



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA REFLEXIÓN EN LA ESTABILIDAD
DE ROMPEOLAS EXENTOS**

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniera Civil

Presenta

ANA LAURA MENESES FERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

JULIO 2006

*A mi papas Luís Antonio e Idalia
Porque cualquiera puede hacer un hijo pero se necesita
ser alguien especial para ser un padre.
Por su amor, valores y el apoyo que siempre me han brindado.*

*A mis hermanos Dirceu Jair, Luís Adolfo y Kevin Eduardo
Por hacer que cada pedazo de tiempo fuera ameno, por sus locuras y porque también
logren lo que se propongan.*

AGRADECIMIENTOS

Esta etapa tan importante de mi vida, que ahora culmino, es el resultado enérgico tanto de esfuerzos individuales, institucionales y comunitarios. Una página no alcanzaría para citar a todos los que directa o indirectamente contribuyeron en mi formación y a la realización de este trabajo, sin embargo, y corriendo el riesgo de caer en omisiones, quiero expresar mi gratitud por el apoyo y la confianza que me han otorgado de forma desinteresada.

*A **Dios** por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr ésta meta en mi carrera.*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, mi alma mater, a la que debo mucho de lo que soy ahora, y para la cual solo tengo un enorme agradecimiento y la responsabilidad de ser una profesionista que la enaltezca.*

*A la **Facultad de Ingeniería** por albergar mis sueños darme una formación profesional de excelencia y permitirme lograr una de mis metas más importantes, convertirme en Ingeniera.*

*A mis **Profesores**, por su ejemplo y dedicación, por transmitirme sus enseñanzas y sus experiencias, pero sobre todo por hacerme una mejor persona.*

*Al **Instituto de Ingeniería**, por la oportunidad de formar parte del grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, por el apoyo, y porque gracias a sus instalaciones me permitió obtener los conocimientos necesarios para el desarrollo de éste trabajo.*

*Gracias al **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, por su confianza, apoyo, orientación, enseñanza y sobre todo por su paciencia durante la elaboración de este trabajo.*

A mis compañeros del grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, sobre todo a Edgar y José Luís, por que sin su apoyo y ayuda la parte experimental de este trabajo se me habría complicado.

***José Ramón** por tu amor, por tu apoyo, por tu paciencia, y por hacer más fácil esto de las señales. ¡Gracias! porque sin tu ayuda todo hubiese sido más complicado...Te Amo Meza!!*

Gracias a mis amigos de la Facultad de Ingeniería, especialmente a Ale, Islas, Diego y Alfonso, por aprender juntos, por superarnos cada día y por los grandes momentos de convivencia.

Gran parte de haber cumplido este sueño se lo debo al apoyo incondicional tanto económico como moral que me brindaron mis tíos, porque gracias a ellos la nostalgia de estar lejos de mis papas y mis hermanos fue menor. Gracias a mi madrina Martha Elena, por su apoyo y su cariño; a mis tíos Víctor Hugo y Leticia porque durante la etapa que estuve con ellos tuve una magnífica hospitalidad y grandes consejos; a mis tíos Analine y Gabriel por el apoyo que siempre me han dado y por estar al pendiente de mi; a mi tía

Nancy gracias por ser como eres, porque con tu entusiasmo y constancia me enseñaste que “cuando se quiere se puede” ¡eres un gran ejemplo!.... A todos ellos no tengo mas que mi gratitud por siempre...Los quiero mucho!!!

También, merece mi gratitud mi abuela Guille por su cariño y por sus consejos; mi abuelo Mere por su cariño, preocupación y todo el apoyo que me ha dado.

Por último, pero no menos importantes, gracias a Violes y Disrra porque mas que mis primos son como unos hermanos para mi, porque en estos años hemos compartido grandes momentos, los quiero.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE SIMBOLOS	5
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS	9
DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	10
1. DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE	13
1.1 Principales parámetros para caracterizar a una onda	13
1.2 Procesos del oleaje	14
1.2.1 Refracción	15
1.2.2 Difracción	15
1.2.3 Reflexión	16
1.2.4 Rotura	16
1.3 Teorías de comportamiento del oleaje	17
2. ANÁLISIS DE SEÑALES DE OLEAJE	21
2.1 Análisis Temporal	21
2.1.1 La muestra	21
2.1.2 Corrección del nivel medio	22
2.1.3 Parametrización de la señal	24
2.1.4 Determinación de los parámetros del oleaje	27
2.1.5 Determinación de la dirección del oleaje	28
2.2 Análisis Espectral	29
2.2.1 Corrección del nivel medio	30
2.2.2 Función Ventana	31
2.2.3 Cálculo de los coeficientes de Fourier	32
2.2.4 Cálculo del espectro	32
2.2.5 Suavizado del espectro	33
2.2.6 Parámetros espectrales	34
2.2.7 Estimación de la dirección del oleaje	36
3. ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE	39
3.1 Reflexión del Oleaje	39
3.2 Método de Mansard y Funke (modificado por Baquerizo (1995))	40
3.3 Definición del coeficiente de reflexión	43
4. COMPORTAMIENTO DE LOS DIQUES DE ABRIGO FRENTE A LA ACCIÓN DEL OLEAJE	47
4.1 Influencia de la reflexión en los diques de abrigo	47
4.2 Procesos de transformación de la energía	48
4.3. Similaridad de los diques de abrigo	48

4.5 Evaluación de daño en la estabilidad de diques en talud y niveles de avería	52
4.6 Consideración de la reflexión en la estabilidad de diques en talud	55
5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS	59
5.1 Características de los modelos	59
5.1.2 Descripción geométrica de los diques ensayados	59
5.2 Arreglo de los dispositivos de medición	60
5.3 Descripción de los ensayos	62
5.4 Análisis de datos	64
5.5 Resultados	65
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	75
6.1 Conclusiones	75
6.2 Futuras Líneas de Trabajo	76
ANEXO A	79
ANEXO B	87
ANEXO C	93
ANEXO D	99
FUENTES CONSULTADAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 a) <i>Oleaje tipo SEA; b) Oleaje tipo SWELL</i>	13
Figura 1.2 <i>Parámetros que caracterizan una onda</i>	14
Figura 1.3 <i>Refracción del oleaje</i>	15
Figura 1.4 <i>Difracción del oleaje</i>	16
Figura 1.5 <i>Reflexión del oleaje debido a la presencia de rompeolas</i>	16
Figura 1.6 <i>Tipos de rotura del oleaje</i>	17
Figura 2.1 <i>Parámetros que definen al oleaje (Tomada de Silva, 2005)</i>	21
Figura 2.2 <i>Marea Semidiurna (Tomada de Silva, 2005).</i>	23
Figura 2.3 <i>Definición de olas por el método de pasos descendentes. (Tomada de Silva, 2005)</i>	26
Figura 2.4 <i>Definición de olas por el método de distancia entre crestas. (Tomada de Silva, 2005)</i>	26
Figura 5.1 <i>Posición relativa de los sensores</i>	60
Figura 5.2 <i>Arreglo de los dispositivos de medición en el canal.</i>	61
Figura 5.3 <i>Arreglo de los dispositivos de medición cercanos al dique (1 y 2).</i>	61
Figura 5.4 <i>Arreglo de los dispositivos de medición cercanos al dique (3).</i>	62
Figura 5.5 <i>Diagrama de flujo del procesamiento de la señal</i>	64
Figura 5.6 <i>Proceso de demanda de piezas del dique 1, al variar la altura de ola.</i>	65
Figura 5.7 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique)</i>	65
Figura 5.8 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.</i> ... 66	
Figura 5.9 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala)</i>	66
Figura 5.10 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.</i> 66	
Figura 5.11 <i>Proceso de demanda de piezas del dique 2, al variar la altura de ola.</i>	67
Figura 5.12 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique).</i>	67
Figura 5.13 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.</i> .. 67	
Figura 5.14 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala)</i>	68
Figura 5.15 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.</i> 68	
Figura 5.16 <i>Proceso de demanda de piezas del dique 3, al variar la altura de ola.</i>	68
Figura 5.17 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique).</i>	69
Figura 5.18 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.</i> .. 69	
Figura 5.19 <i>Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala).</i>	69
Figura 5.20 <i>Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.</i> 70	
Figura 5.21 <i>Evolución del perfil del dique de talud 1.5:1 debido a la acción del oleaje regular.</i>	70

Figura 5.22 Evolución del perfil del dique de talud 1.5:1 debido a la acción del oleaje irregular.....	70
Figura 5.23 Evolución del perfil del dique de talud 2:1 debido a la acción del oleaje regular.	71
Figura 5.24 Perfiles inicial y final del Dique 1, se muestran 3 zonas.	71
Figura 5.25 Perfiles inicial y final del Dique 2, se muestran 3 zonas.	71
Figura 5.26 Perfiles inicial y final del Dique 31, se muestran 3 zonas.	72
Figura C.1 Canal de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)	93
Figura C.2 Generador de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)	94
Figura C.3 Actuador a base de un motor eléctrico, Laboratorio de Olas, II-UNAM.....	94
Figura C.4 Sensores en la parte frontal de la paleta, utilizados por el sistema de absorción, Laboratorio de Olas, II-UNAM	95
Figura 0.1 Daño del dique a una altura de ola de 18 cm.	99
Figura 0.2 Daño del dique a una altura de ola de 19 cm	99
Figura 0.3 Daño del dique a una altura de ola de 20 cm	99
Figura 0.4 Daño del dique a una altura de ola de 21 cm	100
Figura 0.5 Daño del dique a una altura de ola de 22 cm	100
Figura 0.6 Daño del dique a una altura de ola de 23 cm	100
Figura 0.7 Daño del dique a una altura de ola de 24 cm	101
Figura 0.8 Daño del dique a una altura de ola de 26 cm	101
Figura 0.9 Perfil inicial del dique de talud 1.5:1.....	104
Figura 0.10 Perfil final del dique de talud 1.5:1 sometido a oleaje regular	104
Figura 0.11 Perfil final del dique de talud 1.5:1 sometido a oleaje irregular	104

LISTA DE TABLAS

Tabla D. 1 Resultados de Coeficientes de Reflexión obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos al rompeolas, para los primeros ensayos (dique 3).	102
Tabla D. 2 Resultados de las fases obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos al rompeolas, para los primeros ensayos (dique 3).	102
Tabla D. 3 Resultados de Coeficientes de Reflexión obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos a la pala, para los primeros ensayos, (dique 3).	103
Tabla D. 4 Resultados de las fases obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos a la pala, para los primeros ensayos (dique 3).	103

LISTA DE SIMBOLOS

A, a, α	Amplitud de la ola
a_n, b_n, A_n, B_n	Coefficientes de Fourier
A_0, A_1	Coefficientes de ajuste lineal
B_0, B_1, B_2	Coefficientes de ajuste parabólico
β	Factor de corrección
C	Celeridad de la onda
ε	Función de error
e_L	Escala de longitud
e_v	Escala de velocidad
e_T	Escala de tiempo
e_W	Escala de peso
v	Anchura espectral
Δf	Intervalo de frecuencia
f_c	Frecuencia de Nyquist
g	Aceleración debida a la gravedad
H	Altura de ola
H_{IA}	Altura de ola de inicio de avería
H_{AI}	Altura de ola de avería de Irribarren
H_d	Altura de ola de destrucción
h	Profundidad o tirante de agua
H_{rms}	Altura cuadrática media
H_{m_0}	Altura de ola asociada al momento de orden cero
\overline{H}	Altura media
k	Número de onda
L	Longitud de onda
m_n	Momento de orden n
m_0, m_1, m_2	Momento de orden cero, uno y dos
N	Número de datos que integran la señal
N_r, Y_r	Parámetros empleados en el ajuste lineal
N_0	Número de ondas individuales en todo el registro
η	Perfil de la superficie libre del agua
$\overline{\eta_n}$	Promedio aritmético del perfil corregido
$\eta_{m\acute{a}x}$	Punto más alto del registro de la señal
$\eta_{m\acute{i}n}$	Punto más bajo del registro de la señal
η_{rms}	Variación media cuadrática de la superficie libre del agua
$\eta(t^*)$	Perfil una vez aplicada la función ventana

Q_p	Agudeza de pico
$S(f)$	Función de densidad espectral
$\bar{S}(f)$	Espectro suavizado
$\hat{S}(f)$	Espectro de energía promediado
Skw	Asimetría
T	Periodo asociado ala onda
t	Tiempo
Δt	Intervalo de tiempo
\bar{T}	Periodo medio
T_{01}	Periodo asociado al momento de roden cero y uno
T_{02}	Periodo asociado al momento de orden cero y dos
U_x	Componente en x de la velocidad orbital
U_y	Componente en y de la velocidad orbital
W	Función de peso utilizada
W_r	Peso de los elementos del dique
Δx	Separación entre sensores
σ, ω	Frecuencia angular
θ	Ángulo de incidencia
z_I	Componentes complejas del espectro incidente
z_R	Componentes complejas del espectro reflejado
$ R , K_R(j\Delta f)^2$	Coefficiente de reflexión
$\varphi(j\Delta f)$	Fase

INTRODUCCIÓN

El estudio del clima marítimo y la influencia que tiene sobre las costas y las estructuras es de gran importancia tanto en los ámbitos social, económico, ambiental, turístico y político para el desarrollo de la humanidad.

Durante la última década, México ha incrementado de manera significativa su comercio internacional, debido a su estratégica ubicación geográfica, actualmente es uno de los países exportadores más destacados a nivel mundial y el de mayor dinamismo de Latinoamérica, se espera que esta tendencia continúe en los próximos años. Sin embargo, para sostener este crecimiento y participar de manera competitiva en la economía mundial, nuestro país requiere contar con la infraestructura costera necesaria para el aprovechamiento y protección de sus costas. Consecuentemente la ingeniería de costas es de gran importancia no solo por lo que al diseño de obras se refiere, sino por la caracterización del clima marítimo que se presenta a lo largo de las costas mexicanas.

El oleaje es uno de los fenómenos más importantes que se deben considerar entre las condiciones medioambientales que afectan a una estructura marítima, ya que ejercen una gran influencia sobre este tipo de estructuras. Debido a que el oleaje es uno de los fenómenos más complejos de la naturaleza, no es fácil entender por completo sus características principales así como tampoco su comportamiento, ya que cuando el oleaje se propaga sobre la costa sufre una serie de modificaciones debidas diversos fenómenos como son: la reflexión, el someramiento, la refracción, la difracción, la disipación por rotura y fricción de fondo.

La reflexión es uno de los fenómenos de mayor importancia y se presenta cuando existe un cambio significativo en la profundidad de las playas o bien cuando existen obstáculos, los cuales suelen ser principalmente obras de protección costera.

Cuando se realiza el diseño de estructuras marítimas de protección es importante el conocimiento adecuado de este fenómeno para conocer la eficiencia de la estructura, es decir, se debe conocer su capacidad disipativa, la cual se puede determinar evaluando las componentes del oleaje, es decir, las partes reflejada, incidente, transmitida y disipada por la estructura.

El estudio de los modelos experimentales en el laboratorio, para el análisis de la erosión en playas y taludes, es una necesidad primordial a la hora de proyectar obras de defensa portuaria y costeras, debido a la poca instrumentación en las playas o a la escasa calidad de las observaciones visuales.

El sistema más eficiente para mitigar la acción del oleaje no es una barrera con superficie recta, pues la erosión que éstas provocan puede disminuir si se le oponen estructuras que tengan curvatura similar a la letra “S”.

A partir de esta hipótesis, lo que se busca es mejorar el diseño de estructuras de protección costera: diques, espigones, escolleras y rompeolas. Considerando que en el diseño se tomará en cuenta el proceso de reflexión del oleaje.

El resultado de experimentos puede ayudar a incrementar la estabilidad y la seguridad en puertos y playas para que los ingenieros puedan construir estructuras que disipen mejor la energía mecánica del mar y por ende que éstas sean más seguras.

OBJETIVOS

Los objetivos que se plantean en el presente trabajo son los siguientes:

- ✓ Entender el comportamiento y las principales características que definen el fenómeno del oleaje.
- ✓ Estudiar y describir los métodos utilizados para el tratamiento estadístico de una señal de oleaje.
- ✓ Describir las teorías de generación de oleaje en laboratorio, modelos e hipótesis, y el método utilizado para la absorción dinámica de las ondas.
- ✓ Describir e implementar el Método de Mansard y Funke modificado por Baquerizo para la separación de la onda incidente y reflejada.
- ✓ Caracterizar el tipo de oleaje que se puede presentar en una estructura, y conocer las posibles acciones dinámicas que pueden ejercerse sobre diques en talud.
- ✓ Observar el comportamiento y evolución de la reflexión en laboratorio empleando el sistema de absorción dinámica y diques en talud de piezas móviles, realizar una comparación entre dichos diques y determinar que tan eficientes son para la disipación de la energía para dos diferentes estados de mar.
- ✓ Caracterizar la estabilidad de rompeolas exentos conforme éstos adquieren un perfil “S” y el coeficiente de reflexión se estabiliza.

DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Para una mejor exposición del trabajo se ha organizado la tesis en los siguientes capítulos:

Capítulo 1.- Descripción del oleaje

Se presenta la definición y clasificación del oleaje, así como los parámetros que lo caracterizan. Se establecen las condiciones para su análisis y descripción analítica por medio de diferentes teorías de onda.

Capítulo 2.- Análisis de señales de oleaje

En este capítulo se abordan las principales metodologías para el estudio estadístico de una señal, producto de la medición en campo o laboratorio. Se describen las principales formulaciones que se utilizan para estudiar el oleaje, bajo el dominio del tiempo y la frecuencia.

Capítulo 3.- Estimación de la reflexión del oleaje

Se describe el fenómeno de reflexión, se mencionan algunos métodos utilizados para su estimación. Se describe el método de Mansard y Funke (modificado por Baquerizo (1995)) para la separación de la onda incidente y reflejada. Así como también se menciona la influencia de la reflexión al incidir en diques en talud

Capítulo 4.- Comportamiento de los diques de abrigo frente la acción del oleaje

En este capítulo se describe el comportamiento de los diques de abrigo ante la acción dinámica del mar. Se mencionan los procesos de transformación de la energía del oleaje y se explica el efecto de escala.

Capítulo 5.- Experimentos y resultados

Se hace una descripción de los experimentos realizados con diques en talud, de piezas móviles homogéneas, para el análisis de la evolución de la reflexión, que es el objetivo principal de este trabajo. Se detalla la colocación del equipo de medición para la recolección de datos y por último se presentan los resultados.

Capítulo 6.- Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Se presentan las principales conclusiones a las que se llega en este trabajo y se indican algunas de las futuras líneas de investigación sobre el tema.



CAPÍTULO 1
DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE



1. DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE

Una onda es una perturbación periódica de una variable física, que evoluciona en el tiempo y en el espacio. En la realidad, se presentan formas complejas que no son más que la superposición de formas simples. Los métodos analíticos, generalmente se desarrollan para cada onda simple, considerando una celeridad y una repetición en el espacio, las cuales son características del movimiento ondulatorio.

Las ondas se clasifican según el tipo de movimiento, con respecto a la dirección de propagación, en ondas transversales y longitudinales; las ondas de mar se clasifican de acuerdo con la configuración de su superficie y con el movimiento de las partículas del fluido.

El oleaje es el resultado de perturbaciones inducidas por la acción de fuerzas que se presentan en la naturaleza sobre la superficie del mar, durante un periodo de tiempo, y que dan como resultado una serie de ondas de forma compleja. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento.

La capacidad del oleaje para transformar su perfil es uno de los aspectos más característicos del mismo. Éste está formado simultáneamente por olas de alturas y períodos muy diferentes, moviéndose en diversas direcciones, generando patrones muy complejos en la forma de la superficie libre del mar (oleaje tipo *sea* (figura 1.1 a)). Por lo que, la irregularidad es una característica inherente al oleaje. Una vez que las olas abandonan la zona de influencia del viento que lo generó, cobran un estado más ordenado (oleaje tipo *swell* (figura.1.1 b)), reagrupándose y adquiriendo patrones más regulares, siendo capaces de viajar grandes distancias.

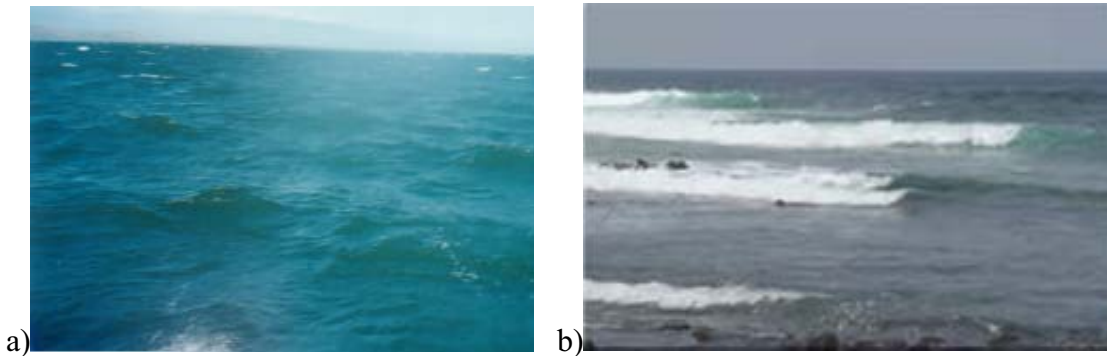


Figura 1.1 a) Oleaje tipo SEA; b) Oleaje tipo SWELL

1.1 Principales parámetros para caracterizar a una onda

Para entender el comportamiento del oleaje, se han desarrollado un sin fin de teorías, en un intento de explicar el fenómeno mediante modelos matemáticos. Así para entender la generación y transformación del oleaje y consecuentemente el desarrollo de modelos, es

necesario definir los parámetros necesarios y suficientes para su caracterización. Estos se describen a continuación:

- ⊕ *Altura de ola (H)*, se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle, en donde la cresta es al parte mas alta de la ola y el valle es la parte mas baja.
- ⊕ *Longitud de onda (L)*, es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos.
- ⊕ *Periodo (T)*, tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto.
- ⊕ *Celeridad (C)*, la velocidad de propagación, se calcula dividiendo la longitud de onda entre el periodo $C = \frac{L}{T}$.
- ⊕ *Profundidad (h)*, es la distancia vertical medida a partir del nivel de aguas tranquilas.
- ⊕ *Perfil de la superficie de agua (η)*, es desplazamiento de la superficie del agua con relación al nivel de aguas tranquilas.
- ⊕ *Amplitud de la ola (A)*, es igual a la mitad de la altura de la ola.

