



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA**

UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS (ZACATENCO)

SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**“EVALUACIÓN DE LA INTERACCIÓN
DEL PERIODO DEL OLEAJE EN EL
DISEÑO DE ROMPEOLAS BAJO EL
CONCEPTO DE OLEAJE REGULAR”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN HIDRÁULICA

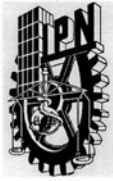
PRESENTA:

MARÍN CASTRO MARIANA ALEJANDRA

DIRECTOR DE TESIS:
M. en C. JAIME ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES

MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE 2007



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 18:00 horas del día 31 del mes de Octubre del 2007 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 de grado titulada:

"EVALUACIÓN DE LA INTERACCIÓN DEL PERIODO DEL OLEAJE EN EL DISEÑO DE ROMPEOLAS BAJO EL CONCEPTO DE OLEAJE REGULAR".

Presentada por el alumno:

MARÍN

CASTRO

MARIANA ALEJANDRA

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro:

B	0	4	1	3	4	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HIDRÁULICA.

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

LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

M. EN C. J. ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES

DR. JUAN MANUEL NAVARRO PINEDA

DR. MARIO ULLOA RAMIREZ

M. EN C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL

M. EN C. ARTURO BRUNO JUAREZ IRON

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ.



RECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 15 del mes de noviembre del año 2007, el (la) que suscribe Mariana Alejandra Marín Castro, alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Hidráulica con número de registro B041341, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores y cede los derechos del trabajo intitulado "Evaluación de la Interacción del Periodo del Oleaje en el Diseño de Rompeolas bajo el Concepto de Oleaje Regular", 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 marin_mariana8@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Mariana Alejandra Marín Castro

AGRADECIMIENTOS

Desde lo más profundo de mi corazón y mi espíritu deseo con todo cariño extender los siguientes agradecimientos a todas aquellas personas que antes, durante y actualmente han seguido mi historia de vida; siendo esta tesis la cristalización de muchos sueños compartidos.

Gracias...

Dios, por seguir caminando conmigo durante todo este tiempo, iluminando mi camino al llenarlo de bendiciones, y a su vez, al enseñarme que la vida solo se es AHORA, por mas que se quiera tener el control de todas las situaciones.

A mi madre y hermana, por aceptarme, apoyarme e impulsarme a siempre seguir adelante; agradezco la unión y la disposición que hemos tenido para seguir cultivado ese amor que nos ha hecho reflexionar y valorar los buenos y malos momentos que hemos pasado, pero sobre todo gracias por ser mis mejores amigas.

A mis abuelitos, por ser mis segundos padres en esta vida, las enseñanzas y regaños son parte de mi formación que llevare conmigo a donde quiera que vaya; principalmente por abrirme las puertas de su casa y su corazón al dejarme compartir parte de sus vidas.

A mis tías, tíos, primas y primos por estar al pendiente de lo que me sucedía al apoyarme, impulsándome y ayudándome en lo que necesitara, compartiendo mis triunfos y fracasos; gracias por confiar en mi.

David, por apoyarme resolviendo mis dudas en la escuela, algo importante que nos caracterizo estos 8 años es que fuimos, somos y seguiremos siendo un buen equipo de trabajo, por lo que te agradezco tu disposición para sacar adelante los proyectos, eres un excelente compañero, además de complemento en este rompecabezas llamado Mariana.

A cada una de las instituciones educativas que han formado parte de mi educación; con especial aprecio al Instituto Politécnico Nacional y a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco.

A todos y cada uno de mis profesores y profesoras, por ser guías y con esto transmitirme sus conocimientos dejando en mi, comprensión y entendimiento dentro y fuera de mi formación profesional, haciendo una mención especial a los profesores: M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores, M. en C. Lucio Fragozo Sandoval, Dr. Mario Ulloa Ramírez, M. en C. Manuel Meneses García, M. en C. Bruno Juárez León, Dr. Juan Manuel Navarro Pineda, Ing. Francisco de la O García, Ing. Hazael Huerta Romero, entre otros, pero que por no ser mencionados no quiera decir que no los tenga presente.



ÍNDICE

Glosario de términos

Índice de figuras

Índice de tablas

Nomenclatura

Resumen

Abstract

Introducción

Justificación

Objetivos

Hipótesis

Metodología

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Oleaje

1.1.1 Características del oleaje

1.1.2 Clasificación del oleaje

1.1.3 Métodos de predicción del oleaje

1.1.4 Teorías del oleaje

1.1.5 Fenómenos que modifican el oleaje

1.2 Obras de protección

1.2.1 Función de los rompeolas

1.2.2 Clasificación de las obras de protección

1.3 Rompeolas permeables a talud

1.3.1 Factores que intervienen sobre la estructura

1.3.2 Obras de protección en México

1.3.3 Daños que se han presentado en las obras de protección

Capítulo 2. Criterios de diseño

2.1 Antecedentes de las fórmulas de diseño

2.2 Fórmulas de diseño bajo el concepto de oleaje regular

2.3 Trabajos experimentales de Ramón Iribarren

2.3.1 Fórmula de diseño de rompeolas

2.3.2 Número de Iribarren



- 2.3.3 Función de estabilidad
- 2.4 Trabajos experimentales de Robert Y. Hudson
 - 2.4.1 Formula de diseño de rompeolas

Capitulo 3. Estudios experimentales

- 3.1 Tipos de modelos
 - 3.1.1 Modelo físico reducido
 - 3.1.2 Escalas del modelo
 - 3.1.3 Parámetros que intervienen en el modelo
- 3.2 Instalaciones
- 3.3 Equipo e instrumentación

Capitulo 4. Modelo

- 4.1 Construcción del modelo
 - 4.1.1 Selección de la escala del modelo
 - 4.1.2 Diseño del modelo
- 4.2 Calibración
 - 4.2.1 Programa de ensayos
- 4.3 Condiciones y Procedimiento de ensayos
 - 4.3.1 Condiciones de los ensayos
 - 4.3.2 Procedimiento de los ensayos
 - 4.3.3 Ensayos para medir el daño en los rompeolas contra oleaje incidente
 - 4.3.4 Arreglo del modelo
- 4.4 Instrumentación
- 4.5 Ensayos en modelo
 - 4.5.1 Observaciones en los ensayos
- 4.6 Rompeolas ensayados bajo incidencia de oleaje regular
 - 4.6.1 Rompeolas talud 1.5:1 lado mar
 - 4.6.2 Rompeolas talud 2:1 lado mar

Capitulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

- 5.1 Procesamiento de los resultados producto de los ensayos
- 5.2 Análisis de resultados
- 5.3 Graficación de resultados
- 5.4 Errores

Capitulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Anexo



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Capítulo 1. Generalidades</i>	
Fig. 1.1 Oleaje.	1
Fig. 1.1.1 Características de una ola.	1
Fig. 1.2.1 Clasificación del oleaje.	3
Fig. 1.1.3 Gráfica del Método de Histograma de Frecuencias.	6
Fig. 1.1.4.1 Esquema de la Teoría Lineal	8
Fig. 1.1.4.2 Esquema de la Teoría de Amplitud Finita.	8
Fig. 1.1.5.1 Transformación del oleaje producto del efecto de fondo.	10
Fig. 1.1.5.2 Método gráfico de Frentes de Ola.	11
Fig. 1.1.5.3 Difracción del oleaje en una zona protegida por un rompeolas.	12
Fig. 1.1.5.4 Perfiles de los distintos tipos de rompientes. La flecha indica el punto de rompiente.	14
Fig. 1.2.1 Obra de protección (rompeolas).	14
Fig. 1.2.2 Rompeolas.	15
Fig. 1.2.3 Escollera.	15
Fig. 1.2.4 Espigones.	16
Fig. 1.2.2.1 Tipos de elementos artificiales.	17
Fig. 1.2.2.2 Vista lateral de rompeolas con elementos de bolsacreto.	17
Fig. 1.3.1 Rompeolas a talud de enrocamiento.	18
Fig. 1.3.2 Corte transversal de un rompeolas a talud.	19
Fig. 1.3.1.1 Impacto de la ola sobre los elementos de un rompeolas.	20
Fig. 1.3.2.1 Vista aérea del puerto de Ensenada.	21
Fig. 1.3.2.2 Escollera del puerto de Manzanillo.	21
Fig. 1.3.2.3 Vista satelital del puerto de Lázaro Cárdenas.	22
Fig. 1.3.2.4 Rompeolas del puerto de Salina Cruz.	23
Fig. 1.3.2.5 Vista del canal de navegación del puerto Tampico.	23
Fig. 1.3.2.6 Rompeolas de Veracruz.	24
Fig. 1.3.2.7 Escollera del puerto de Coatzacoalcos.	25
Fig. 1.3.3.1 Mapa de los huracanes intensos que se han presentado en la Republica Mexicana durante el periodo 1970 al 2006.	26
Fig. 1.3.3.2 Mapa de los huracanes moderados que se han presentado en la Republica Mexicana durante el periodo de 1970 al 2006.	26
Fig. 1.3.3.3 Obras de recarga en el puerto de Coatzacoalcos, Ver.	27
<i>Capítulo 2. Criterios de diseño</i>	
Fig. 2.3.1 Rompeolas del puerto exterior de Bilbao.	30
Fig. 2.3.2 Ensayos para el refuerzo del rompeolas de Bilbao.	30
Fig. 2.3.3 Ensayos y modelo reducido del rompeolas del puerto de Valencia.	30
Fig. 2.3.1.1 Equilibrio según Iribarren (hacia abajo).	31



Capítulo 3. Estudios experimentales

Fig. 3.2.1 Canal de oleaje del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX), España.	40
Fig. 3.2.2 Canal de oleaje bidimensional de la Universidad de Cantabria, España.	41
Fig. 3.3.1 Parte del equipo del Laboratorio de la Universidad de Cantabria, España	42

Capítulo 4. Modelo

Fig. 4.1.1 Esquema del fondo marino reproducido dentro del canal.	43
Fig. 4.1.2.1 Trazo de los escantillones.	46
Fig. 4.1.2.2 Amortiguador de oleaje.	47
Fig. 4.1.2.2 Clasificación del material pétreo.	47
Fig. 4.1.2.3 Colocación del núcleo.	48
Fig. 4.1.2.4 Colocación de la capa secundaria y de coraza.	48
Fig. 4.3.4.1 Canal de oleaje angosto con generador de oleaje hidráulico.	52
Fig. 4.4.1 Equipo de cómputo para control del generador y de medición de oleaje.	52
Fig. 4.6.1.1 Rompeolas Talud 1.5:1 Ensayo 2 Serie 8.	57
Fig. 4.6.1.2 Rompeolas Talud 1.5:1 Ensayo 2 Serie 9.	57
Fig. 4.6.2.1 Rompeolas Talud 2:1 Ensayo 2 Serie 8.	60
Fig. 4.6.2.2 Rompeolas Talud 2:1 Ensayo 2 Serie 9.	61

Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

Fig. 5.2.1 Daño vs. Número de olas acumuladas (oleaje regular).	65
Fig. 5.2.2 Porcentaje de daño del rompeolas vs. Número de olas acumuladas (Talud 1:5:1).	65
Fig. 5.2.3 Porcentaje de daño del rompeolas vs. Número de olas acumuladas (Talud 1:5:1).	66
Fig. 5.2.4 Función de estabilidad para inicio de daño en rompeolas de enrocamiento realizada por Iribarren en 1965.	66
Fig 5.2.5 Influencia del periodo de la ola en la estabilidad del rompeolas (taludes 1.5:1 y 2:1).	68



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Capítulo 2. Criterios de diseño</i>	
Tabla 2.3.1.1 Coeficientes para la formula de Iribarren.	32
Tabla 2.3.2.1 Características del flujo en un talud de enrocamiento con relación al Número de Iribarren I_r (ξ).	34
Tabla 2.3.3.1 Valores de A, B, I_{r_0} . Inicio de daño (después de los datos obtenidos por Iribarren).	35
Tabla 2.4.1.1 Valores de K_D recomendados dado en SPM 1977.	37
Tabla 2.4.1.2 Valores de K_D recomendados dado en SPM 1984.	37
<i>Capítulo 4. Modelo</i>	
Tabla 4.1.1.1. Tipos de escalas utilizadas en el modelo.	44
Tabla 4.1.2.1 Relación de parámetros de diseño, modelo- prototipo.	46
Tabla 4.2.1.1 Programa de ensayos.	50
Tabla 4.5.1 Ensayos para medir el daño del rompeolas sometido a oleaje regular para un talud 1.5:1.	53
Tabla 4.5.1 Ensayos para medir el daño del rompeolas sometido a oleaje regular para un talud 2:1.	54
<i>Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados</i>	
Tabla 5.1.1 Resultados para el rompeolas talud 1.5:1.	63
Tabla 5.1.2 Resultados para el rompeolas talud 2:1.	64



NOMENCLATURA

g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de la ola
H _d	Altura de ola de diseño
H _m	Altura de ola en modelo
H _p	Altura de ola en prototipo
H _s	Altura de ola significativa
H ₁₀	Altura de ola promedio del 10% de olas más altas en un registro
\bar{H}	Altura promedio del registro de oleaje
A/D	Analógico/Digital
B	Ancho de corona
A	Área de capa (generalmente un área unitaria de 10 a 100 m ²)
As(f)	Área bajo el espectro
A _m	Área en modelo
A _p	Área en prototipo
CP	Catastro portuario
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
A y B del talud	Coefficientes ajustados para el tipo de elemento de coraza y del ángulo
K _Δ	Coefficiente de capa (adimensional),
K	Coefficiente de estabilidad
K _D	Coefficiente de estabilidad
K _r	Coefficiente de reflexión
D	Distancia de decaimiento
S _f	Densidad de energía
t	Duración del viento
E _L	Escala de líneas o de longitudes
E	Espesor de capa
B	Flotabilidad del elemento
f	Frecuencia del oleaje
f _i	Frecuencia relativa
F _{wave}	Fuerza del oleaje
GIOC	Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas
f	Longitud del fetch
L _m	Longitud en modelo
L _p	Longitud en prototipo
L	Longitud de ola
L _o	Longitud de la ola en aguas profundas
n	Número de elementos o capas
N _i	Número de intervalos o marcas de clase
I _{r_o}	Número de Iribarren inicial
W	Peso de los elementos de la coraza
W-B	Peso sumergido del elemento
T	Periodo del oleaje



T_m	Periodo del oleaje en modelo
T_p	Periodo del oleaje en prototipo
\bar{T}	Periodo promedio del registro de oleaje
W	Peso medio de los elementos de coraza
P	Porosidad
d	Profundidad
Z	Profundidad a pie del talud del rompeolas
R	Rango
H/L	Relación de esbeltez de la ola
UC	Universidad de Cantabria
U	Velocidad del viento real
V_{10}	Velocidad del viento a 10 m. de la superficie
$U_{19.5}$	Velocidad media del viento medida o calculada a una altura de 19.5 m.
V	Volumen del elemento

LETRAS GRIEGAS

α	Ángulo del talud de la estructura con respecto a la horizontal
μ	Coefficiente de fricción
ρ_w	Densidad relativa del agua del mar
ρ_s	Densidad relativa de la roca
ψ	Función de estabilidad
ξ	Número de Iribarren
β	Pendiente de la playa
γ_s	Peso específico del elemento
γ_w	Peso específico del agua de mar



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Administración Portuaria Integral (API): Sociedad mercantil quien, mediante concesión para el uso, aprovechamiento y explotación de un conjunto de puertos, terminales e instalaciones, se encarga de la planeación, programación operación y administración de los bienes y la prestación de los servicios respectivos.

Aguas someras o poco profundas: Son aguas a tal profundidad que la ola superficial es notablemente afectada por la topografía del fondo.

Aguas profundas: Son aguas a tal profundidad donde las ondas superficiales no afectan al fondo marino.

Altura de la ola (H): Es la distancia vertical que separa la cresta del valle de una ola (la parte más alta y la más baja de la ola respectivamente).

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

Amplitud de la ola: Es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud vale la mitad de la altura de la ola

Ascenso del oleaje: Es el ascenso de agua sobre una estructura debido a la rompiente de la ola. La cantidad del alcance de la ola es una altura vertical por encima del nivel estático del agua, el cual asciende cuando el oleaje incide.

Batimetría: Configuración del fondo de océanos, mares y lagos.

Batimétrica: Línea de nivel que une puntos de igual profundidad en un plano.

Canal de acceso: Es la zona navegable más importante del puerto, en ella el barco aún en movimiento pasa de mar abierto a la zona protegida y debe de realizar además la maniobra de parada.

Carta sinóptica del tiempo: Una carta mostrando la distribución de condiciones meteorológicas sobre un área dada y un tiempo dado. Popularmente llamado mapa de tiempo.

Celeridad o velocidad de fase de la ola: Es el resultado de dividir la longitud de onda entre el periodo.

Clapotis: Esta asociado con el fenómeno de oleaje permanente causado por la reflexión de un tren de oleaje no rompiente de una estructura de pared vertical o casi vertical.



Costa: Franja de tierra de ancho indefinido que se extiende desde la línea de playa hasta el primer cambio notable del terreno.

Cresta de la ola: Es la parte más alta de la ola y que esta por encima del nivel de aguas tranquilas.

Cuerpo de la estructura: Es la parte más larga de la estructura llegando a una profundidad proyectada para las necesidades del puerto.

Curva de nivel: Una línea sobre un mapa o carta representando puntos de igual elevación con relación a un dato de referencia. Estas son llamadas batimétricas cuando conectan punto de igual profundidad por debajo de la referencia.

Daño: En un rompeolas se define como el porcentaje de elementos de coraza desplazados con respecto al total de ellos colocados en la construcción de la estructura.

Diagrama de refracción: Un dibujo mostrando las crestas de ola y/o ortogonales en un área dada desde aguas profundas hacia la costa, con periodo y dirección de ola específicos.

Difracción: Es el fenómeno por el cual la energía se trasmite lateralmente a lo largo de la cresta de la ola. Cuando una parte de un tren de oleaje es interrumpido por una barrera, tal como un rompeolas, el efecto de difracción es manifestado por la propagación de oleaje en la región de abrigo dentro de la sombra geométrica de la barrera.

Efecto de escala: Se define como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y el prototipo causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas del prototipo en el modelo

Escollera: Es una estructura que se extiende dentro de un cuerpo de agua, la cual está diseñada para prevenir el azolvamiento de un canal por el transporte de material y para dirigir y confinar las corrientes de marea. Las escolleras son construidas en las desembocaduras de ríos o canales a marea libre para ayudar a profundizar el canal o estabilizarlo.

Espectro de oleaje: En el estudio del oleaje es una grafica, tabla o ecuación matemática que muestra la distribución de la energía de ola como una función de la frecuencia de la ola. El espectro puede estar basado en consideraciones de observación o teóricas. Varias formas de exposición gráfica son ampliamente utilizadas.

Espigón: Estructura construida para proteger una costa (usualmente perpendicular a la línea de costa) y que sirve para atrapar el acarreo litoral o retardar la erosión de una costa.



Golfo: Porción de agua de grandes magnitudes delimitada por 3 de sus lados por la masa continental.

Huracán: Es un intenso ciclón tropical, en el cual los vientos tienden a girar en espiral hacia el interior del núcleo de baja presión, con vientos superficiales máximos igual o que exceden a los 33 metros por segundo (75 mph o 65 nudos) por varios minutos o por mucho tiempo en algunos puntos.

Litoral: Relativo a las riveras del mar. Costa u orillas del mar.

Longitud del fetch: La distancia horizontal (en la dirección del viento) sobre el cual el viento genera el oleaje local o se crea la sobre-elevación por viento.

Longitud de la ola (L): Es la distancia que separa dos crestas consecutivas.

Marea: Es el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar debido a las fuerzas de atracción lunar y solar combinadas con la fuerza centrífuga y el efecto de coriolis causado por la rotación de la tierra.

Modelo: Es un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se procesa y se presenta en forma adecuada para el diseño y operación de obras hidráulicas

Modelos analógicos: Es cuando dos fenómenos físicos de diferente naturaleza son análogos si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aun cuando cada una de ellas tengan significado diferente.

Modelos físicos: También llamados modelos hidráulicos, son representaciones pequeñas de una obra real, al que se le denomina prototipo. Un modelo de este tipo debe ser geoméricamente, dinámica y cinemáticamente semejante al prototipo para permitir con esto que las observaciones, resultados y conclusiones del modelo se pueden aplicar a su prototipo.

Modelos matemáticos: Son el conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno, conduciendo a un problema matemático que es necesario resolver mediante técnicas matemáticas apropiadas.

Morro: Se caracteriza por ser la parte más robusta de la estructura con el propósito de resistir más el impacto del oleaje.

Número de Froude: Es la relación adimensional de la fuerza de inercia y la fuerza de gravedad para un flujo dado. Su ecuación es: $Fr = V / \sqrt{Lg}$ donde V es la velocidad del flujo, L es una longitud característica y g es la aceleración de la gravedad.



Número de Reynolds: Es la relación adimensional de la fuerza de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido en movimiento, $R_e = \frac{Lv}{\nu}$ donde L es una longitud característica, ν viscosidad cinemática del fluido y v la velocidad característica.

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

Ola: Es una onda sobre la superficie libre del agua, que esta en movimiento.

Ola capilar: Es una ola donde su velocidad de propagación es controlada primeramente por la tensión superficial del liquido en el cual la ola se está trasladando. Las olas con longitudes de la onda menor de 1.7 cm. son consideradas olas capilares.

Ola cnoidal: Es un tipo de ola en aguas poco profundas (es decir, donde la profundidad del agua es menor que 1/8 a 1/10 de la longitud de onda).

Ola estacionaria: Es una ola de forma esencialmente estable la cual no se mueve con respecto a un punto de referencia seleccionado; crecimiento fijo. Algunas veces es llamada permanente.

Ola de gravedad: Ola cuya velocidad de propagación es controlada primordialmente por la gravedad. Olas con longitudes mayores a las 2 pulgadas son consideradas olas de gravedad.

Ola oscilatoria: Una ola en la cual cada partícula oscila con respecto a un punto con un ligero o no cambio permanente de su posición media.

Ola progresiva: Una ola que se mueve relativa a un sistema coordenado fijo en la superficie de un fluido.

Ola significativa: El termino estadístico relativo al tercio de las alturas de las olas más grandes de un grupo de oleaje dado y definido por el promedio de sus alturas y sus periodos. La composición de las alturas de las olas más grandes depende de la extensión en la cual las olas más bajas son consideradas.

Ola de traslación: Es una ola en la cual las partículas de agua son permanentemente desplazadas a un grado significativo en la dirección del viaje de la ola.

Olas monocromáticas (regular): Oleaje donde cada ola tiene la misma longitud de ola y período.



Oleaje: Son ondulaciones en las capas superficiales del mar generadas por el viento, recorriendo los océanos hasta alcanzar tierra donde la energía sobrante se disipa sobre la costa.

Oleaje local: Olas generadas por el viento en el lugar y tiempo de observación (lugar donde se encuentra actuando).

Oleaje distante: Oleaje generado por viento, que ha viajado fuera de su área de generación. El oleaje distante característicamente exhibe un periodo más regular y largo, tiene crestas más aplanadas que el oleaje local de su fetch.

Ortogonal: En un diagrama de refracción de oleaje, es una línea dibujada perpendicularmente a las crestas del oleaje.

Pendiente o talud: Es el grado de inclinación con respecto a la horizontal. Usualmente usado como una relación, tal como 1:25 o 1 sobre 25, indicando una unidad de ascenso en la vertical y 25 unidades en la distancia horizontal.

Periodo de la ola: Es el tiempo que separa el paso de dos crestas sucesivas delante de un punto fijo.

Predicción de oleaje: La determinación teórica de las características del oleaje a futuro, usualmente de fenómenos meteorológicos observados o estimados, también llamado forecasting; también se refiere al uso de cartas sinópticas de viento históricas para calcular las características de las olas que probablemente ocurrieron en un tiempo pasado, también llamado hindcasting.

Prototipo: Término usado en laboratorio, es un fenómeno o bien una estructura a reproducirse completamente a escala.

Puerto: Es el lugar de la costa o ribera habilitado como tal por el Ejecutivo Federal para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones, compuesto por el recinto portuario y, en su caso, por la zona de desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación.

Rebase: El paso de agua por encima de la corona de una estructura como un resultado del alcance de la ola o acción de la variación del nivel del agua.

Refracción: Es el proceso mediante el cual la dirección de una ola moviéndose en aguas bajas en un ángulo a la batimétrica es cambiado, la parte de la ola avanzando en aguas más bajas se mueve más lentamente que la parte que avanza todavía en aguas más profundas, causando que la cresta de la ola tienda a alinearse con la batimétrica.

Reflexión: Es aquel fenómeno en donde las ondas de agua pueden ser parcial o totalmente reflejadas tanto por obstáculos naturales como por los construidos por



el hombre, por lo que al impactarse el oleaje sobre una estructura sin haber sufrido una rompiente indica una acción de reflejo de su energía como oposición a la disipación.

Relación de esbeltez: Es aquella relación que existe entre la altura y la longitud de la ola.

Rompeolas: Es un montículo protegido con piedra o de elementos de concreto ubicados de manera ordenada o aleatoriamente sobre la capa de coraza.

Rompeolas a talud: Son aquellos que debido a su forma trapecial son capaces de soportar la incidencia del oleaje manteniendo un comportamiento estructural e hidráulico favorable para la generación de una zona abrigada en un puerto.

Rompiente: Zona cercana a la costa donde se levantan y rompen las olas.

Rompiente continúa: Es una rompiente con burbujas y turbulencias del agua que se derrama en frente de la ola. El 25 % del frente de la ola puede llegar a ser vertical antes de romper. La rompiente generalmente ocurre en grandes distancias.

Rompiente ondulante: La cima de la ola sube, pero el fondo se apresura hacia delante por debajo de la ola, deslizándose hacia la parte superior de la playa con pequeña o ninguna producción de burbujas. La superficie del frente de ola permanece casi plana excepto donde hay rizos que pueden ser producidos en el fondo de la playa durante el retorno del agua.

Rompiente rodante: La cresta de las olas curvean sobre bolsas de aire; la rompiente se presenta en forma estrepitosa. Siguiendo usualmente con un salpicado tranquilo.

Transporte litoral: Movimiento del sedimento en la zona litoral generado por oleaje y corrientes. Incluye solo el movimiento paralelo (transporte longitudinal a la costa).

Tormenta tropical: Es el termino aplicado a fuertes tormentas con una circulación definida en superficie y vientos máximos sostenidos entre los 17 y 32 m/s.

Valle de la ola: La parte más baja de la ola entre dos crestas sucesivas o también, la parte de la ola abajo del nivel estático del agua.

Viscosidad: La propiedad molecular de un fluido que permite que soporte un cierto esfuerzo tangencial para un tiempo finito y así resistir la deformación.



RESUMEN

Para los puertos mexicanos, la creación de zonas abrigadas dentro de los recintos portuarios, es de suma importancia para la maniobra y recepción de embarcaciones, consiguiéndose esto a través de la construcción de estructuras costeras de protección, llamadas comúnmente rompeolas.

Muchos son los factores por los cuales, un rompeolas puede sufrir daños en su estructura, uno de ellos es ocasionado por los fenómenos naturales que se presentan en nuestro país año con año, motivo por el cual es de manera primordial que en el diseño de estos se deban al considerar todos los fenómenos que interactúan sobre la estructura, con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento.

Actualmente, en el diseño de rompeolas la fórmula de Hudson que trabaja bajo el concepto de oleaje regular, sigue aplicándose de manera vigente en proyectos de gran relevancia en nuestro país, es por esto que, con la finalidad de obtener diseños más adecuados y representativos, sin desaprovechar la sencillez que aporta esta fórmula en su ejecución, se realizó un análisis del comportamiento de esta estructura sometida bajo condiciones de oleaje regular haciendo interactuar el periodo del oleaje en el mismo a través del Número de Iribarren y a la función de daño, siendo lo anterior el objetivo de este estudio.

El estudio fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, se utilizó el canal de oleaje de tipo angosto, con generador de oleaje regular e irregular, para construir un modelo físico reducido de rompeolas de enrocamiento superficial permeable a talud, el cual fue diseñado y ensayado para oleaje de tipo regular para dos diferentes taludes (1.5:1 y 2:1); midiéndose éste por medio de un ológrafo y procesándose por computadora, a las alturas y periodos de ola significativa, a su vez se midió el daño generado por el oleaje a la estructura al cuantificar los elementos de la coraza desplazados, todo lo anterior, para cada uno de los ensayos y registrando dichos daños en grabaciones en video y fotografías.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se realizó el análisis de los mismos, los cuales fueron vaciados en tablas y gráficas de daños y de función de estabilidad, en las cuales se aprecia de manera objetiva el daño percibido por el rompeolas para cada uno de los taludes probados, y que a medida de que el periodo se incrementaba para una misma altura, el daño se incrementaba también. Finalmente los resultados de la tesis fueron comparados con los resultados de estudios similares desarrollados por Iribarren (1965), Jensen (1996), obteniéndose una tendencia muy similar a la que ellos presentan. Por lo que se puede concluir que la utilización del concepto de oleaje regular puede seguirse utilizando pero ahora considerando al periodo del oleaje en el diseño de este tipo de estructuras.



ABSTRACT

For the Mexican Port, the generation of protected zones, in port enclosure, is of great importance for handling and reception of ships, getting this trough of the construction of coastal protection structures commonly called breakwaters.

