337	2.7231	0.2653	0.2481	0.2375	0.1449	0.2793
10	5.2890	10.1562	0.0328	2.7591	0.2793	0.2525	0.2403	0.1465	0.2823
11	5.7370	10.1310	0.0358	2.6425	0.2983	0.2382	0.2311	0.1413	0.2724

En la tabla 21 se puede observar el valor más pequeño de la reflexión del oleaje calculado con la fórmula de Losada, utilizando los coeficientes de Sollitt y Cross, de 0.1381, aunque en el modelo se presentó un valor para ese mismo ensayo de 0.2137.

#### IV. 1 Gráficas de resultados.

En el siguiente apartado, se representan en las figuras 43, 44, 45, 46 y 47, los resultados obtenidos en las cuatro series ensayadas. Se realizaron comparativas de los datos obtenidos en la modelación; así como de los datos obtenidos por medio de las formulaciones de Losada y Giménez-Curto y su aplicación con coeficientes de Sollitt y Cross; la fórmula de Seelig y Ahrens; y por último la elaborada por Van der Meer.

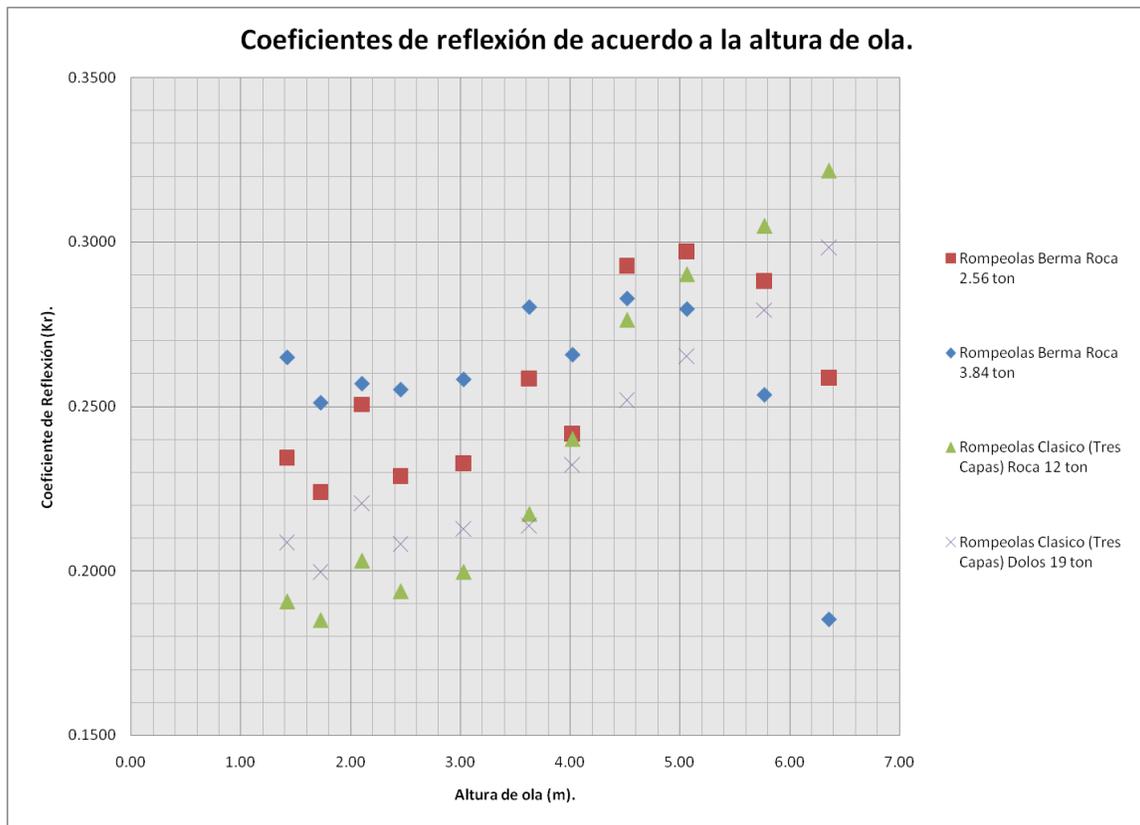


Figura 43. Valores de Kr vs Altura de ola.