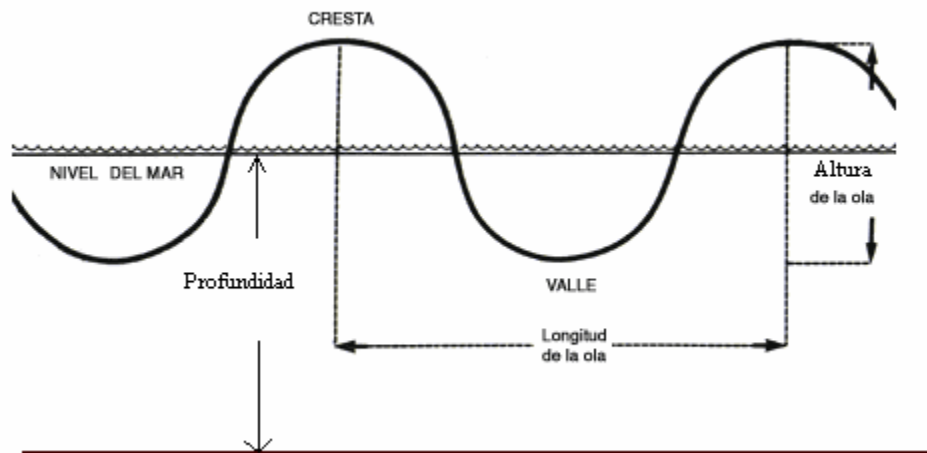


Figura 1.2 *Parámetros que caracterizan una onda*

1.2 Procesos del oleaje

El oleaje durante su propagación presenta transformaciones respecto a las condiciones iniciales que tenía. Estas afectaciones del oleaje se deben, al cambio en la batimetría del

fondo y a la presencia de obstáculos, como escolleras, rompeolas, espaldones o instalaciones portuarias.

Así la predicción del oleaje, como sus características sobre las playas, la línea costera y mar adentro es de suma importancia para decidir y realizar un buen diseño de las obras marítimas.

Estos procesos son refracción, difracción, reflexión, rotura, someramiento o la combinación de estos, dichos cambios se traducen en una variación de la altura de la ola, la disminución de la longitud de onda y en ocasiones, cambios en la dirección de propagación.

1.2.1 Refracción

Es el proceso de modificación de la orientación de las crestas de las olas por influencia del fondo. En la práctica esta transformación es importante porque:

- ⊕ Genera concentración o disipación de la energía del oleaje en ciertos tramos de la costa. En geomorfología litoral, explica el hecho de que para un mismo tipo de ola, la energía liberada en algunos sectores es mayor que en otros y esto tiene consecuencias en las formas resultantes.
- ⊕ Es el proceso de transformación del oleaje caracterizado, por que el frente de ola tiende hacerse paralelo a la línea de costa, causado por la variación de la batimetría. En la práctica esta transformación es importante por las razones siguientes:



Figura 1.3 Refracción del oleaje

1.2.2 Difracción

La difracción de las ondas es un fenómeno que ocurre cuando la propagación del oleaje es interrumpido por un obstáculo, por ejemplo, un rompeolas, instalaciones portuarias, escolleras o pequeñas islas.

El cálculo de los efectos de la difracción son importantes, ya que la distribución de la altura del oleaje, por ejemplo, en una bahía protegida o un puerto se ve afectada su operabilidad, así mismo el apropiado diseño y localización de la entrada a un puerto para evitar el rebase y la resonancia requiere el conocimiento de los efectos de la difracción.

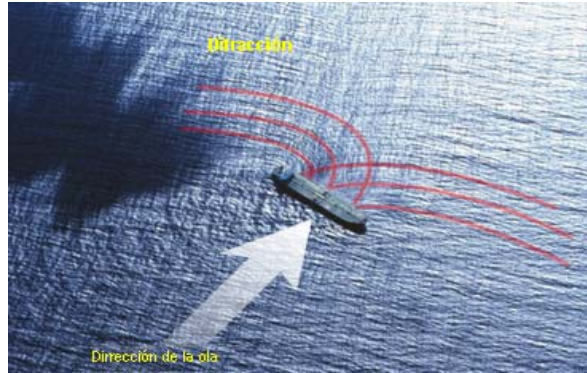


Figura 1.4 Difracción del oleaje

1.2.3 Reflexión

El estudio de la reflexión es tan importante como los fenómenos antes descritos, cuando las olas encuentran un obstáculo (muro, espigón, etc), éstas son reflejadas, es decir, reenviadas en la dirección exactamente opuesta de la dirección de incidencia. Si las olas atacan oblicuamente el obstáculo, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Además, si la estructura contra la que choca la ola es impermeable, la reflexión es máxima pudiendo llegar a la resonancia, en cambio si el medio es permeable parte de la energía se disipa además de disminuir el efecto de la reflexión.



Figura 1.5 Reflexión del oleaje debido a la presencia de rompeolas

1.2.4 Rotura

Cuando disminuye la profundidad, a medida que la ola se acerca a la costa, el fondo hace que la ola se deforme aumentando su altura y disminuyendo la longitud de la onda. Esto ocurre cuando el valor de la profundidad es igual a la mitad de la longitud de onda; se genera la rompiente cuando la parte delantera de la ola se hace muy abrupta debido al exceso de deformación. La rotura de las ondas ha sido clasificada dentro de cuatro grupos, *Descartamiento*, (*Spilling*), *Voluta*, (*Plunging*), *Colapso*, (*Collapsing*) y

Oscilación (Surging). Los cuatro tipos de rotura pueden ocurrir en aguas bajas, de acuerdo con la pendiente de la playa, pero solamente los tipos de rotura Spilling y el Plunging ocurren en aguas profundas.

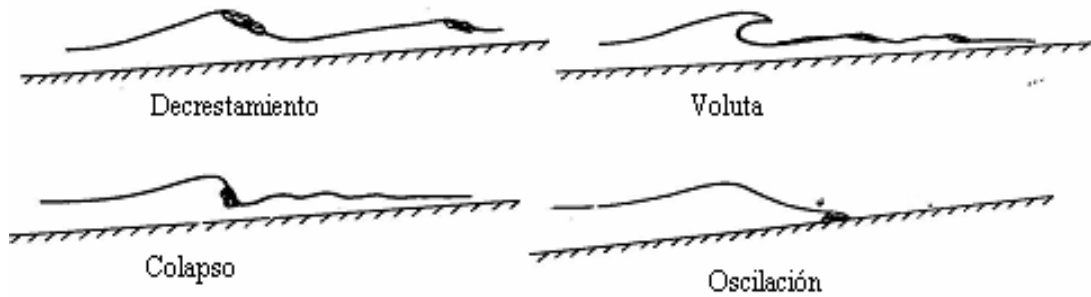


Figura 1.6 Tipos de rotura del oleaje

1.3 Teorías de comportamiento del oleaje

Para poder analizar el oleaje es preciso utilizar un modelo que lo represente. Este modelo debe predecir con fiabilidad el comportamiento de las olas que se generan en el laboratorio, y debe además ser sencillo. Para ello son necesarias ciertas simplificaciones de la realidad. De hecho, el modelo utilizado tanto en la generación del oleaje como en su medición deriva de la teoría lineal del oleaje o teoría de pequeña amplitud. Pero la situación que se reproduce en el laboratorio, al aplicar la teoría lineal podría alejarse de la realidad, y sería necesaria la aplicación de otras teorías de transmisión del oleaje.

La propagación de oleaje en un fluido es un proceso no lineal. Por lo que, para poder aplicar un modelo que represente fácilmente su comportamiento es necesario que se realicen algunas consideraciones o simplificaciones para su análisis físico y matemático, las más comunes son las siguientes:

- ⊕ La propagación del oleaje es un problema tridimensional pero puede ser simplificado en uno de dos dimensiones donde u y w expresan las componentes verticales y horizontales de la velocidad de las partículas de agua.
- ⊕ El agua puede ser considerada como un fluido incompresible y sin viscosidad.
- ⊕ El comportamiento del fluido es prácticamente irrotacional.
- ⊕ El fondo es fijo e impermeable.
- ⊕ La única fuerza exterior que tiene efecto sobre el fluido es la gravedad de la tierra.
- ⊕ La ola es periódica y regular.

- ⊕ El efecto de Coriolis es despreciable.
- ⊕ La tensión superficial es despreciable.

Las teorías de onda que más se utilizan para el diseño de obras marítimas son:

- ☞ Teoría lineal o de Airy.
- ☞ Teoría de Stokes (segundo y tercer orden).
- ☞ Teoría Cnoidal.
- ☞ Teoría de la función flujo gradiente.
- ☞ Teoría hiperbólica de ondas.
- ☞ Teoría de la onda solitaria.



CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE SEÑALES DE OLEAJE





CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE SEÑALES DE OLEAJE



2. ANÁLISIS DE SEÑALES DE OLAJE

La caracterización del clima marítimo y sus estados de mar a partir de señales de oleaje medidas en campo o en el laboratorio a partir de simulaciones, puede ser realizada bajo dos perspectivas de análisis, una temporal y otra frecuencial, ambas complementarias y no excluyentes.

El análisis en el dominio del tiempo (temporal) considera las propiedades estadísticas, parámetros y distribuciones con respecto al desplazamiento de la superficie libre. Mientras que el análisis espectral o en el dominio de la frecuencia (frecuencial) basa su tratamiento en el concepto de superposición lineal de las ondas en la señal de oleaje, bajo este supuesto, a través de la transformada rápida de Fourier (FFT), se estima la función de distribución espectral para obtener propiedades y parámetros que permitan definir un estado de mar.

2.1 Análisis Temporal

2.1.1 La muestra

Generalmente, la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística temporal de un estado de mar es un registro de oleaje medido por un aparato, por lo general un sensor de presión, ubicado en algún punto del mar, por lo general en profundidades someras no muy lejos de la costa o bien en el laboratorio si se trata de la realización de modelos.

Se admite entonces, que estos registros tendrán un aspecto similar al de la figura 2.1, en la que se muestran los parámetros fundamentales que definen al oleaje, tales como: la altura de ola (H) y su período asociado (T).

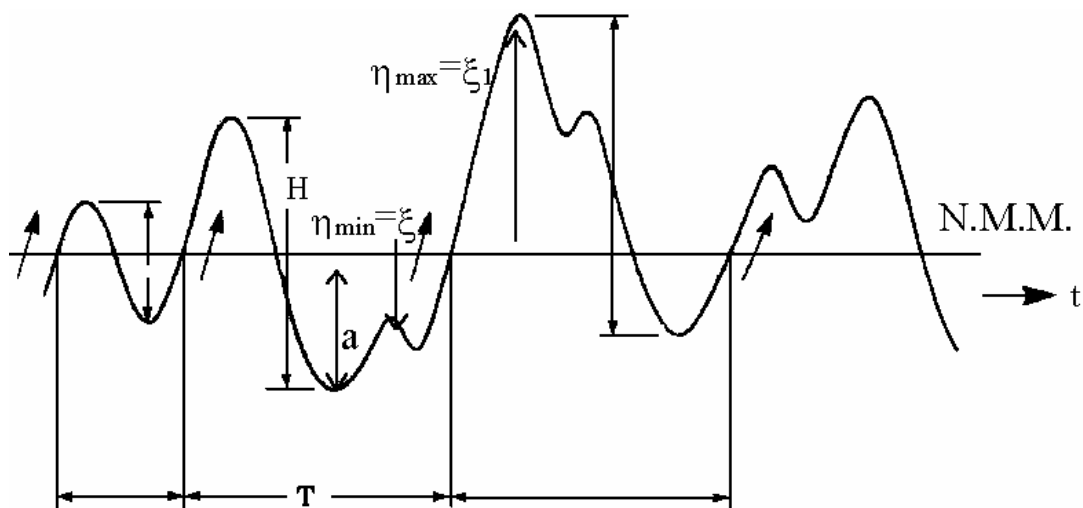


Figura 2.1 Parámetros que definen al oleaje (Tomada de Silva, 2005)

Como primer término se considera el análisis estadístico de la muestra, con lo que se calculan, para el caso de las alturas y períodos de ola, los parámetros estadísticos que se indican a continuación:

Número de sucesos	N
Media	$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Media cuadrática	$X_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$
Media de los N/n valores mayores	$X_{1/n}$
Casos particulares	$X_{1/3}$ valor significativo o $X_{1/10}$ valor un décimo
Valor máximo del parámetro en la muestra	$X_{máx}$

Antes evaluar los parámetros descritos anteriormente, es necesario realizar algunas operaciones matemáticas que ayuden a evitar errores en el cálculo de los parámetros, sin alterar la información estadística contenida en la muestra, para ello se considera la siguiente metodología, bajo el dominio del tiempo:

1. Corrección del nivel medio
2. Caracterización de la señal (separa H y T)
3. Estimación de cruces
4. Evaluación de parámetros y velocidades orbitales.
5. Determinación de la dirección del oleaje

A continuación se describe a detalle cada uno de los pasos y métodos existentes para llevar a cabo un análisis temporal.

2.1.2 Corrección del nivel medio

Generalmente, los registros de oleaje están afectados por la influencia de la variación de la marea, en algunos casos el impacto que tiene sobre el nivel medio del registro es muy grande. Es por ello que se hace necesario realizar la corrección de dicho nivel, y de esa forma evitar distorsiones en el análisis estadístico.

Existen tres procedimientos fundamentales para llevar a cabo esta corrección.

Media aritmética o corrección de orden cero. Consiste en obtener la media aritmética de la superficie libre para todo el registro, para posteriormente restarla a cada dato.

$$\bar{\eta}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \quad (0.1)$$

Este procedimiento es adecuado cuando los efectos de marea no tiene gran impacto el registro del oleaje, es decir cuando es de magnitud pequeña, relativa a la profundidad a la que se mide.

Corrección lineal o de orden uno. La ecuación para realizar esta corrección se obtiene por medio del método de mínimos cuadrados, tal que:

$$\bar{\eta}_n = A_0 + A_1 n \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (0.2)$$

donde,

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_2 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2} \quad (0.3) \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2} \quad (0.4)$$

$$N_r = \sum_{n=1}^N n^r \quad (0.5) \quad Y_r = \sum_{n=1}^N n^r \eta_n \quad (0.6)$$

N denota el número de puntos en la muestra

Esta corrección es adecuada si se tiene un registro de oleaje superpuesto a una onda de marea semidiurna y además tiene una duración menor a que el periodo de la marea, y si se encuentra en la franja de ascenso, zona 1 de la fig. 2.2

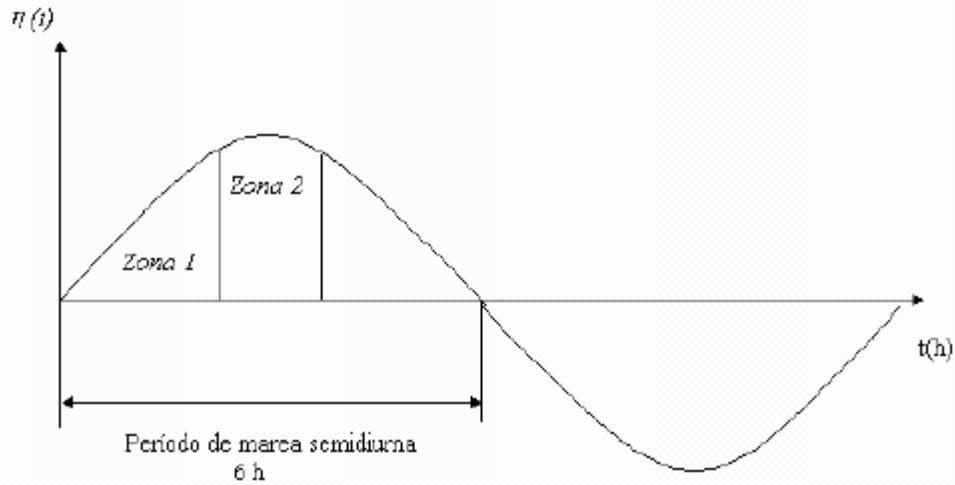


Figura 2.2 Marea Semidiurna (Tomada de Silva, 2005).

Corrección Parabólica o de segundo orden. Siguiendo una metodología similar a la corrección lineal, se obtiene una expresión de segundo grado. Esta corrección queda expresada de la forma siguiente:

$$\bar{\eta}_n = B_0 + B_1n + B_2n^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (0.7)$$

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{\Delta} \left[Y_0 (N_2N_4 - N_3^2) + Y_1 (N_2N_3 - N_1N_4) + Y_2 (N_1N_3 - N_2^2) \right], \\ B_1 &= \frac{1}{\Delta} \left[Y_0 (N_2N_3 - N_1N_4) + Y_1 (N_0N_4 - N_2^2) + Y_2 (N_1N_2 - N_0N_3) \right] \\ B_2 &= \frac{1}{\Delta} \left[Y_0 (N_1N_3 - N_2^2) + Y_1 (N_1N_2 - N_0N_3) + Y_2 (N_0N_2 - N_1^2) \right] \\ \Delta &= N_0N_2N_4 + 2N_1N_2N_3 - N_2^3 - N_0N_3^2 - N_1^2N_4 \end{aligned} \quad (0.8)$$

Si un registro indica la presencia de variaciones de largo período, del orden de minutos, en el nivel medio, se deberá aplicar un filtro numérico

Está se emplea, cuando, además de que la influencia de ondas largas es importante, la muestra se encuentra en la zona 2, (ver figura 2.2).

Una vez que se ha aplicado cualquiera de las metodologías descritas anteriormente, la corrección se realiza restando el valor medio del valor original de cada uno de los datos, lo que queda expresado en la siguiente ecuación:

$$\eta_{icorregida} = \eta_{ideregistro} - \bar{\eta}_{ipromediocorregido} \quad (0.9)$$

2.1.3 Parametrización de la señal

Una vez que se ha corregido el nivel medio, se debe parametrizar la señal, esto es, calcular las alturas y períodos de ola. Para este propósito existen diversos métodos, los cuales se enuncian a continuación:

Método de pasos ascendentes por cero

Este método se basa en definir las olas en el cambio de signo de negativo a positivo, a través del siguiente criterio:

$$\eta_i \cdot \eta_{i+1} < 0 \quad \eta_{i+1} > 0 \quad (0.10)$$

donde η_i representa el i ésimo dato de la elevación de la superficie después de la corrección del nivel medio.

El periodo, T , en el cual cruza el nivel medio se determina por medio de una interpolación lineal entre el tiempo de muestreo de η_i y η_{i+1} . La diferencia en tiempo de este punto al siguiente paso ascendente define el período, y se expresa como:

$$t_a = \frac{\eta_{i+1}t_i - \eta_i t_{i+1}}{\eta_{i+1} - \eta_i} \quad ; \quad t_b = \frac{\eta_{i+1}t_i - \eta_i t_{i+1}}{\eta_{i+1} - \eta_i}$$

$$T = t_b - t_a \quad (0.11)$$

La condición para definir un máximo en el perfil es:

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad y \quad \eta_i > \eta_{i+1} \quad (0.12)$$

Para eliminar el problema de subestimación del máximo real entre dos puntos discretos, se deben estimar el tiempo y la elevación máxima después de ajustar la curva parabólica en función de los tres puntos η_{i-1} , η_i y η_{i+1} . La ecuación para el ajuste parabólico se puede expresar mediante las formulas siguientes:

$$\eta_{\max} = C - \frac{B^2}{4A} \quad (0.13) \quad y \quad t_{\max} = t_i - \frac{\Delta t B}{2A} \quad (0.14)$$

donde,

$$A = \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}) \quad ; \quad B = \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}) \quad ; \quad C = \eta_i$$

Para determinar la altura de ola, el punto más alto sobre la elevación de la superficie libre debe ser encontrado dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes. Una vez que se identificó este punto, se denota como η_i y entonces η_{\max} es estimada por medio de las ecuaciones anteriores. El punto más bajo o valle de la elevación, η_{\min} es calculado por medio de un proceso similar.

La altura de ola se calcula como la diferencia del valor máximo, η_{\max} , menos el mínimo, η_{\min} .

$$H = \eta_{\max} - \eta_{\min} \quad (0.15)$$

Método de pasos descendentes por cero

Este método es análogo al de pasos ascendentes por cero, la única diferencia es que las olas se definen en el cambio de signo de positivo a negativo, como se puede ver en la figura 2.3.