A breakwater can suffer damages in his structure for many factors, one of them is generated for natural phenomenon (hurricanes), that happen in our country each years; so would be fine that in his design, must be considered all the parameters that have some interaction with this structures, in order of to guarantee his well functioning.

Actually, in the breakwater design under the concept of regular wave, the Hudson formula is used in great projects in our country; so in order of to get better design, taking advantage of the simplicity of the Hudson formula in his applications, was realized an analysis of the behavior of this structures under regular wave conditions, taking in consideration the wave period in the analysis, trough of the Iribarren Number and of the stability function; which was the objective of this thesis.

The study was realized in the Laboratory of Hydraulic Engineering of the “Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional”, a narrow wave channel was used to build a reduced physical model of stone, superficial and permeable breakwater, that was designed and tested with regular wave, and for two different slopes (1.5:1 and 2:1), the height and period of significant waves were measured in the model with special equipment and processed by a computer; likewise, was measured the damages that the regular waves generated to the structure, counting the armor elements moved, all this for each one of tests and recording in video and photographs the wave effects over the breakwater.

Once time, that result of tests were gotten, were processed and used to make tables and graphics of damages and of stability function, where one can wash objectively the damages generated for waves to the breakwater in his two sections tested; and that if the wave period increases for a same wave height the damage increases too. Finally, the thesis results were compared with results of a similar study realized by Iribarren (1964), Jensen (1996), and they are very similar. So, we conclude that the use of regular wave concept, could be keep in use, but now considering too, the wave period in the design of this structures.



INTRODUCCIÓN

Los puertos de México se han vuelto estructuras esenciales en la economía del país, al realizarse un comercio internacional más intenso. El funcionamiento adecuado de estos, es fundamental y a su vez el diseño óptimo de las obras de protección cobran mayor relevancia, tal es el caso de los rompeolas.

La condición básica de la cual depende la estabilidad de un rompeolas frente al ataque de las olas, es la resistencia de la coraza a la acción de las mismas, así como la capa secundaria y el núcleo que también deberán mantener su estabilidad.

Parte de los daños percibidos por los rompeolas, se han manifestado durante la presencia de fenómenos meteorológicos, como huracanes; provocando averías considerables en su estructura, como el desprendimiento de elementos de coraza, rebases sobre la corona del mismo, etc., implicando gastos elevados para su reconstrucción o recargas, esto último, si solo se trata de una parte en específico (morro o cuerpo).

Actualmente, los rompeolas siguen diseñándose bajo el concepto de oleaje regular, el cual en sus fórmulas no toma en cuenta el periodo del oleaje, por lo que se plantea realizar un estudio en modelo físico reducido de un rompeolas en el canal de oleaje con que cuenta el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco y hacer el estudio de estabilidad para este tipo de obra utilizando varios periodos de oleaje para una misma altura de ola, por lo tanto con la variante de emplear el periodo del oleaje en el diseño de la estructura.

Lo anterior permitirá un diseño de rompeolas más eficiente, a través de la utilización del Número de Iribarren para alcanzar dicho propósito.

Para lo anterior, este trabajo se divide en los siguientes capítulos:

En el *Capítulo 1. Generalidades*, se realiza una conceptualización de todos aquellos fenómenos iniciando con el oleaje, que pueden intervenir en el comportamiento y enlace directo con una obra de protección, así como, todas aquellas estructuras más relevantes que se encuentran en los puertos de México, describiendo sus dimensiones.

Para el *Capítulo 2. Criterios de diseño*, se hace un recorrido por los antecedentes de las fórmulas de diseño para rompeolas bajo el concepto de oleaje regular, sus investigadores y aportaciones en este tema, abarcando principalmente a los dos investigadores más destacados en este rubro como son Ramón Iribarren y Robert Y. Hudson.



Es importante conocer a fondo lo relacionado con el manejo de un problema real y su reproducción en modelo, es por esto que en el *Capítulo 3. Estudios experimentales*, se trata a buen nivel a la modelación hidráulica y los factores que se deben tomarse en cuenta para su realización, además de conocer instalaciones y equipos que se encuentran en otras instituciones educativas a nivel internacional.

En el *Capítulo 4. Modelo*, se presentan todas las actividades realizadas para la construcción del modelo físico reducido de un rompeolas, en donde se marcan paso por paso las etapas de: diseño, construcción, programa de ensayos, así como la descripción de lo observado en cada ensayo.

Una vez que fue construido el modelo físico, se realizó la parte experimental del estudio obteniéndose los resultados, que forman parte del *Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados*, en donde se plasma lo observado durante los ensayos, al elaborar graficas las cuales fueron comparadas con aportaciones encontradas en el estado del arte con respecto a este tipo de estudio.

Por último, tenemos el Capítulo 6 en donde se presentan las Conclusiones y recomendaciones, aportando en ellas nuevas líneas de investigación y alternativas.



JUSTIFICACIÓN

Dentro de la infraestructura portuaria las obras de protección como los rompeolas son una parte fundamental, los cuales tienen como finalidad proporcionar una zona de calma dentro del puerto, por lo cual, es necesario que su diseño sea lo más adecuado posible para soportar las condiciones de oleaje a las que estarán sometidos.

En el estado del arte, los criterios de diseño más utilizados para el cálculo de rompeolas trabajan bajo el concepto de oleaje regular, dentro de las fórmulas que adoptan este concepto se observa que ninguna contempla el periodo del oleaje; a través del tiempo este tipo de estructuras diseñadas bajo este criterio han sufrido daños a consecuencia de los oleajes incidentes sobre ellas, es por esto que, investigadores de renombre como Ahrens (1975), Hedar (1960,1986), Losada y Giménez- Curto (1979), entre otros; en algunos de sus estudios con oleaje regular en canales de oleaje resaltan la importancia del período de la ola en la estabilidad de la estructura.

Con base a lo anterior, se puede apreciar que es fundamental establecer que el periodo del oleaje debe ser considerado en el diseño de los rompeolas, por lo cual, para validar lo anterior, se realizó un estudio experimental en modelo físico reducido de un rompeolas dentro de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Unidad Zacatenco.

Con los resultados del estudio, se determinó que debe de integrarse el periodo del oleaje en las fórmulas de diseño que trabajan bajo el concepto de oleaje regular a través del Número de Iribarren, ya que éste enlaza a estos dos conceptos (altura y periodo de oleaje regular) de manera satisfactoria.



OBJETIVOS

- Analizar como interviene el periodo del oleaje en el diseño de rompeolas bajo el concepto de oleaje regular.

- Realizar un estudio experimental de un modelo físico reducido de un rompeolas de enrocamiento permeable para dos de los taludes más utilizados sometido a oleaje regular.

- Establecer que en el diseño de rompeolas bajo el concepto de oleaje regular, debe ser considerado el periodo del oleaje, a través de la utilización de un parámetro adimensional denominado Número de Iribarren.



HIPÓTESIS

Dentro de los diseños de rompeolas que se realizan en la práctica, los parámetros considerados para su cálculo son: la altura de la ola de diseño, el ángulo del talud, el peso específico de la roca y la densidad de la misma.

Tales estructuras siguen tratándose mediante el uso de fórmulas que trabajan bajo el concepto de oleaje regular y en las cuales no se contempla el periodo del oleaje, por lo anterior, se puede decir que:

“A TRAVÉS DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO REDUCIDO DE UN ROMPEOLAS SE PUEDE ESTABLECER COMO INFLUYE EL PERIODO DEL OLAJE EN EL DISEÑO DE ROMPEOLAS BAJO EL CONCEPTO DE OLAJE REGULAR A TRAVÉS DEL NÚMERO DE IRIBARREN”.



METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó en este estudio es la siguiente:

- Analizar del estado del arte en lo relativo con el diseño de obras de protección bajo el concepto de oleaje regular, así como, todo lo referente al Número de Iribarren y la función de estabilidad en rompeolas.
- Construir un modelo físico reducido de dos secciones de rompeolas (taludes 1.5:1 y 2:1 lado mar) de enrocamiento.
- Experimentación de las secciones de rompeolas bajo la incidencia de trenes de oleaje regular, los cuales se aplicará con dos diferentes periodos.
- Cuantificación de los daños percibidos por ambas secciones de rompeolas durante los ensayos, para establecer sus respectivos porcentajes.
- A partir de los datos obtenidos por el equipo de medición, calcular el Número de Iribarren para establecer los tipos de rompiente que impactaron sobre los rompeolas, así como, la función de estabilidad, para conocer la estabilidad de las secciones de rompeolas y vaciando toda la información en tablas.
- Realizar un análisis de los resultados, para desarrollar gráficas en las cuales se mostrará el efecto con respecto al daño y su estabilidad que puede producir el periodo del oleaje sobre las secciones del rompeolas probadas, a su vez se relacionaran las gráficas obtenidas con estudios ejecutados por reconocidos investigadores.
- Establecer a través de lo plasmado en tablas y gráficas, una alternativa para hacer diseños mas adecuados de rompeolas a través de la consideración del Número de Iribarren y tomando en cuenta que el diseño y ensayos fueron bajo el concepto de oleaje regular.



1. Generalidades

1.1 Oleaje

Definición

El oleaje son ondulaciones en las capas superficiales del mar generadas por el viento, recorriendo los océanos hasta alcanzar tierra donde la energía sobrante se disipa sobre la costa (ver figura 1.1) (Cifuentes, 1995).



Fig. 1.1 Oleaje.

1.1.1 Características del oleaje

Parámetros del oleaje

La superficie del mar es recorrida por una ondulación, que presenta elevaciones llamadas *crestas* y depresiones denominadas *valles*.

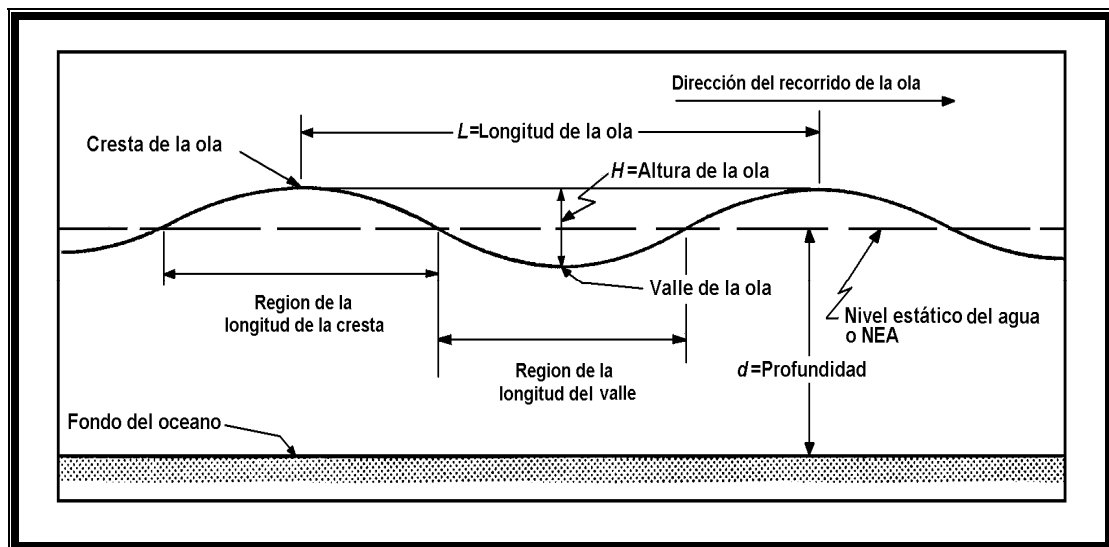


Fig. 1.1.1 Características de una ola.

Se llama *longitud de onda* o *de ola* (L) a la distancia que separa dos crestas consecutivas, *altura de la ola* (H) es la distancia vertical que separa la cresta del valle (depresión más baja de la ola); la *relación de esbeltez* es aquella que existe entre la altura y la longitud de la ola; el *periodo* es el tiempo que separa el paso de dos crestas sucesivas delante de un punto fijo; la *celeridad* o *velocidad* de fase es



el resultado de dividir la longitud de onda entre el periodo. La *amplitud* es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud vale la mitad de la altura de la ola (ver figura 1.1.1) (Cifuentes, 1995).

La *zona de generación* del oleaje, es la zona en donde actúa el viento con velocidad y dirección constante, también llamado *fetch*, si se dividiera en una serie de celdas, se generarán ondas elementales cuya altura, frecuencia, fase y dirección serán aleatorias e independientes y cuya interferencia dará lugar a una disposición caótica sobre la superficie líquida, conocida como *oleaje local* o *sea*. La zona de propagación es aquella zona por donde pasa el oleaje el cual se presenta normalmente en grupos de olas constituidas por algunas de gran altura relativa, seguidas de otras más pequeñas, y que se les conoce como *oleaje distante* o *swell*. El periodo de estas olas es variable de acuerdo a la longitud del fetch, la velocidad del viento y su duración (Silvester, 1974).

1.1.2 Clasificación del oleaje

La clasificación que se realiza en base a las características que presenta el oleaje en diferentes zonas de su trayectoria, son las siguientes (ver figura 1.2.1):

- Conforme al periodo
 - Capilar
 - Ultragravedad
 - Gravedad
 - Infragravedad
 - Periodo largo (Mareas)
 - Transmarea (temblores o tsunamis)

- Conforme a su altura
 - Amplitud pequeña
 - Amplitud finita

- Conforme al desplazamiento de su cresta
 - Progresivas
 - Estacionarias

- Conforme a la profundidad
 - Aguas profundas
 - Aguas intermedias
 - Aguas someras o reducidas

- Conforme al desplazamiento de las partículas
 - Ondas de traslación



- Ondas de oscilación
- Conforme al tiempo de aplicación de la fuerza o acción perturbadora
 - Ondas libres
 - Ondas forzadas (Ruiz, 2004).

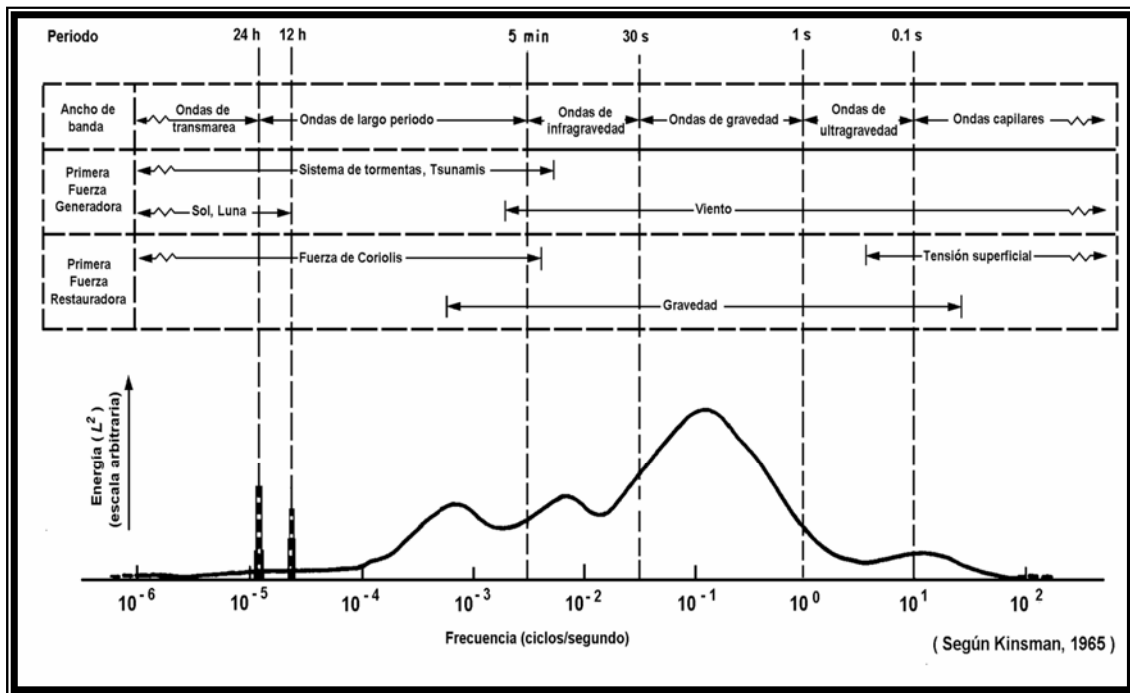


Fig. 1.2.1 Clasificación del oleaje.

1.1.3 Métodos de predicción del oleaje

Los métodos de predicción, son una serie de procedimientos que fueron realizados para conocer las características del oleaje que son producidas por fenómenos meteorológicos. La predicción de oleaje se denomina *hindcasting*, cuando se basa en condiciones meteorológicas pasadas, y *forecasting*, cuando esta basada en condiciones de pronóstico. Para ambos casos se utilizan los mismos procedimientos; la única diferencia es la fuente de los datos (USACE, 1984).

Dentro de los métodos de predicción destacan los basados en:

- *Formulas empíricas*, dentro de las variables que intervienen en el calculo son la altura y el periodo de la ola contra la velocidad del viento y el fetch; debido a su complejidad estas han sido desplazadas por los métodos que componen a la ola significativa.



➤ *Ola significativa*

1) En base a datos meteorológicos tenemos:

a) En la zona de generación (G)

Método de Sverdrup- Munk- Bretschneider (SMB)

El trabajo de Sverdrup y Munk en 1947 fue revisado y complementado por Bretschneider en 1957, teniendo así un método de predicción para conocer las características del oleaje regido por la duración del evento meteorológico (ver ec. 1.1.3.a y 1.1.3.b) o por el fetch (ver ec. 1.1.3.c y 1.1.3.d), teniendo así las siguientes expresiones:

$$\frac{g(H1/3)_G}{U^2} = 12.3174 \tanh \left[0.0004345 \left(\frac{gt}{U^2} \right)^{0.33} \right] \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.a})$$

$$\frac{g(T1/3)_G}{U} = 50.721 \tanh \left[0.015 \left(\frac{gt}{U} \right)^{0.20} \right] \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.b})$$

$$\frac{g(H1/3)_G}{U^2} = 0.2525 \tanh \left[0.01 \left(\frac{gf}{U^2} \right)^{0.49} \right] \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.c})$$

$$\frac{g(T1/3)_G}{U} = 0.358 \tanh \left(\frac{gf}{U} \right)^{0.28} \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.d})$$

Donde:

g= aceleración de la gravedad (m/s²)

f= longitud del fetch (m)

t= duración del viento (seg.)

U= velocidad del viento real (m/s) (Silvester, 1974)

b) En la zona de decaimiento (D)

Método de Sverdrup- Munk (SM)

Las ecuaciones 1.1.3.e y 1.1.3.f utilizadas para el cálculo son las siguientes:



$$\frac{(T_{1/3})_D}{(T_{1/3})_G} = \left[1 + 0.005953 \frac{D}{g(T_{1/3})_G^2} \right]^{1/2} \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.e})$$

$$\frac{(T_{1/3})_D}{(T_{1/3})_G} = \left[\frac{(T_{1/3})_D}{(T_{1/3})_G} \right]^{2.655} \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.f})$$

Donde:

D= distancia de decaimiento (m)

T= periodo del oleaje (seg.) (Ruiz, 2004).

C) Para aguas someras e intermedias

Método de Bretschneider

Para determinar la altura de ola significativa a través de este método se utilizan las siguientes fórmulas (ver ec. 1.1.3.g):

$$\frac{gd}{(V_{10})^2} ; \frac{gF}{(V_{10})^2} \quad \dots (\text{ec. 1.1.3.g})$$

Donde:

F= longitud del fetch (km.)

V₁₀= velocidad del viento a 10 m. de la superficie

d= profundidad (m.)

g= aceleración de la gravedad (m/s²) (Ruiz, 2004).

2) En base a registros de oleaje

Método del histograma de frecuencias

Según el registro de oleaje seleccionado, se contarán las alturas de la ola que forman el registro, obteniendo el rango (R), que es la diferencia entre los valores máximos y mínimos). Calculando el número de intervalos o marcas de clase (N_i) recomendándose varié entre 10 y 15; con esto se determina el tamaño de intervalo que es igual a R/N_i.

El límite inferior del intervalo inicial, corresponderá al valor mínimo registrado, y el límite superior del intervalo final corresponde al valor máximo. Obteniéndose con ayuda de los datos calculados, al inicio el número de olas que corresponden a cada intervalo de altura y se designa como (n_i) (Ruiz, 2004).



Se calcula $N = \sum n_i$; donde N es el número total de olas contenidas en el registro, después se obtiene la frecuencia relativa (f_i) que corresponde a cada intervalo ($f_i = n_i/N$). Construyendo así una grafica que relaciona cada intervalo de clase correspondiente a la frecuencia relativa, llamando esta gráfica histograma de frecuencias de las alturas de ola.

Marcando un punto medio que corresponde a cada barra del histograma, uniéndose hasta formarse una curva, llamándola polígono de frecuencias. Dividiéndose el área bajo el polígono en tres áreas, las cuales tendrán tres tipos de altura de ola (baja, media y alta), por ultimo se calcula el centro de gravedad del área correspondiente a la zona de olas altas y su valor será igual a la altura de ola significativa (ver figura 1.1.3) (Ruiz, 2004).

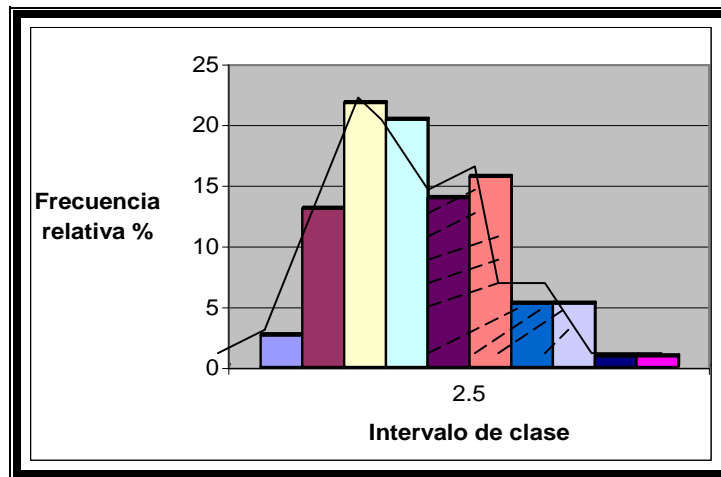


Fig. 1.1.3 Gráfica del Método de Histograma de Frecuencias.

➤ *Espectros de energía*; se denomina así a la relación de la energía de las olas con respecto a sus frecuencias.

1) En base a datos meteorológicos encontramos:

Método del espectro de Pierson- Moskowitz

En 1964, Pierson y Moskowitz publicaron una combinación de tres documentos en la primera edición de *Journal of Geophysical Research*, en la cual presentaron su método de predicción para calcular las características del oleaje (ver ec. 1.1.3.h) (Silvester, 1974).

$$Sf = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-0.74 \left[\frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right]^4 \right] \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.h})$$



Donde:

S_f = densidad de energía (m^2/s)

f = frecuencia del oleaje (ciclos por seg.)

$U_{19.5}$ = velocidad media del viento medida o calculada a una altura de 19.5 m.

(Ruiz, 2004)

2) En base a registros de oleaje

Método de Bretschneider

Este método es utilizado para registros de más de 1000 olas. Para su cálculo se obtendrán los valores de \bar{H} promedio y \bar{T} promedio del registro por analizar, utilizando la ecuación 1.1.3.i, se dibuja el espectro de oleaje correspondiente a los valores H y T ; después se procede a calcular el área bajo el espectro y se designa como $As(f)$, como el área obtenida es igual a la energía y esta a su vez a la varianza tenemos la ecuación 1.1.3.j., donde se despeja finalmente la altura de ola significativa.

$$S(f) = 0.43 \left[\frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2} \right]^2 \frac{g^2}{f^5} \exp \left[-0.675 \left(\frac{1}{\bar{T}f} \right)^4 \right] \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.i})$$

$$As(f) = \left(\frac{1}{4} H_{1/3} \right)^2 \quad \dots(\text{ec. 1.1.3.j})$$

Donde:

$As(f)$ = área bajo el espectro (m^2)

\bar{H} = altura promedio del registro de oleaje (m.)

\bar{T} = periodo promedio del registro de oleaje (seg.)

f = frecuencia del oleaje (ciclos por seg.)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

$S(f)$ = densidad de energía (m^2/s) (Ruiz, 2004).

1.1.4 Teorías del oleaje

Las investigaciones realizadas sobre el oleaje, han permitido desarrollar teorías para analizar matemáticamente este fenómeno, las cuales evolucionaron a medida que se tenía más información, clasificándose en lineales y no lineales.

Dentro de las primeras encontramos la teoría lineal también llamada *teoría de pequeña amplitud*, desarrollada por Airy en 1845, cuyo esquema se observa en la figura 1.1.4.1. Esta teoría es de importancia fundamental, ya que no sólo es fácil de aplicar, sino también es confiable para muchos casos de régimen del oleaje.



Matemáticamente, la teoría de Airy puede considerarse como una primera aproximación de la descripción teórica completa del comportamiento del oleaje (USACE, 1984).

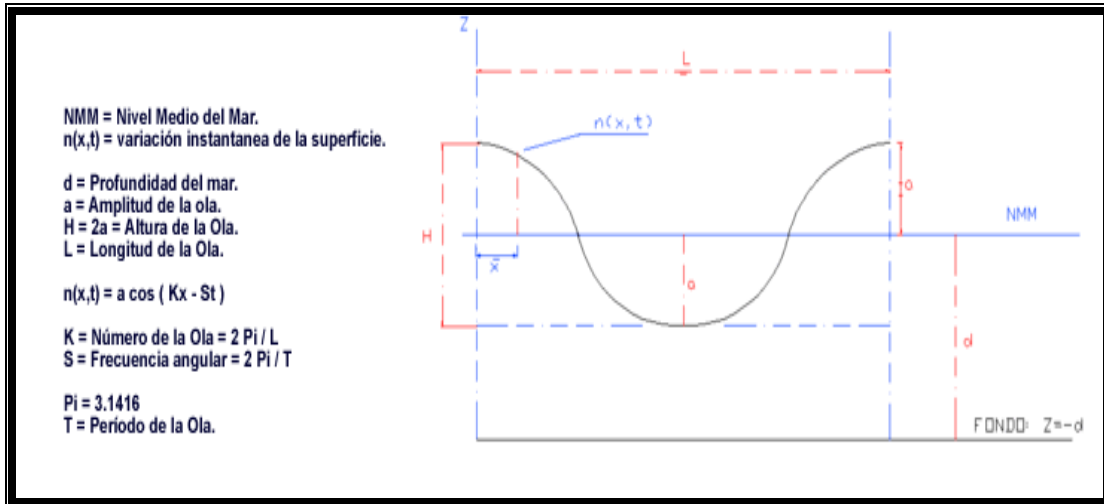


Fig. 1.1.4.1 Esquema de la Teoría Lineal.

Como teorías no lineales tenemos a la teoría de amplitud finita, conocida como *teoría trocoidal*, desarrollada por Gerstner en 1802. Es llamada así porque la superficie libre o perfil de la ola es un trocoide. No se recomienda su aplicación general, ya que el movimiento de la partícula de agua no es el que se observa en la naturaleza. Sin embargo, esta teoría predice con exactitud los perfiles del oleaje. Stokes en 1847 desarrolló también una teoría de amplitud finita, la cual es más satisfactoria que la teoría trocoidal, arriba mencionada (ver figura 1.1.4.2) (USACE, 1984).

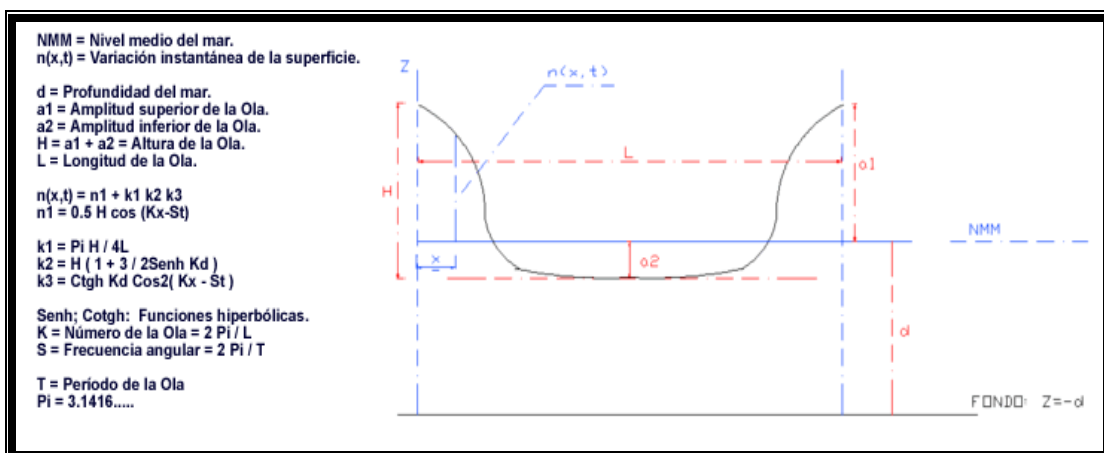


Fig. 1.1.4.2 Esquema de la Teoría de Amplitud Finita.



Dentro de la zona de aguas bajas, la *teoría cnoidal*, fue desarrollada originalmente por Korteweg y De Vries en 1895, prediciendo de manera confiable, la forma de la ola y los movimientos casi oscilatorios que se presentan, teniendo su límite de aplicación cuando se acerca a la rompiente del oleaje. Sin embargo, no ha tenido mucha aplicación debido a las dificultades para realizar los cálculos. Recientemente, el trabajo que implica usar la teoría cnoidal se ha reducido substancialmente mediante la introducción de formas gráficas y tabulares de funciones, sin embargo la aplicación de la teoría es aun bastante complicada (USACE, 1984).