El la figura 43, se muestran los valores del coeficiente de reflexión  $K_r$  vs las Alturas de ola, en la cual se observa que la mayor parte de los datos se encuentra en una franja de valores del coeficiente de reflexión de 0.16 a 0.37, para un rango de valores del parámetro de similitud de rompiente muy estrecha.

Además, se puede observar que para una altura de ola de 6.36 metros en prototipo, el rompeolas de berma de 3.84 ton de peso promedio en sus elementos de coraza, tiene un comportamiento bastante aceptable al ser la sección de menor reflexión.

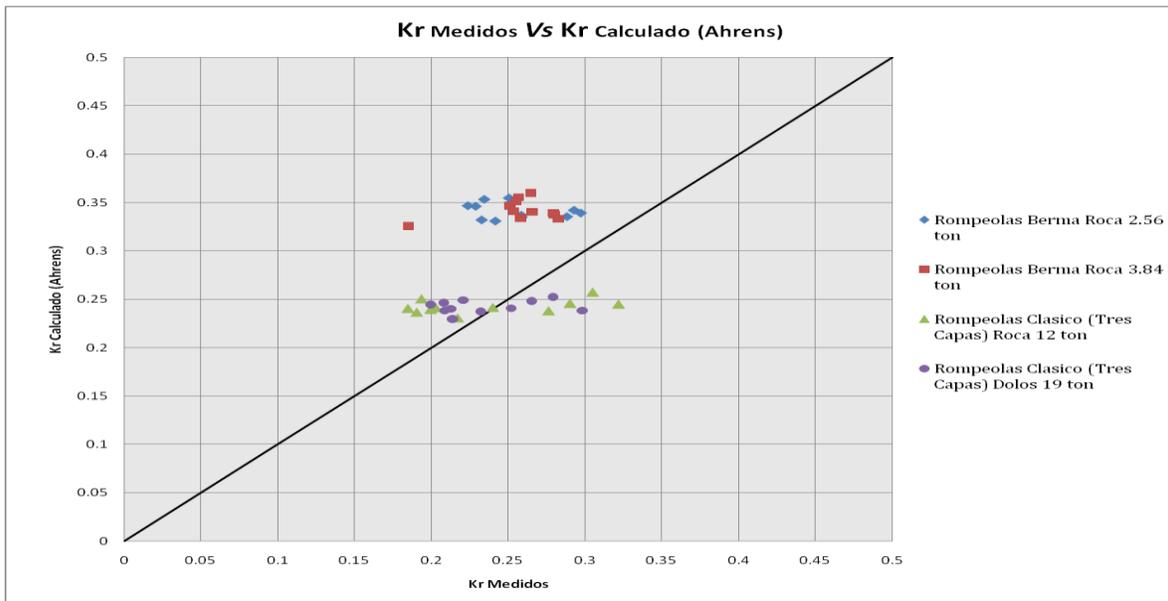


Figura 44. Gráfica de  $K_r$  Medidos vs  $K_r$  Calculados con la formula de Ahrens.

En la figura 44, se puede apreciar que los rompeolas clásicos de coraza de roca y dolos se adecuan mejor a los datos obtenidos a través de los cálculos con la fórmula de Ahrens y los obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio.



En la figura 46, se puede observar que la fórmula de Solitt y Cross subestima los datos obtenidos para las secciones de rompeolas de tres capas, aunque si es aplicable a rompeolas de berma con discreción.