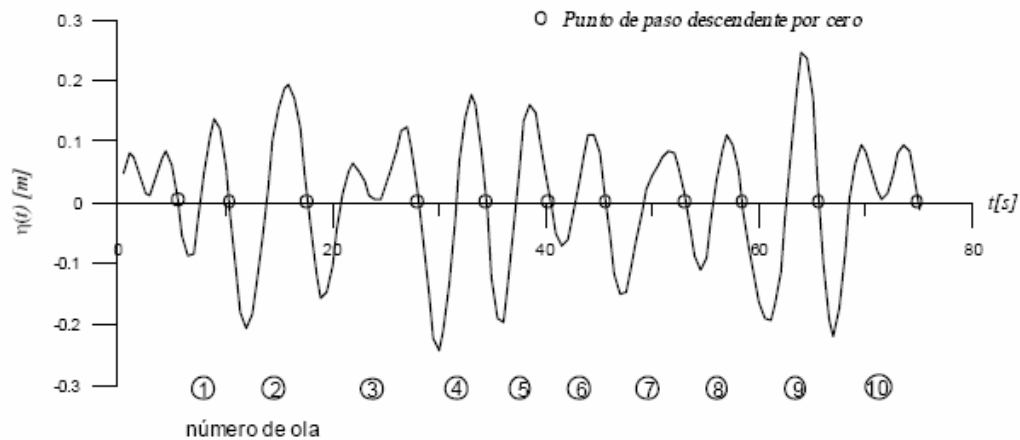


Figura 2.3 Definición de olas por el método de pasos descendentes. (Tomada de Silva, 2005)

Método de distancia entre crestas

Debido a la asimetría natural que se presenta en el oleaje, es decir, que no se tiene el mismo número de puntos del lado positivo que del negativo, el IAHR recomendó en 1986 que una altura de ola se debe definir a partir de la distancia entre cresta y cresta de la serie, tal como se muestra en la siguiente figura 2.4

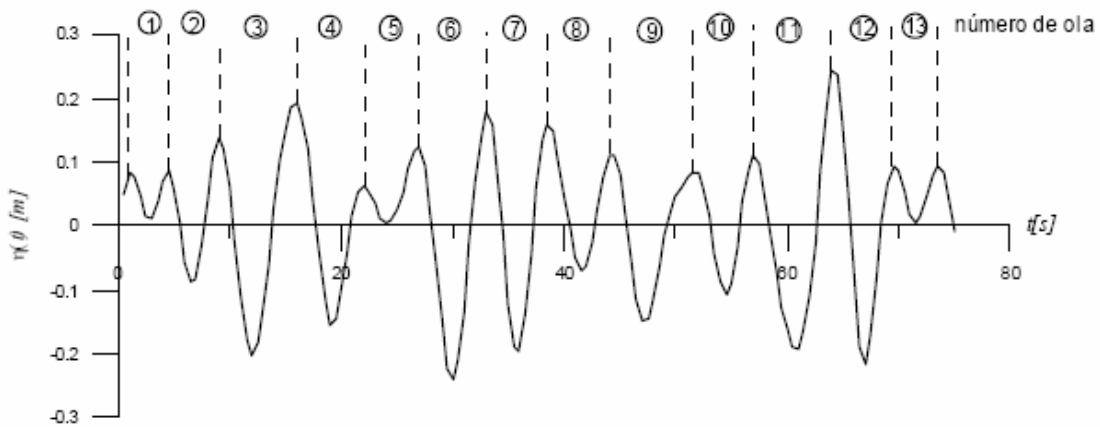


Figura 2.4 Definición de olas por el método de distancia entre crestas. (Tomada de Silva, 2005)

Método de distancia entre valles

Este método es semejante al anterior, solo que en este método es necesario encontrar los mínimos para separar las olas.

Estos dos últimos métodos no son de aplicación extendida, pues presentan el inconveniente de agregar a la estadística olas pequeñas que tenderán a distorsionar los resultados.

2.1.4 Determinación de los parámetros del oleaje

Corregido el nivel medio será necesario determinar los parámetros estadísticos mas importantes que definen a un estado de mar a partir de una serie de tiempo y son:

Variación del nivel medio del mar (set-up ó set-down):

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (0.16)$$

donde,

η_i elevación de la superficie libre del mar en el tiempo t_i .
 N número de eventos o datos que componen la muestra.

La variación de la media cuadrática (la varianza) de superficie del agua, η_{rms}^2 :

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (0.17)$$

La altura media y el período medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (0.18) \quad ; \quad \bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (0.19)$$

donde,

N_0 número de olas individuales de todo el registro.
 H_i altura de ola.
 T_i período de ola.

La altura cuadrática media:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (0.20)$$

La falta de oblicuidad o asimetría se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Skw = \frac{1}{N_0 \eta_{rms}^3} \sum_{i=1}^N \eta_i^3 \quad (0.21)$$

Parámetros relevantes

Existen otros parámetros importantes que caracterizan a un estado de mar tales como: altura significativa o un tercio, ola un medio, así como sus periodos asociados, para calcularlos se realiza el ordenamiento de mayor a menor de los valores correspondientes de altura-periodo de ola. Y se define, $H_{1/3}$ como la media aritmética del 33% de las alturas de ola más altas y $H_{1/2}$ representa el 50% de las olas más altas, de la misma forma para $H_{1/10}$, $H_{1/100}$, $H_{1/1000}$. Para alturas de oleaje que se ajustan a una distribución tipo Rayleigh, se cumple:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 1.41H_{rms} & H_{1/100} &= 2.36H_{rms} \\ H_{1/10} &= 1.80H_{rms} & H_{rms} &= \left[\frac{\sum H_i^2 \cdot f}{\sum f} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (0.22)$$

donde,

f frecuencia.

H_i altura del registro i -ésimo.

En los casos en los que los equipos de medición proporcionen datos de corriente es conveniente determinar la media y el valor máximo para ambas componentes, a partir de las siguientes expresiones:

$$\bar{U}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{x_i} \quad (0.23)$$

$$\bar{U}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{y_i}$$

2.1.5 Determinación de la dirección del oleaje

Si se observa la naturaleza, resulta claro que el oleaje no se propaga en una dirección específica, sino que se distribuye a lo largo de varias direcciones, dependiendo de la intensidad del viento o de la zona de generación.

A continuación, se describe la metodología recomendada para determinar la dirección del oleaje:

1. Procesar y almacenar ambas velocidades orbitales, U_x y U_y .
2. Estimar los valores medios por registro
3. Dibujar ambas velocidades en el sistema de referencia del aparato XY
4. Rotar el sistema de referencia XY los grados que indica la brújula en el aparato.

5. Determinar el sentido del oleaje de acuerdo con la posición de la costa.

2.2 Análisis Espectral

Este tipo de análisis, se basa en el estudio del espectro, el cual tiene un sin fin de formas, y representa como está distribuida la energía del oleaje en función de las frecuencias de la señal, y sus propiedades en el dominio de la frecuencia.

El modelo matemático del oleaje que se utiliza supone que una señal de superficie libre del mar es resultado de una suma de un gran número de ondas sinusoidales cuyas amplitudes vienen dadas por:

$$a_{2j+1}^2 = 2S(\omega_{2j+1})[(\omega_{2j+2} - \omega_{2j})] \quad (0.24)$$

o bien,

$$a_i^2 = 2S(\omega_i)\Delta\omega_i \quad (0.25)$$

Bajo esta consideración es consistente el uso de la teoría lineal de Airy, es posible afirmar que la energía contenida en la banda de frecuencia $\Delta\omega_i$ está asociada a una onda y obtenida por unidad de superficie se define como:

$$\frac{1}{8}\rho g H^2 = \frac{1}{2}\rho g a^2 = \frac{1}{2}\gamma a^2 \quad (0.26)$$

donde γ representa el peso específico del agua de mar.

De las ecuaciones anteriores se tiene que la energía por unidad de superficie contenida en la banda de frecuencias $\Delta\omega_i$, queda expresada como:

$$\frac{1}{2}\gamma[2S(\omega_i)\Delta\omega_i] \quad (0.27)$$

Por lo que la energía total del oleaje por unidad de superficie será:

$$\frac{1}{2}\gamma\left[\sum_i 2S(\omega_i)\Delta\omega_i\right] \quad (0.28)$$

o bien,

$$Energía = \frac{1}{2}\gamma \int_0^\infty 2S(\omega)d\omega \quad (0.29)$$

El fenómeno queda perfectamente definido mediante el espectro si se aceptan las hipótesis estadísticas que permiten estudiarlo. La precisión en el cálculo de la función de distribución espectral es muy importante para la validación del estudio a través de este tipo de análisis. El tratamiento al cual será sometida la serie es, en consecuencia, bastante subjetiva y en cada caso debe estudiarse la resolución espectral y el nivel de confianza que se desea tener para la estimación de los parámetros.

Para calcular los valores del espectro se hace uso de las series de Fourier. Para simplificar este procedimiento se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT), con lo que se reduce en gran medida el número de operaciones necesarias para su obtención más cortas.

La condición necesaria, para realizar un análisis adecuado, es que los registros contengan mínimo 100 olas y que el intervalo, Δt , de muestreo sea de una décima a una vigésima parte del período significativo, $T_{1/3}$, para así poder estimar la máxima frecuencia, conocida como *frecuencia de Nyquist*:

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad (0.30)$$

A continuación se presenta la metodología para realizar el análisis espectral del oleaje:

1. Corrección del nivel medio
2. Aplicación de una función ventana
3. Estimación de las componentes de Fourier
4. Cálculo del espectro de energía
5. Suavizado de espectro de energía
6. Parámetros espectrales
7. Estimación de la dirección del oleaje

De manera semejante a lo que se describió en el análisis temporal, antes de determinar los parámetros que caracterizan al oleaje, es necesario realizar correcciones al registro para evitar la presencia de distorsiones en el espectro denominado *efecto de solapamiento o aliasing*.

2.2.1 Corrección del nivel medio

Debido a la presencia de mareas o de ondas largas en el registro es necesaria la corrección espectral del nivel medio. Esto se realiza mediante la aplicación de un filtro espectral, que consiste en eliminar o filtrar la energía debida a la influencia de mareas o de ondas largas, generalmente menores a 0.02Hz. y se acepta que el oleaje está formado por una suma de ondas sinusoidales, tal que la superficie libre se representa como:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N/2} [a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \sin(2\pi f_n t)] \quad \text{para} \quad 0 \leq t < t_{m\acute{a}x} \quad (0.31)$$

a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

Si no existe la influencia de ondas largas la corrección se puede realizar empleando las correcciones consideradas para el análisis temporal.

2.2.2 Función Ventana

Con al finalidad de evitar las discontinuidades que se pudieran presentar al unir los extremos de la señal y antes de realizar un análisis armónico, una vez que se ha corregido el nivel medio, se procede a la corrección de los datos que conforman a dicha señal. Este proceso es conocido como la aplicación de una función ventana y se expresa como:

$$\eta(t_*) = b(t)\eta(t) \quad (0.32)$$

donde,

$\eta(t_*)$ perfil una vez aplicado una función ventana (corregido).

$b_i(t)$ se le conoce como profundidad de peso, $i = 1, 2$.

$\eta(t)$ perfil sin corrección.

Las funciones ventana mas utilizadas son las siguientes:

$$\text{Ventana tipo trapezoide} \quad b_1(t) = \begin{cases} \frac{t}{l} & : 0 \leq t \leq l \\ 1 & : l \leq t \leq N-l \\ \frac{N-t}{l} & : N-l < t \leq N \end{cases}$$

$$\text{Ventana tipo coseno} \quad b_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{l}\right) \right] & : 0 < t < l \\ 1 & : l \leq t \leq N-l \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(N-t)}{l}\right) \right] & : N-l < t \leq N \end{cases}$$

donde,

$l = 0.1N$

t instante analizado, $t = 1, 2, 3, \dots, N$

N total de datos que constituyen a la muestra.

Cuando se aplica la función ventana a una señal, el espectro de energía decrece, y los valores estimados son mucho menores que los reales, por lo que se deben multiplicar por un factor de corrección antes de evaluar la función de densidad espectral. Dicho factor se calcula como:

$$\beta = \frac{N}{\sum_{n=1}^N [b(t_i)^2]} \quad (0.33)$$

2.2.3 Cálculo de los coeficientes de Fourier

El cálculo se hace usando la técnica de la transformada de rápida de Fourier ,FFT por sus siglas en ingles, sin embargo, los algoritmos convencionales para su cálculo presentan una limitación en cuanto a que la longitud del registro debe ser una potencia de 2, esto es, el número de puntos o datos N del registro debe cumplir: $N = 2^m$. Por lo tanto cuando se programan los aparatos de medición de oleaje se procura que los datos cumplan con esta restricción, y en caso contrario el número de datos se ajusta ya sea eliminando el exceso de datos de la parte inicial o final del registro, o añadiendo los ceros necesarios al final del registro.

El problema fundamental de la adición de ceros es que se reduce el nivel de la energía total. La corrección a este problema se puede tratar de forma análoga al de la función ventana.

El algoritmo de cálculo de la transformada rápida de Fourier se incluye como anexo A de este trabajo.

2.2.4 Cálculo del espectro

La función de densidad espectral $S(f_n)$, es calculada mediante la FFT de las serie de datos de superficie libre $\eta(t)$, y se define a través de las siguientes expresiones:

$$S(f_n) = 0 \quad \text{para } n = 0 \quad (0.34)$$

$$S(f_n) = \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_n)|^2 \quad \text{para } n = 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (0.35)$$

donde $f_n = n\Delta f$. El intervalo de frecuencia Δf , se define a partir de la duración de la serie de tiempo, $t_{m\grave{a}x}$, tal que:

$$\Delta f = \frac{1}{t_{\text{máx}}} = \frac{1}{N\Delta t} \quad (0.36)$$

El espectro obtenido a partir de este procedimiento tiene una gran resolución estadística, sin embargo, para los casos de señales que contienen mucho ruido, es decir perturbaciones, la fiabilidad estadística disminuye.

Es por este motivo es conveniente emplear un procedimiento de suavizado del espectro, con el fin de aumentar la fiabilidad a costa de perder resolución.

2.2.5 Suavizado del espectro

Ya que se ha estimado el espectro, se observa que los valores fluctúan en torno a los valores del espectro real, para atenuar este comportamiento se realiza un suavizado del espectro utilizando una función de peso. Siendo las de mayor uso las siguientes:

Filtro rectangular

$$W_1(f_j) = \frac{1}{m}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right]$$

m representa el número de valores no suavizados que se utilizaron para el promedio.

Filtro triangular

$$W_2(f_j) = \frac{1}{W_2} \left\{ 1 - \frac{|j|}{\left[\frac{(m-1)}{2}\right]} \right\}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right]$$

Filtro parabólico

$$W_3(f_j) = \frac{1}{W_3} \left\{ 1 - \left(\frac{j}{\left[\frac{(m-1)}{2}\right]} \right)^2 \right\}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right]$$

Una vez determinada la función de peso está es aplicada al espectro, que en la práctica se calcula como un promedio ponderado y deforma discreta:

$$\widehat{S}(f) = \sum_{j=k-m}^{j=k+m} W(f_k - f_j) S(f_j) \quad (0.37)$$

donde,

$\overline{S}(f)$ espectro suavizado.

W función de peso utilizada.

$S(f_i)$ es el espectro sin suavizar.

Cuando el registro es suficientemente largo, algunos tramos del mismo pueden considerarse representativos del estado de mar que está estudiando. Es posible elegir varios segmentos de la misma longitud y promediar las estimaciones obtenidas para cada uno de ellos:

$$\widehat{S}(f_*) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n_s} S_n(f_j) \quad (0.38)$$

donde,

η_s número de segmentos tomados.

$\widehat{S}(f_*)$ espectro de energía promediado.

$s_n(f_j)$ espectro de energía j-ésimo.

2.2.6 Parámetros espectrales

Todos los parámetros espectrales se calculan a partir de sus diferentes momentos. El momento de orden “ n ” respecto al origen se define mediante la siguiente expresión:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (0.39)$$

donde $S(f)$ es la función densidad espectral y f es la frecuencia.

También se puede expresar en forma discreta como:

$$m_n = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^n S(f_i) \quad (0.40)$$

Anchura Espectral

Cartwright y Longuet-Higgins en 1956 proponen un parámetro para describir la anchura espectral \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad (0.41)$$

Si el espectro es de banda angosta \mathcal{E} tiende a 0, si es de banda ancha \mathcal{E} tiende a 1.

Dado a que la estimación del momento de cuarto orden es muy sensible valores que se tienen en altas frecuencias, para espectros que definen un estado de mar este parámetro no es representativo ya que puede inducir a fuertes errores. Para hacer más claro este problema, Longuet-Higgins propuso otro parámetro de anchura espectral, el cual depende de los momentos de orden inferior.

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (0.42)$$

Agudeza del pico Q_p ,

Este parámetro define la forma del espectro y fue propuesto por Goda, señalando que el valor es cercano a dos para olas generadas por viento.

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^{\infty} f(S(f))^2 df \quad (0.43)$$

o en su forma discreta:

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \sum_{n=1}^k f_i(S(f_i))^2 \quad (0.44)$$

Goda (1985) señala que Q_p es cercano a 2 para olas generadas por viento.

Variación cuadrática media de la superficie

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad (0.45)$$

Altura de ola

Altura de ola media cuadrática

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad (0.46)$$

Altura de ola de momento cero

$$H_{m_0} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (0.47)$$

Periodo

Es posible estimar el período medio de las olas a partir del espectro, de tal forma que se tienen dos ecuaciones para estimarlo y son:

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (0.48)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (0.49)$$

2.2.7 Estimación de la dirección del oleaje

El oleaje generado por el viento no se propaga en una sola dirección, por el contrario, su energía se distribuye a lo largo de varias direcciones, esto es, la energía asociada a las frecuencias con un valor cercano a la frecuencia modal se propagan principalmente con la dirección del viento, mientras que la energía asociada con frecuencias mayores o menores, se distribuye sobre un rango de diferentes direcciones.

Un análisis direccional del oleaje consiste en determinar la forma en que se distribuye su energía sobre frecuencias (o números de onda) y direcciones de propagación, de forma simultánea, es decir una distribución espectral y angular.

Para realizar este análisis existen varias metodologías como el método estocástico, análisis del espectro cruzado, métodos paramétricos, método de máxima verosimilitud, método de máxima entropía, método bayesiano, entre otros. Además, recientemente se han desarrollado otros métodos que han comprobado ser más eficaces, en la caracterización, entre los que se encuentra el agrupamiento del oleaje, modelos paramétricos de predicción del oleaje y análisis largo plazo.

CAPÍTULO 3

ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE

3. ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE

El diseño estructuras marítimas está basado en la necesidad de mantener estables las condiciones del clima marítimo dentro de un puerto y en la entrada del mismo, con el fin de proporcionar seguridad a las maniobras de las embarcaciones que operan. Al proyectarse este tipo de estructuras, el ingeniero generalmente considera como oleaje de diseño al que se tiene antes de construir la estructura, es decir considera únicamente el oleaje incidente, con lo que comete un error de no considerar al oleaje total que va actuar de forma continua sobre la misma y que es resultado de la suma de la componente incidente y la reflejada por la estructura.

Recientemente se ha verificado que las formulaciones obtenidas a partir de datos de altura de ola total presentan menor dispersión en el ajuste de la estabilidad de diques en talud. Teniendo en cuenta que los datos de oleaje que se utilizan a la hora de dimensionar una estructura marítima son valores de altura de ola incidente (y, por tanto, no total), utilizar estos datos como valores al momento de realizar el dimensionamiento de la estructura puede provocar que se esté sobredimensionando el dique o bien que las dimensiones proyectadas sean menores. Para conocer la relación que existe entre las alturas de ola total e incidente es de gran importancia la medición de la reflexión.

3.1 Reflexión del Oleaje

La reflexión de un tren de olas es el proceso por el cual parte de la energía no disipada del tren al incidir sobre un obstáculo, genera otro tren de olas en sentido contrario al incidente. La superposición de los dos trenes compone la ola total. La formación de esta ola total dependerá de factores como el coeficiente de reflexión, la distancia respecto a la estructura, el periodo, la profundidad y la pendiente del talud. Para poder obtener estos coeficientes de reflexión pueden utilizarse métodos de separación del oleaje total en incidente y reflejado.

Existen diferentes métodos empleados para la separación de la onda incidente y reflejada. Dependiendo del número de puntos de medición que se consideren para precisar el nivel de la superficie libre, estos métodos se dividen en dos grupos importantes:

Análisis en dos dimensiones 2D, que contemplan dos registros temporales de la superficie libre.

Análisis en tres dimensiones 3D, consideran tres o más series de oleaje.

Otra clasificación se basa en el tipo de oleaje para el que fueron desarrollados, y se dividen en:

Unidireccionales, éstos métodos consideran que el oleaje incidente y reflejado se propagan en la misma dirección, pero en sentidos opuestos, así mismo consideran que un tren de ondas irregulares puede representarse como la superposición de un número finito

de ondas incidentes lineales con diferentes características y que son reflejadas por la estructura.

Multidireccionales, considera que la propagación y reflexión de las ondas, se da en diferentes direcciones y con diferentes características, es decir presentan un comportamiento totalmente aleatorio.

Todas las técnicas de separación trabajan en el dominio de la frecuencia y asumen la validez de la teoría lineal de ondas, desarrollada por George Biddell Airy (1886), para el estudio del oleaje y se acepta la validez de las técnicas utilizadas dentro del análisis espectral del oleaje.

Los métodos de mayor aceptación y uso para la separación de la onda incidente y reflejada en dos dimensiones son el propuesto por Mansard y Funke (1980) y el de Goda y Suzuki (1976), existiendo otros, como los desarrollados por Zelt y Skjelbreia, Frigaard y Brorsen. Mientras que para el análisis en tres dimensiones se tienen métodos como los de máxima probabilidad, autovectores, máxima entropía y, máxima verosimilitud, entre otros. Sin embargo en este trabajo solo se utiliza al método propuesto por Mansard y Funke (modificado por Baquerizo (1995)) para el estudio de la reflexión, ya que de todos ellos es el más robusto.

3.2 Método de Mansard y Funke (modificado por Baquerizo (1995))

Este método se considera dentro del grupo de análisis en dos dimensiones y unidireccional, sin embargo utiliza tres puntos de medición de la superficie libre del agua, con lo que es posible mejorar los resultados de los métodos que sólo utilizan dos puntos de medición. Las hipótesis que se plantean para su desarrollo son las siguientes:

- ✓ Se tiene un fondo horizontal.
- ✓ La incidencia del oleaje sobre la estructura es normal a está.
- ✓ La distancia entre los puntos de medición y la estructura se asume que es conocida.