En el límite de la teoría cnoidal, ciertos aspectos del comportamiento del oleaje pueden ser descritos satisfactoriamente con la *teoría de la ola solitaria*. Al contrario de la teoría cnoidal, la teoría de la ola solitaria es fácil de usar ya que se reduce a funciones que pueden evaluarse sin recurrir a tablas especiales.

Una ola solitaria no es oscilatoria ni tampoco muestra un valle, esta se forma completamente por encima del nivel estático del agua, siendo así una ola de traslación en relación con la masa de agua (USACE, 1984).

1.1.5 Fenómenos que modifican el oleaje

El estudio de la refracción, difracción, reflexión y la rompiente del oleaje a través de múltiples investigaciones y análisis han permitido su mejor comprensión e importancia, realizándose la reproducción de estos fenómenos con el fin de su mejor identificación y aplicación en estudios de tipo marítimos, por esto se debe tener bien definido el fenómeno.

Efecto de fondo (shoaling)

En aguas profundas el perfil del oleaje distante (swell) es aproximadamente sinusoidal, con crestas suaves y redondeadas. En esta zona, ni la topografía del fondo ni su rugosidad afectaran apreciablemente el paso de las olas. Conforme las olas se propagan, primero en aguas intermedias y después en aguas poco profundas, sobreviene una transformación por la influencia de la pendiente y rugosidad del fondo llamada *shoaling*.

Una consecuencia fundamental de esta transformación es que la velocidad del oleaje y la longitud de la ola disminuyen progresivamente mientras que la altura de la ola aumenta (por lo que la relación de esbeltez también aumenta); el periodo se supone que permanece constante. Ya cerca de la zona de rompientes, el aumento en la altura de la ola trae consigo una relación de esbeltez de la ola y el perfil se vuelve significativamente simétrico, con crestas muy pronunciadas y separadas por valles relativamente planos. Finalmente, la esbeltez de las crestas se vuelve inestable y la ola rompe (ver figura 1.1.5.1). Por lo tanto, la altura de una ola en rompiente puede ser bastante mayor que en aguas profundas (Mösso, 2004).

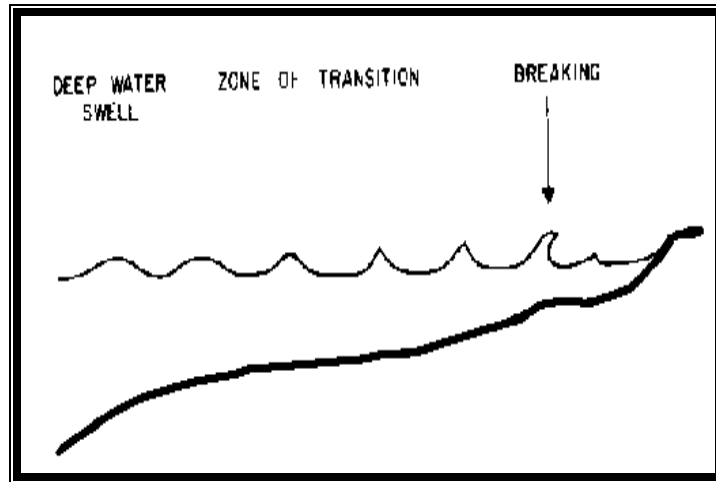


Fig. 1.1.5.1 Transformación del oleaje producto del efecto de fondo

Refracción

Una vez que el oleaje ha entrado a aguas intermedias y someras, se ve sometido a un proceso en el que la dirección de propagación cambia con la disminución de la profundidad, de tal manera que las crestas tienden a ser paralelas a la batimetría del fondo, a esto se le llama refracción, implicando también un cambio en la altura de la ola (Mösso, 2004).

Es importante recalcar que la refracción puede ser producida, no solo por la batimetría sino por cualquier fenómeno que produzca que una parte de la cresta de la ola se propague a distinta velocidad (por ejemplo; la interacción con corrientes) (Mösso, 2004).

Los métodos por los cuales puede ser calculada son de tres tipos:

- 1) Analíticos: Conservación de energía.
- 2) Gráficos: Frentes de ola (ver figura 1.1.5.2), Rayos de oleaje basados en la Teoría de Airy.
- 3) Numéricos: Mike 21, Seaway (Ruiz, 2004).

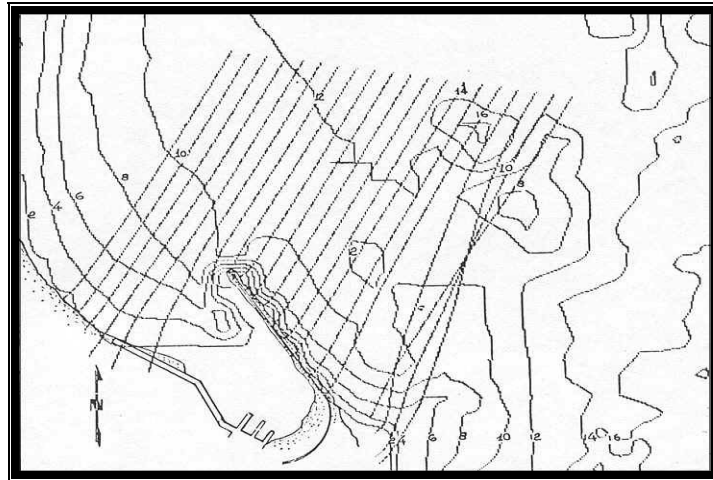


Fig.1.1.5.2 Método gráfico de Frentes de Ola.

La importancia de la refracción radica en que prácticamente las estructuras de protección son construidas en aguas bajas o intermedias, es ahí donde, las olas sufren cambios debido al efecto de fondo, definiendo en alto grado este efecto al transporte litoral. (USACE, 1984).

Difracción

Se puede definir como la transferencia de energía de una zona a otras, ésta se presenta cuando el oleaje es interrumpido por un obstáculo que impide su desplazamiento a la parte posterior de la misma, curvándose alrededor de éste y penetrando dentro de una zona protegida presentándose una expansión lateral, como se muestra en la figura 1.1.5.3 (USACE, 1984).

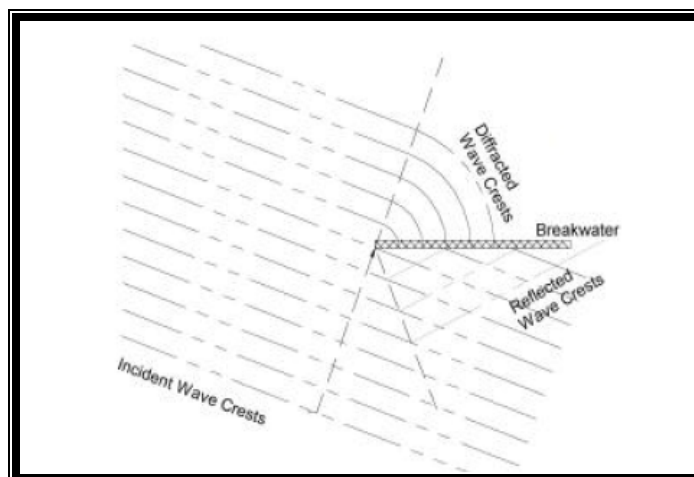


Fig. 1.1.5.3 Difracción del oleaje en una zona protegida por un rompeolas.



El cálculo de la difracción se lleva a cabo a través de los siguientes métodos:

- 1) Analíticos: Método de Larras.
- 2) Gráficos: Diagramas de difracción del oleaje desarrollados por Wiegel.
- 3) Numéricos (Ruiz, 2004).

Con lo anterior, su cálculo para el diseño y localización de las obras de protección serán las apropiadas con respecto al acceso del puerto reduciendo problemas como el azolvamiento y resonancia dentro del recinto.

Reflexión

Es aquel fenómeno en el que el oleaje puede ser parcial o totalmente reflejado tanto por obstáculos naturales como por los construidos por el hombre, por lo que al impactarse el oleaje sobre una estructura sin haber sufrido una rompiente se presenta una acción de reflejo de su energía como oposición a la disipación (USACE, 1984).

Cuando el frente de ola incidente es paralela a un paramento de tipo vertical y plano, se produce una reflexión total, la cual se manifiesta por la presencia de ondas estacionarias llamadas *clapotis*.

El *clapotis* se forma por la sobre posición de dos ondas progresivas de igual altura y periodo avanzando en sentido contrario, esta onda estacionaria se caracteriza por que duplica la altura de la ola incidente.

Dentro de los métodos para calcular este fenómeno tenemos a los analíticos tanto para playas como para estructuras, siendo estos determinados a través de una tabla en donde encontramos el tipo de estructura que se trata y el coeficiente de reflexión (K_r) previamente establecido.

Este fenómeno es importante para el diseño de las obras que se encuentran protegiendo las zonas de agua en el puerto, debido a que las olas que son difractadas pueden ser reflejadas por las obras de protección o muelles provocando el fenómeno de *resonancia* (USACE, 1984).

Rompiente

La rompiente es aquella que se presenta en la zona de aguas bajas, cerca de la costa con gran cantidad de espuma en lugares de poca profundidad.

- Relación de esbeltez de la ola (H/L); en donde el valor limite para producirse la rompiente será de $0.142 = 1/7$, disipando parcialmente su energía.



- Pendiente de la playa; este proceso se llevara a cabo de acuerdo a la teoría de la onda solitaria modificada, lo que significa que a una altura de ola determinada tendera a producirse su rompiente cuando la profundidad del fondo de la playa tenga un valor de 1.28 veces su altura (USACE, 1984).

Existen fundamentalmente 3 formas o tipos de rompiente siendo estas:

- *Continua* (Spilling).- Se desarrolla gradualmente caracterizándose por romper suavemente, presentándose una claridad relativa de la cresta de la ola.
- *Rodante* (Plunging).- Se lleva a cabo de forma drástica, curveándose hacia delante la cresta produciendo mucha espuma y turbulencia, teniendo así una zona de rompientes bien definida.
- *Ondulante* (Surging).- Se desarrolla en la parte superior de la cresta en forma semejante al tipo plunging, ocurre casi en la línea de la playa teniendo su zona de rompiente definida en esta misma zona.

El *Collapsing* es una combinación o transición entre las formas plunging y surging (Mösso, 2004). Todos estos tipos de rompiente se observan en la siguiente figura 1.1.5.4:

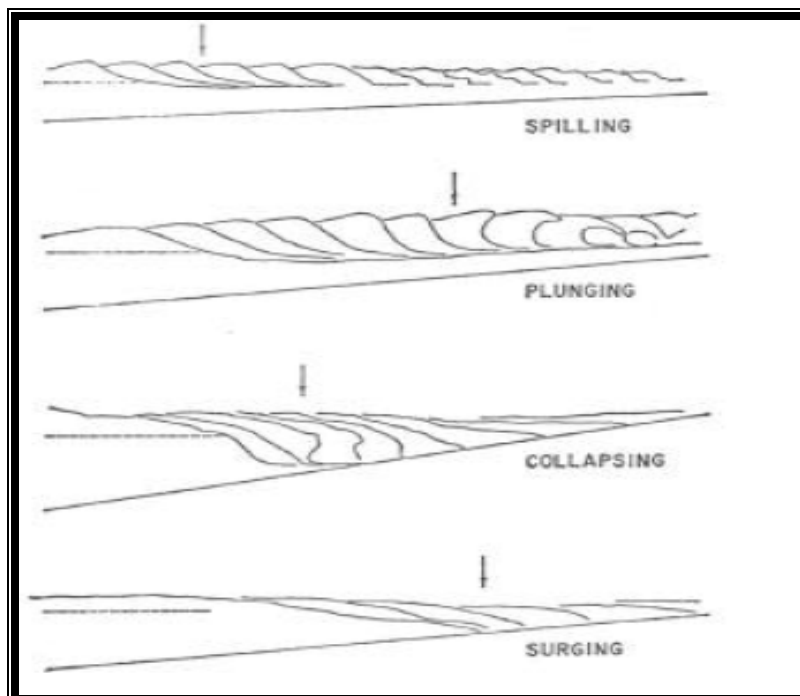


Fig. 1.1.5.4 Perfiles de los distintos tipos de rompientes. La flecha indica el punto de rompiente.



1.2 Obras de protección

Definición

Son aquellas estructuras que se encuentran de manera exterior en un puerto, con el propósito de proporcionar al mismo un área de agua protegida de los efectos del oleaje y así las embarcaciones realicen la función de transferir la carga con seguridad y rapidez. (ver figura 1.2.1) (Negro, 2002).

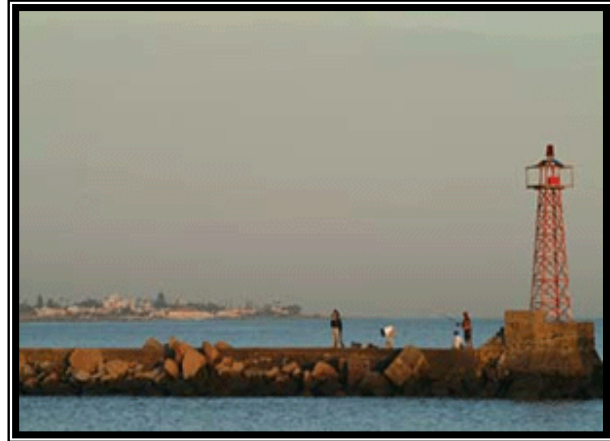


Fig. 1.2.1 Obra de protección (rompeolas).

Teniéndose tres tipos de estas obras que de acuerdo a su función son:

- 1) *Rompeolas*; se componen de tres capas en su estructura en ocasiones más robustas y de gran longitud, además son utilizados en puertos marítimos para generar zonas protegidas al parar o disipar el oleaje (ver figura 1.2.2).



Fig. 1.2.2 Rompeolas.

- 2) *Escolleras*; son aquellas obras que usualmente se encuentran perpendiculares a la costa, con el fin de encauzar un río, característico de puertos fluviales. (ver figura 1.2.3) (Ruiz, 2005).



Fig.1.2.3 Escollera.

- 3) *Espigones*; se compone de dos capas en su estructura, sirven para la protección de las costas al reducir el transporte de sedimentos, además de ser de poca longitud (ver figura 1.2.4) (Ruiz, 2005).



Fig. 1.2.4 Espigones.

1.2.1 Función de los rompeolas

La función de los rompeolas consiste en crear una zona abrigada y protegida dentro del recinto portuario en donde las embarcaciones puedan realizar satisfactoriamente la carga y descarga de productos y/o pasajeros, y en algunos



casos para retener el paso del transporte litoral a fin de garantizar por un mayor tiempo la profundidad del canal de acceso del puerto (Brunn, 1985).

1.2.2 Clasificación de las obras de protección

Los rompeolas pueden clasificarse en:

➤ *Por su geometría*

- A talud; de forma trapezoidal en la práctica la parte expuesta del lado mar será más amplia debido a que deberá soportar los embates del oleaje sobre ella:
- Paramento vertical; encontrando a los cajones de concreto.
- Mixtos; es la combinación de los dos anteriores.

➤ De manera estructural

- Flexible; se comportan de manera permeable.
- Rígidos; característicos de tipo paramento vertical
- Semi-rígidos; son mixtos.

➤ Materiales de construcción

- Enrocamiento; estarán compuestos de roca que cumpla con ciertas características de calidad.
- Elementos artificiales; realizados en concreto teniendo diferentes tipos con diferentes geometrías como cubos, tetrápodos, core-loc, etc. (ver figura 1.2.2.1)

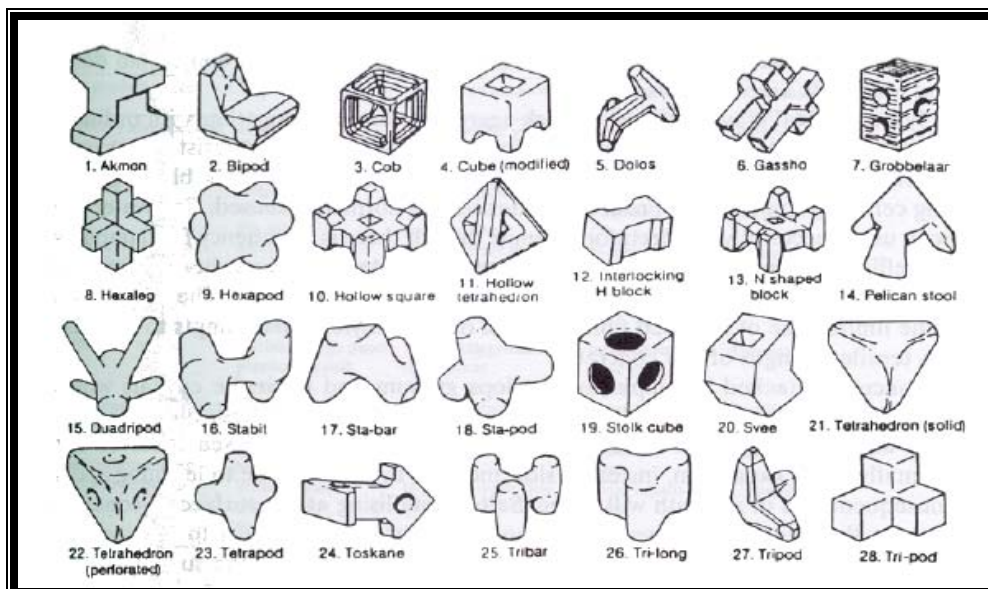


Fig. 1.2.2.1 Tipos de elementos artificiales.



- Bolsacreto; sacos rellenos de concreto pobre (ver figura 1.2.2.2).
- Cajones de concreto (Caisson)
- Tablaestacas
- Combinados (Ruiz, 2005).



Fig. 1.2.2.2 Vista lateral de rompeolas con elementos de bolsacreto.

1.3 Rompeolas permeables a talud

Definición

Los rompeolas a talud son aquellos que debido a su forma trapecial, son capaces de soportar la incidencia del oleaje, manteniendo un comportamiento estructural e hidráulico favorable para la generación de una zona abrigada en un puerto (ver figura 1.3.1) (Negro, 2002).



Fig. 1.3.1 Rompeolas a talud de enrocamiento.

Partes que integran un rompeolas

Haciendo un corte longitudinal esta estructura está formada de tres partes; *arranque o empotramiento*, *cuerpo o tronco* y *morro*.

El *empotramiento* tiene por objeto mantener a la estructura unida hacia la parte terrestre. El *cuerpo* es la parte más larga de la estructura llegando a una



profundidad proyectada para las necesidades del puerto. Por último, el *morro* se caracteriza por ser la parte más robusta de la estructura con el propósito de resistir más el impacto del oleaje.

De manera transversal, encontramos que usualmente están constituidas principalmente por tres capas que son: núcleo, capa secundaria y coraza (ver figura 1.3.2) (Ruiz, 2005).

El núcleo es la parte central de esta estructura compuesta por material de enrocamiento, con un peso pequeño. La capa secundaria tiene como objeto proteger al núcleo y soportar el peso de las rocas de coraza, siendo esta la que resistirá la fuerza del oleaje por lo que su diseño dependerá de ciertos factores como si la ola rompe o no sobre la estructura, el talud (en la práctica 2:1 del lado mar y 1.5:1 del lado tierra), si se trata del morro o el cuerpo, etc. (Negro, 2002).

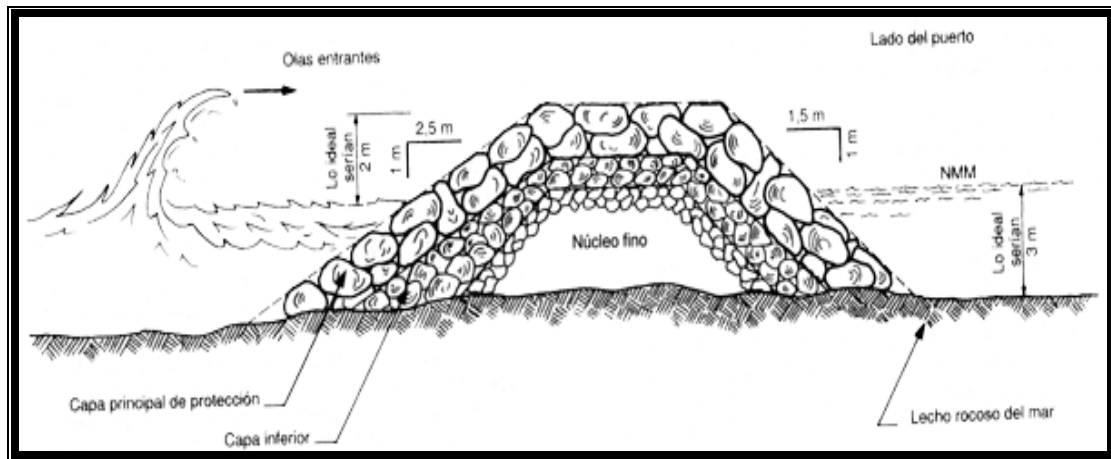


Fig. 1.3.2 Corte transversal de un rompeolas a talud.

1.3.1 Factores que intervienen sobre la estructura

Los factores que interactúan con el rompeolas son las fuerzas debidas al peso propio de la roca y de rozamiento de los elementos que constituyen la coraza, así como, las producidas por el oleaje.

Los fenómenos del oleaje que afectan a la estructura son:

- Rompiente total o completa; se produce cuando la ola impacta de manera perpendicular a la cara del rompeolas (ver figura 1.3.1.1).
- Rompiente parcial; una parte de la energía de la ola es disipada por la estructura y otra parte se refleja.



- Ascenso (Run-up) y Descenso (Run-down) del oleaje sobre el talud generando subpresiones entre los elementos de enrocamiento.
- Rebase (Overtopping) del oleaje; se establece cuando se presenta un ascenso máximo de la ola sobre la cara de la estructura (Brunn, 1985).



Fig. 1.3.1.1 Impacto de la ola sobre los elementos de un rompeolas.

1.3.2 Obras de protección en México

Las obras de protección como rompeolas o escolleras forman parte importante dentro de un puerto al proporcionarle una zona de abrigo dentro del mismo, al protegerlo del oleaje. Es por esto que, las autoridades de los puertos mexicanos se han preocupado por proporcionarles mantenimiento a este tipo de obras con el fin de preservarlos en buenas condiciones y así seguir prestando sus servicios a diferentes partes del país.

A continuación, se enuncian algunas obras de protección encontradas en los puertos más importantes de la República Mexicana:

En el Océano Pacífico encontramos:

- Puerto de Ensenada, Baja California Norte

El puerto está localizado a los $31^{\circ} 51'$ latitud Norte y a los $116^{\circ} 38'$ longitud Oeste (ver figura 1.3.2.1) (API Ensenada, 2006).

Cuenta con un rompeolas ubicado al Suroeste de la dársena construido en el año de 1965 de una longitud de 1640 m., ancho de corona de 8.9 m. y altura de corona



de 7.2 m. sobre el nivel de bajamar media inferior, constituido originalmente por roca, además de concreto en su corona y un deflector (CP, 2001).



Fig. 1.3.2.1 Vista aérea del puerto de Ensenada.

➤ Puerto de Manzanillo, Colima

Se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas latitud Norte $19^{\circ} 03' 45''$ y longitud Oeste $104^{\circ} 18' 08''$ (API Manzanillo, 2006).

Con respecto a sus obras de protección estas son escolleras construidas en 1965, la Norte está ubicada sobre la margen derecha (ver figura 1.3.2.2) a la entrada al puerto con una longitud de 300 m., un ancho de corona de 7.3 m., altura de corona de 3 m. sobre el nivel de bajamar media inferior constituido por roca de hasta 14 ton; la escollera Sur se encuentra sobre la margen izquierda a la entrada del puerto con una longitud de 100 m. conservando el ancho y altura de corona igual que la escollera norte (CP, 2001).



Fig. 1.3.2.2 Escollera del puerto de Manzanillo.



➤ Lázaro Cárdenas, Michoacán

Se encuentra rodeada por los ríos Balsas, Chuta y Habillal (ver figura 1.3.2.3). Al inicio de la administración gubernamental federal del periodo 1976 a 1982, bajo el programa de fortalecimiento de los puertos industriales, el de Lázaro Cárdenas recibió el impulso y, entre otras obras de infraestructura, se terminaron de construir sus escolleras (API Lázaro Cárdenas, 2006).

La escollera Este ubicada en la margen izquierda de la bocana del río Balsas tiene una longitud de 310 m., ancho de corona 6 m. y altura de corona de 7 m. sobre el nivel de bajamar media inferior (CP, 2001).



Fig. 1.3.2.3 Vista satelital del puerto de Lázaro Cárdenas.

➤ Puerto de Salina Cruz, Oaxaca

Se encuentra ubicado a latitud Norte $16^{\circ} 09' 30''$ y longitud Este $95^{\circ} 11' 30''$ (API Salina Cruz, 2006). Cuenta con un rompeolas dentro de la zona comercial al Suroeste del antepuerto (ver figura 1.3.2.4) con una longitud de 754 m., ancho de corona de 6 m y altura de corona de 7 m. sobre el nivel de bajamar media inferior, construido en 1906 fue constituido originalmente por roca de hasta 10 ton. así como de tetrápodos.

El rompeolas Este de la zona petrolera construido en 1982 con una longitud de 1855 m., ancho de corona de 10 m y altura de corona de 4 m. sobre el nivel de bajamar media inferior ubicado a 100 m. de la zona comercial, y está constituido por roca de hasta 16 ton. (CP, 2001).



Fig. 1.3.2.4 Rompeolas del puerto de Salina Cruz.

En el Golfo de México tenemos:

- Tampico, Tamaulipas

Esta localizado a $22^{\circ} 16' 00''$ latitud Norte y $97^{\circ} 47' 00''$ longitud Oeste en la llanura costera (ver figura 1.3.2.5). Al suroeste del puerto convergen los ríos Pánuco y Tamesí (API Tampico, 2006).

Dentro de sus obras de protección encontramos a la escollera Norte ubicada sobre la margen izquierda del río Pánuco con una longitud de 1470 m., ancho de corona de 10 m. y altura de corona de 5.2 m. sobre el nivel de bajamar media constituida inicialmente por roca de 400 Kg., integrándola actualmente tetrápodos y cubos de 16 ton. La escollera sur está ubicada sobre la margen derecha del río Pánuco con una longitud de 1750 m., ancho de corona de 8 m y altura de corona de 4 m. sobre el nivel de bajamar media constituida inicialmente por roca de 500 Kg. Se acompaña de tetrápodos y cubos de 9 y 16 ton. (CP, 2001).



Fig. 1.3.2.5 Vista del canal de navegación del puerto Tampico.



➤ Veracruz, Veracruz

Veracruz es el principal puerto comercial de México por parte del Golfo. Constituye uno de los puntos más importantes para el abasto de gráneles y productos industriales para los principales centros productivos y comerciales del país (API Veracruz, 2006). Cuenta con el rompeolas Norte ubicado al Noroeste del centro de la bahía a la entrada de la misma, construido en 1888 con una longitud de 738 m., ancho de corona de 7.3 m, y altura de 3.8 m. sobre el nivel de bajamar media, constituido inicialmente por roca de 200 a 300 Kg., ahora con cubos y tetrápodos (ver figura 1.3.2.6).

El rompeolas Suroeste de 800 m. de longitud, ancho de corona de 4 m. y altura de corona de 2.6 m. sobre el nivel de bajamar media al igual que el rompeolas Noreste está integrado por los mismos materiales.



Fig. 1.3.2.6 Rompeolas de Veracruz.

➤ Coatzacoalcos, Veracruz

Sobre la costa del Golfo de México, hacia el Sur, se encuentra situada la Ciudad y Puerto de Coatzacoalcos, en la desembocadura del río del mismo nombre, a los 18° 09' latitud Norte y 94° 25' de longitud Oeste, colindando con los Estados de Tabasco, Chiapas y Oaxaca (API Coatzacoalcos, 2006).

Tiene dos escolleras construidas en 1905 constituidas de roca, una de ellas cuenta con una longitud de 925 m., ancho de corona de 10.8 m. y altura de corona de 2.6 m. sobre el nivel de bajamar media (ver figura 1.3.2.7); otra escollera tiene una longitud de 1000 m., ancho de corona de 2.5 m. y altura de corona de 3.6 m. sobre el nivel de bajamar media.



Fig.1.3.2.7 Escollera del puerto de Coatzacoalcos.

El concepto de oleaje regular ha estado presente en el diseño y rediseño de algunos de los rompeolas y escolleras que aparecen en este tema, al hacer uso de la fórmula de Hudson para obtener el peso de los elementos de la coraza e incluso para realizar la recarga de material en alguna parte de la estructura que se encuentre dañada (Vázquez, 1985).

1.3.3 Daños que se han presentado en las obras de protección

En México la principal causa por la que estructuras como rompeolas o escolleras han sufrido daños ha sido la acción del oleaje al presentarse un fenómeno meteorológico extremo, ocasionando desprendimiento significativo de elementos de coraza y capa secundaria; rebase sobre la corona de la estructura, etc.

Las figuras 1.3.3.1 y 1.3.3.2 nos proporcionan una mayor perspectiva de los huracanes que han llegado a impactar sobre los puertos teniendo un impacto importante sobre estas estructuras. Además, de estar sometidos a este fenómeno pueden provocar daños la ocurrencia de un sismo en el lugar.