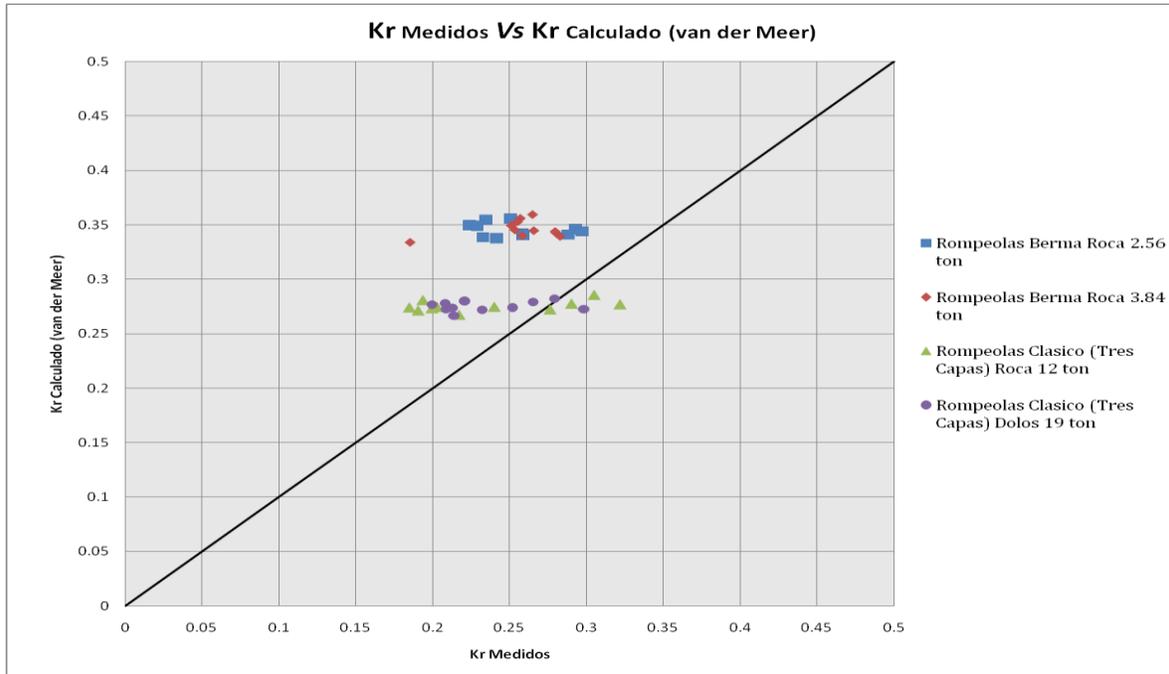


Figura 47. Gráfica de Kr Medidos vs Kr Calculados con la formula de Van der Meer.

En la figura 47 se observa que los valores obtenidos para las secciones de rompeolas de tres capas, siendo la formulación de Van del Meer de fácil aplicación para este tipo de rompeolas, presentando valores aceptables, para el fenómeno estudiado.

En las gráficas de Kr Medidos vs Kr Calculados con las formulas de Ahrens, Losada y Van der Meer, se aprecia una mejor relación entre los Coeficientes de reflexión obtenidos en los ensayos y los calculados con sus formulaciones figuras 45, 46 y 47, lo que permite descartar los valores derivados de la fórmula de Losada con los coeficientes de Solitt y Cross, figura 46. Ya que la relación entre los datos obtenidos a través de los ensayos y los datos calculados con dicha formulación, presentan una discrepancia mayor.

## Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.

### V.1 Conclusiones

A partir de los ensayos realizados se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. De las secciones estudiadas en el laboratorio, se encontró que la sección que presenta la menor reflexión del oleaje en estructuras permeables a talud con oleaje irregular, fue la de rompeolas clásico de tres capas con coraza de dolos.
2. Se presenta un comportamiento limitado del parámetro de similitud de rompiente ( $\xi$ ) de 2.57 a 3.72, con respecto al estado del arte.
3. Dado que los coeficientes de reflexión del oleaje obtenidos de los ensayos antes descritos, dependen intrínsecamente del parámetro de similitud de rompiente; los coeficientes de reflexión del oleaje se encuentran también limitados en un intervalo de valores de 0.16 y 0.37.
4. Podemos concluir, a través la figura 44 que la relación entre los coeficientes de reflexión medidos y los calculados con la fórmula de Ahrens, presentan una correlación moderada, y por lo tanto es medianamente recomendable la utilización de esta formulación para calcular el coeficiente de reflexión del oleaje para secciones de rompeolas de berma y de tres capas.
5. Podemos observar en la figura 47, que la relación entre los coeficientes de reflexión medidos y los calculados con la fórmula de Van der Meer, presentan una correlación más adecuada, y por lo tanto sería la fórmula más adecuada para el cálculo de los coeficientes de reflexión.