Este método utiliza la técnica mínimos cuadrados para obtener las amplitudes complejas del oleaje incidente y reflejado. Se admite que la serie medida puede escribirse de la forma:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N B_j^m e^{-i\omega_j t} \quad m=1,2,3 \quad (0.50)$$

donde, B_j^m son los coeficientes complejos de Fourier de la función, el oleaje puede escribirse como:

$$\eta(x_m, t) = \sum_{j=1}^N (z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m}) e^{-i\omega_j t} \quad (0.51)$$

Para cada frecuencia angular ω_j , se tiene que cumplir la función error dada por:

$$\varepsilon_j^m = z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m} - B_j^m \quad m = 1, 2, 3 \quad (0.52)$$

En general estas funciones tendrán valores complejos y no serán nulas debido a los errores que se cometen en la medición, dichos errores pueden ser ocasionados por ruidos y aspectos no lineales que se presentan en los sensores, así como por efectos no lineales de propagación del oleaje y efectos viscosos.

El objetivo del método es encontrar z_I^j, z_R^j tal que el error dado sea mínimo para cada componente j .

Se considera la función suma de los cuadrados de los módulos de los errores cometidos en cada uno de los N sensores y para cada una de las M frecuencias:

$$E_j = E_j(z_I^j, z_R^j) = \sum |\varepsilon_j^m|^2 \quad (0.53)$$

Debido a que E_j toma valores no negativos, tiene sentido matemático y físico buscar un punto $z_0^j = (z_I^j, z_R^j)$ que minimice la función aunque z_I^j, z_R^j sean valores complejos. Se denota a la parte real e imaginaria del número complejo como $\Re\{\}$, $\Im\{\}$ respectivamente.

Este mínimo debe verificar:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_j}{\partial \Re\{z_I^j\}} = 0 & \quad ; \quad \frac{\partial E_j}{\partial \Im\{z_I^j\}} = 0 \\ \frac{\partial E_j}{\partial \Re\{z_R^j\}} = 0 & \quad ; \quad \frac{\partial E_j}{\partial \Im\{z_R^j\}} = 0 \end{aligned} \quad (0.54)$$

Lo que equivale a resolver:

$$\frac{\partial E_j}{\partial z_I^j} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial E_j}{\partial z_R^j} = 0 \quad (0.55)$$

Al operar el sistema dado por la ecuación E_j se tiene:

$$\begin{cases} M \overline{z_I^j} + S_+ \overline{z_R^j} - B_I = 0 \\ M z_R^j + S_+ z_I^j - B_I = 0 \end{cases} \quad (0.56)$$

donde,

$$S_+ = \sum_{m=1}^M e^{2ik_x^j x_{m1}} \quad S_- = \sum_{m=1}^M e^{-2ik_x^j x_{m1}} \quad (0.57)$$

$$B_I = \sum_{m=1}^M \overline{B_j^m} e^{i(-k_x^j x_{m1} + k_y^j y)} \quad B_R = \sum_{m=1}^M \overline{B_j^m} e^{i(-k_x^j x_{m1} + k_y^j y)} \quad (0.58)$$

La solución al sistema está dada por:

$$\overline{z_I^j} = \frac{B_R M - B_I S_-}{M^2 - S_+ S_-} \quad \overline{z_R^j} = \frac{B_I M - B_R S_-}{M^2 - S_+ S_-} \quad (0.59)$$

La técnica de análisis se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Calcular el espectro de las series de oleaje total, obtenidas en cada punto, tal que para $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$, $\eta_3(t)$ se tienen los espectros suavizados: $S_1(k.\Delta f)$, $S_2(k.\Delta f)$, $S_3(k.\Delta f)$.

2. Obtener la amplitud de cada espectro por medio de:

$$A_1(k.\Delta f) = \sqrt{2.S_1(k.\Delta f).\Delta f}$$

3. Determinar el espectro cruzado en forma polar para las siguientes combinaciones:

$$\eta_1(t) \text{ con } \eta_2(t), \eta_1(t) \text{ con } \eta_3(t).$$

4. Obtener la fase del espectro a partir del espectro cruzado, tal que: $PH_{12}(k.\Delta f)$, $PH_{13}(k.\Delta f)$ y para el caso $PH_{11}(k.\Delta f) = 0$ para todo k .

5. Hacer pares entre los espectros cruzados y las amplitudes.

6. Evaluar las series incidente y reflejada z_I^j , z_R^j con el sistema de ecuaciones presentado.

7. Evaluar los espectros de las series incidente y reflejada con:

$$S_I(k.\Delta f) = \frac{\{z_I(k.\Delta f)\}^2}{2\Delta f} \quad S_R(k.\Delta f) = \frac{\{z_R(k.\Delta f)\}^2}{2\Delta f} \quad (0.60)$$

8. Determinar el coeficiente de reflexión a partir de la siguiente ecuación:

$$R(k, \Delta f) = \frac{z_R(k, \Delta f)}{z_I(k, \Delta f)} \quad (0.61)$$

Para entender de una forma simple el método modificado por Baquerizo, en el anexo B se describe a detalle el método de Mansard & Funke.

Limitaciones

Existen dos limitaciones en la aplicación del método, que se deben a la pérdida de coherencia entre señales y a que el sistema de ecuaciones (3.7) no tiene solución para ciertas frecuencias.

Pérdida de coherencia. Este método utiliza, al menos, tres series temporales y supone que entre ellas existe una gran correlación. Físicamente esto significa que las series registradas son manifestaciones del mismo fenómeno. Una forma de verificar esta correlación es mediante la función de coherencia, $\gamma_{ij}(f)$, que se define como:

$$\gamma_{ij}(f) = \left(\frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \right) \quad (0.62)$$

donde $S_{ij}(f)$ es el espectro cruzado entre las señales de los sensores i, j . $S_{ii}(f)$, $S_{jj}(f)$ son los correspondientes espectros suavizados de las series temporales. La función $\gamma_{ij}(f)$ toma valores entre 0 y 1. Los valores de $\gamma_{ij}(f)$ cercanos a uno corresponden a frecuencias para las que las señales están muy correlacionadas.

Casos en los que no existe solución. Los coeficientes complejos de Fourier de los trenes incidente z_I^j y reflejado z_R^j , dados por la ecuación (3.11) resultan del cálculo del cociente de dos determinantes. Cuando el denominador de esta ecuación es nulo, el sistema se indetermina y por lo tanto no tiene solución.

Ambos problemas se pueden solucionar si se colocan de forma adecuada los sensores de medición y si se toman en cuenta lo siguiente:

1. Que los sensores no estén muy alejados unos de otros, para que exista coherencia entre señales
2. Se debe evitar que los sensores estén uniformemente espaciados.

3.3 Definición del coeficiente de reflexión

A partir de las amplitudes complejas incidente, z_I^j y reflejada z_R^j , se pueden obtener las soluciones al sistema de ecuaciones dado por (3.7), y por tanto los espectros de las componentes incidente y reflejada del oleaje tal que:

$$S_I(k.\Delta f) = \frac{|z_I^j|^2}{2\Delta f} \quad (0.63) \quad . \quad S_R(k.\Delta f) = \frac{|z_R^j|^2}{2\Delta f} \quad (0.64)$$

donde Δf es el intervalo de frecuencia.

El cociente entre las amplitudes complejas de dichas componentes dado por $K_R(f)$, es un número complejo que por consecuencia tiene un módulo expresado como $|K_R(f)|$ que se denomina coeficiente de reflexión, que depende de la frecuencia y una fase, $\phi(f)$, si se expresa este número en su forma polar, se tiene:

$$K_R(f) = |K_R(f)|e^{i\phi(f)} \quad (0.65)$$

Finalmente, el coeficiente de reflexión queda definido como:

$$K_R(j\Delta f)^2 = \frac{|z_R^j|^2}{|z_I^j|^2} \quad (0.66)$$

Otra forma de calcular este coeficiente es por medio del cociente de la altura de ola media cuadrática reflejada entre la altura de ola media cuadrática incidente.

$$|R| = \frac{H_{rmsR}}{H_{rmsI}} \quad (0.67)$$

Por ultimo, la fase se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi(j\Delta f) = \text{ang} \tan \left(\frac{z_R^j}{z_I^j} \right) \quad (0.68)$$

CAPÍTULO 4

**COMPORTAMIENTO DE LOS DIQUES DE ABRIGO
FRENTE A LA ACCIÓN DEL OLEAJE**

4. COMPORTAMIENTO DE LOS DIQUES DE ABRIGO FRENTE A LA ACCIÓN DEL OLEAJE

Los diques de abrigo son estructuras diseñadas para proteger las costas de las dinámicas marinas, principalmente la acción del oleaje. Estos pueden ser de diversas tipologías, por ejemplo, diques en talud, verticales y mixtos.

El dique de abrigo en talud es comúnmente utilizado, por lo que el estudio de su estabilidad es de gran importancia. El modo de falla que más se ha estudiado es la extracción de piezas, debido a la importancia para la seguridad del dique.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3, cuando se dimensiona una estructura marítima los datos que se utilizan generalmente son valores de altura de ola incidente, lo cual puede provocar que se esté sobredimensionando el dique o bien que las dimensiones proyectadas sean menores. Los trabajos de Losada y López, 1999 muestran que este problema se reduce al tener en cuenta la reflexión del oleaje que interacciona con la estructura.

4.1 Influencia de la reflexión en los diques de abrigo

Cuando el oleaje se propaga sobre un fondo con pendiente suave disipa su energía gradualmente, ante esta situación la reflexión que se presenta es mínima. Sin embargo, si el oleaje se encuentra una pared vertical e impermeable, prácticamente toda la energía es devuelta y la reflexión es casi completa.

Estas dos situaciones son casos extremos, pero existen diferentes e infinitas situaciones intermedias en las que se producen fenómenos de reflexión, disipación, rotura y transmisión del oleaje.

En los diques de escollera que habitualmente se construyen, la reflexión es importante, ya que suelen ser estructuras con taludes en donde la mayor parte de las olas rompen en oscilación o colapso, con coeficientes de reflexión superiores a 0.4. Por lo tanto, los fenómenos de flujo y sus efectos sobre una estructura en talud dependen de la interacción entre el oleaje incidente y el reflejado.

Para determinar la interacción entre el oleaje incidente y el reflejado es necesario conocer bien el proceso de reflexión que origina el dique. Este proceso queda definido por el coeficiente de reflexión, y la fase, o desfase existente entre el oleaje incidente y el reflejado.

Dado que el objetivo de este trabajo se centra en el análisis de la reflexión, a continuación, se describen distintos casos en los que se presenta la reflexión como un proceso de transformación de la energía.

4.2 Procesos de transformación de la energía

Pared vertical impermeable: reflexión pura

Cuando el oleaje incide sobre una pared vertical indefinida, impermeable y lisa, la reflexión es completa, no existen procesos de disipación, rotura ni transmisión. Este problema es resuelto en teoría lineal, como la superposición de dos ondas de la misma longitud (L), periodo (T) y amplitud (A), que viajan en sentido contrario.

Talud impermeable: reflexión y rotura

Si la estructura tiene cierta pendiente, es impermeable, lisa e indefinida, se produce el fenómeno de rotura, disipando parte de la energía, mientras que la otra parte se refleja.

Ante este tipo de situación la reflexión es definida por el coeficiente de reflexión, el cual proporciona información del proceso, así como de su fase, éste último proporciona información sobre el punto ficticio donde se produce la reflexión efectiva.

Pared vertical permeable: reflexión y disipación

Cuando el oleaje incide sobre una estructura vertical, indefinida y permeable una parte de él se refleja y el resto se transmite a través de la estructura. El oleaje transmitido es disipado por fricción a medida que se propaga por el medio poroso.

Talud permeable: reflexión, rotura, transmisión y disipación

Si el oleaje incide sobre una talud permeable indefinido ocurre al combinación de procesos de reflexión del oleaje, tanto en la cara aguas arriba de la estructura como en la cara aguas abajo, rotura del oleaje sobre el talud, disipación del oleaje por fricción al atravesar el medio poroso y transmisión de parte de la energía al otro lado de la estructura.

4.3. Similitud de los diques de abrigo

Es muy frecuente que el estudio de la estabilidad de los diques se realice a través de ensayos de laboratorio sobre modelos a escala reducida.

Los ensayos de diques realizados en el laboratorio deben tener similitud dinámica de comportamiento entre modelo y prototipo, para lograr esto se aplica la escala de Froude. Esta escala es adecuada si la influencia de las fuerzas viscosas es despreciable en el comportamiento que se desea estudiar, lo que se cumple cuando el número de Reynolds es muy grande, otro inconveniente de la escala es que no se modela de forma correcta la permeabilidad del medio poroso al flujo del agua, este error se denomina 'efecto escala'.

La similitud en modelos dinámicos requiere que exista similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo. La similitud geométrica se

obtiene conservando el cociente entre las dimensiones lineales del prototipo y las correspondientes con el modelo, cumpliendo la ecuación:

$$e_L = \lambda = \frac{l_m}{l_p} \quad (0.69)$$

La similaridad cinemática se obtiene al conservar el cociente de las componentes de los movimientos vectoriales en el prototipo con sus correspondientes en el modelo.

Cuando dos sistemas son similares geométrica y cinemáticamente será necesario que también exista similaridad dinámica, por lo que se requiere mantener constante el cociente entre fuerzas vectoriales en el prototipo con sus correspondientes en el modelo. Dentro de las fuerzas que se deben considerar para la similitud dinámica se tiene el peso de las piezas empleadas para la construcción del dique. A continuación, se describe el procedimiento para cumplir con la escala del peso entre modelo y prototipo.

El cálculo del peso de los elementos que forman un dique es de suma importancia para la estabilidad del mismo y puede ser calculado mediante la fórmula de Hudson (1959), la cual proporciona un valor aproximado.

$$W_r = \frac{\gamma_r H^3}{k_\lambda (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (0.70)$$

donde,

γ_w	peso específico del agua de mar (kg/m^3)
γ_r	peso específico de las piezas (kg/m^3)
$S_r = \gamma_r / \gamma_w$	peso específico relativo
θ	ángulo de talud del rompeolas
k_λ	constante de estabilidad de las piezas o coeficiente de trabazón

Si H se expresa en metros, entonces W_r se obtiene en kilogramos.

La constante de estabilidad depende de los siguientes factores:

- Tipo de pieza utilizada
- Número de capas utilizadas en el talud
- Tipo de ola que llega al rompeolas (si la ola rompe o no sobre el talud)

Conociendo estos factores se puede conocer el número de piezas por unidad de área que serán necesarias y el espesor de la coraza a partir del número de unidades (N_r) por unidad de área (N_r / A):

$$\frac{N_r}{A} = n \cdot k_\lambda \cdot (1 - P - 100) \cdot \left| \frac{\gamma_r}{W_r} \right|^{2/3} \quad (0.71)$$

Ya se ha definido que la similitud geométrica se cumple, ahora, como los ensayos son realizados a superficie libre el número de Froude deberá ser el mismo tanto para el modelo como para el prototipo. En consecuencia:

$$e_v = e_L^{1/2} \quad (0.72)$$

$$e_T = e_L^{1/2} \quad (0.73)$$

donde,

e_v escala de velocidades

e_T escala de tiempo

Entonces se deberá determinar en que condiciones se cumple la similitud dinámica en los empujes de la ola sobre la estructura. Las fuerzas consideradas por Hudson fueron:

Arrastre

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D k_a l^2 V^2 \quad (0.74)$$

Inercia

$$F_I = C_m \rho_w k_v l^3 \frac{dv}{dT} \quad (0.75)$$

Peso de las unidades sumergidas

$$W_s = k_v l^3 (\gamma_r - \gamma_w) \quad (0.76)$$

donde,

ρ_w Densidad del agua

l Longitud característica de las piezas

k_a Coeficiente de área ($k_a l^2 = \text{área que opone la unidad al agua}$)

k_v Coeficiente de volumen ($k_v l^3 = \text{volumen de la unidad}$)

V Velocidad de flujo libre del agua sobre el rompeolas

C_D coeficiente de arrastre

C_m coeficiente de masa virtual

La similitud dinámica entre modelo y prototipo existirá si en puntos homólogos se verifica que los cocientes F_D / W_s y F_I / W_s son iguales. De las ecuaciones (4.6) y (4.7) se obtiene que:

$$\frac{F_D}{W_s} = \frac{0.5\rho_w C_D k_a l^2 V^2}{k_v l^3 (Y_r - Y_w)} = \frac{1}{2} C_D \frac{k_a}{k k_v^{2/3}} \frac{H}{(W_r/Y)^{1/3} (S_r - 1)} \quad (0.77)$$

Para ola rompiente, que es la considerada por Hudson, se demuestra que $V^2 = gH/k$ en que $k = f(H/\lambda, \sigma)$, siendo σ el ángulo de talud del fondo.

k es adimensional y su valor será el mismo en modelo y prototipo.

k_a y k_v toman igual valor respectivamente en modelo y prototipo, por ser coeficientes adimensionales.

Para asegurar que C_D toma el mismo valor en modelo y prototipo se debe mantener una de las siguientes dos condiciones:

- 1) Si en el prototipo $Re \gg Re_C$ entonces se debe asegurar en el modelo que $Re \gg Re_C$. Re_C es el número de Reynolds por encima del cual C_D no depende de dicho número.
- 2) Si en el prototipo $Re \ll Re_C$ entonces se debe cumplir la igualdad del número de Reynolds en el modelo y en el prototipo.

Suponiendo que se cumple una de las condiciones ($C_D = cte$) se tiene que:

$$\frac{H}{1/3} = cte \quad (0.78) \quad ; \quad \left(\frac{W_r}{\gamma_r} \right) \quad (0.79) \quad ; \quad (S_r - 1) \quad (0.80)$$

entonces:

$$e_{W_r} = \frac{e_L^3 e_{\gamma_r}}{e^3 (S_r - 1)} \quad (0.81)$$

Calculando F_I/W_s se tiene:

$$\frac{F_I}{W_s} = \frac{C_m \rho_w k_v l^3 \frac{dV}{dt}}{k_v l^3 (\gamma_r - \gamma_w)} \frac{C_m \frac{dV}{dt}}{g (S_r - 1)} \quad (0.82)$$

En condiciones de similitud $C_D = cte$.

También deberá cumplirse que:

$$\frac{e_{\left| \frac{dV}{dt} \right|}}{e_{(S_r - 1)}} = 1 \quad (0.83)$$

Pero $e_{(dV/dt)} = 1$ por mantenerse el número de Froude tanto en el modelo y el prototipo, por lo que $e_{(S_r-1)} = 1$

Por lo que:

$$S_{r_m} = S_{r_p} \quad (0.84)$$

sustituyendo esto último en (4.13) se obtiene que:

$$e_{W_r} = e_L^3 e_{\gamma_r} \quad (0.85)$$

e_W escala de peso

Con lo que quedan definidas las escalas de longitud y peso y consecuentemente la similitud entre modelo y prototipo.

Otra forma de cuantificar el peso de los elementos que constituyen el manto principal del dique es mediante una función de estabilidad.

Losada y Jiménez –Curto (1979), propusieron una expresión exponencial en función del número de Irribarren:

$$\psi = A_u \cdot (Ir - 2.654 \tan \alpha) \cdot e^{B_u \cdot (Ir - 2.654 \tan \alpha)} \quad (0.86)$$

Donde ψ (función de estabilidad), depende del talud, la altura de ola, el periodo, longitud de la ola, el tipo de pieza, los coeficientes de fricción y permeabilidad y otros coeficientes empíricos. A_u y B_u son coeficientes que dependen del talud del dique y del tipo de pieza del manto principal.

Entonces se tiene que el peso de las piezas estará dado por.

$$W = \psi \cdot \gamma_w \cdot H^3 \cdot \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} \quad (0.87)$$

El cálculo del peso de las piezas por medio de cualquiera de las dos formas descritas anteriormente solo es aplicable al diseño de diques según el criterio tradicional, es decir, las características de las capas inferiores dependen de la capa principal (tipo y peso de las piezas y espesor de la capa). Pero, para el caso de este trabajo las piezas que conforman el dique son homogéneas, es decir tienen las mismas dimensiones y peso, y aun no existe información de cómo realizar un cálculo aproximado de la determinación del peso de los elementos que constituirán la estructura, por lo que es necesario considerar otras características que nos definan la inestabilidad o el daño que se puede presentar.

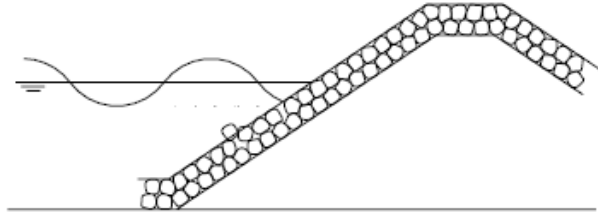
4.5 Evaluación de daño en la estabilidad de diques en talud y niveles de avería

En el estudio de la estabilidad de diques en talud es necesario utilizar un parámetro que exprese el nivel de averías del dique. A lo largo de la segunda mitad del siglo XX se han propuesto diferentes metodologías para medir el daño que se genera a un dique en talud.

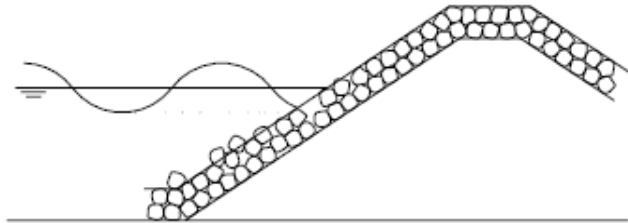
Iribarren (1955)

R. del Moral y J.M Berenguer (1980) expusieron la ponencia de Iribarren en la que definió dos niveles de daños:

- Iniciación de averías. Se produce cuando la curva acumulada del número de cantos desprendidos del manto se hace creciente. A partir de este punto el manto deja de tener estabilidad total para tener estabilidad parcial.