Fig. 1.3.3.1 Mapa de los huracanes intensos que se han presentado en la República Mexicana durante el periodo 1970 al 2006.



Fig. 1.3.3.2 Mapa de los huracanes moderados que se han presentado en la República Mexicana durante el periodo de 1970 al 2006.



Debido a que la construcción y reconstrucción tanto de los rompeolas como las escolleras son muy costosas, algunas alternativas que se han utilizado son la recarga de material sobre el talud del lado mar, ya sea con roca natural o elementos artificiales, dependiendo de la existencia o no de materiales pétreos cerca del sitio, ya que al rebasar la distancia de 10 Km. para su acceso, se eleva el costo de transportación, un caso particular fue la construcción de un deflector en el rompeolas del puerto de Ensenada con el fin de abatir el rebase del oleaje.

Debido a lo antes expuesto, se tiene registro de recargas con otros elementos sobre la coraza de las obras de protección tal es el caso del puerto de Tampico, cuyos rompeolas fueron recargados en 1997, 99 y 2000 para el caso de la escollera Norte y la escollera Sur en 1998, con cubos de concreto (CP, 2001); en Coatzacoalcos por el fenómeno de rebase se protegió la escollera (ver figura 1.3.3.3) (API Coatzacoalcos, 2006). La mayoría de los rompeolas y las escolleras se encuentran complementados por elementos artificiales, pocos son los casos en los que se usa solo roca como son Manzanillo, Ensenada y Coatzacoalcos.



Fig. 1.3.3.3 Obras de recarga en el puerto de Coatzacoalcos, Ver.

A través del análisis de los conceptos básicos que se manejan en este capítulo, se obtendrá una mayor identificación de los fenómenos que afectan e interactúan sobre la estructura de un rompeolas, además de una semblanza general de las obras de protección que se tienen en los puertos mexicanos, dando paso a el análisis de los criterios de diseño para posteriormente su construcción.



2. Criterios de diseño

2.1 Antecedentes de las fórmulas de diseño

En la antigüedad, culturas como la egipcia, romana y la vikinga principalmente, ubicaron sus zonas mercantes en una bahía o ensenada, ya que estas se encontraban protegidas de manera natural contra el oleaje; sin embargo, otros tuvieron la necesidad de protegerse debido a que se estaban mas expuestos al oleaje, construyendo montículos de rocas arrojadas al mar de manera arbitraria y simple, para que estos cumplieran de manera provisional con las necesidades que requerían los navegantes al arribar a estas zonas, aun así se presentaron deficiencias en la construcción de estas estructuras ante las inclemencias del tiempo.

A través del tiempo países como Noruega, Holanda, España entre otros, comienzan a realizar sus primeras investigaciones para el mejoramiento de las obras de protección (rompeolas), teniendo como principal objetivo una mayor vida útil de estas estructuras (Brunn, 1982).

A partir de 1933 en donde se presenta por primera vez una fórmula de diseño para estas estructuras, múltiples investigadores han contribuido con el mejoramiento del diseño de las obras de protección (Negro, 2002).

2.2 Fórmulas de diseño bajo el concepto de oleaje regular

En 1933, se publica por Eduardo de Castro y Pascual (Revista de Obras Publicas, abril del mismo año) la primera fórmula para el cálculo del peso de las rocas de la coraza de un rompeolas de enrocamiento, función del cubo de la altura de ola, la pendiente del talud y la densidad relativa de las rocas, cuya expresión es la siguiente (ver ec. 2.2.a):

$$W = \frac{0.704}{(\cot g\alpha + 1)^2 * \sqrt{\cot g\alpha - \frac{2}{\rho_s}}} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots(\text{ec. 2.2.a})$$

Esta expresión se considera la pionera en el cálculo del peso de los elementos de la coraza de un rompeolas sobre ajustes con datos reales y existentes, y la cual sirvió como base para posteriores investigaciones (Negro, 2002).

En 1938, y debido a la influencia del estudio anterior, Iribarren publica su primera expresión (ver ec. 2.2.b) que generalizará en 1950 con la ayuda de Castro Nogales, que culminó tras siete años de experiencia en taludómetro (1957- 1965), con el Congreso de Estocolmo del PIANC- AIPCN, introduciendo de forma directa, la manera de trabazón y la fricción entre las rocas (ver ec. 2.2.c) (Negro, 2002).



Capítulo 2. Criterios de diseño

$$W = \frac{K}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots(\text{ec. 2.2.b})$$

$$W = \frac{KH^3 \rho_s}{(\mu \cos \alpha \pm \text{sen} \alpha)^3 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)} \quad \dots (\text{ec. 2.2.c})$$

Epstein y Tyrrel en 1949, presentan una nueva fórmula (ver ec. 2.2.d) con estructura similar a la de Iribarren. En donde el coeficiente K de la fórmula depende de la esbeltez de la ola (Negro, 2002).

$$W = \frac{K}{(\mu - \text{tg} \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots(\text{ec. 2.2.d})$$

Larras en 1952, presenta otra fórmula en la que incluye la profundidad y la longitud de la ola (ver figura 2.2.e) (Negro, 2002).

$$W = \frac{K * \left[\frac{\frac{2\pi H}{L}}{\sinh^* \frac{4\pi Z}{L}} \right]}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots (\text{ec. 2.2.e})$$

Donde K= 0.0152 con Z= H/2 y H/L ≤ 0.1

Abecasis en 1953 critica los coeficientes de trabazón unitarios para piezas especiales propuestos por Iribarren. Hedar en el mismo año, desarrolló dos expresiones (ver ec. 2.2.f y 2.2.g) con variación del equilibrio, en base al ascenso y descenso del oleaje sobre el talud y a su rompiente (Bruun, 1985).

$$W = \frac{K}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots (\text{ec. 2.2.f})$$

Donde K= 0.015



$$W = \frac{K * K_1^3}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w - 1}\right)^3} \quad \dots \text{(ec. 2.2.g)}$$

Como: $K_1 = K_1 (\alpha \geq 15^\circ)$; $K = 0.1113 \times 10^3$; $\mu = 1.11$

Para núcleo permeable:

$K_1 (15^\circ) = 7.44$
$K_1 (20^\circ) = 7.48$
$K_1 (25^\circ) = 6.26$
$K_1 (30^\circ) = 5.30$
$K_1 (35^\circ) = 4.20$

Hudson en 1959, tras una exhaustiva investigación de laboratorio con rompeolas de elementos naturales y piezas artificiales, presenta una fórmula que ha tenido una amplia difusión en el mundo, con una estructura similar a la de Iribarren (ver ec. 2.2.h) (Negro, 2002).

$$W = \frac{Hd^3 \rho_s}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \cot \alpha} \quad \dots \text{(ec. 2.2.h)}$$

$K_D = 3.2$ (para 0-1% daño)
 $K_D = 15.9$ (para 30-60% daño)

En estos años, múltiples investigadores desarrollaron sus ecuaciones de diseño, siendo muy parecidas, destacando por su singularidad las empleadas en las normas soviéticas, SN-92-60, siendo esta la ecuación 2.2.i (Negro, 2002).

$$W = \frac{K}{\sqrt{1 + \cot^3 \alpha}} * \frac{H^2 * L * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w - 1}\right)^3} \quad \dots \text{(ec. 2.2.i)}$$

Donde $K = 0.025$, $L = 20 H$ con ascenso y descenso de la ola sobre el talud

Para todas las fórmulas, se tiene que W peso medio de los elementos de coraza, α talud del rompeolas, H altura de ola de diseño de cálculo, ρ_s densidad relativa de la roca, ρ_w densidad relativa del agua del mar, K_D ó K coeficientes de estabilidad, L longitud de la ola, μ coeficiente de fricción y Z profundidad a pie del talud del rompeolas.

Cabe destacar que cada una de estas expresiones fueron validadas bajo el concepto de oleaje regular (Negro, 2002). (Se presentan más fórmulas en el Anexo).



Otros investigadores siguieron posteriormente realizando trabajos con el fin de seguir retroalimentando el estado del arte con respecto a los criterios de diseño, entre los más relevantes se presentan los siguientes:

Iribarren en 1965, resume su trabajo de investigación, fijando el valor del coeficiente de rozamiento según el tipo de elementos. Por otro lado limitó la utilización de su fórmula a rompiente total sobre el talud, introduciendo por lo tanto, de una manera indirecta el efecto del periodo en la estabilidad (Negro, 2002).

En 1979, Losada y Giménez-Curto, analizan los fenómenos de flujo sobre el talud, demostrando que pueden ser descritos como una función del número de Iribarren. Asimismo, proponen un modelo exponencial, función del número de Iribarren para el estudio de la estabilidad de los rompeolas a talud, introduciendo, por otro lado las curvas de interacción para el análisis directo de la estabilidad a través de la altura y el periodo de la ola. En 1982, presentan una hipótesis de trabajo para el cálculo de la estabilidad de rompeolas a talud con incidencia oblicua del oleaje (Negro, 2002).

Por lo que respecta a la estabilidad dinámica de los rompeolas, los primeros estudios están asociados a los perfiles de equilibrio de playas de gravas, realizados por Van Hijun en 1974, 1976; en 1982 junto con Pilarczyk desarrollaron un modelo que describe el perfil de playas de gravas gruesas. A lo largo de la década de los ochenta, se comienzan a construir obras con un manto exterior de roca sin clasificar, con una berma de gran espesor por encima del nivel del mar. La acción el oleaje deforma esta berma, que alimenta un perfil en “S” que alcanza un equilibrio dinámico (las piezas se mueven pero el perfil se mantiene) (Ruiz, 2005).

Desiré 1985, en su tesis doctoral, realiza un análisis riguroso del flujo y del movimiento de elementos de taludes granulares (Negro, 2002). Todos los trabajos anteriores parten de ensayos con oleaje regular y ajustes empíricos de sus coeficientes.

2.3 Trabajos experimentales de Ramón Iribarren

Ramón Iribarren Cavanilles (1900- 1967) percibió la necesidad de crear herramientas técnicas que, al igual que en otros ámbitos de la ingeniería civil, permitiesen determinar mediante fórmulas la acción del mar y evaluar la fiabilidad de las obras de protección. Al igual que Eduardo de Castro, destacó la importancia del peso de los elementos del paramento exterior de un rompeolas (coraza) ante criterios de estabilidad (CEDEX, 2000).

Dentro del trabajo realizado por Iribarren, se ilustra un estudio elaborado para el puerto de Bilbao, el cual consistía en estabilizar el rompeolas ubicado en la parte



exterior del mismo a través de refuerzos (ver figuras 2.3.1 y 2.3.2); así también para el puerto de Valencia el cual requería determinar el perfil de su rompeolas ante el oleaje (ver figura 2.3.3), cada uno de ellos probado a través de un modelo físico reducido (CEDEX, 2000).

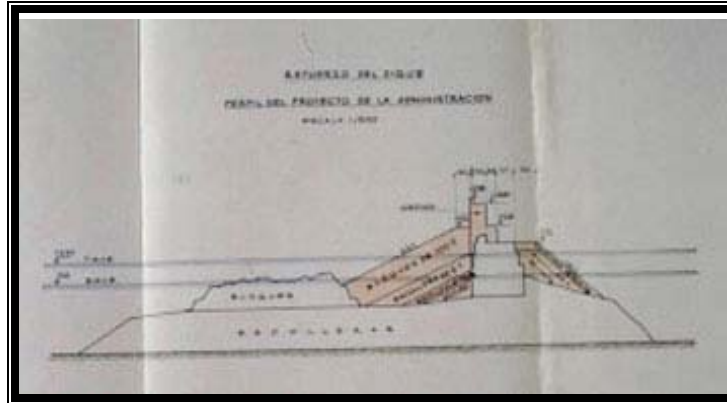


Fig. 2.3.1 Rompeolas del puerto exterior de Bilbao.

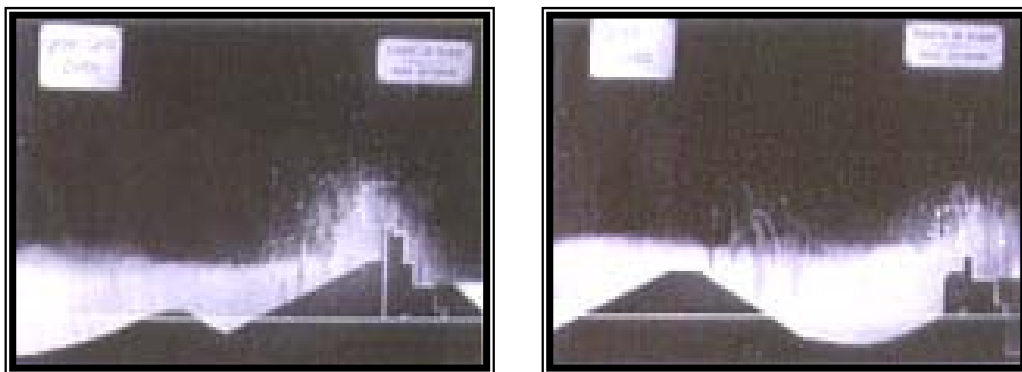


Fig. 2.3.2 Ensayos para el refuerzo del rompeolas de Bilbao.

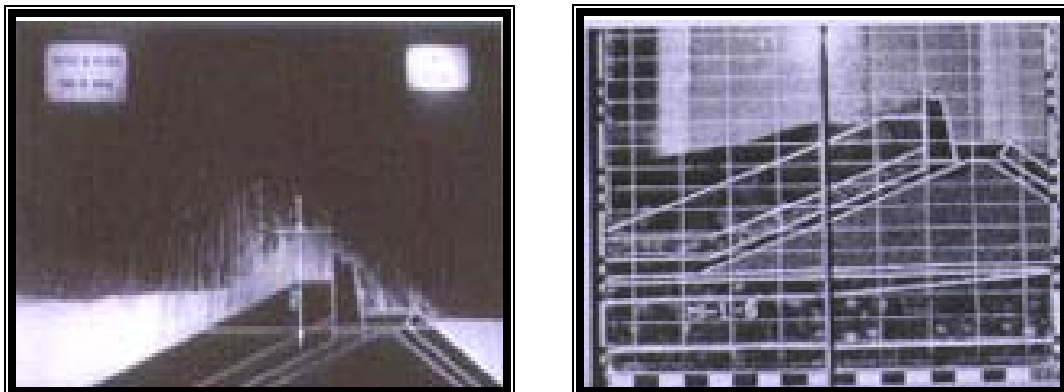


Fig. 2.3.3 Ensayos y modelo reducido del rompeolas del puerto de Valencia.



2.3.1 Fórmula de diseño de rompeolas

Iribarren estableció las condiciones de equilibrio de un elemento situado sobre la superficie, teniendo en cuenta que al romper la ola sobre la capa exterior no se anula toda su cantidad de movimiento y que el agua pasa a través de los elementos de la primera capa, chocando contra la segunda en la que se supone se anula el resto de la cantidad de movimiento. Cada elemento está sometido a la presión y subpresión sobre él, a la acción de la gravedad y a las fuerzas de fricción. Los parámetros que considera son: W peso del elemento (roca), B flotabilidad del elemento, $W-B$ peso sumergido del elemento, V volumen del elemento, α ángulo del talud, μ coeficiente de fricción, F_{wave} fuerza del oleaje (ver figura 2.3.1.1) (Del Moral, 1980).

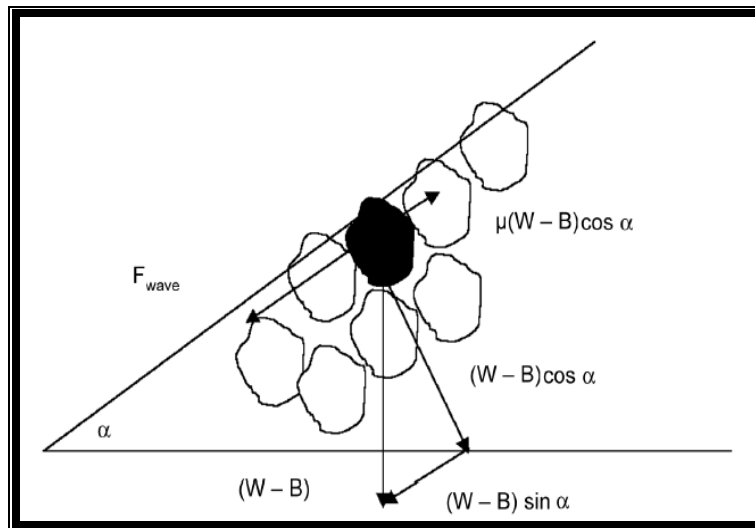


Fig. 2.3.1.1 Equilibrio según Iribarren (hacia abajo).

En 1938, y tras casi una década de experimentación a escala real junto con el Grupo de Puertos de Guipúzcoa en España, publicó una fórmula para el cálculo de rompeolas (ver ec. 2.3.1.a) (Negro, 2002).

$$W = \frac{K}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \dots \text{(ec. 2.3.1.a)}$$

Siendo W peso de los elementos de coraza, ρ_s densidad relativa de la roca, ρ_w densidad relativa del agua del mar, α ángulo del talud, H altura de ola, K coeficiente de estabilidad.

Para esta primera expresión Iribarren supuso un coeficiente de fricción igual a 1 el cual fue omitido, por semejanza en los bancos de roca cuyo talud natural era próximo a los 45° , al realizar estudios con el Taludómetro en 1957 para corroborar



este valor, determinó que el coeficiente es función del número de elementos y que ni siquiera para las taludes probados se aproxima a 1, al no ser aceptable el resultado trato de fijar de nuevo el coeficiente de la fórmula mediante modelos reducidos (Del Moral, 1980).

Posteriormente Iribarren y Casto Nogales desarrollaron la modificación de la primera, la cual fue presentada en su ponencia publicada en el XXI Congreso Internacional de Navegación celebrado en Estocolmo en 1965, (ver ec. 2.3.1.b).

$$W = \frac{K}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)^3} \quad \dots \text{(ec. 2.3.1.b)}$$

Donde W peso de los elementos de coraza, α ángulo del talud del rompeolas, H altura de ola, ρ_s densidad relativa de la roca, ρ_w densidad relativa del agua del mar, μ coeficiente de fricción (Negro, 2002).

En este congreso da las recomendaciones para los valores de K y μ (ver. tabla 2.3.1.1). Los valores de K se refieren a cero daño.

Tipo de elemento	Coeficiente de fricción μ	Estabilidad sección abajo $(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3$ K	Estabilidad sección arriba $(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)^3$ K	Angulo de transición entre la estabilidad sección arriba y sección abajo $\cot \alpha$
Roca	2.38	0.430	0.849	3.64
Cubos	2.84	0.430	0.918	2.80
Tetrápodos	3.47	0.626	1.743	1.77

Tabla 2.3.1.1 Coeficientes para la fórmula de Iribarren.

El coeficiente K representa influencias diferentes, ya que éste es una función del nivel de daño definido como "Pérdida de la estabilidad", también influye en él efecto de la forma de los elementos, pero no su fricción interna, ya que este se considera por separado en la fórmula. El coeficiente de fricción μ tiene una relación estrecha con el método de prueba (Taludómetro), al encontrar una diferencia notoria entre la fricción y el número de elementos colocados sobre el talud (D'Agremond, 2004).

2.3.2 Número de Iribarren

A lo largo de diez años de ensayos en el Laboratorio de Puertos, Iribarren y Nogales en su ponencia durante el XVII Congreso Internacional de Navegación, celebrado en Lisboa en 1949, resumían los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo de los rompeolas, dando a conocer, por primera vez, el parámetro que permite deducir cuándo el oleaje rompe en el talud o bien se refleja. Este



parámetro es conocido hoy en día como Número de Iribarren o Parámetro de similitud de rompiente (ver ec. 2.3.2.a) (CEDEX, 2000).

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi H/gT^2}} \quad \dots(\text{ec.2.3.2.a})$$

Donde ξ Número de Iribarren, H altura de la ola, L_0 longitud en aguas profundas y α ángulo del talud del rompeolas, g aceleración de la gravedad, T periodo del oleaje.

El Número de Iribarren se puede utilizar para determinar si se presenta la condición de rompiente o no rompiente y de que tipo se espera. Este parámetro sin dimensiones también se utiliza para determinar el ascenso del oleaje en una estructura y a partir de esto determinar si existe rebase del oleaje, así como el descenso del oleaje y la estabilidad estructural del rompeolas (USACE, 1984).

Posteriormente, en 1958 publica su artículo “Violentas presiones accidentales producidas por la rompiente de la olas” en la cual realiza mas aportaciones sobre este número y al analizar sobre los esfuerzos producidos por la ola en rompiente (Marín, 2001).

Esto dio lugar a que más investigadores retomaran esta expresión y se utilice para determinar la rompiente, dependiendo de la pendiente que se tenga ya sea en las obras de protección ó en playas.

Posteriormente Battjes en 1974, halló que el coeficiente de reflexión puede ser expresado en función del Número de Iribarren únicamente. A este número adimensional Battjes lo denominó Parámetro de similitud de rompiente, $\xi = Ir$, demostrando que gobierna los procesos de rompiente del oleaje (Sierra, 1997) y obteniendo los siguientes valores:

$0.5 < \xi$ se presenta una rompiente continua (Spilling).

$0.5 < \xi < 2.5 - 3.0$ se presenta una rompiente rodante (Plunging).

$\xi = 3.0$ se presenta una rompiente (Collapsing)

$\xi > 3.0 - 3.3$ se presenta una rompiente ondulante (Surging) (Negro, 2002).

2.3.3 Función de estabilidad

Tradicionalmente, el termino “daño” en un rompeolas, fue definido como el porcentaje de elementos de coraza desplazados con respecto al total de ellos colocados en la construcción de la estructura, aunque en la actualidad este



concepto se ha modificado, Iribarren dentro de sus estudios para este tipo de estructuras, realizó una serie de experimentos utilizando elementos para la coraza como: roca, bloques paralelepípedos y tetrápodos, así como para diferentes tipos de taludes bajo el concepto de oleaje regular (Brunn, 1986).

Una vez que obtuvo la función de la estabilidad, para cada tipo de elemento de coraza y la incidencia de oleaje regular en sus ensayos determino que, la función de la estabilidad dependía solamente del ángulo del rompeolas (α) y de la relación de esbeltez de la ola (H/L_o), o sea $\psi = (\alpha, H / L_o)$.

Es por esto que, el número de Iribarren juega un papel importante para la estabilidad de un rompeolas (Brunn, 1986).

La expresión desarrollada por Losada y Gimenez-Curto en 1979, es el resultado del estudio de investigación de los últimos ocho años de Iribarren, a los que incorporaron datos procedentes de Ahrens y McCartney en 1975 y Hudson en 1959, al proponer un modelo exponencial (ver ec. 2.3.3.a), que está en función del Número de Iribarren para el análisis de la estabilidad de los rompeolas bajo el concepto de oleaje regular (Negro, 2002).

$$\psi = A(Ir - Ir_o) \exp B(Ir - Ir_o), Ir > Ir_o \quad \dots \text{(ec. 2.3.3.a)}$$

Para:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_o}} \quad \xi = Ir \quad \dots \text{(ec. 2.3.2.b)}$$

$$Ir_o = 2.654 \tan \alpha \quad \dots \text{(ec. 2.3.3.c)}$$

Donde:

ψ función de estabilidad; A y B coeficientes ajustados para el tipo de elemento de coraza y del ángulo del talud; ξ Número de Iribarren; Ir_o Número de Iribarren inicial, α ángulo del talud, H altura de la ola, L_o longitud de la ola en aguas profundas.

Una vez propuesta esta ecuación (ec. 2.3.3.a) y basados en los resultados obtenidos por Iribarren, elaboraron la tabla 2.3.3.1 (Brunn, 1986):



TIPO DE ELEMENTOS	Cot α	A	B	I _{ro}
Roca	1.50	0.09035	-0.5879	1.77
	2.00	0.05698	-0.6627	1.33
	3.00	0.04697	-0.8084	0.88
	4.00	0.04412	-0.9339	0.66
Bloques paralelepípedos	1.50	0.06819	-0.5148	1.77
	2.00	0.03968	-0.6247	1.33
	3.00	0.03410	-0.7620	0.88
Tetrápodos	1.33	0.03380	-0.3141	1.99
	1.50	0.02788	-0.3993	1.77
	2.00	0.02058	-0.5078	1.33

Tabla 2.3.3.1 Valores de A, B, I_{ro}. Inicio de daño (Después de los datos obtenidos por Iribarren).

2.4 Trabajos experimentales de Robert Y. Hudson

Múltiples han sido las contribuciones que se han realizado alrededor del estudio del diseño de los rompeolas, sobresaliendo, además de la antes citadas, la realizada por el investigador Robert Y. Hudson en los laboratorios de la Armada de los Estados Unidos en Vicksburg, California y que en colaboración con el investigador McCartney (Brunn, 1985) desarrollo una fórmula para el cálculo de este tipo de obra de protección, a través de un parámetro adimensional denominado K_D, presentando una expresión sencilla y práctica y que actualmente se sigue utilizando y que se describe a continuación.

2.4.1 Fórmula de diseño de rompeolas

En los años 40 y por encargo del Departamento de la Marina de Estados Unidos (Department of the Navy), se llevaron a cabo en Vicksburg (Waterways Experiment Station) una serie de ensayos encaminados a estudiar el efecto del oleaje sobre los rompeolas.

En 1952, Hudson modifico la fórmula de Iribarren empleando las mismas suposiciones y diagramas de fuerzas para obtener el coeficiente adimensional. En 1958, amplió este trabajo hasta desarrollar una fórmula nueva para determinar los elementos de la coraza (USACE, 1966), basada en desprejiciar el coeficiente de fricción salvo casos aislados donde interviene la cohesión, al simplificar las fuerzas actuantes de inercia y arrastre que tienden a separar la roca del talud (Negro, 2002).

Proponiendo la siguiente expresión 2.4.1.a:

$$W = \frac{Hd^3 \gamma_s}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cot \alpha} \quad \dots \text{(ec. 2.4.1.a)}$$



Capítulo 2. Criterios de diseño

Donde W peso de los elementos de coraza, α talud del rompeolas, γ_s peso específico de la roca de coraza, ρ_s densidad relativa de la roca, ρ_w densidad relativa del agua de mar, K_D coeficiente de diseño y H_d altura de la ola de diseño (D'Agremond, 2004).

El K_D representa muchas influencias diferentes, sólo de la misma manera que el coeficiente K en la fórmula de Iribarren. Al principio, es una función del nivel de daño definido como la "Pérdida de la estabilidad". También incluye el efecto de la forma de las rocas y el rozamiento interno. Los valores recomendados para K_D han sido divulgados y actualizados por el Cuerpo de Ingenieros en el Shore Protection Manual de 1977, la altura de ola es definida como H_s (altura de ola significativa) y los valores para los elementos más comunes son dados a continuación (ver tabla 2.4.1.1) (D'Agremond, 2004).

Tipo de elemento	Número de capas (N)	Cuerpo de la estructura		Morro de la estructura	
		Kd		Kd	
		oleaje rompiente	oleaje no rompiente	oleaje rompiente	oleaje no rompiente
Roca angular rugosa	1	**	2.9	**	2.3
Roca angular rugosa	2	3.5	4.0	2.5*	3.8*
Roca angular rugosa	3	3.9	4.5	3.7*	4.2*
Tetrápodos	2	7.2	8.3	5.5*	6.1*
Dolos	2	22.0	25.0	15.0	16.5*
Cubos	2	6.8	7.8		5.0

*Variación recomendada para el K_D evaluada para diferentes taludes.

**No se recomienda su uso para una capa si se presenta oleaje rompiente.

Tabla 2.4.1.1 Valores de K_D recomendados dado en SPM 1977.

En el Shore Protection Manual de 1984 (ver tabla 2.4.1.2), luego de varios fracasos dramáticos de rompeolas de enrocamiento, se propuso el uso de H_{10} (promedio del 10% de olas más altas en un registro), esto es igual a $1.27 H_s$.

Tipo de elemento	Número de capas (N)	Colocación	Cuerpo de la estructura		Morro de la estructura		Talud
			Kd		Kd		
			oleaje rompiente	oleaje no rompiente	oleaje rompiente	oleaje no rompiente	
Roca Lisa redondeada	2	Al azar	2.1	2.4	1.7	1.9	1.5 a 3.0
	3	Al azar	2.8	3.2	2.1	2.3	1.0 a 1.54
Angular rugosa	1	Al azar	**	2.9	**	2.2	1.0 a 3.0
Angular rugosa	2	Al azar	2.0	4.0	2.9	3.2	1.5
					2.5	2.8	2.0
	Especial	4.8	5.5	3.5	4.5	1.0 a 3.0	
	3	Al azar	3.9	4.5	3.7	4.2	1.0 a 1.5
Tetrápodos	2	Al azar			5.9	6.6	1.5
					5.5	6.1	2.0
					4.0	4.4	3.0
Dolos	2	Al azar			15.0	16.5	2.0
					13.5	15.0	3.0
Cubos	2	Al azar	6.8	7.8		5.0	1 a 1.5

**No se recomienda su uso para una capa si se presenta oleaje rompiente.

Tabla 2.4.1.2 Valores de K_D recomendados dado en SPM 1984.



Capítulo 2. Criterios de diseño

De una comparación entre las dos tablas anteriores, resultó una recomendación de diseño mucho más conservadora en 1984. No sólo los valores de K_D han sido cambiados sino también la sustitución de H_s por H_{10} . Hudson define el valor de K_D para el daño inicial de los elementos de enrocamiento entre 0- 5 % en la capa de coraza. (D'Agremond, 2004).