## V.2 Recomendaciones

Se establecen las siguientes recomendaciones:

1. Es importante continuar con los ensayos sobre el fenómeno de la reflexión del oleaje en rompeolas, ya que existen pocos documentos sobre la reflexión del oleaje; utilizando modelos físicos reducidos, así como, la implementación de nuevas estructuras.
2. Realizar pruebas con diferentes elementos de coraza de la estructura, sean de enrocamiento o elementos artificiales como: cubos, tetrápodos, acrópodos, coreloc, etc.; ello con el fin de extender la gama de pruebas.
3. Optimizar los tipos de estructuras ensayadas, buscando la disminución significativa del fenómeno en estudio; la reflexión del oleaje en rompeolas permeables a talud no revasables con oleaje irregular.
4. Ejecutar ensayos con incrementos en el rango estudiado del parámetro de similitud de rompiente ( $\xi$ ).



## Referencias bibliográficas

- (s.f.). Recuperado el 5 de Diciembre de 2009, de <http://www.mailxmail.com/curso-como-desarrollar-tesis-profesional/elaborar-protocolo-tesis>
- Berenguer, J. M. (1995). Estudios experimentales en el proyecto y la regeneracion de playas. *Ingenieria del Agua* , 2 (extraordinario), 143.
- Beresford, P. J. (1994). Operation, User Manual. En *WAVE GEN - Wave Generator Control Software Program*. H. R. Wallingford Ltd.
- Beresford, P. J. (1994). Wave Reflection and Transfer Functions, The Theory of Data Analysis Routines, User Manual. En H. Wallingford, H.R. *WAVE - Data Acquisition and Analysis Software Program*. H.R. Wallingford Ltd.
- Bustamante, et. al. (1976). *Ingenieria Maritima* (Segunda ed.). México: Ediciones Temas Maritimos, 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.
- Cruz. (2010). *Apuntes de Ingenieria de Costas*. México, D.F.
- Díaz. (2006). *Tesis Doctoral "Análisis de Resonancia Portuaria: Generación, Transitoriedad, No Linealidad y Acoplamiento Geométrico"*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
- Fontirroig. (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, & Moreno. (1988). *Ingenieria de Costas* (Segunda ed.). México: Limusa.
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in radom wave experiments. *15th Coastal Engineering Conference, Hawaii* , 828-836.
- Hernández, Fernández, & Baptista. (2003). *Metodología de la Investigación* (Tercera ed.). México: Mc Graw Hill.
- Hughes, S. A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. En *Advanced Series on Ocean Engieering* (Vol. 7). World Scientific.
- Mansard, E. P., & Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proccedings of the Seventeenth Coastal Engineering Conference: March 23 to 28, 1980, Sydney, Australia* , 154-172.



Marín. (2007). *Evaluación de la intreracción del periodo del oleaje en el diseño de rompeolas bajo el concepto de oleaje regular*. México.

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

Ocaña. (2001). *Modelacion fisica de rompeolas sumergidos con oleaje irregular*. México, D.F.: Instituto Politecnico Nacional.

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

Postma, G. M. (1989). Wave reflection from rock slopes under random wave attack. En *Master Thesis*. Delft University of Technology: Departament of Civil Engineering.

Rosales. (2005). *Transmision del oleaje irregular en rompeolas superficiales permeables a talud*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.

Ruiz. (2009). *Apuntes de Hidrodinamica Maritima*. México.

Ruiz. (2010). *Apuntes de Obras Portuarias*. México, D.F.