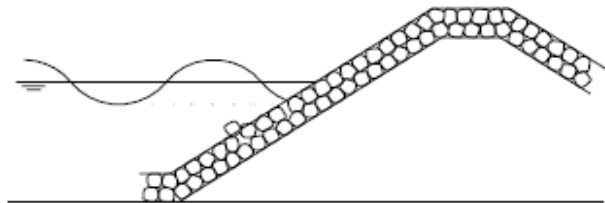
- Rotura total: Conocida popularmente como “Averia de Iribarren”. Se produce cuando la avería afecta al manto hasta la profundidad de un canto o, más concretamente, del lado del cubo equivalente, con lo que la primera capa del mismo queda totalmente rota y la estabilidad del dique comprometida. En este punto la estabilidad deja de ser parcial y se produce la inestabilidad.



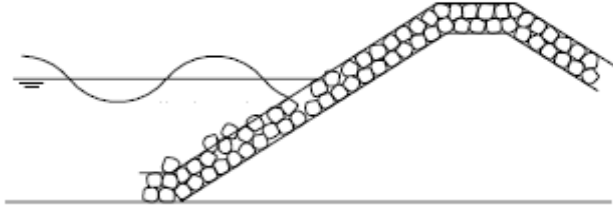
Losada (1986)

Definió 3 niveles de daño diferentes que pueden reconocerse a simple vista.

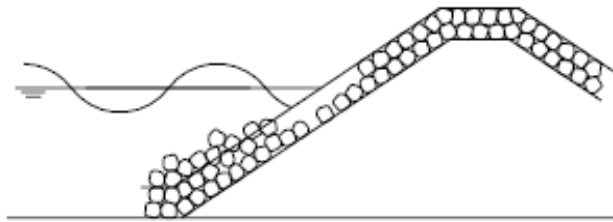
- Inicio de averías, el nivel de daño define las condiciones en las que se encuentra el manto principal cuando un 5% de las unidades son desplazadas de suposición original una distancia igual o superior a la del lado del cubo equivalente.



- Avería de Iribarren, se produce cuando la avería afecta al manto hasta la profundidad de un canto o, más concretamente, del lado del cubo equivalente. Es decir, cuando la zona erosionada alcanza la segunda capa del manto principal.



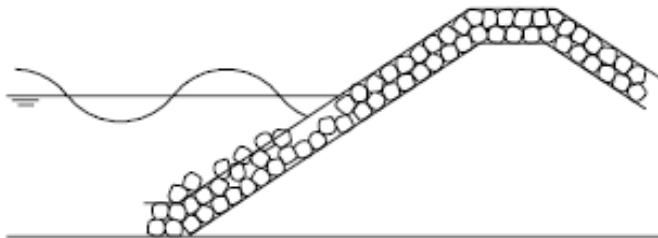
- Destrucción, se produce cuando el manto secundario (o filtro) es dañado y su material es extraído.



Vidal (1991)

C. Vidal y M. A. Losada (1998) añadieron en sus ensayos otro nivel a los 3 definidos por Losada (1998). Para ello intercalaron junto a los niveles de daño expuestos por Losada en 1986 un nuevo estado de avería expuesto por primera vez por Vidal en 1991 llamado inicio de destrucción.

- Inicio de destrucción, se produce al iniciarse el daño en la segunda capa del manto principal.



4.6 Consideración de la reflexión en la estabilidad de diques en talud

Cuando el oleaje interacciona con el dique en talud se produce la reflexión, también se presenta dicho fenómeno cuando existe un cambio en el medio de propagación (transición entre capas). La interacción el oleaje incidente con el reflejado modifica las características del mismo, aguas arriba del dique, es decir, el oleaje que actúa sobre las piezas del manto principal del dique varía ante la presencia de la reflexión.

El comportamiento hidrodinámico de un dique en talud se conoce desde hace tiempo, solo que tradicionalmente se ha considerado que el agente que determina la estabilidad de las piezas del manto principal del dique es el oleaje incidente, por lo tanto, el peso mínimo de las piezas se obtenía mediante resultados experimentales en donde se relacionaba la avería en el dique con el oleaje incidente. Por lo que el peso obtenido mostraba dispersiones grandes.

López (1998), hace un estudio detallado de la reflexión con el fin de determinar en qué situaciones la reflexión es importante y como puede evaluarse. De la revisión de los ensayos de Irribarren y Nogales (1965), del análisis de nuevos ensayos de reflexión y de su comparación con formulaciones empíricas y con un modelo numérico extrae las siguientes conclusiones:

- ⊕ En el intervalo $kh < 1.0$, el coeficiente de reflexión varía linealmente con kh , mientras que para $kh > 1.0$ es oscilatorio.
- ⊕ Para números de $Ir > 3.0$, el coeficiente de reflexión no depende de la altura de ola. En la región $Ir < 1.5$, el coeficiente de reflexión queda representado por el número de Irribarren; lo que se puede entender como que en esta región la rotura de la ola disipa la mayor parte de la energía incidente, reflejándose el residuo. En la región intermedia, tanto la representación con Ir como con kh , son igualmente imprecisas.
- ⊕ La permeabilidad del dique influye en el coeficiente de reflexión, siendo más reflejantes los diques impermeables, ya que los diques permeables dejan que la energía se transmita a través del dique, y una parte se disipa en este proceso y otra puede alcanzar el otro lado de la estructura.
- ⊕ La fase es aproximadamente lineal con kh , en todas las regiones de kh ; y tanto el modelo numérico como las formulaciones empíricas reproducen bastante adecuadamente este comportamiento.

Cuando se considera la reflexión del oleaje en el dique para el diseño de peso de las piezas la dispersión que se presenta es escasa.



CAPÍTULO 5
EXPERIMENTOS Y RESULTADOS



5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Equation Section 5

Uno de los factores determinantes del diseño de los diques rompeolas es el relativo al tipo y peso de las piezas del manto principal, que con un talud determinado, son capaces de resistir las solicitaciones debidas al oleaje. Dichas solicitaciones, como ya se ha mencionado deberán incluir el oleaje reflejado por al estructura.

Este trabajo se enfoca al análisis de la reflexión del oleaje que actúa sobre diques en talud permeable. Por lo que se realizaron ensayos con una tipología, dos taludes y bajo dos estados de mar.

5.1 Características de los modelos

Los modelos ensayados comienzan con una sección inicial de piezas cúbicas de concreto. La presencia del talud en los diques ocasiona que se presenten los fenómenos de reflexión y disipación de energía por rotura.

La estabilidad de los diques varía en función del ángulo de inclinación del talud. La trabazón entre las piezas aumenta también con el ángulo del talud.

Los diques en talud son de sección trapezoidal homogénea de piezas cúbicas de concreto, de dimensiones 3x3x3 centímetros.

La disposición de las piezas en la sección se realizo mediante el proceso de vertido.

5.1.2 Descripción geométrica de los diques ensayados

Dique 1 (1.5:1 regular)

Taludes	
• Lado mar	1.5:1
• Lado playa	1.25:1
Altura	84 cm
Longitud de la corona	16.5 cm
Estado de mar ensayado	Oleaje regular

Dique 2 (1.5:1 irregular)

Taludes	
• Lado mar	1.5:1
• Lado playa	1.25:1
Altura	84 cm.
Longitud de la corona	16.5 cm.
Estado de mar ensayado	Oleaje irregular

En los diques 1 y 2 solo varia el estado de mar al que son ensayados, las características geométricas son iguales.

Dique 3 (2:1 regular)

Taludes	
• Lado mar	2:1
• Lado playa	1:1
Altura	84 cm.
Longitud de la corona	16.5 cm.
Estado de mar ensayado	Oleaje regular

5.2 Arreglo de los dispositivos de medición

Con al finalidad de obtener datos, y posteriormente realizar el análisis de los mismos, se han colocado dispositivos para medir la superficie libre del agua. Estos dispositivos son siete sensores de nivel colocados de forma estratégica, tal que permitan la aplicación del método, descrito en el capítulo 3 de este trabajo, para la separación de al onda incidente y reflejada.

Separación entre sensores, el método utilizado para la separación de la onda incidente y reflejada, recomienda una distancia máxima y mínima entre sensores para la obtención de lecturas confiables, dicha separación debe encontrarse dentro del intervalo $\frac{\pi}{10} \leq k\Delta x \leq \frac{9\pi}{10}$, por lo que la distancias correspondientes son las siguientes:

$$\Delta x_{\min} = \frac{\pi}{10k} \quad (5.1)$$

$$\Delta x_{\max} = \frac{9\pi}{10k} \quad (5.2)$$

donde,

Δx_{\min} separación mínima entre sensores

Δx_{\max} separación máxima entre sensores

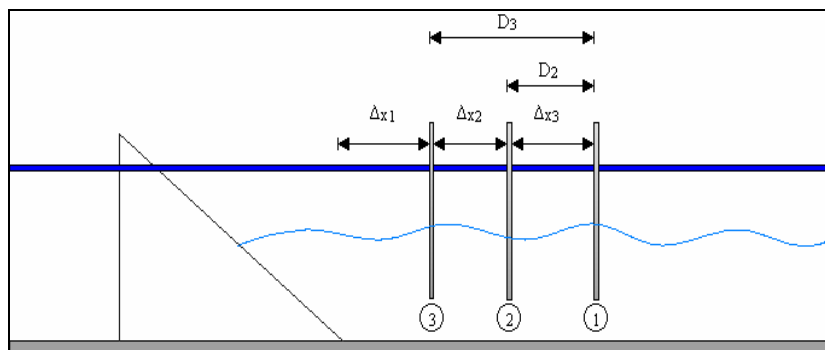


Figura 5.1 Posición relativa de los sensores

El arreglo de estos dispositivos de medición es el siguiente (Figura 5.2):

- Se utilizaron 7 sensores de nivel, numerados del 1 al 7 iniciando da partir del más cercano a la pala del generador.
- Se colocaron 3 sensores cerca de la pala y otros 3 cercanos al dique del lado mar, y uno más cerca del dique en el lado playa.
- La distancia del sensor 6 al sensor 5, así como la del sensor 3 al sensor 2 es de 30 centímetros.
- La distancia del sensor 6 al sensor 4, así como la del sensor 3 al sensor 1 es de 110 centímetros.
- La distancia del dique al sensor 6 es de 2.47 metros.
- La distancia del dique al sensor 7 es de 2.5 metros.

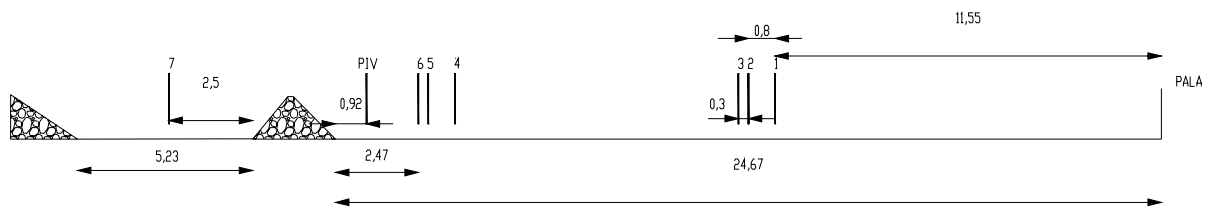


Figura 5.2 Arreglo de los dispositivos de medición en el canal.

Las distancias existentes entre la pala al sensor 1 y del dique al sensor 6 varían dependiendo del talud del dique ensayado.

Para los diques 1 y 2 (talud 1.5:1)

- La distancia de la pala, en su posición inicial, al sensor 1 es de 12.335 m.
- Para los ensayos de estos diques se utilizo además equipo láser para medir la velocidad de las partículas mediante el uso de imágenes (Particle Image Velocimetry (PIV))

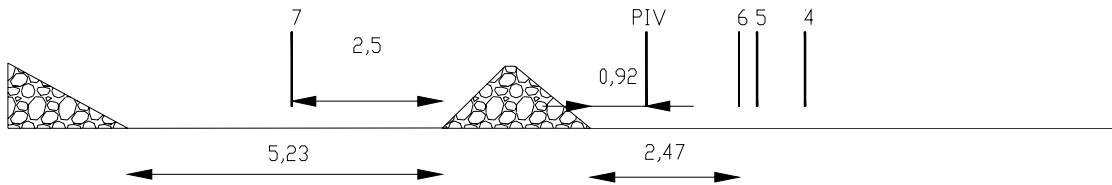


Figura 5.3 Arreglo de los dispositivos de medición cercanos al dique (1 y 2).

Para el dique 3

- La distancia de la pala, en su posición inicial, al sensor 1 es de 11.55 metros.

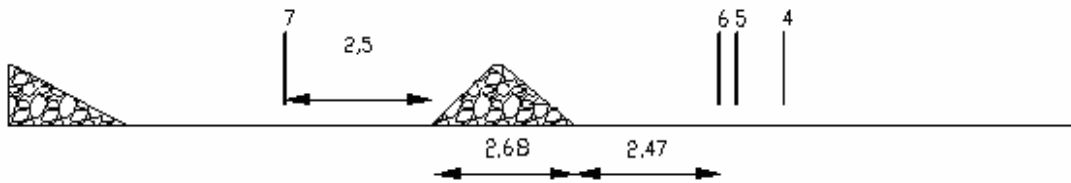


Figura 5.4 Arreglo de los dispositivos de medición cercanos al dique (3).

5.3 Descripción de los ensayos

Una vez que se ha colocado el modelo de dique que se desea ensayar y los dispositivos de medición se procede a llenar el canal a una profundidad de 54 centímetros, dicha profundidad será considerada como el nivel medio de la superficie del agua.

El periodo utilizado para realizar los ensayos depende del tipo de oleaje al que se va a experimentar o generar. Así pues, se definió que para la caracterización por oleaje regular el periodo T es igual a 1.315 s, mientras que para el oleaje irregular se utilizó un espectro Jonswap con T igual a 1.5775 s. El ángulo de incidencia del oleaje es normal al dique por lo tanto $\theta = 0^\circ$.

El numero de datos a obtener se basó tanto en el periodo como en el número de olas que se requieren para aplicar el método de separación de ondas, se considerará un mínimo de 500 olas, por lo que el número de datos requeridos para el oleaje regular es de 10240, y para el oleaje irregular es de 22016. Estos datos se ingresan en el software, que se tiene para el manejo de los sensores de nivel, para obtener los registros de la variación de la superficie del agua.

Para la recolección de datos se requiere que se lleve a cabo la calibración de los sensores de nivel, y posteriormente la introducción, en el software correspondiente, de los valores necesarios para la generación del oleaje y para la obtención de la señal de los sensores.

Terminado el procedimiento anterior se comienzan los ensayos con el modelo de dique y el estado de mar correspondiente.

1.- Se inicia el ensayo con una altura de ola inicial ($H_{inicial}$) teórica de magnitud pequeña.

- ⊕ Para el dique 1 la $H_{inicial} = 9$ cm
- ⊕ Para el dique 2 la $H_{inicial} = 7$ cm
- ⊕ Para el dique 3 la $H_{inicial} = 10$ cm

2.- Se observa y se realiza un conteo visual de las piezas cúbicas que se mueven durante el ensayo.

- 3.- Al mismo tiempo es registrado el oleaje mediante los sensores de nivel (obtención de "Test").
- 4.- Se observa si existen cambios en la pendiente, así como también se al forma de la rotura del oleaje.
- 5.- Si existe movimiento de cubos, se realiza un nuevo ensayo o tanda con al misma altura de ola, así hasta que se llegue a una tanda en la que no exista movimiento de piezas.
- 6.- Si no hay movimiento de piezas se aumenta la altura de la ola con un incremento (ΔH) igual a un centímetro, y se repite el proceso.
- 7.- Cuando deja de haber movimiento de piezas y se observa un cambio en el perfil inicial con una tendencia a obtener un perfil en S, se ensaya el dique para las alturas de ola de inicio de avería, H_{IA} , avería de Iribarren, H_{AI} , de inicio de destrucción, H_d , y por ultimo, la altura de ola que se tenia al llegar a este nuevo perfil. Para estas cuatro alturas de ola, los movimientos de piezas deben ser nulos o despreciables.
- 8.- Cuando se cumple la condición anterior se procede a perfilar la superficie del dique, con ayuda de una estación total. Se realizan 5 perfiles equiespaciados transversalmente sobre el talud del dique.
- 9.- Al inicio de cada ensayo se toma una fotografía, con al finalidad de tener información sucesiva de la variación del perfil. En algunos ensayos se realizó la grabación de video.

Este procedimiento se repite hasta obtener un perfil de equilibrio en al sección ensayada. H_{IA} , H_{AI} , H_d son las alturas de ola que indican el nivel de avería o daño que se produce en el dique, obtenidas mediante la observación y de acuerdo a la definición de daño propuesta por Losada (1986).

Observando el procedimiento para la realización de los ensayos se puede ver que existen "Test" de dos tipos o ciclos.

El ciclo 1 se realiza siempre, mientras que el segundo depende del resultado del primero.

Ciclo 1 del Test. Este ciclo esta formado por una secuencia de tandas de igual altura de ola. Cada tanda se caracteriza porque tiene una altura de ola constante y una duración de 10 minutos aproximadamente en el caso del oleaje regular y de 30 minutos para el caso del irregular.

Para decidir si se ha de realizar el segundo *Ciclo del Test*, se observa si han ocurrido cambios en el perfil del dique. El primer cambio del perfil se identifica con la formación

de una curva en S, es decir ocurre una disminución de piezas en la zona superior del talud y en la zona baja ocurre un depósito de las piezas desplazadas arriba.

Si el perfil no ha cambiado se pasa al siguiente “*Test*”, incrementando la altura tal como se indica en el punto 6 del procedimiento para la realización de los ensayos. Si el perfil ha cambiado, se realiza el *Ciclo 2*.

Ciclo 2 del Test. El objetivo de este ciclo es comprobar que el nuevo perfil deformado es estable bajo la acción de altura de olas inferiores a la altura de ola del ciclo 1 del Test (punto 7 del procedimiento).

5.4 Análisis de datos

Una vez que se obtiene toda la información de los cambios de nivel de la superficie libre del agua mediante los registros de los sensores, se procede a realizar la conversión de los datos que salen en crudo en unidades de voltaje a unidades de metros, con el programa “lehrwd.for”, que además realiza el análisis temporal de la señal.

Posteriormente se introducen los archivos con la señal corregida a otro programa, llamado “ref_mod.for”. Dicho programa calcula el valor de los coeficientes de Fourier para posteriormente realizar la separación de la ola incidente y reflejada aplicando el método de Mansard y Funke modificado por Baquerizo y descrito en el capítulo 3 de este trabajo, también realiza la estimación de los parámetros requeridos para caracterizar el oleaje.

A continuación se presenta un diagrama de flujo del proceso seguido para realizar el análisis de los datos.

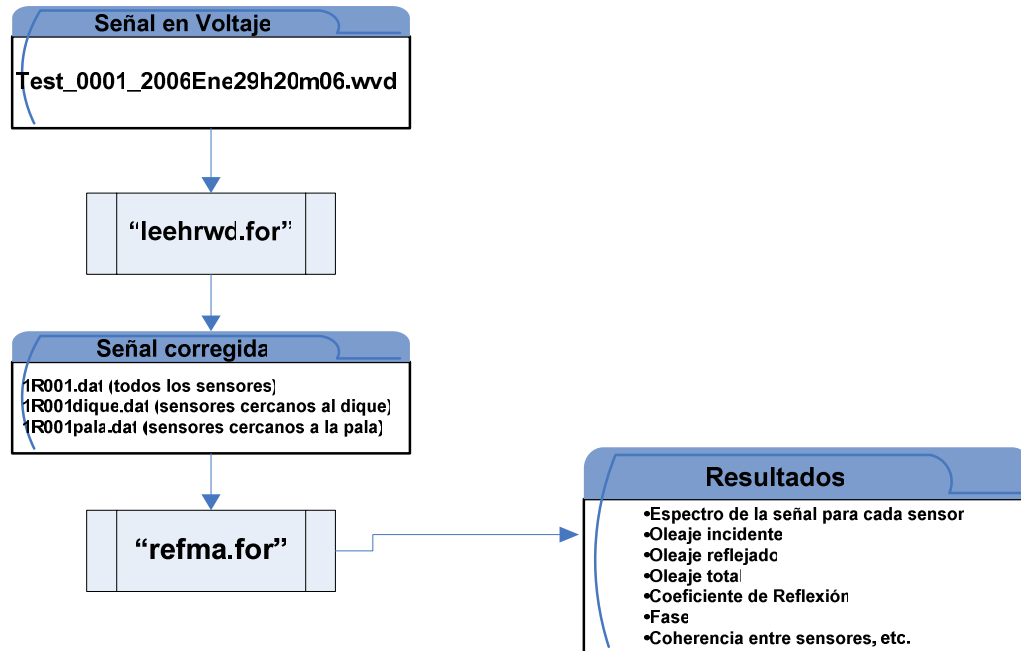


Figura 5.5 Diagrama de flujo del procesamiento de la señal

Con los resultados que se obtienen es posible observar el comportamiento que tiene la reflexión del oleaje y los efectos que ésta produce en la estabilidad de los rompeolas exentos, ensayados en el laboratorio.

5.5 Resultados

En seguida se presentan las graficas de resultados del comportamiento del oleaje al interactuar con los diques.