Investigadores como Iribarren y Hudson, siguen teniendo relevancia actualmente con la utilización del parámetro del primero y la fórmula de diseño de rompeolas del segundo, aunque se trabaja con oleaje regular, es imposible desechar del todo esta expresión (Hudson), por su sencillez sobresale de las demás investigaciones. Si se observan todas las fórmulas, son similares cambiando los coeficientes de diseño al colocarles otras letras, pero basadas en la misma que es la derivada por Iribarren.



3. Estudios experimentales

3.1 Tipos de modelos

Modelo

Definición

Un modelo es un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se procesa y se presenta en forma adecuada para el estudio de dicho prototipo (Vergara, 1993).

Dentro de la modelación encontramos los siguientes tipos:

- Modelos matemáticos.- Son el conjunto de hipótesis y formulaciones matemáticas de las variables que describen un fenómeno, conduciendo a un problema matemático que es necesario resolver mediante apropiadas técnicas matemáticas.
- Modelos analógicos.- Dos fenómenos físicos de diferente naturaleza los llaman análogos, si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aun cuando cada una de ellas tengan significado diferente (Vergara, 1993).
- Modelos físicos (también llamados modelos hidráulicos).- Son representaciones pequeñas de un elemento real, al que se le denomina prototipo. Un modelo de este tipo debe ser geoméricamente, dinámica y cinemáticamente semejante al prototipo para permitir con esto que la observación, resultados y conclusiones del elemento que se estudie sea válido (Bonilla, 1971).

3.1.1 Modelo Físico Reducido

La utilización de modelos hidráulicos comienza en 1752, el científico John Sneathon aplicó estos para ensayar ruedas hidráulicas y molinos de viento. A mediados del siglo XIX, William Froude realizó los ensayos sobre modelos con más seriedad.

Reynolds fue el primero en demostrar el valor que tienen los modelos para el diseño de obras hidráulicas en la Ingeniería Civil. En 1887 construyó un modelo reducido del estuario de Mersey en Inglaterra, donde simuló el flujo de la marea obteniendo una formación de bancos de arena, como se encontraban en la naturaleza.

Con el avance de la Hidrodinámica moderna gracias a los investigadores Prandtl, Blasius y otros, los modelos adquirieron una aplicación en campos mas extensos que abarcan desde la investigación hasta la aplicación práctica de la Ingeniería (Bonilla, 1971).



3.1.2 Escalas del modelo

Cuando se definen lados, superficies y volúmenes homólogos, del modelo y prototipo que constituyen la *similitud geométrica*, misma que implica una relación constante, que para cualquier longitud L , resulta ser que $L_p/L_m = E_L$ llamada escala de líneas o de longitudes. Los subíndices p y m se refieren respectivamente a prototipo y modelo del fenómeno que se estudie.

Cuando la comparación de los sistemas A_p y A_m es con respecto a un movimiento, se establece entonces la *similitud cinemática*, y que se cumple cuando la forma del comportamiento de flujos homólogos son iguales en cualquier tiempo.

La similitud completa del sistema modelo- prototipo se presenta al cumplirse la *similitud dinámica*, al estar representadas por todas de fuerzas que intervengan en el prototipo pero como no es posible considerar en forma simultánea a todas estas fuerzas, sino únicamente a las más importantes. (Vergara, 1993).

La *selección de escalas* lineales, horizontales y verticales, se hace de forma independiente, cuando el fenómeno así lo permita con el fin de que el modelo esté adecuado al espacio, con respecto a las dimensiones con las que cuenten las instalaciones que se utilizarán y que el efecto de escala sea lo más reducido posible.

El *efecto de escala* se define como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y del prototipo causadas por la imposibilidad práctica de considerar simultáneamente a todas las fuerzas del prototipo

Las escalas recomendables para modelos de estabilidad de rompeolas son de 1:20 a 1:60, para modelos sin distorsión, de fondo fijo, en dos dimensiones; esto es, cuando se realizan ensayos en un canal de oleaje y de 1:40 a 1:80 para tanques de oleaje en tres dimensiones (Vergara, 1993).

3.1.3 Parámetros que intervienen en el modelo

Para modelos de estabilidad de rompeolas se consideran los siguientes puntos:

- Condiciones de cimentación
- Erosión al pie de la estructura (Para modelos de fondo móvil)
- Acción directa del oleaje

Dentro de este apartado, el ascenso y descenso continuó del oleaje sobre el talud de un rompeolas, crea un flujo en el interior de los elementos que cubren la cara



de esta estructura, teniendo así una fuerza que trata de mover los elementos de su lugar (Vergara, 1993).

Cuando se considera la acción del oleaje en un estudio, se tomarán en cuenta variables como: la altura de la ola (H), periodo del oleaje dependiendo del tren de olas que se hagan interactuar con la estructura (T), oleaje con o sin rompiente, profundidad de desplante de la estructura, peso de los elementos de enrocamiento (W), densidad del agua y de la roca (ρ_w , ρ_s), peso específico de los elementos (γ), ángulo del talud del rompeolas y de la pendiente de la playa (α , β), forma de la roca, espesores y permeabilidad de las capas, colocación de las rocas, parte de la sección del rompeolas que se estudiará (cuerpo o morro), criterios de diseño (con o sin daño) (Vergara, 1993).

3.2 Instalaciones

Dentro de instituciones educativas de otros países que cuentan con instalaciones para llevar a cabo estudios sobre rompeolas, se tienen canales de oleaje con un generador de tipo hidráulico con o sin viento controlado por computadora para reproducir cualquier tipo de oleaje regular ó irregular, dentro del proceso de vaciado del agua en los canales se permite la reutilización y depuración, además de tener instalado un equipo de filtrado, este el caso de la Universidad Politécnica de Valencia (Medina, 2001).

Como ejemplo de algunos canales de oleaje encontramos el del Centro de Estudios de Puertos y Costas en España con dimensiones de 90 m. de longitud, 3.60 m. de ancho, profundidad variable desde 6 m. en la zona de generación de oleaje hasta 4.50 m. en la zona de observación (ver figura 3.2.1). El generador de oleaje con el que cuentan puede generar un oleaje de hasta 1.60 m. (CEDEX, 2006).



Fig. 3.2.1 Canal de oleaje del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX), España.



En la Universidad de Cantabria en ese mismo país, dentro del laboratorio del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC), el canal de oleaje tiene 68.5 m. de longitud, 2 m. de ancho y 2 m. de profundidad. La altura de ola máxima generada es de 1.0 m. En la zona de medición cuentan con un carro eléctrico, capaz de desplazar un brazo vertical en las tres direcciones del espacio, siempre y cuando se requiera del perfilado en algún estudio. Además, de un generador de oleaje que puede reproducir oleaje de tipo regular, irregular, grupos de oleaje y tsunamis (ver figura 3.2.2) (UC, 2006).



Fig. 3.2.2 Canal de oleaje bidimensional de la Universidad de Cantabria, España.

3.3 Equipo e Instrumentación

Así como es importante la infraestructura dentro de un estudio de rompeolas, destaca también, la relevancia de identificar el equipo e instrumentación básico a utilizar, con el fin de obtener mejores resultados, dependiendo del tema a tratar, como pueden ser de estabilidad y rebases en este tipo de obra, reflexión y transmisión del oleaje, etc.

La mayoría de las instituciones educativas, tal es el caso de la Universidad de Cantabria en España cuentan con equipo como: sensores de superficie libre resistivos, presión y velocidad de tipo unidireccional por molinete electrónico, así como bidireccionales que pueden ser de hilo caliente y por láser doppler, en el caso de los dos primeros con sus respectivas tarjetas acondicionadoras de señal, dentro de los últimos ya cuenta con una tarjeta integrada para acondicionar su señal dentro del equipo (ver figura 3.3.1) (UC, 2006).



Capítulo 3. Estudios Experimentales

Además de esto, equipo de vídeo y fotografía para posteriormente procesar digitalmente las imágenes en computadoras que se encuentren dentro del los Laboratorios, adicionalmente se tienen equipo de campo, ya que realizan trabajos externos para particulares e incluso para investigación interna de las instituciones.



Fig. 3.3.1 Parte del equipo del Laboratorio de la Universidad de Cantabria, España

Después de lo expuesto en este capítulo, se concluye que, dentro de los modelos es importante tener identificados que tipo de fenómenos se simularán en el estudio, los tipos de escalas, aunque ya se tienen establecidas es de relevancia tenerlas definidas, así como el equipo con el que se deberá contar para reproducir el estudio, tendrá que ser el necesario para la obtención de resultados aceptables para su mejor análisis y comprensión.



4. Modelo

4.1 Construcción del modelo

La construcción del modelo físico reducido para este estudio, se realizó para dos secciones de rompeolas permeables a talud, utilizándose para su dimensionamiento una fórmula de diseño bajo el concepto de oleaje regular.

Se dispuso de un canal angosto de oleaje para un modelo de fondo fijo sin distorsión, en el cual se reprodujeron las secciones de rompeolas con taludes 1.5:1 y 2:1 lado mar y 1.5:1 lado tierra en ambos taludes; para realizar lo anterior se habilitó material de enrocamiento (material pétreo).

Para la construcción del modelo, primeramente se realizaron actividades que consistieron en el retiro de un amortiguador de pendiente simple y tezontle, que estaban dentro del canal en su extremo final, se demolió el perfil playero existente; y se habilitó un nuevo relleno de granzón clasificado y compactado recubriéndolo con un firme hecho de arena- cemento de 2.0 cm. de espesor; el fondo marino cuenta con una longitud de 7.60 m. y pendiente 1:50 así como un tramo de transición de 7.88 m. de longitud y pendiente 1:100 para poder ligar el fondo del canal con la pendiente del fondo marino (ver figura 4.1.1).

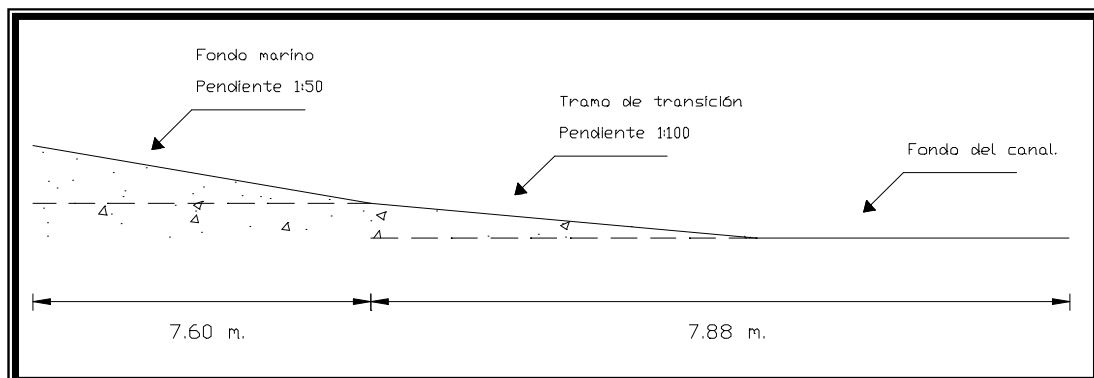


Fig. 4.1.1 Esquema del fondo marino reproducido dentro del canal.

4.1.1 Selección de la escala del modelo

Para representar el fenómeno a reproducir en los ensayos, en este caso la estabilidad de las secciones de rompeolas permeables a talud bajo la acción del oleaje, se propuso un modelo sin distorsión (escala de líneas vertical y horizontal iguales) y cuya escala permitió minimizar los efectos de la viscosidad y tensión superficial.

Las fuerzas que imperan en el fenómeno de estudio son las gravitacionales y de inercia, por lo tanto la condición de similitud a reproducir es la de Froude. Con



base a lo anterior, las dimensiones del canal, la característica del oleaje y niveles a reproducir en las pruebas se seleccionó una escala de líneas de 1: 40, para un modelo de fondo fijo sin distorsión (ver tabla 4.1.1.1).

TIPO DE ESCALA	NOTACION	ESCALAS
Escala de líneas horizontales	E_{LH}	40.00
Escala de líneas verticales	E_{LV}	40.00
Escala de longitudes de ola	E_L	40.00
Escala de alturas de ola	E_H	40.00
Escala de periodos de ola	E_T	6.32
Escala de celeridades de ola	E_C	6.32
Escala de fuerzas	E_F	64000.00
Escala de pesos	E_W	64000.00

Tabla 4.1.1.1 Tipos de escalas utilizadas en el modelo.

4.1.2 Diseño del modelo

Para el diseño geométrico del modelo se aplicó el criterio de diseño bajo el concepto de oleaje regular, a través de la fórmula de Robert Y. Hudson (1959) (ver ec. 4.1.2.a); considerando para esto una altura de ola representativa de nuestro país, es importante mencionar que el material pétreo utilizado para la construcción del modelo cuenta con un peso específico de 2.57 ton/m^3 .

$$W = \frac{Hd^3 \gamma_s}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cot \alpha} \quad \dots \text{(ec. 4.1.2.a)}$$

El cálculo del peso de los elementos de la coraza dio como resultado $W = 12 \text{ ton.}$; para los elementos de la capa secundaria y núcleo según (USACE, 1984) fueron $W/10$ a $W/20$ y $W/200$ a $W/6000$ respectivamente.

El ancho de corona, es correspondiente al ancho de dos piedras de coraza ($n = 2$), por lo tanto, éste puede obtenerse por medio de la ecuación 4.1.2.b (USACE, 1984):

$$B = nK_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \dots \text{(ec. 4.1.2.b)}$$

Con lo que se obtuvo un ancho de corona $B = 3.84 \approx 4.00 \text{ m.}$ y para la capa secundaria $B = 1.78 \approx 2.00 \text{ m.}$ El ancho de corona del núcleo estará en función de



permitir el acceso de los equipos de construcción que colocarán el material, siendo este $B= 3.00$ m. como mínimo.

El espesor de las capas según (USACE, 1984), se obtiene con la siguiente ecuación 4.1.2.c, la cual es igual a la anterior, con la diferencia que en este caso se calcula el espesor de las capas y donde el número de capas será $n= 2$:

$$E = nK_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \dots \text{(ec. 4.1.2.c)}$$

Donde se obtuvo para la capa de coraza $E= 3.84 \approx 4.00$ m. y para la capa secundaria $E= 1.78 \approx 2.00$ m.

En (USACE, 1984), se muestra una ecuación para calcular el número de elementos en el talud (ver ec. 4.1.2.d):

$$N = nK_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_s}{W} \right)^{2/3} A \quad \dots \text{(ec. 4.1.2.d)}$$

Las variables de las ecuaciones 4.1.2.a, 4.1.2.b, 4.1.2.c y 4.1.2.d son: W peso de los elementos de la coraza (toneladas), n número de elementos o capas, K_{Δ} coeficiente de capa (adimensional), γ_s peso específico del elemento (ton/m^3), H_d altura de ola de diseño (m), α ángulo del talud de la estructura con respecto a la horizontal (grados), P porosidad (porcentaje), A área de capa (generalmente un área unitaria de 10 a 100 m^2), K_D coeficiente de estabilidad (adimensional), γ_w peso específico del agua de mar (ton/m^3), B ancho de corona (metros), E espesor de capa (metros).

Para obtener el nivel de coronamiento de la estructura, se deberá determinar el nivel del ascenso máximo del oleaje sobre el talud lado mar (run-up) el cual es un parámetro muy discutido entre los investigadores, para lo cual se tuvo que recurrir a varios criterios, entre los cuales están: Miche (1944), Hunt (1954), Battjes (1974), Gunbak (1976), Colman (1986), Ahrens (1988), Per Brunn (1989), Scout (1992), obteniendo diversos resultados que variaron entre 5 cm. y 40 cm. (2 m. y 16 m. en prototipo respectivamente), por lo que se propuso de acuerdo a las restricciones geométricas del canal de oleaje un nivel de run-up de 20 cm. (8 m.) (Brunn, 1985), (USACE, 1984), (Pilarczyk, 1996).

Así, el nivel de coronamiento de la estructura es igual a la suma del nivel de run-up y la profundidad de desplante, cabe aclarar que solo se consideran estos por ser las variables que intervienen sobre el modelo, ya que su diseño no fue tomado de alguno ya existente en la realidad (ver ec. 4.1.2.e):

$$\text{Nivel de coronamiento} = 20 \text{ cm.} + 30 \text{ cm.} = 50 \text{ cm.} \quad \dots \text{(ec. 4.1.2.e)}$$



De acuerdo con lo anterior, se presenta la tabla 4.1.2.1 donde se puede apreciar con mayor claridad la relación de estos parámetros entre el modelo y el prototipo.

PARÁMETRO	PROTOTIPO			MODELO		
	Real	25%	-25%	Real	25%	-25%
Peso de los elementos +- 25%						
Coraza	12 ton.	15 ton.	9 ton.	187.50 g.	234.38 g.	140.53 g.
Capa secundaria	1.2 ton.	1.5 ton.	0.9 ton.	18.75 g.	23.44 g.	14.10 g.
Altura de la ola de diseño	5.0 m.			12.50 cm.		
Ancho de corona						
Coraza	4.0 m.			10.0 cm.		
Capa secundaria	2.0 m.			5.0 cm.		
Espesor de las capas						
Coraza	4.0 m.			10.0 cm.		
Capa secundaria	2.0 m.			5.0 cm.		
Run- up	8 m.			20 cm.		
Nivel de coronamiento	20 m.			50 cm.		

Tabla 4.1.2.1 Relación de parámetros de diseño, modelo- prototipo.

Después de haber realizado el diseño de la estructura se continuó con la elaboración de los escantillones en papel ilustración que servirán como guía en el proceso constructivo de las secciones de los rompeolas (ver figura 4.1.2.1).



Fig. 4.1.2.1 Trazo de los escantillones.

A continuación, se trazaron con cinta adhesiva las líneas correspondientes a la sección geométrica de la estructura a construir.

Posteriormente, se le dio mantenimiento al amortiguador de pendiente simple, desarmándolo para quitarle el óxido acumulado en los marcos y malla ciclónica, para posteriormente aplicarles una base de pintura primaria para herrería y pintura



de aceite color negra en ambas caras de los marcos y mallas, limpiando sus fibras con una compresora de aire.

Una vez armado el amortiguador, se marcó dentro del canal la pendiente correspondiente, colocándose el tezonle en el extremo y por abajo de donde se ubicará el amortiguador (ver figura 4.1.2.2).



Fig. 4.1.2.2 Amortiguador de oleaje.

Una vez habilitado el canal y el amortiguador, fue necesario recolectar el material pétreo que conformaría el cuerpo de las secciones del rompeolas a reproducir (ver figura 4.1.2.2) y se continuó con el triturado del material.

Finalmente, se realizó la clasificación utilizando cucharones, charolas, básculas y cribas (1/2", 3/4", 1/8"), cabe mencionar que las rocas utilizada para la coraza y capa secundaria se pesó una por una, para determinar cuales se encontraban dentro del rango de pesos que se obtuvo de la escala de pesos.

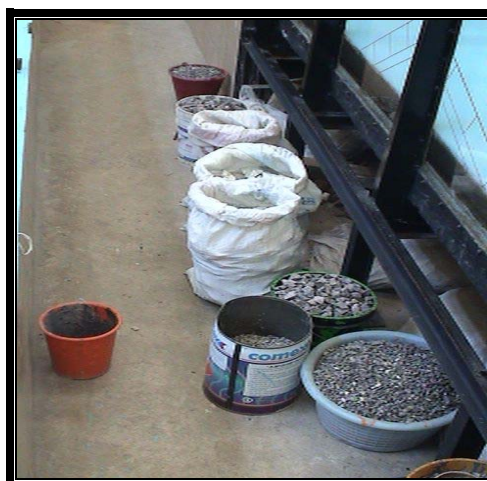


Fig. 4.1.2.2 Clasificación del material pétreo.



Una vez concluidas estas actividades, se prosiguió a pintar los elementos que conformarían la coraza, con el fin de detectar el movimiento de los elementos y poder obtener el grado de daño que presentó la estructura, para lo cual se dividió en cuatro franjas de 32 cm. en el talud 2:1 y cuatro de 21.5 cm. en el talud 1.5:1. Se obtuvieron un total de 569 piezas de coraza para el talud 1.5:1 (95 en la franja blanca, 130 en la franja verde, 128 en la franja roja, 216 en la franja azul) y 751 piezas de coraza para el talud 2:1 (144 en la franja blanca, 178 en la franja verde, 166 en la franja roja, 263 en la franja azul) para el talud lado mar.

En primer lugar se colocó el material del núcleo (ver figura 4.1.2.3), posteriormente el material de capa secundaria y por ultimo los elementos de coraza (ver figura 4.1.4).



Fig. 4.1.2.3 Colocación del núcleo.



Fig. 4.1.2.4 Colocación de la capa secundaria y de coraza.



4.2 Calibración

Se entiende por calibración, al establecer con exactitud la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que mide con él.

Para llevar a cabo el estudio, se empezó por calibrar los sensores de oleaje que se utilizarían en la medición de éste (en este caso fueron tres), lo primero es poner en funcionamiento el ológrafo y el ajuste de los sensores en éste mediante una aguja la cual servirá para centrar y fijarlos en una misma frecuencia, el siguiente paso es iniciar una de las computadoras, la cual se en carga de convertir las señales analógicas que envían los sensores a digitales y así obtener la impresión de las mediciones.

En la computadora se etiquetan y marcan los sensores que arriba se mencionaron, así como aquellos que la computadora tiene como fijos para conocer de ambos sus lecturas, posteriormente se realiza una secuencia en la cual se dibuja el perfil a reproducir, primeramente se toman lecturas de los sensores al nivel en que estarán colocados en toda la medición (estableciéndose esta posición como cero), posteriormente se suben los sensores a una longitud de 1.60 m. en prototipo, o sea 4 cm. en modelo (siendo este punto la cresta), se regresan a su posición original (siendo cero nuevamente), se bajan los sensores a una longitud a -1.60 m., o sea -4 cm. en modelo (este punto será el valle), terminando de nuevo en su nivel (o sea cero), el ascenso y descenso del sensor depende de la altura de ola máxima que se seleccionó, además estos deben estar referenciados a las especificaciones admitidas por el canal y el tirante que se utilizara en los ensayos, en cada uno de estos puntos se monitorea y se establecen las lecturas definitivas de la calibración para cada sensor, para que la calibración sea satisfactoria dependerá de que no hayan variaciones en el voltaje para obtener lecturas que estén de acuerdo con lo que admite el programa de medición de la computadora.

Una vez que se ha concluido con esta secuencia y las lecturas resultan aceptables, se realiza la instrucción de realizar las gráficas de regresión para cada uno de los sensores con las lecturas obtenidas en cada punto del perfil trazado y así obtener coeficientes de correlación para cada uno de ellos, los cuales deberán estar próximos a 1, cuando las gráficas sean satisfactorias, se imprimen los resultados y será la calibración con la que se trabajará en la medición del oleaje en el estudio (los resultados de la calibración se muestran en el anexo de esta tesis).

4.2.1 Programa de ensayos

Para llevar a cabo las pruebas en el modelo, se estableció el siguiente programa de ensayos (ver tabla 4.2.1.1):



Número de señal	T _{prototipo} (seg.)	T _{modelo} (seg.)	H _{prototipo} (m.)	H _{modelo} (m.)
1	7.27	1.15	3.90	9.75
2	7.58	1.20	3.90	9.75
3	7.58	1.20	4.20	10.50
4	7.90	1.25	4.20	10.50
5	7.90	1.25	4.50	11.25
6	8.22	1.30	4.50	11.25
7	8.22	1.30	4.80	12.00
8	8.54	1.35	4.80	12.00
9	8.54	1.35	5.20	13.00
10	8.85	1.40	5.20	13.00
11	8.85	1.40	5.60	14.00
12	9.17	1.45	5.60	14.00
13	9.17	1.45	5.90	14.75
14	9.49	1.50	5.90	14.75
15	9.49	1.50	6.20	15.50
16	9.81	1.55	6.20	15.50
17	9.81	1.55	6.50	16.25
18	10.13	1.60	6.50	16.25

Tabla 4.2.1.1 Programa de ensayos.

Nota: Las alturas y periodos de oleaje presentados son para condiciones de oleaje regular.

4.3 Condiciones y Procedimiento de ensayos

En la ejecución de las pruebas del modelo, se establecieron las siguientes condiciones de ensayo:

4.3.1 Condiciones de los ensayos

- En todos los ensayos se utilizó oleaje regular.
- En todos los ensayos se reprodujo oleaje durante 10 minutos; de acuerdo con lo probado por Thomas Jensen y otros investigadores en 1996, donde retoma para su estudio trabajos realizados por Vidal, en 1995, sobre daño en rompeolas bajo oleaje regular, en donde se establece que para que éste exista se deberá cubrir un rango de 300 a 600 olas (dependiendo del periodo) en una serie, para que se observe el daño a través de la incidencia de este tipo de oleaje y que se cubre en el tiempo arriba establecido (Jensen, 1996).
- En todos los ensayos se midió el coeficiente de reflexión.



- En todos los ensayos se midió el oleaje en tres secciones diferentes del canal (aguas profundas, intermedias y reducidas).

4.3.2 Procedimiento de los ensayos

Con el objeto de conocer el grado de reflexión de los rompeolas y en caso dado de tomarlo en cuenta en la interpretación de los resultados, se procede de la siguiente manera:

- Se colocaron tres sensores de oleaje entre el generador de oleaje y el rompeolas, a una distancia mayor de una longitud de ola que esta en función del periodo de oleaje correspondiente al ensayo y separados entre si de acuerdo con el periodo del oleaje de ensayo.
- Se generó oleaje y se midió la energía de la ola incidente y la reflejada en la estructura por cada uno de los tres sensores de oleaje.
- Se calculó el coeficiente de reflexión promediando las energías del oleaje incidente y reflejado, evaluadas de los datos transmitidos por los sensores al equipo de computo y a través del software con que cuenta este equipo.

4.3.3 Ensayos para medir el daño en los rompeolas contra oleaje incidente

Estos se llevaron a cabo mediante el siguiente proceso:

- Se generó oleaje para cada uno de los ensayos, durante un tiempo de 10 minutos, ya que es el tiempo representativo, de acuerdo a Thomas Jensen y otros investigadores en 1996.
- Con base en los datos de oleaje transmitidos por los sensores y el equipo de cómputo, se calcularon las alturas y periodos de ola significativa para cada ensayo.
- Se midió el daño presentado en la estructura, cuantificando los elementos de enrocamiento desplazados de su franja correspondiente.

4.3.4 Arreglo del modelo

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de oleaje angosto con dimensiones de 24 m. de longitud, 0.90 m. de profundidad y 0.67 m. de ancho, perteneciente al Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Unidad Zacatenco, el cual cuenta en uno de sus extremos con un generador de oleaje regular e irregular, mismo que está dotado de una paleta generadora de oleaje de movimiento traslacional accionado mediante un gato hidráulico, cuyo control se efectúa por procedimientos electrónicos controlados por computadora.



Las dimensiones del canal de oleaje y la disposición del modelo se muestran en la figura 4.3.4.1.

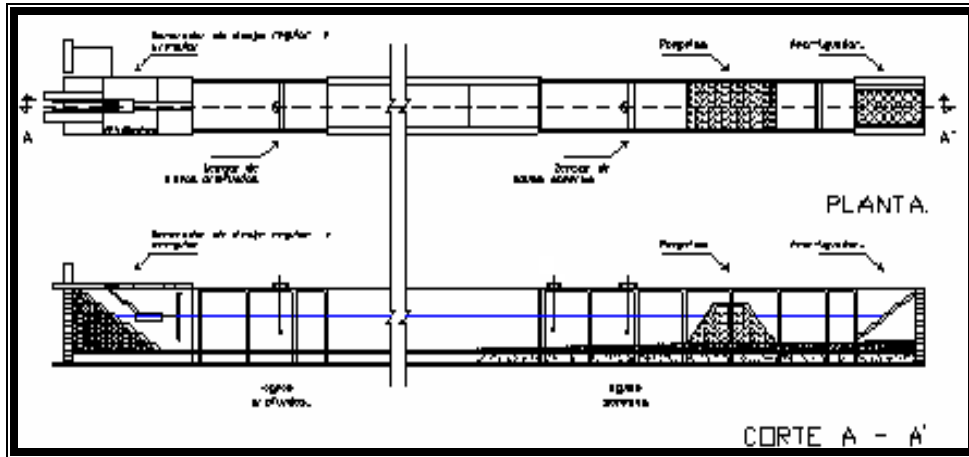


Fig. 4.3.4.1 Canal de oleaje angosto con generador de oleaje hidráulico

4.4 Instrumentación

Para medir el oleaje incidiendo sobre la estructura (rompeolas), se colocaron dos sensores de oleaje de tipo capacitivo para medir el oleaje en aguas profundas (pie del generador) y en las cercanías de la estructura (oleaje incidente). Las señales analógicas transmitidas por los sensores de oleaje, se amplificaron a través de un ológrafo, para luego enviarse a un convertidor de señales A/D (Analógico/Digital) con que cuenta el equipo de cómputo, ya digitalizadas se analizaron con un programa de cómputo y se enviaron a una impresora (ver figura 4.4.1) (mas detalles del equipo de computo y del generador de oleaje se muestran en el anexo).



Fig. 4.4.1 Equipo de cómputo para control del generador y de medición de oleaje.