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

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

U. S. Army Coastal Engineering Reseach Center. (2008). *Coastal Engineering Manual - Part II*. Departament of the Army Corps of Engineers.

U. S. Army Coastal Engineering Research Center. (2002). *Coastal Engineering Manual* (Vol. Part II). Departament of the Army Corps of Engineers.

U.S. Army Coastal Engineering Research Center. (1975). *Shore Protection Manual* (Vol. I). Belvoir, Virginia: Department of the Army Corps of Engineers.

U.S. Army Coastal Engineering Research Center. (1975). *Shore Protection Manual* (Vol. II). Belvoir, Virginia: Department of the Army Corps of Engineers.

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

Van der Meer, J. W., & Zanuttigh, B. (2006). *Wave reflection from coastal structures*.

Van der Meer, J. W., & Zanuttigh, B. (2008-A). *Wave reflection from coastal structures in design conditions*.

Van der Meer, J. W., & Zanuttigh, B. (2007). *Wave reflection from composite slopes*.



Van der Meer, J. W., Zanuttigh, B., & et., a. (2008-B). *Analysis of wave reflection from structures*.

Vergara. (1995). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Mexico, D. F.: Alfaomega.



## Anexos

### Anexo 1. Programa de cálculo para la separación de sensores (Beresford, 1994).

Programa de cálculo de espaciamiento y bandas de frecuencia entre sensores para análisis de reflexión del oleaje, realizado por Paul Beresford en 1994.

```
1   CLS
2   REM *****
3   REM Probe spacings and frequency bands for reflection analysis
4   REM Paul Beresford - 1 August 1992
5   REM *****
6   PRINT n PROBE SPACINGS FOR REFLECTION ANALYSIS.
   PRINT "P J Beresford Sept 1994"
7   PRINT
8   PRINT "X1: Distance between probes 0,1 (m proto)"
9   PRINT "X2: Distance between probes 0.2 (m proto)"
10  PRINT "X3: Distance between probes 1.2 (m proto)"
12  PRINT
13  INPUT" WATER DEPTH (m proto) ";
14  INPUT" SAMPLING INTERVAL (s proto) ";
15  INPUT" NDATA, NSHOTH ";
16  DELTAF = NSMOTH / NDATA / DT
17  PRINT
18  PI = 3.14159
20  INPUT" FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or:- 2 (Mosk/Jonswap freqs)";Z
30  ON Z GaTO 35. 75
35  PRINT
40  INPUT" F (lower)   (Hz proto)"; FL
60  INPUT" F (upper)  (Hz proto)"; FU
70  GOTO 110
75  PRINT
80  INPUT" F (peak)   (Hz proto)"; FU
90  FL = .5 * FP
100 FU = 2 * FP
110 F = FL
120 GOSUB 1000
130 X2 = 2 * PI / WAVENO / 10
140 F=FU
150 GOSUB 1000
160 X1 =2 * PI / WAVENO / 2.5
170 X3 = X2 - X1
```



```

172 PRINT
173 PRINT "Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges"
174 PRINT
175 PRINT "  SPACING m(proto)  VALID FREQS HZ(proto)":PRINT
176 XX = 6.28 * H / 10 / X2: GOSUB 2000
177 YY = 6.28 * H / 2.5 / X2: GOSUB 2001
178 SPA = SQR (1.56 / 10 / X2 * XXX): SPB = SQR (1.56 / 2.5 / X2 * YYY)
179 BANDA=INT (SPA / DELTAF - .5) + 1: BANDB = INT (SPB / DELTAF - .5)
180 PRINT" For X2[0:2]="; X2; » m, valid freqs are n; SPA; HHz ->; SPB; " Hz"
181 PRINT" Valid frequency bands are: - "; BANDA, "AND", BANDB
182 XX = 6.28 * H / 10 / X1: GOSUB 2000
184 YY = 6.28 * H / 2.5 / X1: GOSUB 2001
186 SPA = SQR (1.56 / 10 / X1 * XXX): SPB= SQR (1.56 / 2.5 / X1 * YYY)
187 BANDA = INT (SPA / DELTAF - .5) + 1: BANDB = INT (SPB / DELTAF - .5)
188 PRINT
190 PRINT 11 For X1[0: 1] ="; X1; " m, valid freqs are "; SPA; "Hz ->; SPB; " Hz
191 PRINT 11 Valid frequency bands are: - "; BANDA. " AND", BANDB
192 XX = 6.28 * H / 10 / X3: GOSUB 2000
194 YY = 6.28 * H / 2.5 / X3: GOSUB 2001
196 SPA = SQR (1.56 / 10 / X3 * XXX): SPB = SQR (1.56 / 2.5 / X3 * YYY)
197 BANDA = INT (SPA / DELTAF - .5) + 1: BANDB = INT (SPB / DELTAF - .5)
198 PRINT
200 PRINT" For X3[1:2] ="; X3;" m, valid freqs are n; SPA; "Hz ->; SPB; " Hz
225 PRINT" Valid frequency bands are: - "; BANDA. " AND", SANDS
250 GOTO 1240
300 REM *****
500 REM Subroutine to calculate WAVENUMSER. 2PI/L
700 REM *****
1000 A = (2 * PI * E) - 2 / 9.80665
1010 KD = A * R
1020 IF KD < 1 TREN 1050
1030 K = A
1040 IF KD > 10 THEN 1220 EL SE 1080
1050 KD = SQR (KD)
1060 K= KD / H
1070 IF KD < .05 TREN 1220
1080 ZERR = .0001
1090 ICOUNT = 1
1095 X = KD: GOSUB 3000
1130 8L - SH * CH + KD
1140 TL = CH * (K * SH - A * CH)
1150 DK = TL / BL
1160 K = K - DK
1170 IF ABS (DK) < ZERR TREN 1220
1180 IF ICOUNT > 25 TREN 1220