Dique 1 (1.5:1 oleaje regular)

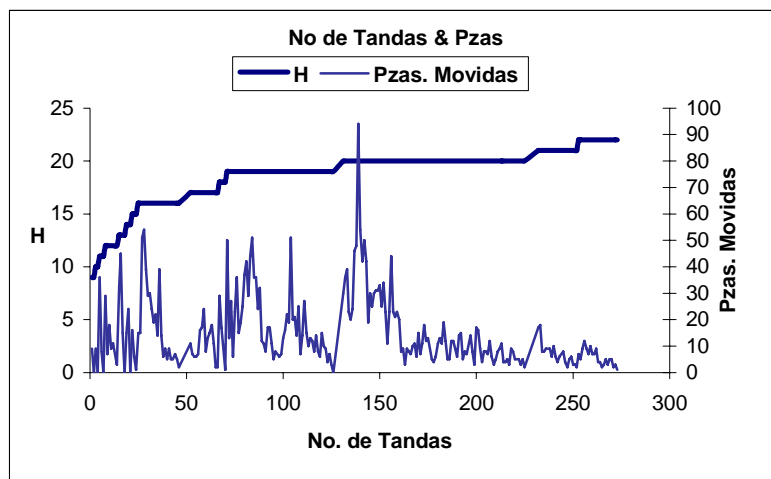


Figura 5.6 Proceso de demanda de piezas del dique 1, al variar la altura de ola.

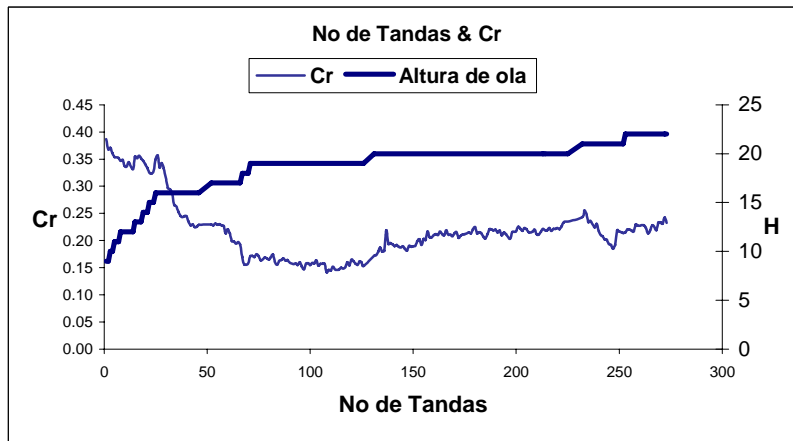


Figura 5.7 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique)

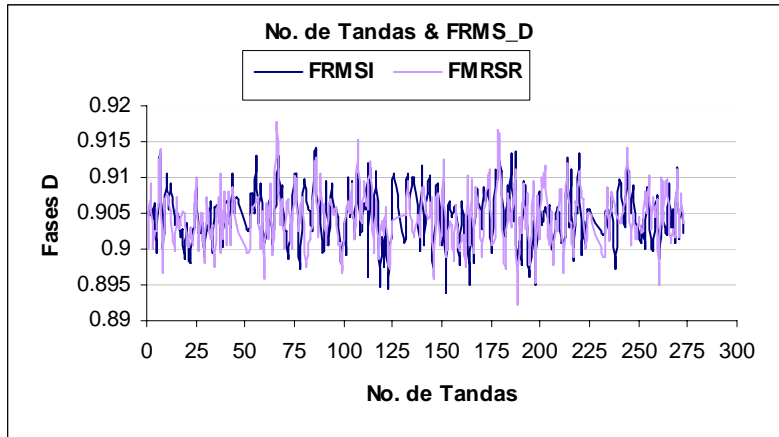


Figura 5.8 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.

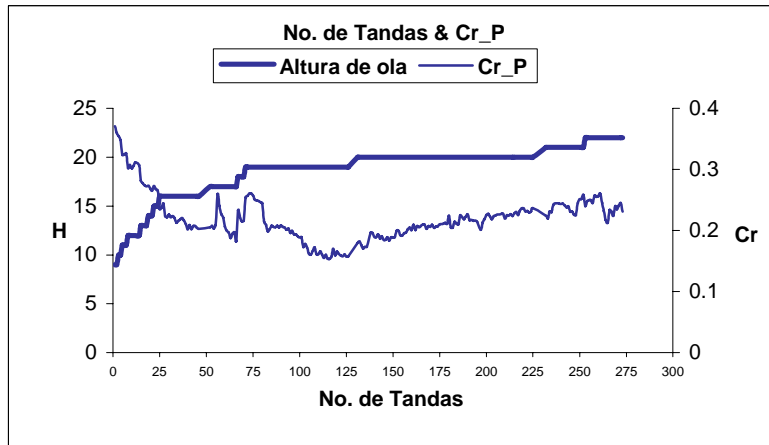


Figura 5.9 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala)

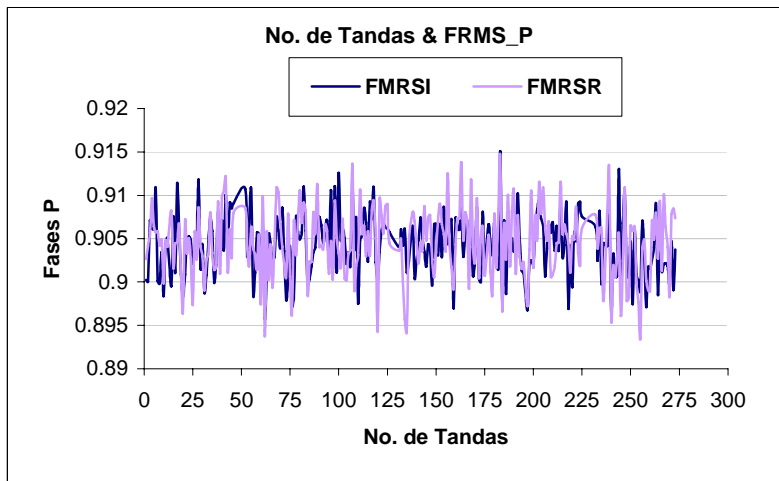


Figura 5.10 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.

Dique 2 (1.5:1 oleaje irregular)

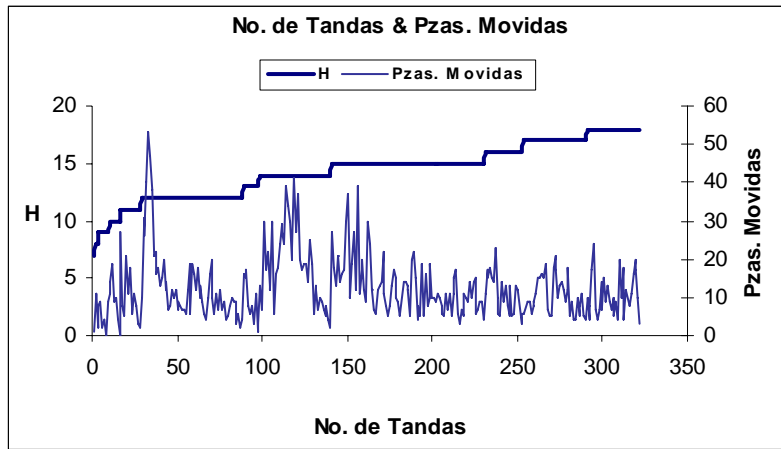


Figura 5.11 Proceso de demanda de piezas del dique 2, al variar la altura de ola.

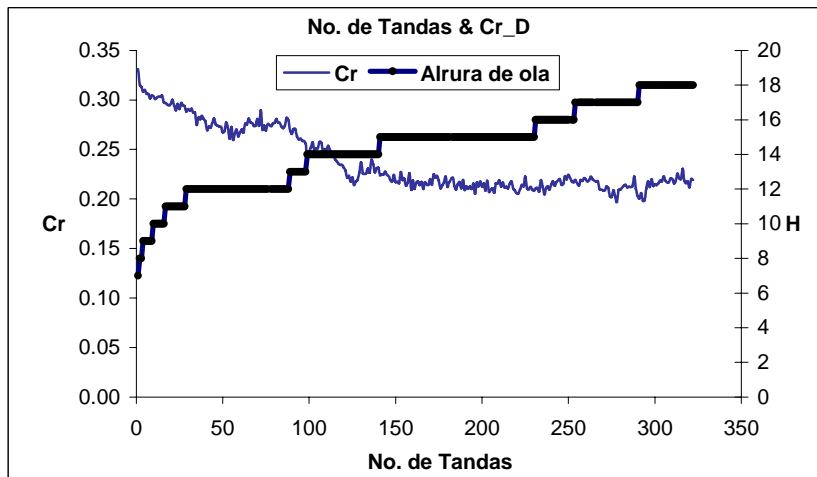


Figura 5.12 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique).

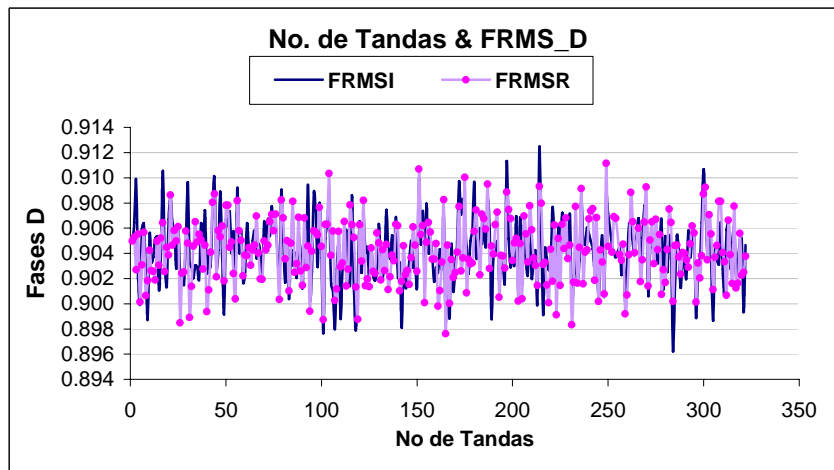


Figura 5.13 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.

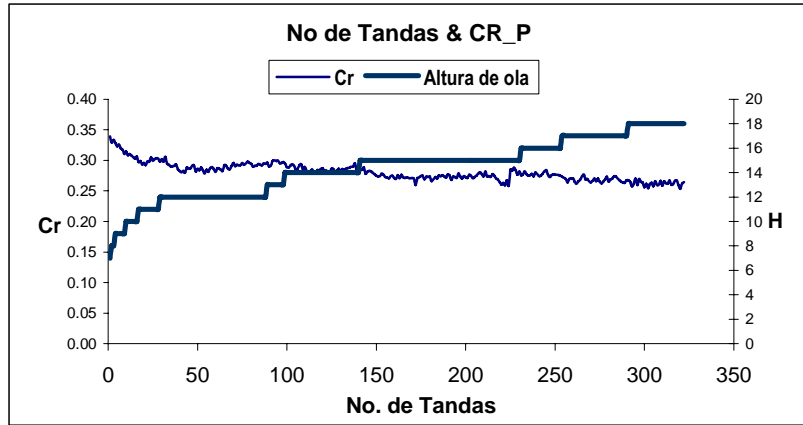


Figura 5.14 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala)

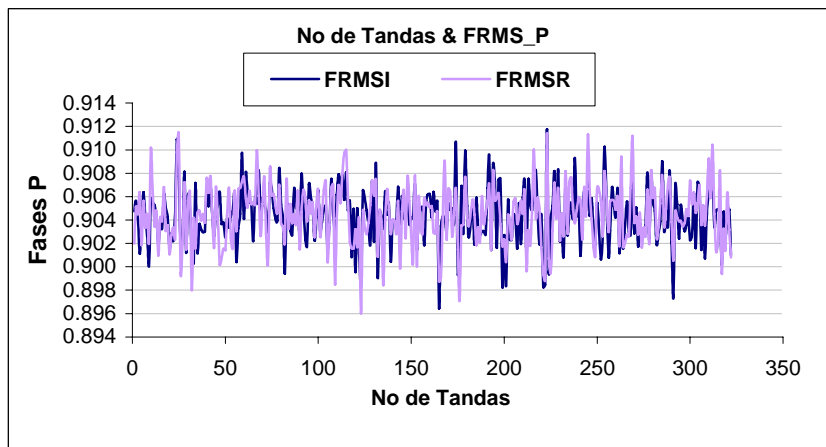


Figura 5.15 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.

Dique 3 (2:1 oleaje regular)

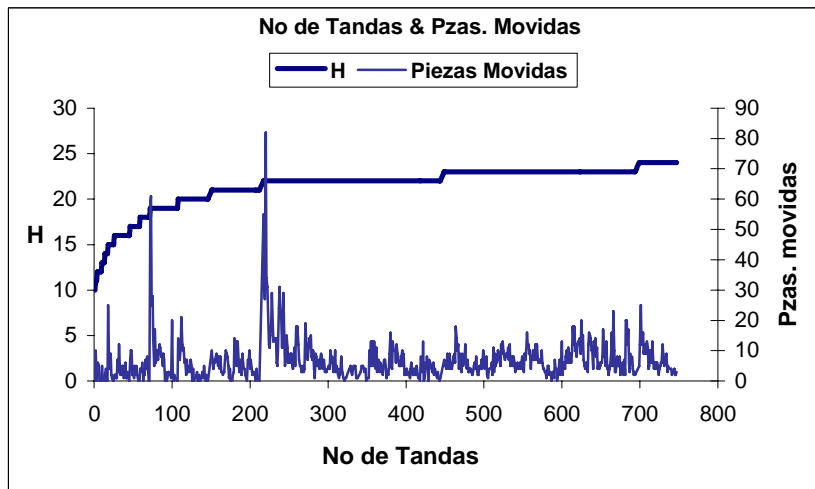


Figura 5.16 Proceso de demanda de piezas del dique 3, al variar la altura de ola.

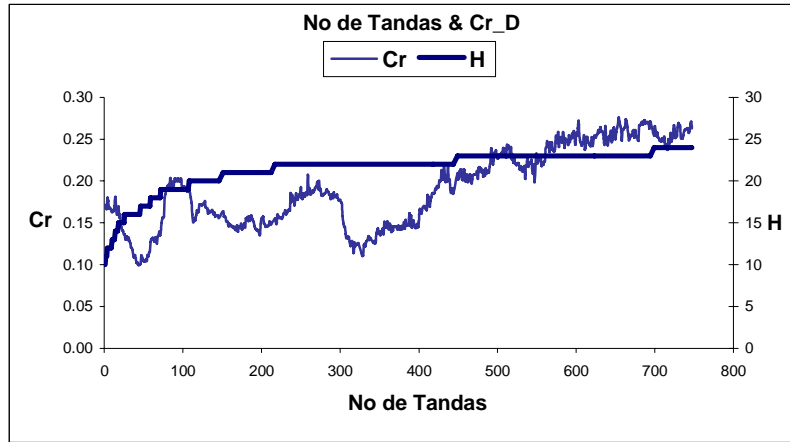


Figura 5.17 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos al dique).

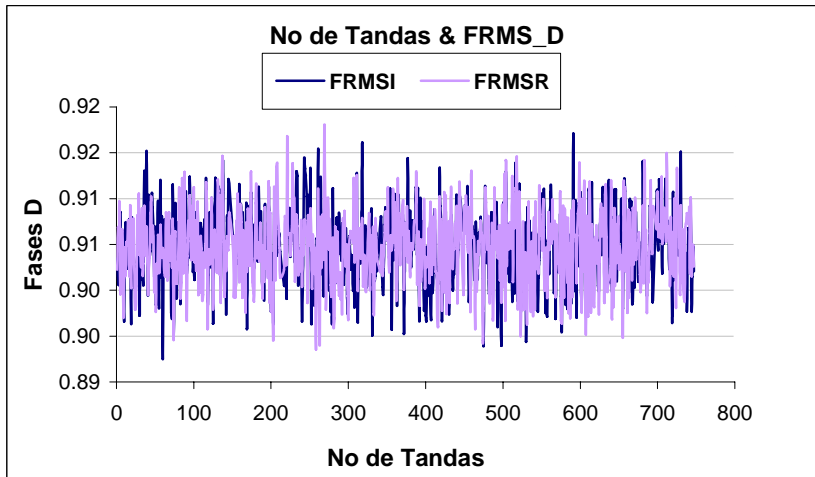


Figura 5.18 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca del dique.

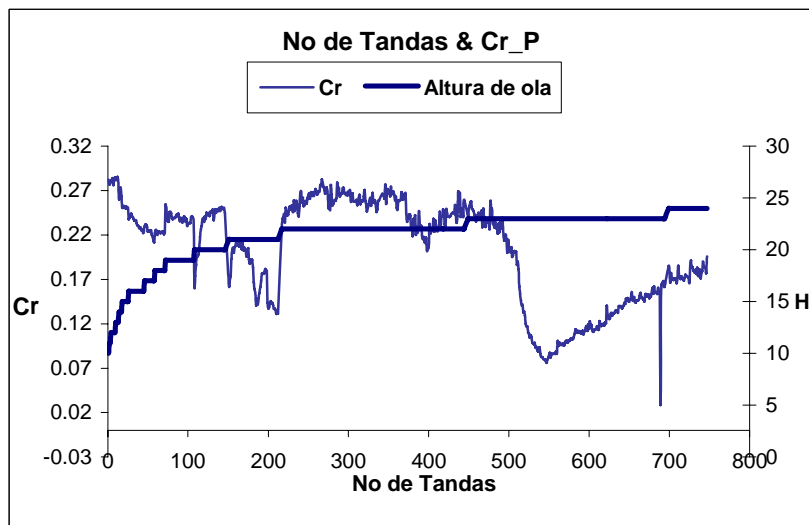


Figura 5.19 Evolución de la reflexión al variar la altura de ola (sensores cercanos a la pala).

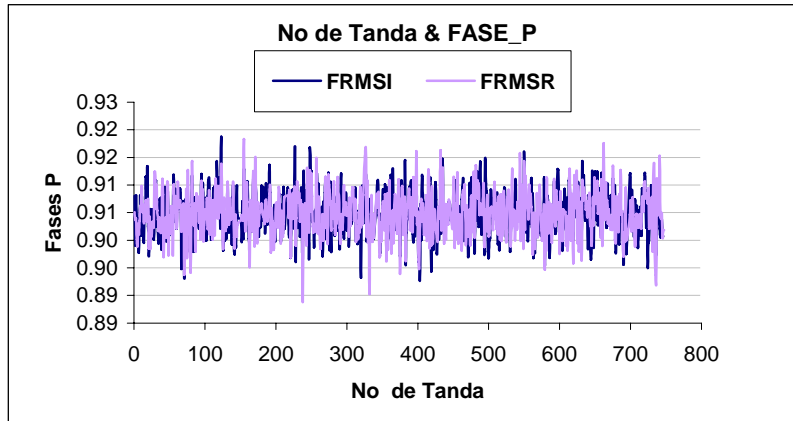


Figura 5.20 Comportamiento de las fases incidente (I) y reflejada (R) cerca de la pala.

A Continuación se presentan unas gráficas en la que se muestra la afectación del dique al verse sometido al estado de mar ensayado. Dichas graficas son resultado de mediciones realizadas con ayuda de una Estación Total.

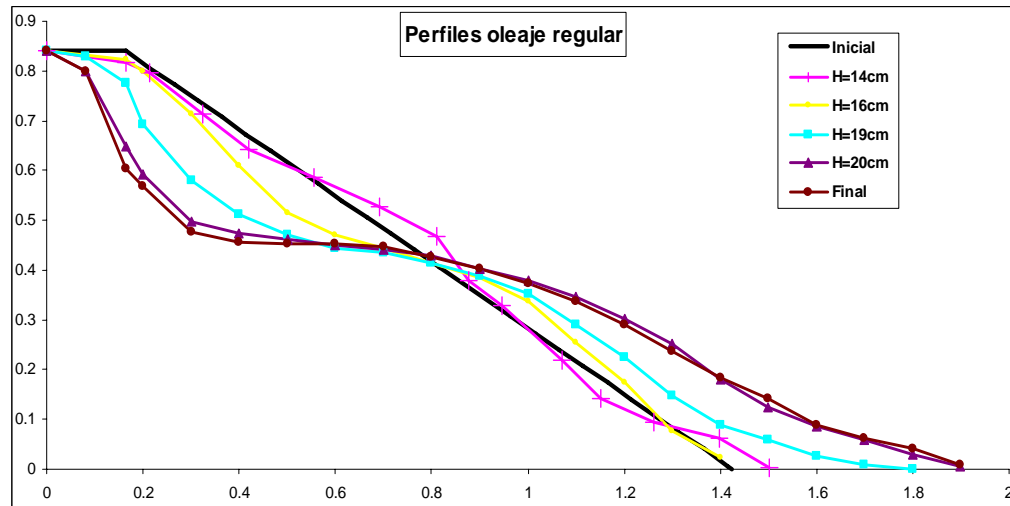


Figura 5.21 Evolución del perfil del dique de talud 1.5:1 debido a la acción del oleaje regular.

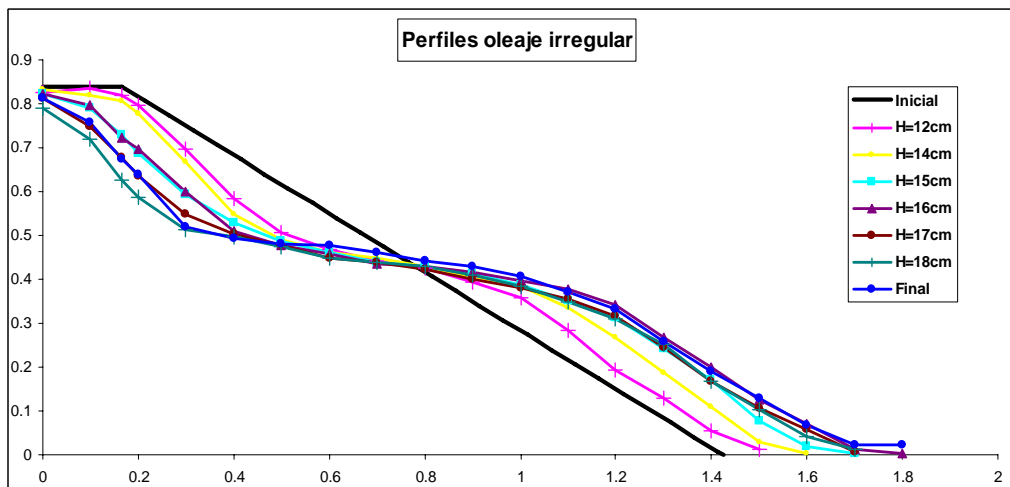


Figura 5.22 Evolución del perfil del dique de talud 1.5:1 debido a la acción del oleaje irregular.