4.5 Ensayos en modelo

Los ensayos en modelo se desarrollaron siguiendo la secuencia establecida previamente en el programa de ensayos, por lo que respecta a la medición del oleaje en cada uno de los 18 ensayos programados para cada sección de rompeolas, se obtuvieron un total de 36 mediciones; en las siguientes tablas (ver tablas 4.5.1 y 4.5.2), se presenta una relación de resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados.

TABLA DE ENSAYOS CON OLEAJE REGULAR												
TALUD 1.5:1												
SERIE	ENSAYO	ALTURA SIGNIFICANTE		PERIODO DE LA OLA		NUMERO DE OLAS ACUMULADAS	NUMERO DE ROCAS ACUMULADAS	% DE DAÑO	DAÑO POR FRANJA			
		Hs		T					BLANCO	VERDE	ROJO	AZUL
		MODELO (cm.)	PROTOTIPO (m)	MODELO (seg.)	PROTOTIPO (seg.)							
1	1	9.75	3.90	1.15	7.27	532	0	0	0	0	0	0
	2			1.20	7.58	510	0	0	0	0	0	0
2	1	10.50	4.20	1.20	7.58	507	0	0	0	0	0	0
	2			1.25	7.90	490	0	0	0	0	0	0
3	1	11.25	4.50	1.25	7.90	490	0	0	0	0	0	0
	2			1.30	8.22	461	0	0	0	0	0	0
4	1	12.00	4.80	1.30	8.22	461	1	0.20	0	0	1	0
	2			1.35	8.54	452	1	0.20	0	0	0	0
5	1	13.00	5.20	1.35	8.54	452	1	0.20	0	0	0	0
	2			1.40	8.85	445	1	0.20	0	0	0	0
6	1	14.00	5.60	1.40	8.85	445	4	0.70	0	1	2	0
	2			1.45	9.17	422	10	1.76	0	3	3	0
7	1	14.75	5.90	1.45	9.17	422	24	4.22	0	4	10	0
	2			1.50	9.49	411	44	7.73	0	1	13	6
8	1	15.50	6.20	1.50	9.49	402	56	9.84	0	3	6	3
	2			1.55	9.81	386	63	11.07	0	0	1	6
9	1	16.25	6.50	1.55	9.81	384	65	11.42	0	0	2	0
	2			1.60	10.13	366	69	12.13	0	0	4	0
Total de roca		569		Duración por ensayo de 10 min.								
Total de roca desplazada		69										
Total de roca desplazada por franja				Blanco= 0		Verde= 12		Rojo= 42		Azul= 15		

Tabla 4.5.1 Ensayos para medir el daño del rompeolas sometido a oleaje regular para un talud 1.5:1.



TABLA DE ENSAYOS CON OLEAJE REGULAR TALUD 2:1												
SERIE	ENSAYO	ALTURA SIGNIFICANTE		PERIODO DE LA OLA		NUMERO DE OLAS ACUMULADAS	NUMERO DE ROCAS ACUMULADAS	% DE DAÑO	DAÑO POR FRANJA			
		Hs		T					BLANCO	VERDE	ROJO	AZUL
		MODELO (cm.)	PROTOTIPO (m)	MODELO (seg.)	PROTOTIPO (seg.)							
1	1	9.75	3.90	1.15	7.27	533	0	0	0	0	0	0
	2			1.20	7.58				509	0	0	0
2	1	10.50	4.20	1.20	7.58	509	0	0	0	0	0	0
	2			1.25	7.90				490	0	0	0
3	1	11.25	4.50	1.25	7.90	490	0	0	0	0	0	0
	2			1.30	8.22				461	1	0.13	0
4	1	12.00	4.80	1.30	8.22	460	1	0.13	0	0	0	0
	2			1.35	8.54				452	1	0.13	0
5	1	13.00	5.20	1.35	8.54	452	1	0.13	0	0	0	0
	2			1.40	8.85				444	1	0.13	0
6	1	14.00	5.60	1.40	8.85	444	1	0.40	0	0	0	0
	2			1.45	9.17				420	6	0.80	0
7	1	14.75	5.90	1.45	9.17	420	15	2.00	1	4	4	0
	2			1.50	9.49				391	19	2.53	0
8	1	15.50	6.20	1.50	9.49	393	21	2.80	0	1	1	0
	2			1.55	9.81				386	21	2.80	0
9	1	16.25	6.50	1.55	9.81	386	21	2.80	0	0	0	0
	2			1.60	10.13				264	30	3.99	0
Total de roca		751		Duración por ensayo de 10 min.								
Total de roca desplazada		30										
Total de roca desplazada por franja		Blanco= 1		Verde= 9		Rojo= 20		Azul= 0				

Tabla 4.5.2 Ensayos para medir el daño del rompeolas sometido a oleaje regular para un talud 2:1.

4.5.1 Observaciones en los ensayos

A través de algunas fotografías, se presenta una descripción de las observaciones que se detectaron en cada una de las pruebas realizadas durante la fase experimental del estudio.

4.6 Rompeolas ensayados bajo incidencia de oleaje regular

Se presentan a continuación las observaciones de los ensayos para las dos secciones del rompeolas propuestas inicialmente, sometida a oleaje regular en el canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Unidad Zacatenco.



4.6.1 Rompeolas talud 1.5:1 lado mar

Ensayo 1 Serie 1 $H_p = 3.90$ m. $T_p = 7.27$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso al final de la franja roja y descenso a 2 cm. de la franja verde. Se presenta una rompiente de oleaje incipiente sobre el rompeolas, movimiento en una roca color rojo, aunque llega a estabilizarse a medida que transcurre el ensayo. *No hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 1 $H_p = 3.90$ m. $T_p = 7.58$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso al final de la franja roja y descenso a 2 cm. de la franja verde. Se aprecia nuevamente una rompiente incipiente del oleaje sobre el rompeolas, movimiento de una roca roja, llegando a la parte final del ensayo a estabilizarse, *no existiendo desplazamientos.*

Ensayo 1 Serie 2 $H_p = 4.20$ m. $T_p = 7.58$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 1 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. de la franja roja. Nuevamente se aprecia una rompiente de tipo incipiente, generación de burbujas de aire al inicio de la franja roja, *no hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 2 $H_p = 4.20$ m. $T_p = 7.90$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 1 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. de la franja roja. *No hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 1 Serie 3 $H_p = 4.50$ m. $T_p = 7.90$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 3 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. al inicio de la franja roja. No se aprecia movimiento de rocas, generación de burbujas de aire en toda la franja roja. *No hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 3 $H_p = 4.50$ m. $T_p = 8.22$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso del oleaje sobre el talud a 9 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. de la franja roja. Se aprecia una rompiente del oleaje con mayor energía y con mayor impacto sobre la franja roja. Se presenta movimiento en dos rocas verdes y una roja, *no hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 1 Serie 4 $H_p = 4.80$ m. $T_p = 8.22$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso del oleaje sobre el talud a 9 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. de la franja verde. Movimiento registrado de dos rocas verdes y una roja, presentándose rompimiento del oleaje, generando burbujas de aire sobre la franja roja. Se presentó desplazamiento de una roca roja. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 2 Serie 4 $H_p = 4.80$ m. $T_p = 8.54$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso del oleaje a 11 cm. de la franja azul y descenso a 6 cm. de la franja verde. Movimiento de dos rocas (verde y roja), sin existir desplazamientos. No hubo desplazamiento de rocas. *Acumulado de 1 roca desplazada.*



Ensayo 1 Serie 5 Hp= 5.20 m. Tp= 8.54 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 12 cm. de la franja azul y descenso a 7 cm. de la franja verde. Se presenta movimiento de tres rocas (dos verdes y una roja), sin desplazarse. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 2 Serie 5 Hp= 5.20 m. Tp= 8.85 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre el talud a 14 cm. de la franja azul y descenso a 5 cm. de la franja verde. Se presenta rompimiento del oleaje en la franja roja, con salpicadura de agua, continúa el movimiento de dos rocas (verde y roja) sin ocurrir desplazamientos. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 1 Serie 6 Hp= 5.60 m. Tp= 8.85 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre el talud a 15 cm. de la franja azul y descenso a 6 cm. de la franja verde. Movimiento de dos rocas verdes. Rompimiento del oleaje sobre la franja roja siendo estas de mayor impacto, se presentó desplazamiento de dos rocas rojas y una verde. *Acumulado de 4 rocas desplazadas.*

Ensayo 2 Serie 6 Hp= 5.60 m. Tp= 9.17 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 17 cm. de la franja azul y descenso a 7 cm. de la franja verde. Movimiento de tres rocas rojas, cuatro verdes y tres blancas. Desplazamiento de tres rocas rojas y tres verdes. *Acumulado de 10 rocas desplazadas.*

Ensayo 1 Serie 7 Hp= 5.90 m. Tp= 9.17 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 18 cm. de la franja azul y descenso a 9 cm. de la franja verde. Movimiento de tres rocas verdes y una roja. Desplazamiento de diez rocas rojas, cuatro verdes. *Acumulado de 24 rocas desplazadas.*

Ensayo 2 Serie 7 Hp= 5.90 m. Tp= 9.49 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre la corona del rompeolas y descenso a 10 cm. de la franja verde. Se presenta movimiento de varias rocas en las franjas roja, verde y blanca, desplazándose trece rocas rojas, una verde y seis azules. *Acumulado de 44 rocas desplazadas.*

Ensayo 1 Serie 8 Hp= 6.20 m. Tp= 9.49 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre la corona del rompeolas y descenso a 11 cm. de la franja verde. Movimiento de algunas rocas. Desplazamiento de seis rocas rojas, tres verdes y tres azules. *Acumulado de 56 rocas desplazadas.*

Ensayo 2 Serie 8 Hp= 6.20 m. Tp= 9.81 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre la corona del rompeolas y descenso a 12 cm. de la franja verde. Se registra movimiento de rocas, desplazándose una roca roja y seis azules. *Acumulado de 63 rocas desplazadas (ver figura 4.6.1.1).*



Fig. 4.6.1.1 Rompeolas Talud 1.5:1 Ensayo 2 Serie 8.

Ensayo 1 Serie 9 Hp= 6.50 m. Tp= 9.81 s. Tiempo= 10 min.

Ascenso del oleaje sobre la corona del rompeolas y descenso a 14 cm. de la franja verde. Se registra movimiento de rocas en las franjas verde, roja y blanca, desplazándose dos rocas rojas. *Acumulado de 65 rocas desplazadas.*

Ensayo 2 Serie 9 Hp= 6.50 m. Tp= 10.13 s. Tiempo= 10 min.

Se presenta rebase del oleaje sobre la estructura. Se registra movimiento de rocas en las franjas verde, roja y blanca, incluso nuevamente en rocas fuera de la estructura. Se presenta el desplazamiento de cuatro rocas rojas. *Acumulado de 69 rocas desplazadas* (ver figura 4.6.1.2).

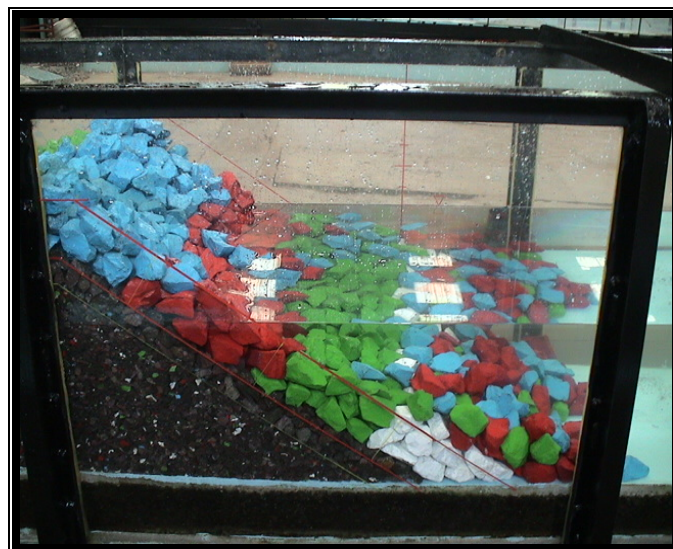


Fig. 4.6.1.2 Rompeolas Talud 1.5:1 Ensayo 2 Serie 9.



4.6.2 Rompeolas talud 2:1 lado mar

Ensayo 1 Serie 1 $H_p = 3.90$ m. $T_p = 7.27$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 3 cm. de la franja azul y descenso al inicio de la franja roja. Se presenta una rompiente de oleaje incipiente sobre el rompeolas, movimiento en dos rocas (color verde y roja), una de ella llega a estabilizarse. *No hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 1 $H_p = 3.90$ m. $T_p = 7.58$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 5 cm. de la franja azul y descenso inicio de la franja roja. Se aprecia nuevamente una rompiente incipiente del oleaje sobre el rompeolas, movimiento de una roca color rojo, llegando a la parte final del ensayo a estabilizarse, *sin presentarse desplazamiento de rocas.*

Ensayo 1 Serie 2 $H_p = 4.20$ m. $T_p = 7.58$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 7 cm. de la franja azul y descenso al inicio de la franja roja. Nuevamente se aprecia una rompiente de tipo incipiente, generación de burbujas de aire al inicio de la franja roja, movimiento de dos rocas (verde y roja detectadas en ensayos anteriores), *no hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 2 $H_p = 4.20$ m. $T_p = 7.90$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 6 cm. de la franja azul y descenso al inicio de la franja roja. El movimiento de la roca verde ha disminuido, al igual que el de la roca roja. Rompiente incipiente, *no hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 1 Serie 3 $H_p = 4.50$ m. $T_p = 7.90$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso a 8 cm. de la franja azul y descenso a 1 cm. al inicio de la franja roja. Se aprecia movimiento de dos rocas verdes y dos rojas, generación de burbujas de aire en toda la franja roja. *No hay desplazamiento de rocas.*

Ensayo 2 Serie 3 $H_p = 4.50$ m. $T_p = 8.22$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso del oleaje sobre el talud a 10 cm. de la franja azul y descenso a 2 cm. de la franja verde. Se aprecia una rompiente del oleaje con mayor energía y con mayor impacto sobre la franja roja. Se presenta movimiento en tres rocas (2 rojas y 1 verde), desplazándose así una de las rocas rojas. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 1 Serie 4 $H_p = 4.80$ m. $T_p = 8.22$ s. Tiempo = 10 min.

Ascenso del oleaje sobre el talud a 11 cm. de la franja azul y descenso a 4 cm. de la franja verde. Movimiento registrado (3 rocas rojas y 1 verde), presentándose rompimiento del oleaje con alturas de ola mas grandes, generando burbujas de aire sobre la franja roja. No hubo desplazamiento de rocas. *Acumulado de 1 roca desplazada.*



Ensayo 2 Serie 4 Hp= 4.80 m. Tp= 8.54 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 11 cm. de la franja azul y descenso a 6 cm. de la franja verde. Movimiento de rocas (1 verde y 1 roja), sin existir desplazamientos. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 1 Serie 5 Hp= 5.20 m. Tp= 8.54 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 12 cm. de la franja azul y descenso a 7 cm. de la franja verde. Se presenta movimiento de rocas, mismas que en el ensayo anterior, sin desplazarse. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 2 Serie 5 Hp= 5.20 m. Tp= 8.85 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre el talud a 14 cm. de la franja azul y descenso a 5 cm. de la franja verde. Se presenta rompimiento del oleaje en la franja roja, con salpicadura de agua, continua el movimiento en las rocas detectadas en ensayos anteriores sin ocurrir desplazamientos. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 1 Serie 6 Hp= 5.60 m. Tp= 8.85 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre el talud a 15 cm. de la franja azul y descenso a 6 cm. de la franja verde. Movimiento de dos rocas verdes. Rompimiento del oleaje sobre la franja roja siendo estas de mayor impacto, aunque no se presentó desplazamiento de rocas. *Acumulado de 1 roca desplazada.*

Ensayo 2 Serie 6 Hp= 5.60 m. Tp= 9.17 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 17 cm. de la franja azul y descenso a 7 cm. de la franja verde. Movimiento de tres rocas rojas, cuatro verdes y tres blancas. Desplazamiento de tres rocas rojas y dos verdes. *Acumulado de 6 rocas desplazadas.*

Ensayo 1 Serie 7 Hp= 5.90 m. Tp= 9.17 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 19 cm. de la franja azul y descenso a 9 cm. de la franja verde. Movimiento de seis rocas verdes y dos blancas. Desplazamiento de cuatro rocas rojas, cuatro verdes y una blanca. *Acumulado de 15 rocas desplazadas.*

Ensayo 2 Serie 7 Hp= 5.90 m. Tp= 9.49 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje sobre el talud a 20 cm. de la franja azul y descenso a 9 cm. de la franja verde. Se presenta movimiento de varias rocas en las franjas roja, verde y blanca, desplazándose dos rocas rojas y dos verdes. *Acumulado de 19 rocas desplazadas.*

Ensayo 1 Serie 8 Hp= 6.20 m. Tp= 9.49 s. Tiempo= 10 min.
Ascenso del oleaje a 22 cm. de la franja azul y descenso a 11 cm. de la franja verde. Movimiento de algunas rocas. Desplazamiento de una roca roja y una verde. *Acumulado de 21 rocas desplazadas.*



Ensayo 2 Serie 8 $H_p = 6.20$ m. $T_p = 9.81$ s. Tiempo = 10 min.
Ascenso del oleaje a 25 cm. de la franja azul y descenso a 14 cm. de la franja verde. Se presenta nuevamente movimiento de algunas rocas, no se presenta desplazamiento de rocas. *Acumulado de 21 rocas desplazadas* (ver figura 4.6.2.1).



Fig. 4.6.2.1 Rompeolas Talud 2:1 Ensayo 2 Serie 8.

Ensayo 1 Serie 9 $H_p = 6.50$ m. $T_p = 9.81$ s. Tiempo = 10 min.
Ascenso del oleaje a 26 cm. de la franja azul y descenso a 15 cm. de la franja verde. Se registra movimiento de rocas en las franjas verde, roja y blanca, incluso en rocas que están ya fuera de la estructura. No se presentó desplazamiento de rocas. *Acumulado de 21 rocas desplazadas*.

Ensayo 2 Serie 9 $H_p = 6.50$ m. $T_p = 10.13$ s. Tiempo = 10 min.
Se presenta rebase del oleaje sobre la estructura. Se registra movimiento de rocas en las franjas verde, rojo y blanca, incluso nuevamente en rocas fuera de la estructura. Se presenta el desplazamiento de nueve rocas rojas. *Acumulado de 30 rocas desplazadas* (ver figura 4.6.2.2).

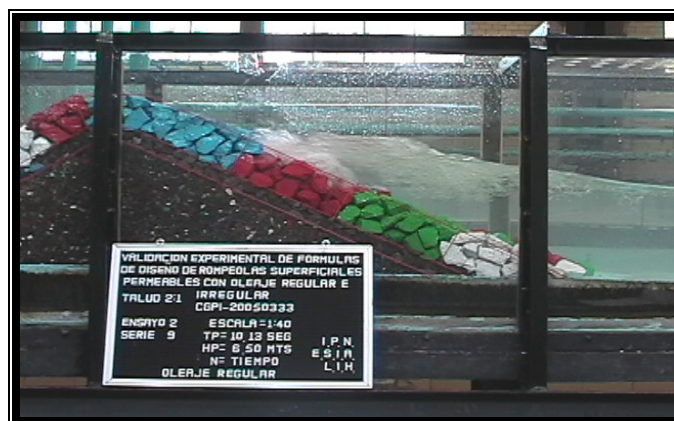


Fig. 4.6.2.2 Rompeolas Talud 2:1 Ensayo 2 Serie 9.



5. Procesamiento y Análisis de los resultados

5.1 Procesamiento de los resultados producto de los ensayos

Para llevar a cabo el procesamiento de los resultados producto de los ensayos para medir el daño del talud lado mar de los rompeolas, se realizaron una serie de hojas de cálculo por medio del programa Excel, en las cuales se relacionaron los diferentes parámetros correspondientes, con la finalidad de obtener los porcentajes de daño, el Número de Iribarren y la Función de Estabilidad de cada uno de los rompeolas ensayados y que se muestran a continuación (ver tabla 5.1.1 y 5.1.2):

TABLA DE RESULTADOS TALUD 1.5:1											
SERIE	ENSAYO	ALTURA SIGNIFICANTE		PERIODO DE LA OLA		NÚMERO DE OLAS ACUMULADAS	% DE DAÑO	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE Hs	LONGITUD DE OLA Lo	NÚMERO DE IRIBARREN Ir	FUNCIÓN DE ESTABILIDAD Ψ
		Hs		T							
		MODELO (cm.)	PROTOTIPO (m)	MODELO (seg.)	PROTOTIPO (seg.)						
1	1	9.75	3.90	1.15	7.27	532	0	3.071	79.574	3.360	0.0564
	2			1.20	7.58	510	0	3.493	79.501	3.149	0.0554
2	1	10.50	4.20	1.20	7.58	507	0	3.940	71.941	2.820	0.0512
	2			1.25	7.90	490	0	3.958	67.878	2.733	0.0494
3	1	11.25	4.50	1.25	7.90	490	0	4.240	71.707	2.714	0.0490
	2			1.30	8.22	461	0	4.277	64.177	2.557	0.0448
4	1	12.00	4.80	1.30	8.22	461	0.20	4.363	68.275	2.611	0.0463
	2			1.35	8.54	452	0.20	5.250	81.181	2.595	0.0459
5	1	13.00	5.20	1.35	8.54	452	0.20	5.258	77.513	2.534	0.0441
	2			1.40	8.85	445	0.20	5.341	87.108	2.665	0.0478
6	1	14.00	5.60	1.40	8.85	445	0.70	5.466	91.545	2.701	0.0487
	2			1.45	9.17	422	1.76	5.471	81.338	2.545	0.0444
7	1	14.75	5.90	1.45	9.17	422	4.22	5.516	77.513	2.474	0.0421
	2			1.50	9.49	411	7.73	5.517	87.024	2.621	0.0466
8	1	15.50	6.20	1.50	9.49	402	9.84	5.576	92.741	2.692	0.0484
	2			1.55	9.81	386	11.07	5.921	99.220	2.702	0.0487
9	1	16.25	6.50	1.55	9.81	384	11.42	6.737	95.953	2.491	0.0426
	2			1.60	10.13	366	12.13	7.103	93.176	2.390	0.0389

Duración por ensayo de 10 min.

Tabla 5.1.1 Resultados para el rompeolas talud 1.5:1.



Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

TABLA DE RESULTADOS TALUD 2:1											
SERIE	ENSAYO	ALTURA SIGNIFICANTE		PERIODO DE LA OLA		NÚMERO DE OLAS ACUMULADAS	% DE DAÑO	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE Hs	LONGITUD DE OLA Lo	NÚMERO DE IRIBARREN Ir	FUNCIÓN DE ESTABILIDAD Ψ
		Hs		T							
		MODELO (cm.)	PROTOTIPO (m)	MODELO (seg.)	PROTOTIPO (seg.)						
1	1	9.75	3.90	1.15	7.27	533	0	3.502	79.348	2.380	0.0298
	2			1.20	7.58	509	0	3.870	68.201	2.099	0.0263
2	1	10.50	4.20	1.20	7.58	509	0	3.871	79.348	2.264	0.0287
	2			1.25	7.90	490	0	4.107	71.941	2.093	0.0262
3	1	11.25	4.50	1.25	7.90	490	0	4.290	68.350	1.996	0.0244
	2			1.30	8.22	461	0.13	4.430	71.941	2.015	0.0248
4	1	12.00	4.80	1.30	8.22	460	0.13	4.839	64.101	1.820	0.0202
	2			1.35	8.54	452	0.13	5.225	77.586	1.927	0.0229
5	1	13.00	5.20	1.35	8.54	452	0.13	5.355	92.446	2.077	0.0260
	2			1.40	8.85	444	0.13	5.453	81.338	1.931	0.0230
6	1	14.00	5.60	1.40	8.85	444	0.40	5.537	77.659	1.873	0.0216
	2			1.45	9.17	420	0.80	5.651	92.138	2.019	0.0249
7	1	14.75	5.90	1.45	9.17	420	2.00	5.760	81.338	1.879	0.0217
	2			1.50	9.49	391	2.53	5.937	99.291	2.045	0.0254
8	1	15.50	6.20	1.50	9.49	393	2.80	6.212	96.247	1.968	0.0238
	2			1.55	9.81	386	2.80	6.287	86.797	1.858	0.0212
9	1	16.25	6.50	1.55	9.81	386	2.80	6.401	95.953	1.936	0.0231
	2			1.60	10.13	264	3.99	6.422	86.979	1.840	0.0207

Duración por ensayo de 10 min.

Tabla 5.1.2 Resultados para el rompeolas talud 2:1.

5.2 Análisis de resultados

Una vez que se obtuvieron los resultados de los ensayos, se realizó el análisis de los mismos, para lo cual se desarrollaron gráficas en donde se relacionaron los datos aportados por el estudio con los implementados por otros investigadores.

5.3 Graficación de resultados

La graficación de los resultados, se llevó a cabo a través del programa Excel y de los cuales se realiza un comparativo con lo presentado por otros investigadores como son las figuras 5.2.1 y 5.2.4.

El estudio que se tomo como referencia para realizar las gráficas de Daño vs. Número de olas fue el de la investigación de Thomas Jensen titulado *"Breakwater"*



Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

Stability under Regular and Irregular Wave Attack” (ver figura 5.2.1) (Jensen, 1996).

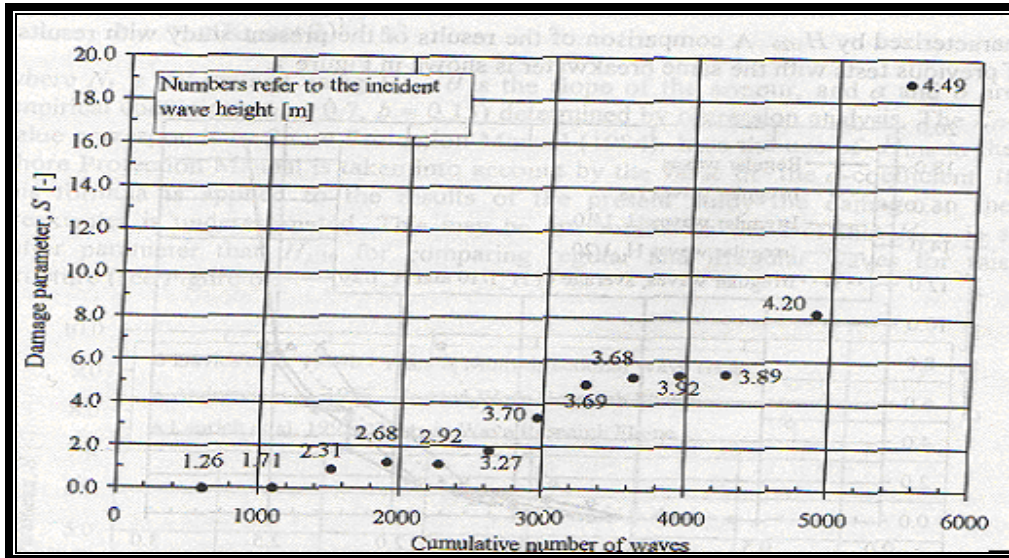


Fig. 5.2.1 Daño vs. Número de olas acumuladas (oleaje regular) (Jensen, 1996).

Los resultados obtenidos en este estudio para los taludes 1.5:1 y 2:1 (lado mar) se muestran en las figuras 5.2.2 y 5.2.3.

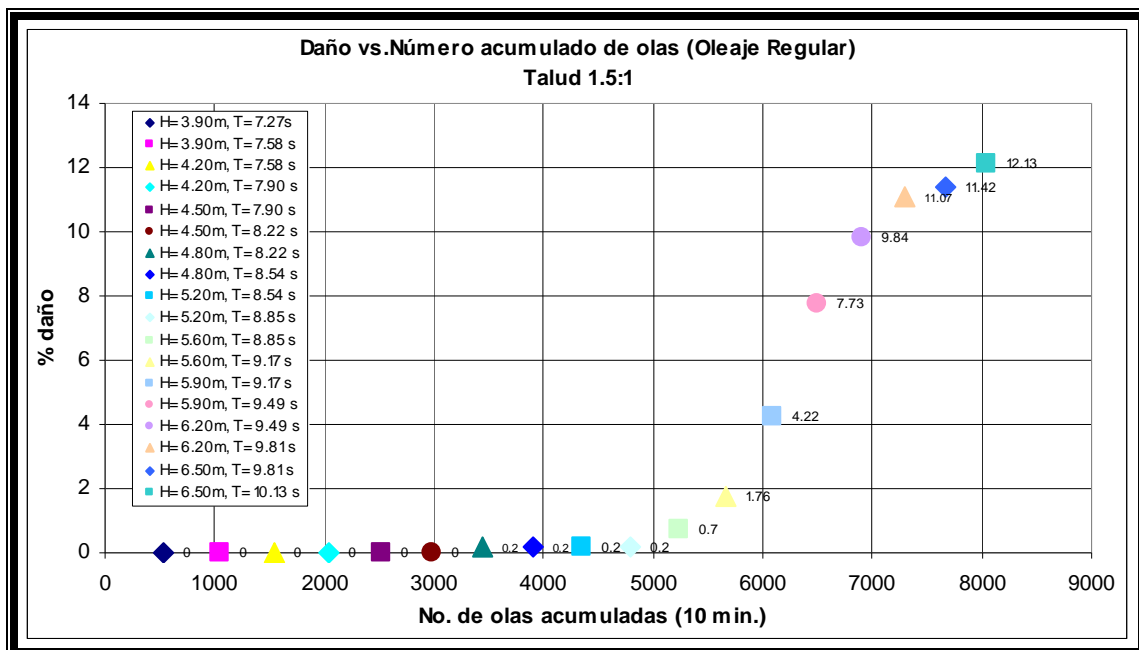


Fig. 5.2.2 Porcentaje de daño del rompeolas vs. Número de olas acumuladas (Talud 1.5:1).



Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

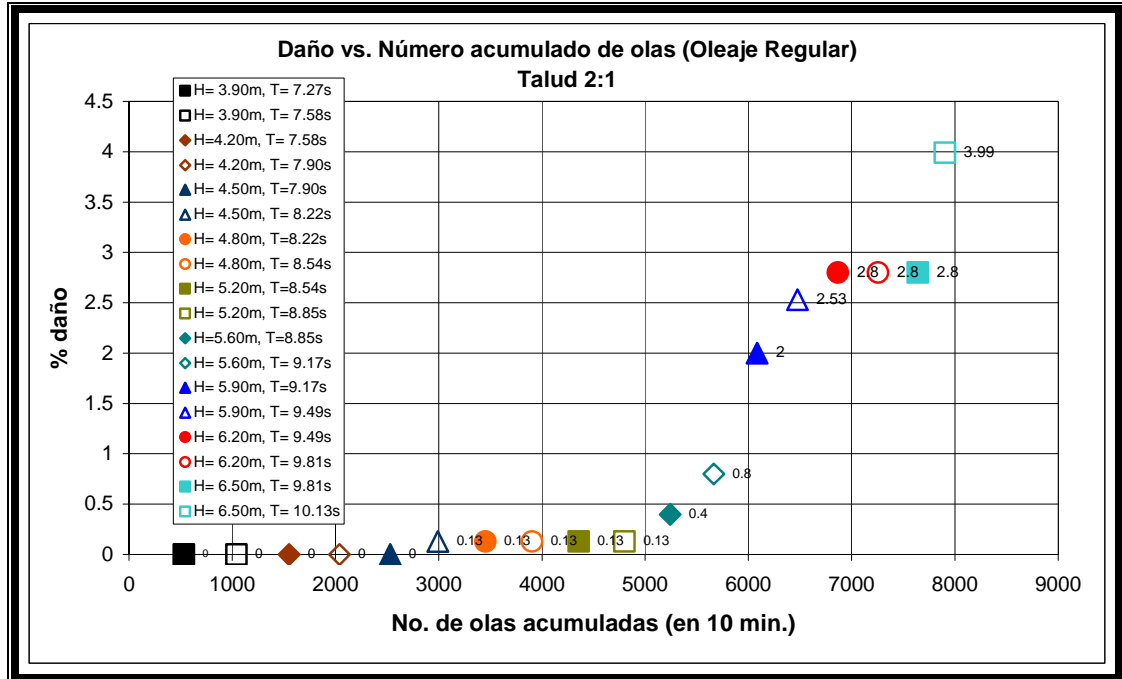


Fig. 5.2.3 Porcentaje de daño del rompeolas vs. Número de olas acumuladas (Talud 2:1).

Por lo que respecta a la elaboración de la gráfica de Función de Estabilidad vs. Número de Iribarren, fue tomada de la investigación de Ramón Iribarren en 1965, que se encuentra en el libro de Per Brunn *“Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection”* de 1982 (ver figura 5.2.4).

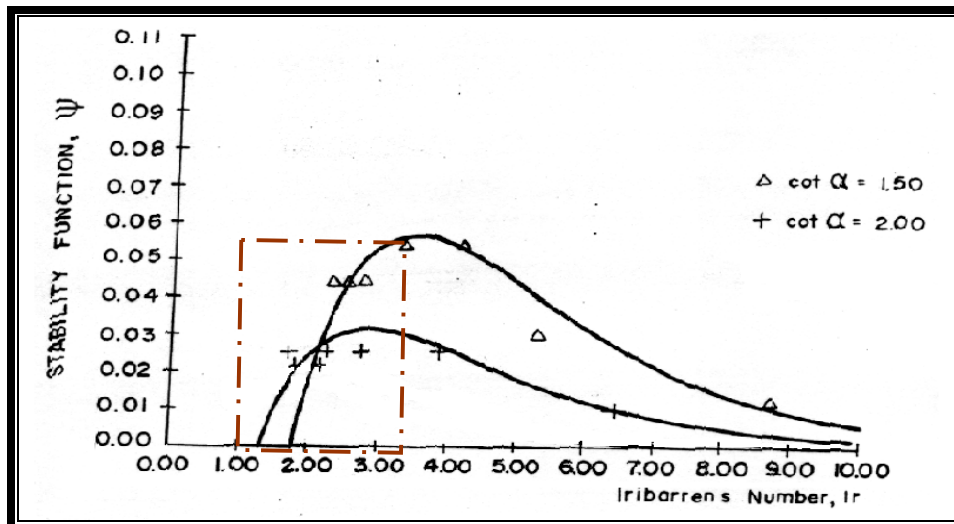


Fig. 5.2.4 Función de estabilidad para inicio de daño en rompeolas de enrocamiento realizada por Iribarren en 1965 (Brunn, 1982).



Capítulo 5. Procesamiento y Análisis de los resultados

En base a los resultados derivados de este estudio para los taludes 1.5:1 y 2:1 (lado mar), se obtuvo lo siguiente (ver figura 5.2.5):

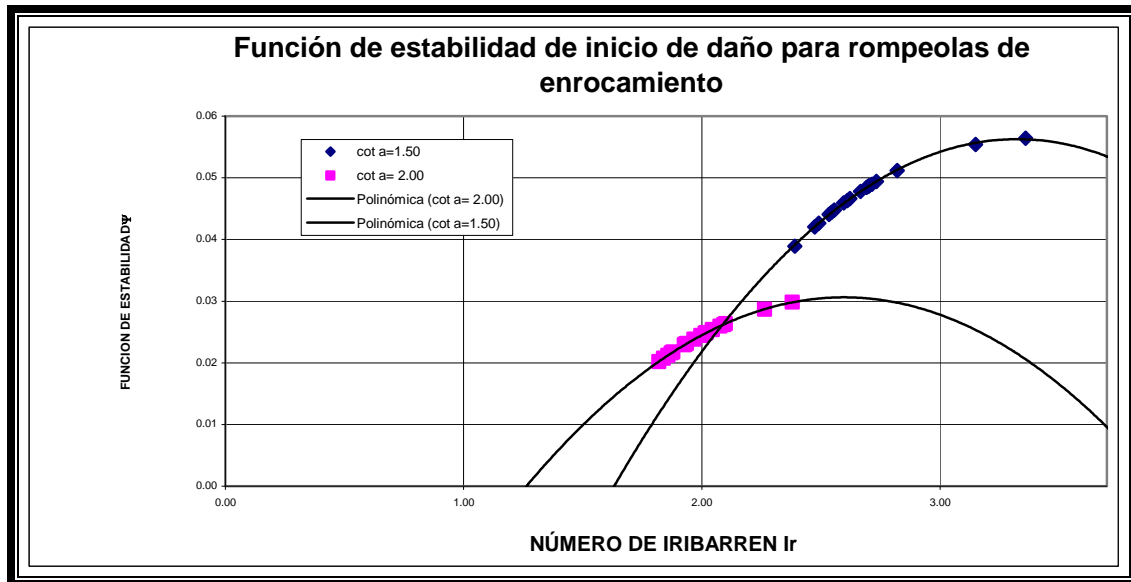


Fig. 5.2.5 Influencia del periodo de la ola en la estabilidad del rompeolas (taludes 1.5:1 y 2:1).

Como se puede observar hay gran semejanza entre los gráficos encontrados en el estado del arte (ver figuras 5.2.1 y 5.2.4) y los resultados graficados a partir de los ensayos realizados para ambos taludes de rompeolas (ver gráfico 5.2.2, 5.2.3 y 5.2.5).

5.4 Errores

Los errores que llegan a cometerse dentro de este tipo de estudios son muy comunes, ya que la reproducción exacta de los fenómenos que interactúan en modelos de rompeolas es de gran complejidad, así como aquellos que se encuentran lejos del alcance del investigador. Para el caso particular de este estudio se presentaron los siguientes errores:

- Debido a la clasificación tan específica del material de núcleo, originó la poca permeabilidad de la estructura (rompeolas) de lado mar al lado tierra, así como la transmisión del oleaje sobre esta.
- La variación de voltaje en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica, provocaba en ocasiones una baja o alta señal en el equipo de computo, interfiriendo en el buen funcionamiento en las lecturas para iniciar con los ensayos y en el desempeño del generador de oleaje presentando mayor o menor energía en la generación de oleaje.



6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Para analizar el Daño vs. Número de olas, se concluye lo siguiente al tomar en cuenta lo obtenido en las tablas 5.1.1 y 5.1.2:

- En ambas tablas se aprecia que para una misma altura de ola al presentarse dos diferentes periodos, el daño que percibe la estructura se incrementa (Ver Serie 6 Ensayos 1 y 2 para ambos taludes 1.5:1 y 2:1).
- El porcentaje total de daño al concluir el estudio para el talud 1.5:1 fue del 12%, siendo este mayor que para el 2:1 con un porcentaje total de daño del 4%, presentando una mayor estabilidad la segunda.
- A pesar de iniciar con desplazamiento de rocas en el talud 2:1 lado mar en la Serie 3 Ensayo 2 y para el talud 1.5:1 en la Serie 4 Ensayo 1, ambos presentan variación con respecto al porcentaje de daño a partir de la Serie 6.

Con base a las observaciones para las tablas (arriba señaladas) y lo plasmado en las figuras 5.2.2 y 5.2.3, se concluye que las fórmulas de diseño de rompeolas con oleaje regular deben tomar en consideración al periodo del oleaje correspondiente, para que el diseño sea el más adecuado.

Con respecto a la Función de Estabilidad vs. Número de Iribarren, considerando las tablas 5.1.1 y 5.1.2 se concluye lo siguiente:

- Las características del flujo en un talud rugoso permeable de un rompeolas, puede ser representado por el parámetro, conocido como Número de Iribarren. Consecuentemente, es razonable asumir que este parámetro tiene un papel muy importante en la estabilidad de rompeolas rugosos permeables a talud (de acuerdo a datos aportados por Iribarren en 1965).
- En la tabla 5.1.1 se puede observar que para el talud 1.5:1, lado mar la rompiente que se presentó fue de tipo ondulante (surging) y rodante (plunging), en la tabla 5.1.2, el talud 2:1, presentó una rompiente tipo rodante (plunging), por lo que se justifica que la primera haya presentado más daño debido a la presencia de más tipos de rompiente incidiendo sobre la estructura.
- Con esto se aprecia que en la figura 5.2.5, la Función de Estabilidad es mucho mayor para el talud 1.5:1 (al levantar más la curva de la Función de Estabilidad contra Número de Iribarren), en comparación al calculado para el talud 2:1 (en donde la curva es mucho más pequeña), por lo que se concluye que su comportamiento es notoriamente más estable a



Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

comparación del talud 1.5:1 (y en cuyos resultados pueden compararse en las tablas 5.1.1 y 5.1.2 para el talud 2:1).

- Cabe señalar que la gama que muestra la figura 5.2.4 en los valores para el Número de Iribarren es de $I_r = 1 - 10$, en comparación con lo obtenido (ver figura 5.2.5) donde la gama de valores es menor $I_r = 1 - 3.5$, esto debido a limitantes mismas del estudio; observando una tendencia muy similar entre ambas figuras para ambos taludes.

6.2 Recomendaciones

- Es recomendable que se utilice el Número de Iribarren en el diseño de rompeolas, para que con esto, se presente una participación más directa del periodo del oleaje en el diseño.
- Realizar un mayor número de ensayos, con el fin de seguir obteniendo valores para el Número de Iribarren y con esto conocer el comportamiento de la estructura hasta su estabilización.
- Someter los dos rompeolas a la incidencia de oleaje irregular y con esto hacer un comparativo entre ambos conceptos de oleaje.
- Dentro de las aplicaciones que presenta esta tesis es que puede tomarse en cuenta para la realización de futuros diseños de rompeolas e incluso en el estudio para la reparación de estas en obras ya existentes en nuestro país.



BIBLIOGRAFÍA

1. (Bonilla, 1971)
Bonilla, Gris R., Salinas, Quinard L. E. *Modelos Hidráulicos de la ESIA*. Ed. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. Marzo, 1971.
2. (Brunn, 1985)
Brunn P. *Design and construction of mounds for breakwaters and coastal protection*. Ed. Elsevier. Vol. 37. 1985.
3. (D´Agremond, 2004)
D´Agremond, K., Van Roode, F. C. *Breakwaters and closure dams*. Ed. Sponbress 2da. Edición. 2004.
4. (Del Moral, 1980)
Del Moral, Carro R. *I Curso Iberoamericano de Planeación, Explotación y Dirección de Puertos*. Diques en talud. Ed. Dirección General de Puertos y Costas de España y otros. Capitulo V. Tema 7. 1980
5. (Guarda, 1987)
Guarda, R. *Estudio hidráulico de la ampliación del puerto de la Paloma*. Tomo I. Agosto 1987.
6. (Jensen, 1996)
Jensen, T., Andersen, H., Gronbech, J., Mansard, E., Davies, M. *Breakwater stability under regular and irregular wave attack*. Coastal Engineering.. Ed. Elsevier. Capitulo 131. 1996.
7. (Negro, 2002)
Negro, Valdecantos V. Varela, Carnero, O. *Diseño de diques rompeolas*. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España, 2002.
8. (Pilarczyk, 1996)
Pilarczyk Krystian W *Perspectiva internacional en las estructuras hidráulicas y costeras*. Abril 1996.
9. (Ruiz, 2004)
Ruiz y Zurvia Flores J. R. *Apuntes de Hidrodinámica Marítima*. 2004
10. (Ruiz, 2005)
Ruiz y Zurvia Flores J. R. *Apuntes de Obras Marítimas 1*. 2005
11. (Silvester, 1974)
Silvester, R. *Coastal Engineering 1*. Ed. Elsevier Vol 4. 1era. Impresión. New York, 1974.



12. (Taboada, 2007)

Taboada, Rodríguez P. D: *Validación experimental de formulas de diseño de rompeolas bajo el concepto de oleaje irregular*. Instituto Politécnico Nacional. México, 2007.

13. (USACE, 1984)

U. S. Army Corps of Engineers. *Shore Protection Manual*. Vol. II. 4ta. Edición. Washington, 1984

14. (Vergara, 1993)

Vergara, Sánchez M. A. *Técnicas de modelación en hidráulica*. Ed. Alfaomega. México, 1993.

Paginas de internet

15. (API Coatzacoalcos, 2006)

Puerto de Coatzacoalcos Veracruz. www.puerto-de-coatzacoalcos.com.mx

16. (API Ensenada, 2006)

Puerto de Ensenada Baja California. www.puertoensenada.com.mx

17. (API Lázaro Cárdenas, 2006)

Puerto de Lázaro Cárdenas Michoacán. www.puerto-lazarocardenas.com.mx

18. (API Manzanillo, 2006)

Puerto de Manzanillo Colima_ www.puerto-de-manzanillo.com.mx

19. (API Salina Cruz, 2006)

Puerto de Salina Cruz Oaxaca. www.puerto-de-salinacruz.com.mx

20. (API Tampico, 2006)

Puerto de Tampico Tamaulipas. www.puertodetampico.com.mx

21. (API Veracruz, 2006)

Puerto de Veracruz Veracruz. www.apiver.com.mx

22. (CEDEX, 2000)

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). *Iribarren. Ingeniería y Mar*. www.cedex.es/cehopu/iribarren/panel35.htm - 7k

23. (CEDEX, 2006)

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). *Instalaciones* www.cedex.es/castellano/presentacion/datos/instalaciones/ins21.html - 17k



24. (Cifuentes, 1995)

Cifuentes, Lemus J. L. *El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanográfica física, matemática e ingeniería*. omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_11.html - 24k

25. (Hechos TV, 2006)

Noticiero Hechos. *Huracanes que han afectado a México*.
www.tvazteca.com/hechos/masarchivos2/9/48651.shtml - 34k

26. (Giles, 2002)

Giles, J. *Modelación Hidráulica. 2002*
fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html - 25k

27. (Marín, 2001)

Marín, Balda J. L. *Ramón Iribarren Cavanilles*. Revista de Obras Públicas 2001.
ropdigital.ciccp.es/public/detalle_articulo.php?registro=17625 - 18k

28. (Medina, 2001)

Medina, J. *La estela investigadora de Ramón Iribarren. Laboratorio de Puertos y Costas. Universidad Politécnica de Valencia*. Revista de Obras Públicas 2001.
ropdigital.ciccp.es/public/detalle_articulo.php?registro=5818 - 23k

29. (SCT, 2001)

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) Coordinación de Puertos y Marina Mercante (CPYMM). *CD Catastro Portuario*. México, 2001.

30. (Sierra, 1997)

Sierra J. P., Lo Presti A. *Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular*.1997.
https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2977/1/51article2.pdf

31. (Silva, 2004)

Silva Medina G. A. *Introducción a la Hidráulica Marítima*. Bogota, 2004.
www.geocities.com/gsilvam/maritima.htm - 32k

32. (SMN, 2006)

Servicio Meteorológico Nacional. *Ciclones Tropicales*. smn.cna.gob.mx/ciclones/ciclones.html - 1k

33. (UC, 2006)

Universidad de Cantabria. www.gioc.unican.es/presentacion/instalaciones1.htm
41k



34. (Mösso, 2004)

Mösso, Aranda O. C. *Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa*. Universidad Politécnica de Cataluña. www.tdx.cesca.es/TEISIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1213104-134941//13Ocma13de13.pdf



ANEXO

➤ *Registro de Huracanes en México*

Se presenta una serie de datos cronológicos de los huracanes mas importantes que han impactado en las costas de México y que fueron referencia para desarrollar parte del Capitulo 1, siendo estos:

1926, septiembre

En los estados de Veracruz, Quintana Roo, Yucatán y Campeche, hubo barcos hundidos y trenes suspendidos.

1933, junio

En Tamaulipas, Soto la Marina destruida, la totalidad de las casas en el poblado de Padilla fueron arrasadas por el huracán, además de dejar miles de muertos.

1935, agosto

En Veracruz se tuvieron 27 barcos hundidos

1949, septiembre

En este año en Sinaloa, se presentaron como saldo la muerte de cien personas y decenas de barcos destruidos.

1957, octubre

Sinaloa presento pérdidas por más de cien millones de pesos en Mazatlán.

1959, octubre

Destrozados los poblados de Manzanillo, Minatitlán y Comitán, alrededor de mil 500 muertes.

1976, octubre

Baja California Sur y Sonora, el huracán Liza, deja como saldo la muerte de 600 personas y entre 10 mil y 12 mil damnificados.

1980, agosto

Tamaulipas.- Huracán Allen, deja 25 mil personas desalojadas en Matamoros.

1988, septiembre

Yucatán, Campeche, Quintana Roo, Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila.- Huracán Gilberto, deja 250 muertes y 150 mil personas desalojadas.

1990, agosto

El huracán Diana, deja pérdidas económicas en Veracruz, en Hidalgo deja 50 mil damnificados y 66 personas muertas.



1993, septiembre

Sinaloa y Sonora.- Huracán Lidia, alrededor de 200 pescadores perdieron la vida en Sinaloa y en Sonora daño a 10 mil personas.

1995, septiembre

Sonora y Sinaloa, el huracán Ismael, deja más de 24 mil damnificados.

1995, octubre

Veracruz, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo, el huracán Roxana, dejó más de 13 mil damnificados.

1997, octubre

EN los estados de Oaxaca y Guerrero.- Huracán Paulina, deja 200 muertos y 4 mil damnificados.

1998, septiembre

Sonora, Sinaloa y Baja California sur.- Huracán Isis, pérdidas por más de 50 millones de pesos.



Fig. 1 Huracán Isis, pérdidas por más de 50 millones de pesos.

1998, octubre

Quintana Roo, Tabasco, Yucatán y Campeche, huracán Mich, con 13 mil damnificados.

2000, octubre

Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Chiapas, el huracán Keith, deja alrededor de 30 mil damnificados en Campeche, el desbordamiento de 4 ríos en Tabasco, en Chiapas del desgajamiento de un cerro, afectando a más de 53 municipios



2002, septiembre

El huracán Isidoro causo graves danos en los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche en la Península de Yucatán en México. Más de 500,000 personas fueron afectadas.

2002, octubre

El huracán Kenna pegó en los estados de Nayarit, Jalisco y Sinaloa, con vientos de 260 km/h este fue uno de los más fuertes que han llegado a México en un cuarto de siglo.

2003, agosto

En lo que va de la temporada de huracanes, tres tormentas tropicales han afectado el país sin convertirse en huracán, en junio, la tormenta tropical Carlos, se debilitó cuando tocó tierra en Oaxaca, en julio la tormenta tropical Claudette pegó en la Península de Yucatán y en la costa sureste de México. A principios de agosto la tormenta tropical Erika, entró a la costa norte de Tamaulipas, afectando principalmente las ciudades de Matamoros y Reynosa. A finales de agosto el Huracán Ignacio, afectó principalmente Baja California Sur, principalmente La Paz, los daños ascendieron en el estado a 180 millones de pesos.

2003, septiembre

El huracán Marty, toco tierra en la zona de Baja California Sur y Norte, Sinaloa y Durango. Dejó al menos 5 muertos en BCS y al menos 6 mil damnificados, una más en Sinaloa.

2005, julio

El huracán Emily de categoría IV, afectó los estados de Yucatán, Tamaulipas, Nuevo León, Veracruz. El gobierno mexicano cuantificó en más de 26 millones de dólares los daños provocados por la tormenta, en donde al menos 4 personas murieron.

2005, octubre

El huracán Stan tocó tierra el 4 de octubre de 2005, de categoría I, en Punta Roca Partida, en Veracruz. Las lluvias afectaron además los estados de Tabasco, Oaxaca, Tabasco, y Chiapas donde se desbordaron 33 ríos. Chiapas y Veracruz fueron las entidades más afectadas. El total de muertos por el paso del huracán fue de 18 personas.

(Hechos TV, 2006)

➤ *Fórmulas de diseño bajo el concepto de oleaje regular*

Parte de las fórmulas encontradas por otros investigadores, que también fueron probadas bajo el concepto de oleaje regular, son las que se muestran a continuación:



ESTADOS UNIDOS

Mathews (1948)
$$W = \frac{0.0149}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^2} * \frac{H^2 * T * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} ; \quad \text{donde } T = 2.5 H$$

Hickson y Rodolf (1949)
$$W = \frac{0.0162}{\text{tg}^3(45^\circ - \frac{\alpha}{2})} * \frac{H^2 * T * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} ; \quad \text{donde } T = 2.5 H$$

SUECIA

Hennes- Leonoff (1953)
$$W = \frac{K}{(\mu - \text{tg} \alpha)^3} * \frac{Vb^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3}$$

NORUEGA

Svee
$$W = \frac{K}{\cos \alpha^3} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} \quad \text{donde } K = 0.12$$

UNION SOVIETICA

Metelicyna
$$W = \frac{K * K_s}{\cos^3(23^\circ + \alpha)} * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} ; \quad \text{donde } K = 0.025$$

$$K_s = 1.5$$

Goldschtein y Kononenko
$$W = 0.3 * K * \text{tg}^{1.83} \alpha * \frac{H^3 * \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} ; \quad \text{donde } K = 1.4$$

(para $H > 5m$)

Rybtchevsky
$$W = \frac{K}{\cos^3 \alpha \sqrt{\cot^3 \alpha}} * \frac{H^2 * L * \gamma_m}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3}$$

Para todas las fórmulas se tiene que W peso de los elementos de coraza (Kg. o Ton.), α talud del rompeolas (grados), H altura de ola de diseño (m.), ρ_s densidad relativa de la roca, ρ_w densidad relativa del agua del mar, K coeficientes de estabilidad, γ_m peso específico del material (Kg./ m³), L longitud de la ola, η



coeficiente adimensional que depende del tipo de material, d profundidad de desplante (m.), K_s coeficiente de refracción que depende de la configuración del fondo, μ coeficiente de fricción entre los elementos de coraza y capa secundaria, V_b fuerza del oleaje proporcional al cuadrado de las velocidades orbitales.

(Brunn, 1985)

➤ *Modelación*

Otra definición de modelo, es un aparato, un plan, un diagrama, una ecuación, un programa de computadora o incluso sólo una imagen mental. Si los modelos son físicos, matemáticos o conceptuales, su valor radica en la sugerencia de cómo funcionan o podrían funcionar las cosas. Cuando un modelo no produce el fenómeno adecuadamente, la naturaleza de la discrepancia es una clave de la forma en que puede mejorarse el modelo. Sin embargo, los modelos también pueden ser engañosos, sugiriendo características que realmente no se comparten con lo que se toma de referencia.

Modelos físicos

El significado más familiar del término "modelo" es el modelo físico un dispositivo o proceso real que se comporta igual al fenómeno del cual se tomó el modelo y que se espera aprender algo de él. De manera típica, es mucho más fácil trabajar con un modelo físico que con lo que él representa en virtud de su tamaño más pequeño, menos caro en términos de material y más corto en duración. Pero no siempre los modelos a escala van a ser más pequeños y más económicos. Algún fenómeno puede ser tan inconvenientemente largo que se observa sólo un segmento de él. El modelo de corto plazo intenta comprimir los efectos de largo plazo aumentando los índices a los cuales se presentan los acontecimientos.

No se puede esperar que la conducta de un modelo físico siempre represente la del fenómeno en escala real con precisión completa, ni siquiera en el conjunto limitado de características que se están estudiando. Por ejemplo, si una embarcación modelo es muy pequeña, la manera en que fluye el agua por ella será significativamente diferente de un océano y una embarcación real. Lo inapropiado de un modelo puede relacionarse con factores tales como cambios en la escala o la presencia de diferencias cualitativas que no se toman en cuenta en el modelo.

Escala

Las magnitudes físicas se clasifican en dos grupos; las *básicas o fundamentales* (fuerza- F , longitud- L , tiempo- T) y las *derivadas o secundarias* (área- A , volumen- V , gastos- Q , etc.).

La gama de magnitudes en el universo de tamaños, duraciones, velocidades, etc. es inmensa. Muchos de los descubrimientos en la ciencia física son prácticamente incomprensibles debido a que entrañan fenómenos en escalas lejanas a la



experiencia humana. Sin embargo, es factible representar tales cantidades en términos matemáticos abstractos y buscar relaciones entre ellos que tengan algún sentido.

Los grandes cambios en la escala se acompañan de manera típica por cambios en el tipo de fenómenos que ocurren,

Cuando el número de variables o magnitudes físicas son cuatro o más, El Teorema pi de Buckingham constituye una herramienta, mediante la cual pueden agruparse estas magnitudes en un número menor de grupos adimensionales significativos, a partir de los cuales puede establecerse una ecuación. Los grupos adimensionales se llaman grupos o números pi. Si en el fenómeno físico en cuestión intervienen n magnitudes físicas q y k magnitudes fundamentales, entonces matemáticamente

$$f_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$$

Esta ecuación puede remplazarse por la relación

$$f_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{n-k}) = 0$$

Donde cualquier número π no depende más que de $(k+1)$ magnitudes físicas q y cada uno de los números π son funciones independientes, adimensionales y funciones monomios de las magnitudes q .

Procedimiento

1. Se escriben las n magnitudes físicas q , que intervienen en un problema en particular, anotando sus dimensiones y el número k de dimensiones fundamentales. Existirán $(n-k)$ números π .
2. Seleccionar k de estas magnitudes, sin que haya ninguna sin dimensiones, ni dos que tengan las mismas dimensiones. Todas las dimensiones fundamentales deben incluirse colectivamente en las magnitudes seleccionadas.
3. El primer grupo π puede expresarse como el producto de las magnitudes escogidas, elevada cada una a un exponente desconocido y una de las otras magnitudes elevada a una potencia conocida (normalmente se toma igual a uno).
4. Mantener las magnitudes escogidas en (2) como variables repetidas y escoger una de las restantes variables para establecer el nuevo número π . repetir el procedimiento para obtener los sucesivos números π .
5. En cada uno de los grupos π determinar los exponentes desconocidos mediante el análisis dimensional.



Relaciones útiles

- Si una magnitud es adimensional constituye un grupo π sin necesidad de aplicar el procedimiento anterior.
- Si dos magnitudes físicas cualesquiera tienen las mismas dimensiones su cociente será un número adimensional π .
- Cualquier número π puede ser sustituido por una potencia del mismo, incluida π^{-1} .
- Cualquier número π puede sustituirse por su producto por una constante numérica.
- Cualquier número π puede expresarse como función de otros números π .

(Giles, 2002)

- Similitud en los modelos

Similitud geométrica

Entre el modelo y el prototipo existe similitud geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homologas en modelo y prototipo son iguales.

Similitud cinemática

Entre el modelo y el prototipo existe similitud cinemática si:

- Las trayectorias de las partículas móviles homologas son geoméricamente semejantes.
- Las relaciones entre las velocidades de las partículas homologas son iguales.

Similitud dinámica

Entre dos sistemas semejantes geométrica y cinemáticamente existe semejanza cinemática si las relaciones entre las fuerzas homologas en modelo y prototipo son las mismas. Las condiciones requeridas para la similitud completa se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton $\Sigma F_x = M a_x$. Las fuerzas que actúan pueden ser cualquiera o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitacionales, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas.