```



```
1190 KD = K * H
1200 ICOUNT = ICOUNT + 1
1210 GOTO 1095
1220 WAVENO = K
1230 RETURN
1850 REM *****
1900 REM TANR FUNCTION
1950 REM *****
2000 XXX = (EXP (XX) - EXP (-XX)) / (EXP (XX) + EXP (-XX)): RETURN
2001 YYY = (EXP (YY) - EXP (-YY)) / (EXP (YY) + EXP (-YY)): RETURN
2950 REM *****
2960 REM SINH and COSH FUNCTIONS
2970 REM *****
3000 SH = (EXP(X) - EXP (-X)) / 2: CH = (EXP(X) + EXP(-X)) / 2: RETURN
1240 PRINT
1242 PRINT
1244 PRINT " *** END ***"
1250 REM END
1260 SYSTEM
```



## Anexo 2. Corridas del programa para cada ensayo.

Corridas del programa para el cálculo de la separación entre sensores y bandas para las cuales es válida por ensayo.

### **Corrida 1, Ensayo 1**

```
WATER DEPTH (m proto)      ? 19.36
SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 0.7899
NDATA, NSMOTH              ? 2048, 32
FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2
F (peak) (Hz proto)? 0.1582
Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges
                SPACING m (proto)          VALID FREQS Hz (proto)
For X2 [0:2] = 15.99747 m, valid freqs are 7.906634E-02 Hz -) .1970484 Hz
Valid frequency bands are: - 4 AND 9
For X1 [0:1] = 6.236316 m, valid freqs are .1549881 Hz -) .3163211 Hz
Valid frequency bands are: - 8 AND 15
For X3 [1:2] = 9.761159 m, valid freqs are .1163488 Hz -> .2528257 Hz
Valid frequency bands are: - 6 AND 12
*** END ***
Presione cualquier tecla y continúe
```