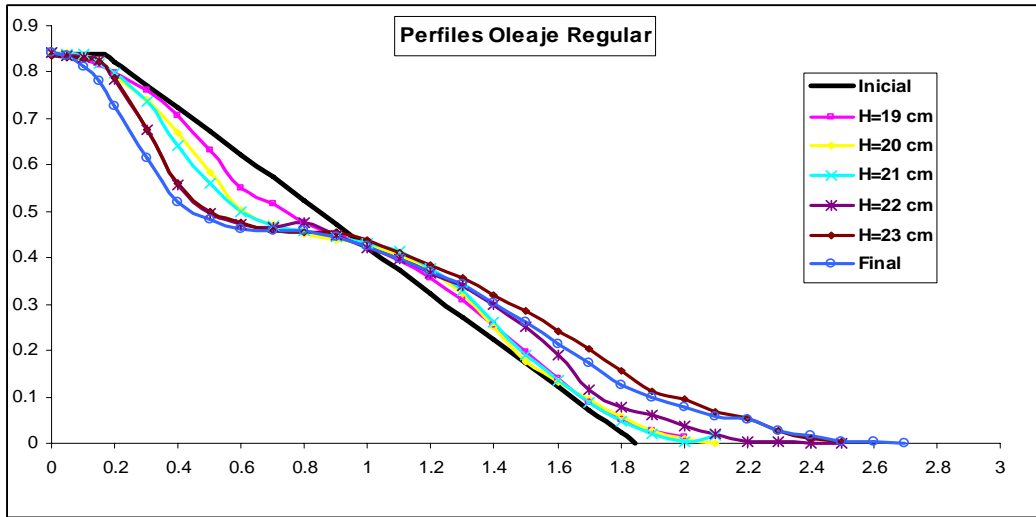


Figura 5.23 Evolución del perfil del dique de talud 2:1 debido a la acción del oleaje regular.

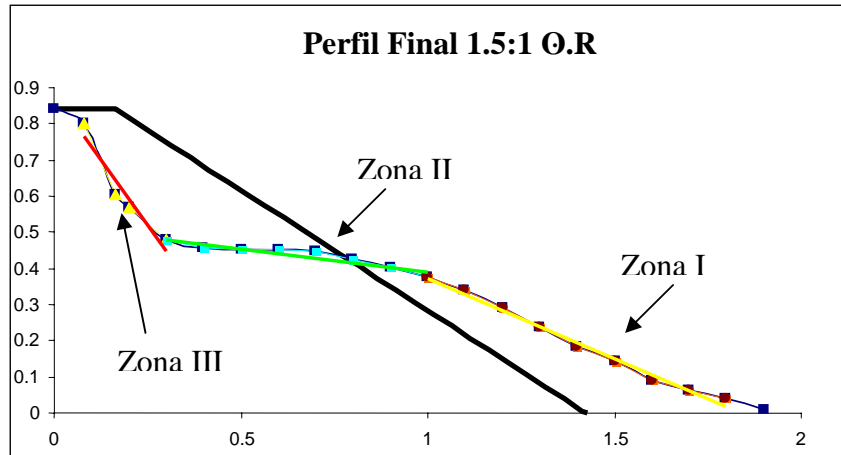


Figura 5.24 Perfiles inicial y final del Dique 1, se muestran 3 zonas.

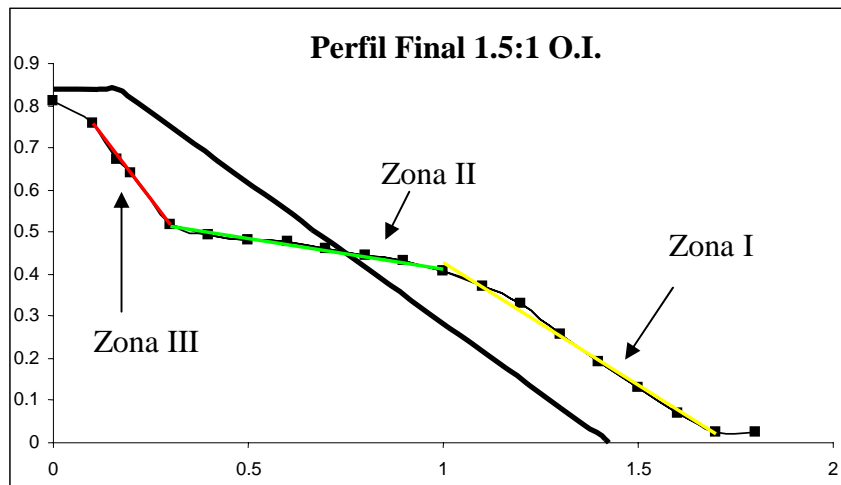


Figura 5.25 Perfiles inicial y final del Dique 2, se muestran 3 zonas.

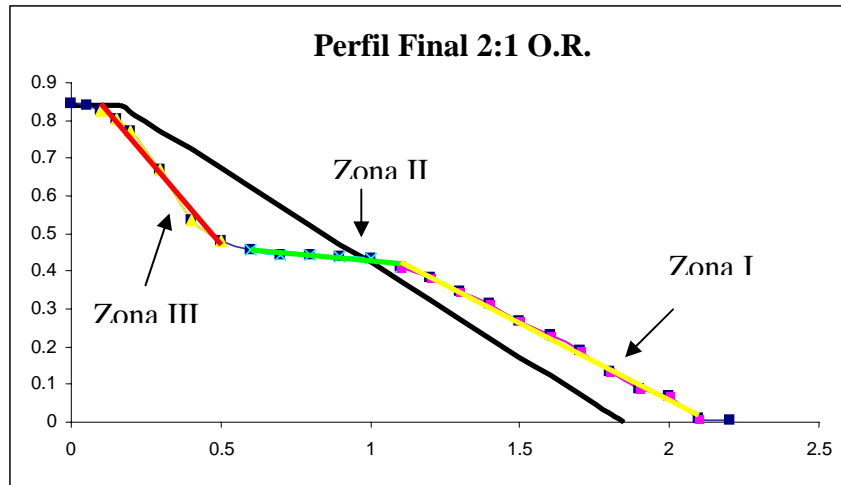


Figura 5.26 Perfiles inicial y final del Dique 31, se muestran 3 zonas.

En las gráficas 5.21 a 5.23 se observa que para los tres modelos de dique se llega a un perfil de equilibrio “S”. Si se dibujan líneas de tendencia para cada uno de los perfiles finales se obtienen las gráficas 5.24, 5.25 y 5.26 en donde es posible observar claramente la generación de tres zonas que definen al perfil “S”, en la Zona I el decaimiento de la energía del oleaje se debe a la presencia de la estructura y en dicha zona se presenta el fenómeno de la reflexión, en la Zona II se tiene disipación de energía debido a la rotura de la ola.

En el Anexo D de este trabajo se muestra un ejemplo de los resultados a partir de los cuales se obtienen las gráficas anteriores, así como también algunas fotografías de la evolución del perfil de los diques. Debido a que el material fotográfico es muy extenso solo se muestra lo que se consideró más representativo para la presentación de éste trabajo.



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO





6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

6.1 Conclusiones

- ⊕ Para analizar el comportamiento del oleaje es necesario realizar simplificaciones en los modelos para que los resultados sean confiables, por lo que para este trabajo se acepta que el fluido es incompresible y no viscoso, el flujo es irrotacional y la tensión en la superficie del agua es despreciable.
- ⊕ Para realizar la caracterización de un estado de mar a partir de una señal obtenida por medio de un dispositivo de medición es necesario realizar un análisis estadístico de dicha señal, éste análisis puede hacerse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, ambas son complementarias y no excluyentes.
- ⊕ La evaluación del oleaje reflejado es de suma importancia para la proyección de estructuras marítimas de protección, debido a que con ello es posible calcular con mayor precisión los efectos y afectaciones que el oleaje producirá en la estructura.
- ⊕ Al realizar el análisis de los resultados se observa que, los valores de altura de ola incidente son menores que los que se indica que se generen en la pala, esto se debe al sistema de absorción con el que cuenta el canal de oleaje lo cual hace que la altura total (suma de $H_{incidente}$ más $H_{reflejada}$) sea igual a la altura de ola que se desea generar.
- ⊕ Los resultados de los valores del Coeficiente de Reflexión obtenidos para los ensayos con oleaje regular y oleaje irregular y con pendiente 1.5:1 oscilan en valores de 0.20 a 0.35, se observa que al final de los ensayos se presenta una estabilización del Coeficiente.
- ⊕ El comportamiento del Coeficiente de Reflexión para los ensayos con el *modelo 3*, es decir, oleaje regular y pendiente del dique de 2:1 presenta un comportamiento extraño ya que no se aprecia que dicho coeficiente al final llegue a una estabilización como en los casos anteriores, más bien resulta un comportamiento parabólico, por lo que será conveniente realizar otros ensayos para observar si el comportamiento se repite y tratar de verificar o analizar más detalladamente a que se debe dicho comportamiento o bien revisar que errores son los que ocasionan la tendencia de éstos resultados.
- ⊕ Al realizar cada cambio de altura de ola, es decir al finalizar cada *ciclo* con los *Test 1* y *2*, se observa que existe un salto o incremento en el valor del Coeficiente de Reflexión esto es debido a que al aumentar la altura generada se aumenta la energía que incide sobre el dique y por consecuencia el oleaje reflejado también aumenta.
- ⊕ Por lo que respecta a las fases del oleaje incidente y reflejado se tiene que la diferencia o defase existente entre los trenes de oleaje mencionados es muy pequeño, por lo que se concluye que están en fase.
- ⊕ En cuanto a la estabilidad del dique se observa que no siempre es necesario que aumente la altura de ola para que aumente la avería en la sección.
- ⊕ Para todos los modelos se verifica que las piezas del dique tienden a autoorganizarse hasta llegar a un perfil “S”.

- ⊕ El perfil “S” presenta dos zonas muy importantes, lo cual ayuda a la disipación de la energía del oleaje en un 95%. La Zona I en donde la energía decae por reflexión y la Zona II en donde se disipa el resto de la energía por rotura.
- ⊕ Aunque el dique este destruido, pero con un perfil “S” estable es posible que aun siga desempeñando su función de protección siempre y cuando el oleaje no rebase al dique.

6.2 Futuras Líneas de Trabajo

Debido a que el estudio de los fenómenos que influyen en el comportamiento del mar y los efectos que éste produce en las estructuras marítimas es muy extenso y la información existente no es suficiente, es necesario la realización de mas experimentos de laboratorio con al finalidad de predecir las condiciones necesarias para que las obras de ingeniería marítima sean más estables y por lo tanto mas seguras, por lo que a continuación se mencionan algunas líneas de trabajo o investigación que mas adelante podrían estudiarse.

- ⊕ Analizar la evolución de la reflexión y sus efectos en la estabilidad de diques rebasables.
- ⊕ Estudiar la evolución de la reflexión en rompeolas rebasables y exentos pero considerando la evolución de la rotura, es decir evaluar también los efectos de disipación de energía con los dos fenómenos del oleaje.
- ⊕ Trabajar con modelos playa – dique para analizar el comportamiento e interacción del oleaje en dicho modelo y observar los efectos de socavación si es que se presentan.
- ⊕ Realizar pruebas con diques de tipología diferente a la utilizada en los ensayos para la realización de este trabajo, para observar la influencia que tiene la geometría de las piezas que lo constituyen en la estabilidad del rompeolas.
- ⊕ Realizar las pruebas mencionadas anteriormente pero incluyendo un análisis multidireccional del oleaje.



ANEXO A

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER



ANEXO A Transformada Rápida de Fourier FFT

El análisis frecuencial de señales en tiempo discreto se realiza, normalmente, de forma más conveniente en procesadores de señales digitales que pueden ser computadoras (PC's) o hardware especialmente diseñado. Para realizar el análisis frecuencial de una señal discreta es necesario convertir la señal en el dominio del tiempo en una señal equivalente en el dominio de la frecuencia.

La *Transformada Discreta de Fourier* (DFT) juega un papel importante en numerosas aplicaciones de procesamiento de señales digitales. Entre otras destacan: filtrado lineal, análisis de correlación y análisis espectral. Una de las razones de la importancia de la DFT es la existencia de algoritmos sumamente eficientes para su cálculo. Uno de los más utilizados es el denominado Radix 2, el cual se basa en el hecho de analizar una secuencia que posee un número tamaño N que es una potencia de 2. Existe un algoritmo denominado Radix 4, cuyo nombre deriva de la misma razón del Radix 2. Estos tipos de algoritmos permiten calcular en forma rápida y sumamente eficiente la DFT. Se denominan FFT por sus siglas en inglés de *Fast Fourier Transform*.

La DFT requiere de grandes cantidades de operaciones matemáticas para lograr el mismo resultado que los algoritmos FFT. En particular, el cálculo de la FFT (con el algoritmo Radix 2) usando 1024 puntos puede mejorar la rapidez hasta en alrededor de 200 veces la velocidad de calculo directo la DFT.

Desarrollo del algoritmo FFT

Generalmente, se acostumbra realizar los análisis en el dominio del tiempo; pero, el manejo matemático de las señales resulta mucho más sencillo si se realiza en el dominio de la frecuencia, ya que cuando se tiene una gran cantidad de datos se vuelve más complejo efectuar el análisis en el dominio del tiempo.

Debe quedar claro que la Transformada Rápida de Fourier (FFT), es un algoritmo mejorado de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), por lo tanto, para poder entender dicho algoritmo es necesario comprender primeramente a la DFT.

La DFT convierte una señal discreta en el dominio del tiempo, a una señal discreta pero en el dominio de la frecuencia, es decir, en el dominio de Fourier.

Para poder realizar dicha “conversión” es necesario aplicar la definición de la DFT, que se presenta a continuación:

$$DFT = X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad \text{Transformada Discreta de Fourier}$$

$$\text{IDFT} = x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi}{N} nk} \quad \text{Transformada Inversa de Fourier}$$

Donde:

k= K-ésimo termino en el dominio de Fourier

n= n-ésimo termino en el dominio discreto.

N= Número de datos

En la definición de la DFT existe un factor llamado TWIDDLE o factor de regreso

$$W_N^{nk} = e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} = \cos\left(\frac{2\pi}{N} nk\right) - j \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N} nk\right)$$

El factor TWIDDLE es inversamente simétrico respecto al origen. Por ejemplo para una señal de 8 elementos:

$$W_8^1 = -W_8^5$$

$$W_8^2 = -W_8^6$$

$$W_8^3 = -W_8^7$$

$$W_8^4 = -W_8^8$$

Esto quiere decir que sólo la primera mitad del factor TWIDDLE contiene toda la información necesaria.

Por lo que la DFT se describirá como: $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}$

Los orígenes de la FFT se remontan al año de 1805 descubierta por Gauss 1777 – 1855. Después En 1965, Jim Cooley, investigador ligado a IBM y John Tukey, de la Universidad de Princeton mostraron una forma sencilla de programar la transformada de Fourier discreta.

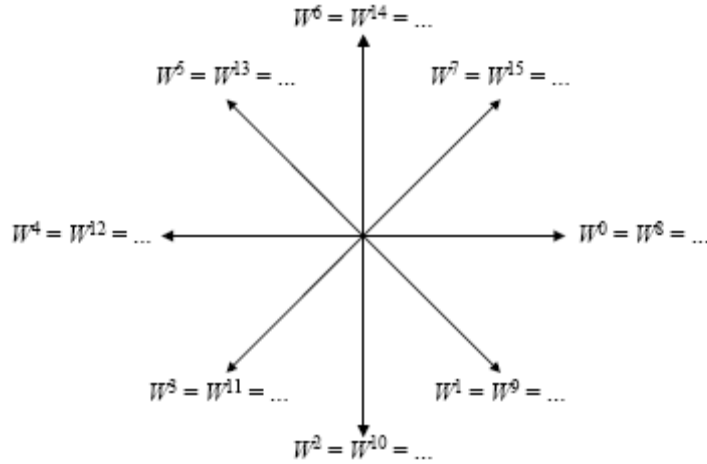
Este algoritmo, como ya se menciona, solo se puede aplicar cuando los datos de la señal de entrada son múltiplos de 2, es decir cuando $2^n = N$, donde N es el número de datos. Si aplicamos esta condición a las señales del oleaje que se obtuvieron, en los ensayos de laboratorio, para la realización de este trabajo se tiene que:

- Para los ensayos con oleaje regular el número de datos de la señal es de 10240, y al condición no se cumple por lo que fue necesario adicionar 6144 ceros para poder aplicar el algoritmo.

- Para el oleaje irregular el número de datos fue de 22016, y para poder lograr que el número de entrada sea potencia de 2, se añadió 10752 ceros.

La adición de ceros corresponde a una potencia de 2^{14} y de 2^{15} , respectivamente para cada estado de mar.

La FFT explota las simetrías en la matriz W_N^{nk} .



Periodicidad y simetría de los factores W.

Los pasos para lograr la FFT son:

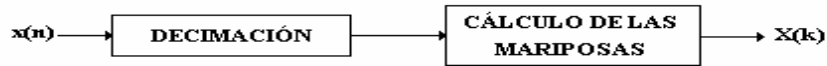
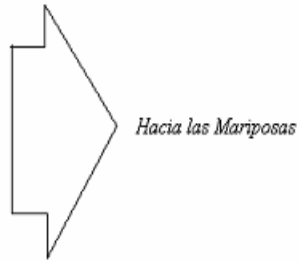


Diagrama de Bloques de la FFT.

Proceso de Decimación.

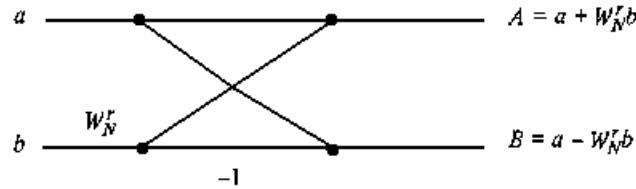
Consiste en reagrupar la secuencia de entrada mediante un direccionamiento de acarreo inverso. Por ejemplo para una señal de entrada de 8 tenemos:

<i>Señal de Entrada</i>	<i>Acarreo Inverso</i>	<i>Señal Decimada</i>
x(0) →	000	000 → x(0)
	+100	
x(1) →	100	100 → x(4)
	+100	
x(2) →	010	010 → x(2)
	+100	
x(3) →	110	110 → x(6)
	+100	
x(4) →	001	001 → x(1)
	+100	
x(5) →	101	101 → x(5)
	+100	
x(6) →	011	011 → x(3)
	+100	
x(7) →	111	111 → x(7)

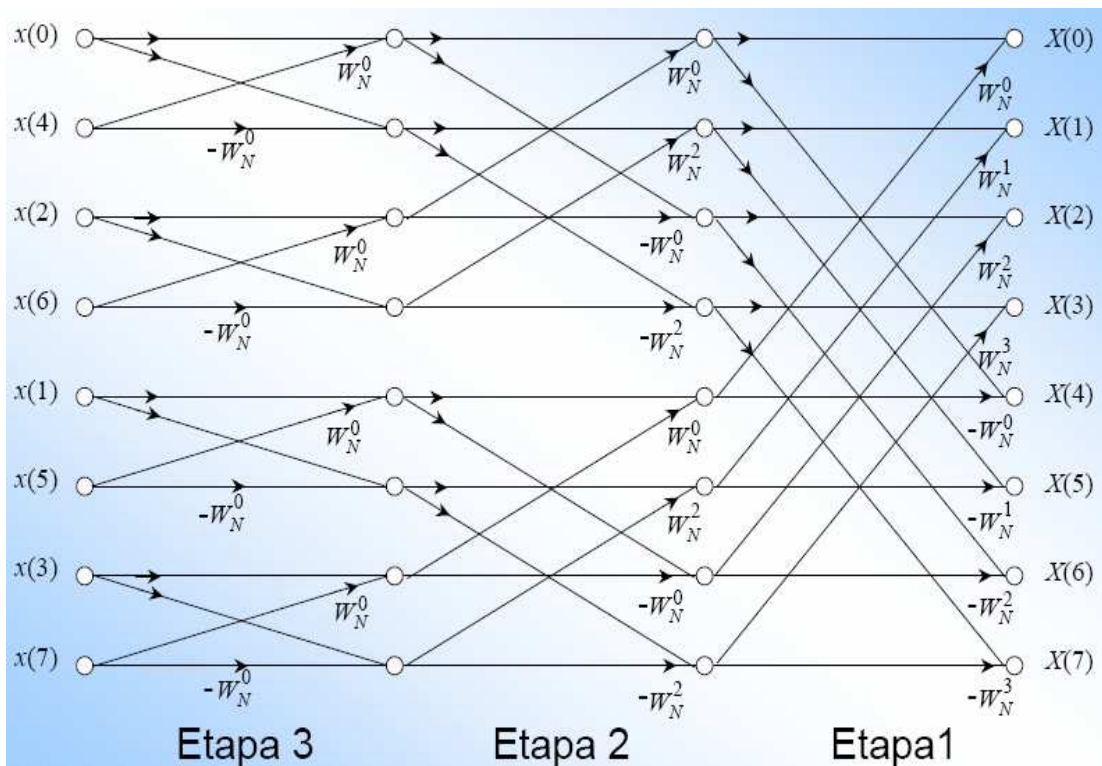


Cálculo de las Mariposas

Para realizar las mariposas es necesario seguir el siguiente diagrama, el cual nos presenta el caso general.