Relación de las fuerzas de inercia a las de presión

(Número de Euler). Esta dada por: (utilizando $T = L/V$)

$$\frac{Ma}{pA} = \frac{\rho L^3 * L / T^2}{pL^2} = \frac{\rho L^4 * V^2 / L^2}{pL^2} = \frac{\rho L^2 V^2}{pL^2} = \frac{\rho V^2}{p} \quad \dots(\text{ec. 1})$$

Relación de las fuerzas de inercia a las viscosas

(Número de Reynolds). Se obtiene a partir de:



$$\frac{Ma}{\tau a} = \frac{Ma}{\mu \left(\frac{dv}{dy} \right) A} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu \left(\frac{V}{L} \right) L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad \dots(\text{ec. 2})$$

Relación de las fuerzas de inercia a las elásticas
(Número de Cauchy). Se obtiene a partir de:

$$\frac{Ma}{EA} = \frac{\rho L^2 V^2}{EL^2} = \frac{\rho V^2}{E} \quad \dots (\text{ec. 3})$$

(Giles, 2002)

La raíz cuadrada de esta relación $\frac{V}{\sqrt{E/\rho}}$ se llama *Número de March*.

Relación de las fuerzas de inercia a las gravitatorias
Se obtiene de:

$$\frac{Ma}{Mg} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{Lg} \quad \dots (\text{ec. 4})$$

La raíz cuadrada de esta relación $\frac{V}{\sqrt{Lg}}$ se llama *Número de Froude*.

Relación de las fuerzas de inercia a las de la tensión superficial
(Número de Weber) Se obtiene de:

$$\frac{Ma}{\sigma L} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma} \quad \dots(\text{ec. 5})$$

(Giles, 2002)

➤ Equipo de generación de oleaje

El generador de oleaje opera con un software llamado WAVEGEN, el cual permite la simulación para condiciones de mar en forma variable. Este programa genera oleaje bajo dos métodos, uno con ruido blanco filtrado digitalmente (*FILTRED WHITE NOISE GENERATOR*), y otro con la suma de varias olas sinusoidales, que es el método de la transformada rápida de Fourier (*FOURIER METHOD WAVE GENERATOR*).

Reproduce oleaje de tipo regular (*REGULAR WAVE GENERATOR*), irregular (*IRREGULAR WAVE GENERATOR*) y la ola solitaria (*SOLITARY WAVE*), así



como olas con secuencias propuestas por el usuario. Para lograr estas olas, se requiere de un mecanismo capaz de generar un movimiento en el agua de manera periódica, que puede ser de manera articulada o bien, por un pistón hidráulico, siendo estos últimos los que mayor ventaja tienen sobre los primeros, ya que son capaces de reproducir las características del oleaje con mayor exactitud, ya que por lo general, son controlados por un equipo de cómputo.

Por lo general, se recomienda que la longitud mínima entre la paleta que se encarga de generar el oleaje y el modelo, sea de 7 veces la longitud de olas en aguas profundas. Para que el equipo opere en las mejores condiciones, es necesario que el canal cuente con un tirante de agua mínimo de 0.50 metros a todo lo largo de éste.

Para cualquiera de las opciones anteriores, es posible el uso de los espectros de oleaje que son:

- Espectro de Jonswap.
- Espectro de Pierson Moskowitz.
- Espectro del Congreso Internacional de Estructuras de Barco (ISSC).
- Espectro del Congreso Internacional de Remolque de Buques (ITTC).
- Espectro de ola BTTP.
- Espectro de oleaje costero DARBYSHIRE.
- Espectro de oleaje Oceánico DARBYSHIRE.
- Espectro de oleaje de Neumann.

Para este estudio se empleó el espectro de Pierson Moskowitz, debido a que es el que más se adapta a las condiciones de un Fetch largo, siendo este el caso de las costas mexicanas.

El software del equipo, cuenta con una opción de secuencias que serán definidas por el usuario, en las cuales habrán de emplearse datos de oleaje medidos en campo y los cuales estarán contenidos en un archivo del espectro de oleaje seleccionado.

Además, el equipo cuenta para la medición del oleaje, con cuatro sensores de oleaje de tipo resistivo y un programa de cómputo de nombre HR WAVES, el cual se emplea como parte del equipo de medición de oleaje, ya que éste registra y permite la medición del oleaje para realizar el análisis del mismo; este programa presenta las siguientes opciones de aplicación:

- Subrutina de Calibración de Sensores (CAL).



- Subrutina de Medición y análisis de oleaje por espectros de oleaje (SPEC).
- Subrutina de Medición y análisis de oleaje por tiempo o número de olas (WARP).
- Subrutina de Utilerías (UTILS).
- Subrutina de Salida (EXIT).

(Taboada, 2007)

➤ Análisis dimensional del estudio

Se presenta el análisis dimensional realizado para la ejecución de este estudio, las variables que se contemplaron son: la pendiente del canal (β), pendiente del talud del rompeolas (α), peso específico del agua (γ) y su viscosidad cinemática (ν), altura de la ola incidente (H_i), longitud de ola en aguas profundas (L_o), periodo (T), celeridad (C), profundidad (h), frecuencia (f), aceleración de la gravedad (g).

Se considero que la profundidad, celeridad, frecuencia y pendiente del canal permanecerán constantes para todos los ensayos. Por lo que se tiene, aplicando el teorema pi de Buckingham:

$$f(H_i, T, L_o, g, \alpha, \nu, \gamma) = 0 \quad \dots \text{(ec. 6)}$$

El número de parámetros adimensionales z se obtiene de restar el número de variables físicas y el número de magnitudes fundamentales (masa, longitud y tiempo)

$$n = 7 \quad k = 3; \quad q = n - k = 7 - 3 = 4 \quad \dots \text{(ec. 7)}$$

Por lo que, se tendrán 4 parámetros adimensionales π .

$$f(\pi) = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad \dots \text{(ec. 8)}$$

A continuación se enuncian las variables respecto a sus magnitudes fundamentales:

$$f(L, T, L, L, L, T^2, M^0 L^0 T^0, L^2 T^{-1} M L^{-2} T^{-2}) = 0$$

Sustituyendo :

$$(\pi_i) = (L)^{x_{1,i}} (T)^{x_{2,i}} (L)^{x_{3,i}} (L T^{-2})^{x_{4,i}} (L^2 T^{-1})^{x_{5,i}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,i}}$$

$$(\pi_i) = (L)^{x_{1,i} + x_{3,i} + x_{4,i} + 2x_{5,i} - 2x_{6,i}} (M)^{x_{6,i}} (T)^{x_{2,i} - 2x_{4,i} - x_{5,i} - 2x_{6,i}}$$

$$\text{Longitud (L)} = x_{1,i} + x_{3,i} + x_{4,i} + 2x_{5,i} - 2x_{6,i}$$

$$\text{Masa (M)} = x_{6,i} = 0$$



$$\text{T tiempo (T)} = x_{2,i} - x_{4,i} - x_{5,i} - 2x_{6,i}$$

Obteniendo los parámetros π son:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= H^{x_{1,1}} T^{x_{2,1}} \gamma^{x_{6,1}} L^0 \\ \pi_2 &= H^{x_{1,2}} T^{x_{2,2}} \gamma^{x_{6,2}} g \\ \pi_3 &= H^{x_{1,3}} T^{x_{2,3}} \gamma^{x_{6,3}} v \\ \pi_4 &= \alpha \end{aligned}$$

Resolviendo los números π :

$$\begin{aligned} \pi_1 &= H^{x_{1,1}} T^{x_{2,1}} \gamma^{x_{6,1}} L^0 \\ \pi_1 &= (L)^{x_{1,1}} (T)^{x_{2,1}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,1}} (L) \\ \pi_1 &= (L)^{x_{1,1} - 2x_{6,1} + 1} (M)^{x_{6,1}} (T)^{x_{2,1} - 2x_{6,1}} \end{aligned}$$

Desarrollando para cada magnitud se tiene:

Longitud

$$(L) = x_{1,1} - 2x_{6,1} + 1 = 0; \quad x_{1,1} = -1$$

Masa

$$(M) = x_{6,1} = 0; \quad x_{6,1} = 0$$

Tiempo

$$\begin{aligned} (T) &= x_{2,1} - 2x_{6,1} = 0; \quad x_{2,1} = 0 \\ \pi_1 &= H^{-1} T^0 \gamma^0 L^1 \end{aligned}$$

$$\pi_1 = \frac{L^0}{H}$$

$$\begin{aligned} \pi_2 &= H^{x_{1,2}} T^{x_{2,2}} \gamma^{x_{6,2}} g \\ \pi_2 &= (L)^{x_{1,2}} (T)^{x_{2,2}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,2}} (L T^{-2}) \\ \pi_2 &= (L)^{x_{1,2} - 2x_{6,2} + 1} (M)^{x_{6,2}} (T)^{x_{2,2} - 2x_{6,2} - 2} \end{aligned}$$

Desarrollando para cada magnitud se tiene:

Longitud

$$(L) = x_{1,2} - 2x_{6,2} + 1 = 0; \quad x_{1,2} = -1$$

Masa

$$(M) = x_{6,2} = 0; \quad x_{6,2} = 0$$

Tiempo



$$(T) = x_{2,2} - 2x_{6,2} - 2 = 0; \quad x_{2,2} = -2$$

$$\pi_2 = H^{-1} T^{-2} \gamma^0 g^1$$

$$\pi_2 = \frac{T^2 g}{H}$$

$$\begin{aligned} \pi_3 &= H^{x_{1,3}} T^{x_{2,3}} \gamma^{x_{6,3}} v \\ \pi_3 &= (L)^{x_{1,3}} (T)^{x_{2,3}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,3}} (L^2 T^{-1}) \\ \pi_3 &= (L)^{x_{1,3} - 2x_{6,3} + 2} (M)^{x_{6,3}} (T)^{x_{2,3} - 2x_{6,3} - 1} \end{aligned}$$

Desarrollando para cada magnitud se tiene:

Longitud

$$(L) = x_{1,3} - 2x_{6,3} + 2 = 0; \quad x_{1,3} = 2$$

Masa

$$(M) = x_{6,3} = 0; \quad x_{6,3} = 0$$

Tiempo

$$(T) = x_{2,3} - 2x_{6,3} - 1 = 0; \quad x_{2,3} = -1$$

$$\pi_3 = H^2 T^{-1} \gamma^0 v$$

$$\pi_3 = \frac{Tv}{H^2}$$

Como π_4 esta en función de la pendiente del talud de la estructura, entonces: $\pi_4 = \alpha$

Una vez obtenidos los valores para cada π , se sustituirán en la ecuación 8.

$$f(\pi) = f\left(\frac{Lo}{H}, \frac{T^2 g}{H}, \frac{Tv}{H^2}, \alpha\right) \quad \dots \text{(ec. 9)}$$

Resolviendo la ecuación 9, tenemos:

$$\frac{1}{\pi_1} = \frac{H}{L}; \text{ ya que un número puede sustituirse por una potencia del mismo, dando}$$

como resultado la relación de esbeltez de la ola.

$$\frac{1}{\pi_3} = \frac{H^2}{Tv} = \frac{HH}{Tv} = \frac{VH}{v} = Re; \text{ obteniendo un parámetro del número de Reynolds.}$$



Realizando el producto de los números π_1 y π_2 será:

$\pi_1 * \pi_2 = \frac{Lo}{H} * \frac{T^2 g}{H} = \frac{Lo T^2 g}{H^2}$; obteniendo un parámetro del tipo del número de Froude:

$$\frac{H^2}{Lo T^2 g} = \frac{V^2}{Log} = \frac{V^2}{\sqrt{Log}} = Fr ;$$

Se plantea una ecuación con los parámetros generados

$$f\left(\frac{H}{L}, Fr, Re, \alpha\right) \quad \dots \text{(ec. 10)}$$

De acuerdo con la relación de esbeltez se tiene lo siguiente:

$$\left(\frac{H}{Lo}\right)_m = \left(\frac{H}{Lo}\right)_p \text{ donde } \left(\frac{H_m}{H_p}\right) = \left(\frac{Lo_m}{Lo_p}\right) ; EH = ELo \quad \dots \text{(ec. 11)}$$

La escala de líneas vertical es igual a la escala de líneas horizontal, ya que se trata de un modelo sin distorsión, observando que se cumple al tener la escala de altura incidente igual a la escala de longitud de ola en aguas profundas.

Para el número de Reynolds obtenido se tiene:

$$\left(\frac{VH}{\nu}\right)_m = \left(\frac{VH}{\nu}\right)_p \text{ donde } \frac{\left(\frac{V_p}{V_m}\right)\left(\frac{H_p}{H_m}\right)}{\frac{\nu_p}{\nu_m}} = 1 ; \frac{EVEH}{E\nu} = 1 ; EV = \frac{E\nu}{EH} \quad \dots \text{(ec. 12)}$$

Teniendo como resultado la escala de velocidades y de viscosidad cinemática. Tomando en cuenta el número de Froude, se tiene:

$$\left(\frac{V^2}{\sqrt{Log}}\right)_m = \left(\frac{V^2}{\sqrt{Log}}\right)_p \text{ donde } \frac{\frac{V_p}{V_m}}{\left(\frac{Lo_p}{Lo_m}\right)^{1/2} \left(\frac{g_p}{g_m}\right)} = 1 ; \quad \frac{EV}{(ELo)^{1/2} (Eg)^{1/2}} = 1 ;$$

$EV = (ELo)^{1/2} (Eg)^{1/2}$ obteniendo la escala de aceleración de la gravedad y de longitud en aguas profundas, al tener esta forma se considerara igual a la unidad



$$EV = (EH)^{1/2}$$

... (ec. 13)

Igualando las ecuaciones 12 y 13, tenemos las condiciones de similitud de Reynolds y Froude:

$$Ev(EH)^{-1} = (EH)^{1/2}$$

$$EH = Ev^{2/3}$$

➤ Calibración

HR Cal Version HR Cal 2.1 Written In June 1992.
 CALIBRATION VALUES FOR FILE 21SEP05 on 21/ 9/ 5 at 13:57: 7

Channel	Voltage Range	Calibration-Factor	Zero Level	GOODFIT	
0	10.0	6.683134e-003	2047	9.953696e-001	- Sensor A.R.
1	10.0	6.276056e-003	2047	9.994621e-001	- Sensor A.I.
2	10.0	1.355017e-002	2047	9.993253e-001	- Sensor A.P.
3	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
4	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
5	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
6	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
7	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
8	10.0	2.756660e-001	2047	9.992870e-001	- No label
9	10.0	6.948497e-001	2047	9.988677e-001	- No label
10	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
11	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
12	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
13	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
14	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
15	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
16	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
17	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
18	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
19	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
20	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
21	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
22	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
23	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
24	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
25	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
26	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
27	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
28	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
29	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
30	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
31	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
32	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
33	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
34	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
35	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
36	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
37	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
38	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
39	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
40	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
41	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
42	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
43	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
44	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
45	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
46	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label
47	10.0	1.000000e+000	2047	0.000000e+000	- No label

MPSCALE = 1.000000e+000
 DEPTH = 1.000000e+000 m
 X1 = 1.000000e+000 m
 X2 = 1.000000e+000 m
 X3 = 1.000000e+000 m



➤ Serie 9 Ensayo 1 Talud 1.5:1

HR Warp Version 2.0a Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 10/11/ 5 at 18:15:18

ENSAYO 1 SERIE 9 T=9.81 s y H=6.50 m

Calibration file used = 05OCT05 - 5/10/2005 12:47:6
Number of data batches = 10
Batch length = 60 Prototype Seconds
Time interval between samples = 0.1937 Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio = 1.0000

Crossing level for channel 0 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel 0 = 0.00680078 - Sensor A.R.
Calibration factor for channel 1 = 0.00637518 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel 2 = 0.0139069 - Sensor A.P.

Digital zero level for channel 0 = 2047
Digital zero level for channel 1 = 2047
Digital zero level for channel 2 = 2047

Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

CHAN	BATCH	BAD	WAVES	H MAX	H3	H BAR	TBAR
0	1	0	38	7.134e+00	6.880e+00	6.281e+00	1.539e+00
1	1	0	38	7.606e+00	7.281e+00	6.807e+00	1.550e+00
2	1	0	38	7.329e+00	6.957e+00	6.586e+00	1.550e+00
0	2	0	39	7.488e+00	7.114e+00	6.235e+00	1.515e+00
1	2	0	39	7.459e+00	7.210e+00	6.626e+00	1.525e+00
2	2	0	39	6.995e+00	6.943e+00	6.743e+00	1.525e+00
0	3	0	39	8.188e+00	7.515e+00	6.577e+00	1.535e+00
1	3	0	38	7.714e+00	7.404e+00	6.652e+00	1.539e+00
2	3	0	38	7.343e+00	7.163e+00	6.887e+00	1.539e+00
0	4	0	38	8.759e+00	8.116e+00	6.676e+00	1.545e+00
1	4	0	39	8.045e+00	7.680e+00	6.553e+00	1.515e+00
2	4	0	39	7.398e+00	7.175e+00	6.812e+00	1.515e+00
0	5	0	39	9.678e+00	9.089e+00	7.091e+00	1.525e+00
1	5	0	38	8.358e+00	7.750e+00	6.437e+00	1.529e+00
2	5	0	39	7.996e+00	7.576e+00	7.132e+00	1.530e+00
0	6	0	38	1.115e+01	9.991e+00	7.481e+00	1.545e+00
1	6	0	39	8.715e+00	7.082e+00	5.730e+00	1.520e+00
2	6	0	38	8.581e+00	8.095e+00	7.412e+00	1.545e+00
0	7	0	39	1.043e+01	9.420e+00	7.509e+00	1.525e+00
1	7	0	39	9.174e+00	7.633e+00	5.732e+00	1.525e+00
2	7	0	39	9.540e+00	8.659e+00	7.366e+00	1.525e+00
0	8	0	38	1.083e+01	9.501e+00	7.121e+00	1.539e+00
1	8	0	39	9.174e+00	7.481e+00	5.843e+00	1.530e+00
2	8	0	39	8.636e+00	8.098e+00	7.154e+00	1.535e+00
0	9	0	39	1.128e+01	9.642e+00	7.254e+00	1.535e+00
1	9	0	38	8.218e+00	7.378e+00	5.430e+00	1.545e+00
2	9	0	38	9.693e+00	8.607e+00	7.525e+00	1.555e+00
0	10	0	37	1.015e+01	9.555e+00	7.476e+00	1.586e+00
1	10	0	39	9.085e+00	7.558e+00	5.938e+00	1.525e+00
2	10	0	39	9.081e+00	8.328e+00	7.416e+00	1.525e+00

RUN RESULTS

CHAN	BAD	WAVES	MEAN OF H MAX	MEAN OF H3	MEAN OF H BAR	TBAR	T
0	0	384	9.508e+00	8.681e+00	6.968e+00	1.539e+00	9.733
1	0	386	8.355e+00	7.442e+00	6.173e+00	1.530e+00	9.677
2	0	386	8.259e+00	7.753e+00	7.103e+00	1.534e+00	9.702



➤ Serie 9 Ensayo 2 Talud 1.5:1

HR Warp Version 2.0a Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 10/11/ 5 at 18:29:47

ENSAYO 2 SERIE 9 T=10.13 s y H=6.50 m

Calibration file used = 05OCT05 - 5/10/2005 12:47:6
Number of data batches = 10
Batch length = 60 Prototype Seconds
Time interval between samples = 0.2000 Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio = 1.0000

Crossing level for channel 0 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel 0 = 0.00680078 - Sensor A.R.
Calibration factor for channel 1 = 0.00637518 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel 2 = 0.0139069 - Sensor A.P.

Digital zero level for channel 0 = 2047
Digital zero level for channel 1 = 2047
Digital zero level for channel 2 = 2047

Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

CHAN	BATCH	BAD	WAVES	H MAX	H3	H BAR	TBAR
0	1	0	37	1.018e+01	8.763e+00	7.567e+00	1.578e+00
1	1	0	37	7.440e+00	6.969e+00	6.251e+00	1.589e+00
2	1	0	37	5.897e+00	5.629e+00	5.131e+00	1.595e+00
0	2	0	38	1.125e+01	9.177e+00	6.924e+00	1.553e+00
1	2	0	38	7.389e+00	6.989e+00	6.128e+00	1.568e+00
2	2	0	37	6.898e+00	5.856e+00	5.043e+00	1.578e+00
0	3	0	37	1.156e+01	9.565e+00	7.078e+00	1.595e+00
1	3	0	36	7.899e+00	6.987e+00	5.609e+00	1.600e+00
2	3	0	38	7.496e+00	6.883e+00	5.595e+00	1.558e+00
0	4	0	36	1.069e+01	9.897e+00	7.479e+00	1.650e+00
1	4	0	37	1.045e+01	8.050e+00	5.722e+00	1.573e+00
2	4	0	38	9.498e+00	8.386e+00	6.362e+00	1.547e+00
0	5	0	35	1.053e+01	9.286e+00	6.812e+00	1.697e+00
1	5	0	35	1.058e+01	7.890e+00	6.000e+00	1.697e+00
2	5	0	37	9.471e+00	8.025e+00	6.124e+00	1.568e+00
0	6	0	40	9.773e+00	8.643e+00	6.062e+00	1.490e+00
1	6	0	32	1.091e+01	8.329e+00	6.170e+00	1.819e+00
2	6	0	38	9.012e+00	7.633e+00	6.043e+00	1.558e+00
0	7	0	37	1.089e+01	9.564e+00	6.776e+00	1.616e+00
1	7	0	36	8.504e+00	7.778e+00	5.991e+00	1.628e+00
2	7	0	38	9.039e+00	7.901e+00	6.377e+00	1.574e+00
0	8	0	36	9.875e+00	9.337e+00	7.249e+00	1.622e+00
1	8	0	34	9.741e+00	7.957e+00	6.205e+00	1.747e+00
2	8	0	37	9.832e+00	7.861e+00	6.245e+00	1.611e+00
0	9	0	35	1.096e+01	9.215e+00	6.923e+00	1.697e+00
1	9	0	32	8.912e+00	7.746e+00	6.056e+00	1.819e+00
2	9	0	37	8.887e+00	7.755e+00	6.101e+00	1.595e+00
0	10	0	35	1.116e+01	8.911e+00	6.369e+00	1.686e+00
1	10	0	35	9.556e+00	8.099e+00	5.878e+00	1.703e+00
2	10	0	38	9.457e+00	7.806e+00	6.162e+00	1.574e+00

RUN RESULTS

CHAN	BAD	WAVES	MEAN OF H MAX	MEAN OF H3	MEAN OF H BAR	TBAR	T
0	0	366	1.069e+01	9.233e+00	6.918e+00	1.616e+00	10.220
1	0	352	9.138e+00	7.677e+00	5.998e+00	1.669e+00	10.556
2	0	375	8.549e+00	7.368e+00	5.921e+00	1.575e+00	9.961



➤ Ensayo 9 Serie 1 Talud 2:1

HR Warp Version 2.0a Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 26/ 9/ 5 at 14:54:45

ENSAYO 1 SERIE 9 T=9.80 s y H=6.50 m

Calibration file used = 21SEP05 - 21/9/2005 13:57:4
Number of data batches = 10
Batch length = 60 Prototype Seconds
Time interval between samples = 0.1937 Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio = 1.0000

Crossing level for channel 0 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel 0 = 0.00668313 - Sensor A.R.
Calibration factor for channel 1 = 0.00627606 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel 2 = 0.0135502 - Sensor A.P.

Digital zero level for channel 0 = 2047
Digital zero level for channel 1 = 2047
Digital zero level for channel 2 = 2047

- Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

CHAN	BATCH	BAD	WAVES	H3	H BAR	TBAR
0	1	0	39	7.247e+00	6.705e+00	1.530e+00
1	1	0	38	6.897e+00	6.306e+00	1.534e+00
2	1	0	38	6.874e+00	6.272e+00	1.539e+00
0	2	0	38	7.443e+00	6.703e+00	1.545e+00
1	2	0	39	6.724e+00	6.107e+00	1.510e+00
2	2	0	39	6.449e+00	6.136e+00	1.515e+00
0	3	0	39	7.380e+00	6.501e+00	1.525e+00
1	3	0	39	6.729e+00	6.138e+00	1.530e+00
2	3	0	39	6.630e+00	6.437e+00	1.530e+00
0	4	0	38	7.231e+00	6.267e+00	1.539e+00
1	4	0	38	6.874e+00	6.294e+00	1.545e+00
2	4	0	38	6.720e+00	6.492e+00	1.545e+00
0	5	0	39	6.823e+00	6.135e+00	1.515e+00
1	5	0	39	6.916e+00	6.290e+00	1.520e+00
2	5	0	39	6.663e+00	6.414e+00	1.520e+00
0	6	0	39	6.782e+00	6.237e+00	1.530e+00
1	6	0	39	6.977e+00	6.404e+00	1.535e+00
2	6	0	39	6.745e+00	6.542e+00	1.535e+00
0	7	0	38	6.831e+00	6.328e+00	1.545e+00
1	7	0	38	7.081e+00	6.458e+00	1.550e+00
2	7	0	38	6.765e+00	6.590e+00	1.550e+00
0	8	0	39	6.888e+00	6.298e+00	1.520e+00
1	8	0	39	7.070e+00	6.344e+00	1.525e+00
2	8	0	39	6.697e+00	6.479e+00	1.525e+00
0	9	0	39	7.015e+00	6.424e+00	1.535e+00
1	9	0	38	7.103e+00	6.338e+00	1.539e+00
2	9	0	38	6.625e+00	6.420e+00	1.539e+00
0	10	0	38	7.166e+00	6.582e+00	1.550e+00
1	10	0	39	7.062e+00	6.169e+00	1.515e+00
2	10	0	39	6.560e+00	6.230e+00	1.515e+00

RUN RESULTS

CHAN	BAD	WAVES	MEAN OF H3	MEAN OF H BAR	TBAR	T
0	0	386	7.077e+00	6.417e+00	1.533e+00	9.696
1	0	386	6.940e+00	6.284e+00	1.530e+00	9.677
2	0	386	6.665e+00	6.401e+00	1.531e+00	9.603



➤ Ensayo 9 Serie 2 Talud 2:1

HR Warp Version 2.0a Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 26/ 9/ 5 at 15: 8:15

ENSAYO 2 SERIE 9 T=10.11 s y H=6.50 m

Calibration file used = 21SEP05 - 21/9/2005 13:57:4
Number of data batches = 10
Batch length = 60 Prototype Seconds
Time interval between samples = 0.2000 Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio = 1.0000

Crossing level for channel 0 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel 2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel 0 = 0.00668313 - Sensor A.R.
Calibration factor for channel 1 = 0.00627606 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel 2 = 0.0135502 - Sensor A.P.

Digital zero level for channel 0 = 2047
Digital zero level for channel 1 = 2047
Digital zero level for channel 2 = 2047

Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

CHAN	BATCH	BAD	WAVES	H3	H BAR	TBAR
0	1	0	37	9.129e+00	8.124e+00	1.600e+00
1	1	0	38	7.131e+00	6.344e+00	1.563e+00
2	1	0	37	6.451e+00	5.877e+00	1.578e+00
0	2	0	37	9.390e+00	8.164e+00	1.584e+00
1	2	0	37	7.096e+00	6.404e+00	1.595e+00
2	2	0	38	6.270e+00	5.725e+00	1.563e+00
0	3	0	38	9.550e+00	7.777e+00	1.574e+00
1	3	0	37	7.560e+00	6.366e+00	1.584e+00
2	3	0	37	6.449e+00	5.617e+00	1.589e+00
0	4	0	37	8.703e+00	6.865e+00	1.600e+00
1	4	0	37	7.906e+00	6.250e+00	1.562e+00
2	4	0	38	6.859e+00	5.742e+00	1.574e+00
0	5	0	33	9.405e+00	6.850e+00	1.782e+00
1	5	0	34	8.181e+00	6.382e+00	1.741e+00
2	5	0	37	7.929e+00	6.132e+00	1.595e+00
0	6	0	33	9.596e+00	7.376e+00	1.733e+00
1	6	0	34	8.010e+00	6.511e+00	1.747e+00
2	6	0	37	8.137e+00	6.503e+00	1.578e+00
0	7	0	33	8.919e+00	7.069e+00	1.800e+00
1	7	0	34	8.306e+00	6.600e+00	1.741e+00
2	7	0	38	8.106e+00	6.129e+00	1.563e+00
0	8	0	33	8.776e+00	6.850e+00	1.697e+00
1	8	0	34	8.296e+00	6.400e+00	1.718e+00
2	8	0	37	7.580e+00	6.042e+00	1.589e+00
0	9	0	35	8.915e+00	6.705e+00	1.697e+00
1	9	0	35	8.222e+00	6.312e+00	1.697e+00
2	9	0	37	7.703e+00	5.791e+00	1.568e+00
0	10	0	32	8.903e+00	6.651e+00	1.831e+00
1	10	0	35	8.167e+00	6.469e+00	1.686e+00
2	10	0	38	7.447e+00	5.826e+00	1.563e+00

RUN RESULTS

CHAN	BAD	WAVES	MEAN OF H3	MEAN OF H BAR	TBAR	
0	0	348	9.126e+00	7.266e+00	1.684e+00	10.651
1	0	355	7.885e+00	6.401e+00	1.660e+00	10.500
2	0	374	7.287e+00	5.937e+00	1.576e+00	9.967