### **Corrida 2, Ensayo 2**

```
WATER DEPTH (m proto)      ? 19.36
SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 0.8684
NDATA, NSMOTH              ? 2048, 32
FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2
F (peak) (Hz proto)? 0.1439
Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges
                SPACING m (proto)          VALID FREQS Hz (proto)
For X2 [0:2] = 17.85731 m, valid freqs are 7.191849E-02 Hz -) .1970484 Hz
Valid frequency bands are: - 4 AND 9
For X1 [0:1] = 7.537327 m, valid freqs are .1382604 Hz -) .2877283 Hz
Valid frequency bands are: - 8 AND 15
For X3 [1:2] = 10.31998 m, valid freqs are .1117989 Hz -> .245877 Hz
Valid frequency bands are: - 6 AND 13
*** END ***
Presione cualquier tecla y continúe
```

### **Corrida 3, Ensayo 3**

```
WATER DEPTH (m proto)      ? 19.36
SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 0.9487
NDATA, NSMOTH              ? 2048, 32
FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2
```







Valid frequency bands are: - 6 AND 15  
 For X3 [1:2] = 10.9079 m, valid freqs are .1073433 Hz -> .2391462 Hz  
 Valid frequency bands are: - 9 AND 20  
 \*\*\* END \*\*\*

Presione cualquier tecla y continúe

**Corrida 9, Ensayo 9**

WATER DEPTH (m proto) ? 19.36  
 SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 1.4205  
 NDATA, NSMOTH ? 2048, 32  
 FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2  
 F (peak) (Hz proto)? 0.0879  
 Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges

	SPACING m (proto)	VALID FREQS Hz (proto)
For X2 [0:2] = 30.56285 m, valid freqs are 4.392901E-02 Hz -)	.1370783	Hz
Valid frequency bands are: - 4 AND 11		
For X1 [0:1] = 19.89907 m, valid freqs are 6.535415E-02 Hz -)	.1757529	Hz
Valid frequency bands are: - 6 AND 15		
For X3 [1:2] = 10.66378 m, valid freqs are .1091543 Hz -> .241874	Hz	
Valid frequency bands are: - 10 AND 21		

\*\*\* END \*\*\*

Presione cualquier tecla y continúe

**Corrida 10, Ensayo 10**

WATER DEPTH (m proto) ? 19.36  
 SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 1.5059  
 NDATA, NSMOTH ? 2048, 32  
 FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2  
 F (peak) (Hz proto)? 0.0832  
 Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges

	SPACING m (proto)	VALID FREQS Hz (proto)
For X2 [0:2] = 32.37619 m, valid freqs are 4.15800E-02 Hz -)	.1321083	Hz
Valid frequency bands are: - 4 AND 12		
For X1 [0:1] = 22.01162 m, valid freqs are 5.966347E-02 Hz -)	.166354	Hz
Valid frequency bands are: - 6 AND 15		
For X3 [1:2] = 10.36458 m, valid freqs are .1114494 Hz -> .2453466	Hz	
Valid frequency bands are: - 11 AND 23		

\*\*\* END \*\*\*

Presione cualquier tecla y continúe

**Corrida 11, Ensayo 11**

WATER DEPTH (m proto) ? 19.36  
 SAMPLING INTERVAL (s proto) ? 1.5824  
 NDATA, NSMOTH ? 2048, 32  
 FREQ RANGE? - Input: - 1 (user freqs) or: - 2 (Mosk/Jonswap freqs)? 2



F (peak) (Hz proto)? 0.0791

Results follow: - CHECK overlap between frequency ranges

	SPACING m (proto)	VALID FREQS Hz (proto)
For X2 [0:2] = 34.12991 m, valid freqs are	3.953093E-02 Hz -)	.127606 Hz
Valid frequency bands are:	- 4 AND 12	
For X1 [0:1] = 24.08314 m, valid freqs are	5.493616E-02 Hz -)	.1581549 Hz
Valid frequency bands are:	- 6 AND 15	
For X3 [1:2] = 10.04677 m, valid freqs are	.113983 Hz ->	.2492023 Hz
Valid frequency bands are:	- 12 AND 24	

\*\*\* END \*\*\*

Presione cualquier tecla y continue