Por ejemplo para el caso de una señal de 8 puntos se observa el algoritmo en la siguiente figura:

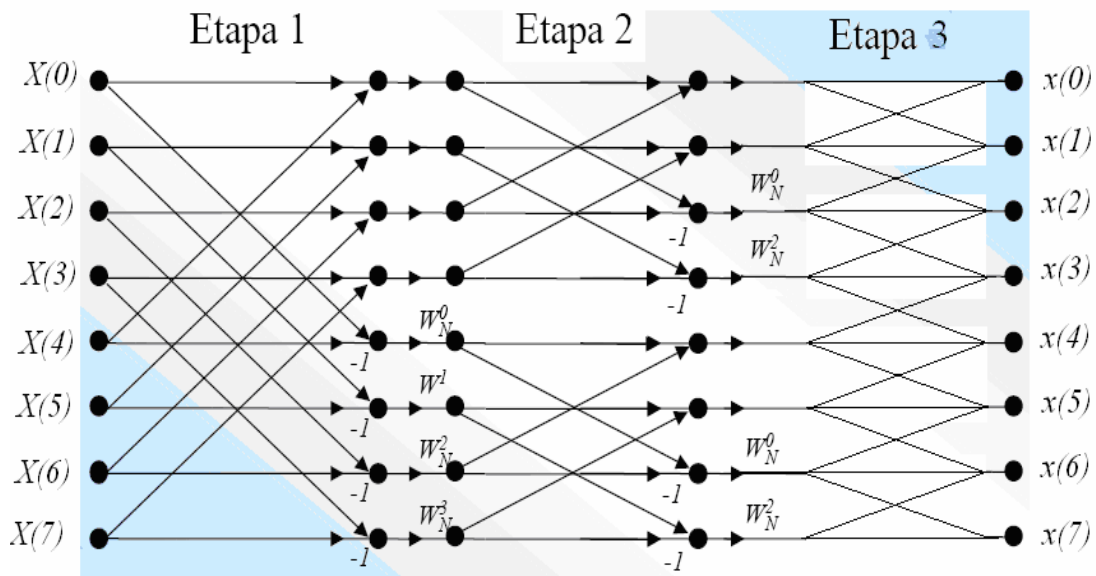


Los valores que inicialmente se encontraban en el dominio del tiempo, al realizar los pasos anteriores, ahora se encuentran en el dominio de la frecuencia, es decir, la FFT nos entrega valores discretos pero en el dominio de Fourier. Ahora el siguiente paso será regresar dichos valores al dominio temporal. Esto se lleva a cabo mediante el algoritmo de la IFFT.

La IFFT tiene el mismo principio que la FFT, la diferencia es que a los valores no se les aplica la decimación, es decir, se meten a la IFFT en el orden que son arrojados por la FFT. Después se calculan las mariposas correspondientes y a la salida se obtienen los

valores de los coeficientes de la Serie de Fourier de los datos discretos de entrada, estos valores son números complejos.

El siguiente diagrama representa a la IFFT:



Los resultados obtenidos finalmente, nos proporcionan los valores de los coeficientes complejos de Fourier con lo que ya nos es posible realizar el cálculo de z_I^j , z_R^j , descritos en el capítulo 3 de este trabajo.



ANEXO B

**MÉTODO DE MANSARD Y FUNKE
PARA LA SEPARACIÓN DE LA OLA INCIDENTE Y REFLEJADA**



ANEXO B Método de Mansard y Funke para la separación de la ola incidente y reflejada.

Equation Section 2

El método presentado y desarrollado por Mansard & Funke en 1980, basados en los trabajos realizados por Marcou (1969) y como una extensión natural del método de Goda & Suzuki (1976),

Parte de las hipótesis mencionadas en el capítulo 3 de este trabajo y admitiendo que la superficie de agua en un campo de ondas en dos dimensiones puede ser representada como la superposición de N ondas con diferentes características, tal como se menciono anteriormente.

Así el perfil de la superficie libre del agua puede expresarse para en la forma siguiente:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n) \quad (\text{B.1})$$

Cuando se presenta el efecto de reflexión el perfil se ve afectado. De está forma el perfil original estará formado por la superposición del perfil original (onda incidente) y el perfil debido a la reflexión, por lo tanto reescribiendo la ecuación (B.1) se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{Rn}) \quad (\text{B.2})$$

En ocasiones la distancia existente entre la estructura y los sensores son difíciles de medir con exactitud, por ejemplo cuando se tiene una pendiente, por ello una fase θ_s , es introducida para compensar esté error de medición, además de introducir una función de error que toma en cuenta otros tipos de errores no considerados, y que ya se mencionaron en el capítulo 3, por lo tanto reescribiendo la ecuación (B.2), se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n + \theta_s) + \Omega(t) \quad (\text{B.3})$$

Si,

$$\eta_p = \eta(x_p, t)$$

P, se refiere al número de sensor.

Entonces:

$$\eta_p = \sum_{n=1}^N a_I \cos(k(x_1 + \Delta x) - \sigma t + \Phi) + \quad (B.4)$$

$$a_R \cos(k(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + \sigma t + \Phi + \theta_s) + \Omega_p(t)$$

El objetivo es minimizar la función de error (la fase), $\Omega(t)$, para ello es necesario aplicar la transformada de Fourier a la ecuación (B.4), con el propósito de obtener una solución algebraica, que es la base para minimizar la función de error, en otras palabras la fase.

Al aplicar dicha transformación se obtiene:

$$A_p + iB_p = a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} + a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} + Y_p e^{(i\rho_p)} \quad (B.5)$$

A_p y B_p son los coeficientes de Fourier.

Si,

$$Z_I = a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)}$$

$$Z_R = a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} \quad (B.6)$$

$$Z_{N,p} = Y_p e^{(i\rho_p)}$$

Por lo que la ecuación (B.5) en términos de la expresión (B.6), queda como:

$$A_p + iB_p = Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} + Z_{N,p} \quad (B.7)$$

Desarrollando la expresión (B.7) para cada uno de los sensores, se tiene que:

$$A_1 + iB_1 = Z_I + Z_R + Z_{N,1}$$

$$A_2 + iB_2 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,2})} + Z_{N,2}$$

$$A_3 + iB_3 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,3})} + Z_{N,3}$$

De las expresiones anteriores se despeja la función de error, la cual se quiere minimizar, y se tiene para cada sensor:

$$\varepsilon_1 = Z_I + Z_R - (A_1 + iB_1) \quad (\text{B.8})$$

$$\varepsilon_2 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,2})} - (A_2 + iB_2) \quad (\text{B.9})$$

$$\varepsilon_3 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,3})} - (A_3 + iB_3) \quad (\text{B.10})$$

donde :

$$\varepsilon_p = -Z_{N,p} + f_e(Z_I, Z_R) \quad (\text{B.11})$$

Como se menciono anteriormente, el objetivo del método es minimizar la función de error, $\Omega(t)$, que toma valores no negativos, tiene sentido matemático y físico buscar un punto Z_I y Z_R , tal que la dicha función sea lo más pequeña posible, en otras palabras que la minimicen.

Esté proceso equivale a minimizar la suma de los cuadrados de ε_p , por lo tanto se tiene:

$$\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_p)^2 = \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right)^2 \quad (\text{B.12})$$

Esté mínimo debe verificar:

$$\frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_I} = \frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_R} \quad (\text{B.13})$$

Desarrollando ésta ecuación se obtiene:

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(ik x_{1,p})} = 0 \quad (\text{B.14})$$

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(-ik x_{1,p})} = 0 \quad (\text{B.15})$$

Desarrollando e incluyendo el subíndice n en las ecuaciones (B.12) y (B.13) se obtiene:

$$\begin{aligned} & Z_{i,n} \left(1 + \exp(i2k_n x_{1,2}) + \exp(i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{R,n} = \\ & (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(ik_n x_{1,3}) \\ & Z_{R,n} \left(1 + \exp(-i2k_n x_{1,2}) + \exp(-i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{I,n} = \\ & (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(-ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(-ik_n x_{1,3}) \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

La solución esta determinada por Mansard & Funke como:

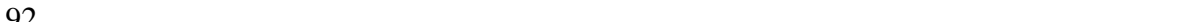
$$\begin{aligned}
 Z_{I,n} &= \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} + iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} + iQ_{2,n}) + \\
 & (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} + iQ_{3,n})] \\
 Z_{R,n} &= \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} - iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} - iQ_{2,n}) + \\
 & (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} - iQ_{3,n})] \tag{B.17}
 \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 D_n &= 2(\sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3}) + \sin^2((k_n x_{1,3}) - (k_n x_{1,2}))) \\
 R_{1,n} &= \sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3}) \\
 Q_{1,n} &= \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,2}) + \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3}) \\
 R_{2,n} &= \sin(k_n x_{1,3}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) \\
 Q_{2,n} &= \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,2}) \\
 R_{3,n} &= -\sin(k_n x_{1,2}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) \\
 Q_{3,n} &= \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,3})
 \end{aligned}$$

ANEXO C

**DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE OLEAJE DEL LABORATORIO
DE INGENIERÍA MARÍTIMA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**



ANEXO C Descripción del canal de oleaje del laboratorio de ingeniería marítima del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Características del canal de oleaje

El canal de Laboratorio de olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM tiene como características geométricas una longitud de 37 metros de largo por 80 centímetros de ancho y 120 centímetros de alto. De acuerdo a estas características se puede generar oleaje con una profundidad de entre 70 y 80 centímetros y olas alrededor de 40 centímetros de altura como máximo, debido a límite de tirante.

El material de construcción de uno de los costados y del fondo del canal es de lámina de acero inoxidable y el otro lado está conformado por 30 metros de vidrio y de acero inoxidable en los extremos. El canal es soportado por una estructura de tubular (acero PTR) a una altura de 80 centímetros sobre el nivel del piso.

El canal tiene una capacidad máxima (considerando que el llenado es a una profundidad de 80 centímetros) de aproximadamente 24,000 litros de agua, pero para condiciones normales de operación requiere de 15,000 litros aproximadamente. Esta cantidad de líquido es posible almacenarla en una cisterna y es recirculada para evitar su desperdicio.

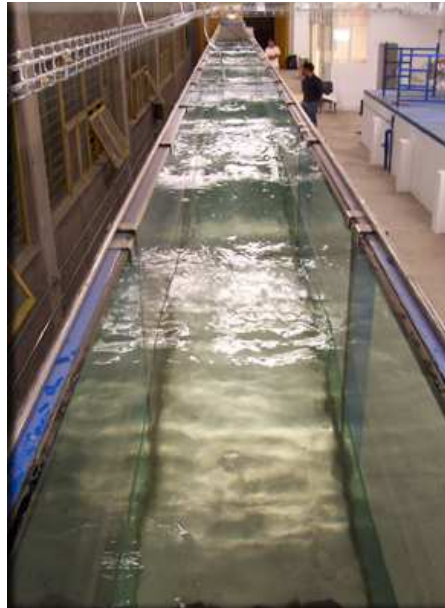


Figura C.1 Canal de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)

Generador de oleaje

El equipo de generación fue adquirido a la empresa HR Wallingford del Reino Unido y puede generar tanto oleaje controlado (regular) en el que siempre se tendrá la misma

altura de ola, como oleaje aleatorio (irregular) que es el que resulta más cercano a la realidad.

El generador es de tipo pistón y consiste en una placa de acero sostenida por un riel horizontal (ver figura C1), que se mueve hacia delante y hacia atrás. Dicho riel, a su vez, ésta suspendido de una estructura fija a las paredes del canal. Lo que permite que los elementos de precisión estén a una altura suficiente y no correr el riesgo de mojarse.



Figura C.2 *Generador de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)*

La pala puede alcanzar un desplazamiento total de 85 centímetros, a una velocidad máxima de 0.81 m/s y con una fuerza máxima de 3.5 KN

El riel se mueve debido a un actuador de motor eléctrico (Figura C.2) que opera a través de engranes y se controla desde una computadora. El motor es de inercia baja, necesaria para que se pueda operar en frecuencias altas, y los engranes están diseñados para trabajar a velocidades altas.

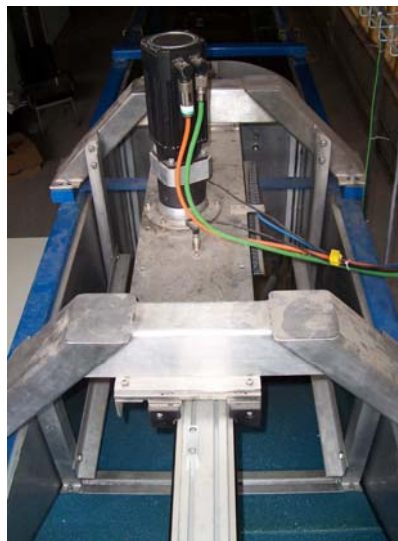


Figura C.3 *Actuador a base de un motor eléctrico, Laboratorio de Olas, II-UNAM.*

Una de las limitaciones de las instalaciones es que el oleaje generado no se pierde sino que tiende a reflejar en las paredes de los extremos del canal. Este problema aumenta cuando dentro del canal es colocada una estructura altamente reflejante; ya que las ondas viajaran en ambos sentidos provocando un caos que no permitirá la realización de estudios confiables.

Para solucionar los problemas de las ondas reflejadas, el canal cuenta con un sistema de absorción de oleaje diseñado por HR Wallingford para minimizar el efecto de reflexión.

Absorción de reflexiones en la pala

Este sistema de absorción de reflexiones de la pala dispone de un par de sensores de nivel adosados a la pala (Ver fig. C.3) que toman medidas a lo largo del ensayo. La medida de estos sensores se corresponde con la superposición del ensayo que se desea ensayar y el oleaje reflejado que se propaga hacia la pala.

De al comparación entre el perfil del oleaje medido y el que se desea generar, se obtiene el desplazamiento horizontal de la pala necesario para absorber la diferencia de niveles. Al mismo tiempo que se registra este nivel, el controlador de posición registra la posición de la pala. Con esta medida y el desplazamiento calculado, se obtiene la nueva posición de al pala.



Figura C.4 *Sensores en la parte frontal de la paleta, utilizados por el sistema de absorción, Laboratorio de Olas, II-UNAM*



ANEXO D
TABLAS Y FOTOGRAFÍAS





ANEXO D Tablas y Fotografías.

En este apartado se muestra, mediante fotografías, la evolución de daño del dique 3 al incidir el oleaje sobre de él.



Figura 0.1 Daño del dique a una altura de ola de 18 cm.



Figura 0.2 Daño del dique a una altura de ola de 19 cm



Figura 0.3 Daño del dique a una altura de ola de 20 cm



Figura 0.4 Daño del dique a una altura de ola de 21 cm



Figura 0.5 Daño del dique a una altura de ola de 22 cm



Figura 0.6 Daño del dique a una altura de ola de 23 cm



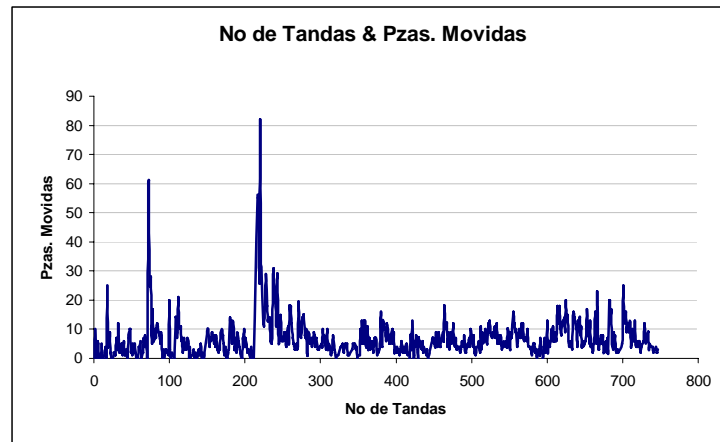
Figura 0.7 Daño del dique a una altura de ola de 24 cm



Figura 0.8 Daño del dique a una altura de ola de 26 cm

En estas fotografías es posible observar la variación del perfil del dique de modelo 3 conforme aumenta la altura de ola en los ensayos, hasta alcanzar una altura umbral en la que ya no existe desplazamiento de piezas y se alcanza un perfil de tipo “S”.

En la siguiente grafica se muestra el desplazamiento de piezas del rompeolas a lo largo de cada tanda efectuada.



A continuación se presentan los resultados del análisis de las señales obtenidas a partir de los datos registrados por los sensores, tanto para los que se colocaron cercanos al dique como para los colocados cerca de la pala de generación. Debido a que el número de ensayos es grande se muestran en la siguiente tabla solo el registro de los resultados para las primeras pruebas y 4 diferentes alturas de ola.

CONTADOR	H	No. De tandas	Pzas. Movidas	DIQUE			
				CRAF_D	CRT_D	CRBF_D	CRP_D
1	10	1	0	0.71705	0.17141	0.09018	0.16101
2	11	2	10	0.66969	0.16821	0.08972	0.15505
3	11	3	0	0.69634	0.16634	0.08821	0.14641
4	12	4	2	0.71063	0.17994	0.08736	0.13702
5	12	5	6	0.71566	0.17600	0.08598	0.13603
6	12	6	5	0.70200	0.16710	0.08486	0.12524
7	12	7	0	0.68666	0.16821	0.08354	0.12752
8	12	8	0	0.69349	0.16681	0.08360	0.12544
9	12	9	0	0.69214	0.16434	0.08292	0.12198
10	13	10	5	0.69961	0.16265	0.08290	0.12164
11	13	11	1	0.69641	0.16545	0.08210	0.12060
12	13	12	0	0.69620	0.16401	0.08182	0.12043
13	13	13	0	0.69160	0.16987	0.08136	0.12305

Tabla D. 1 Resultados de Coeficientes de Reflexión obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos al rompeolas, para los primeros ensayos (dique 3).

CONTADOR	H	FASE DIQUE				
		FRMSI	FRMSR	DIFFASE	FCRRMS	FCIRMS
1	10	0.90346	0.90225	0.00121	1.22364	1.14793
2	11	0.90130	0.90684	0.00554	1.15734	1.52044
3	11	0.90065	0.90612	0.00547	1.10893	0.85514
4	12	0.90358	0.90955	0.00597	0.99910	0.76503
5	12	0.90851	0.89985	0.00866	1.05664	0.86367
6	12	0.90090	0.90216	0.00126	1.16750	1.43901
7	12	0.90190	0.90661	0.00470	0.91411	0.82709
8	12	0.90035	0.90638	0.00603	1.09640	0.98445
9	12	0.90641	0.89710	0.00931	1.17671	1.16706
10	13	0.89659	0.90137	0.00478	0.98527	0.76005
11	13	0.90484	0.90467	0.00017	1.10384	0.63506
12	13	0.90742	0.90163	0.00578	1.04457	0.74168
13	13	0.90246	0.90525	0.00278	1.07085	0.70861

Tabla D. 2 Resultados de las fases obtenidas en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos al rompeolas, para los primeros ensayos (dique 3).

CONTADOR	H	No. De tandas	Pzas. Movidas	PALA			
				CRAF_P	CRT_P	CRBF_P	CRP_P
1	10	1	0	0.59578	0.28238	0.11211	0.27393
2	11	2	10	0.60651	0.27657	0.10135	0.27368
3	11	3	0	0.61785	0.27864	0.10317	0.27164
4	12	4	2	0.63479	0.28162	0.09735	0.26489
5	12	5	6	0.63298	0.28157	0.09647	0.26376
6	12	6	5	0.62644	0.28398	0.09657	0.26693
7	12	7	0	0.67250	0.27611	0.09201	0.25894
8	12	8	0	0.66422	0.28369	0.09253	0.26098
9	12	9	0	0.65719	0.28486	0.09352	0.26219
10	13	10	5	0.65816	0.28199	0.09333	0.24174
11	13	11	1	0.67924	0.28220	0.09305	0.24459
12	13	12	0	0.68365	0.28539	0.09345	0.24550
13	13	13	0	0.69836	0.28097	0.09233	0.24572

Tabla D. 3 Resultados de Coeficientes de Reflexión obtenidos en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos a la pala, para los primeros ensayos, (dique 3).

CONTADOR	H	FASE PALA				
		FRMSI	FRMSR	DIFFASE	FCRRMS	FCIRMS
1	10	0.90805	0.90508	0.00297	1.46685	1.21100
2	11	0.89898	0.90367	0.00469	1.34190	0.86784
3	11	0.90803	0.90393	0.00410	1.30493	1.53845
4	12	0.90393	0.90012	0.00381	1.17838	1.57530
5	12	0.90165	0.89889	0.00276	1.28759	1.52951
6	12	0.90261	0.90295	0.00035	1.28134	0.91280
7	12	0.89770	0.90093	0.00323	0.79167	0.87297
8	12	0.90405	0.90352	0.00053	1.35822	1.40546
9	12	0.90812	0.90624	0.00188	1.38082	1.19491
10	13	0.90087	0.90610	0.00523	1.28829	1.55781
11	13	0.90777	0.90981	0.00205	1.04290	1.31735
12	13	0.90542	0.90515	0.00027	1.30674	1.55590
13	13	0.90508	0.90638	0.00130	0.87223	1.04719

Tabla D. 4 Resultados de las fases obtenidas en el análisis de la señal de los datos de los sensores cercanos a la pala, para los primeros ensayos (dique 3).

Los parámetros graficados son los que aparecen en las tablas como **CONTADOR** que indica únicamente el número de prueba que se realizó, contra **CRT** (Coeficiente de Reflexión Total), **FRMSI** y **FRMSR** (fase media cuadrática incidente y reflejada respectivamente), tanto de la Pala como del Dique.

A continuación se presentan las fotografías que muestran el daño que sufre el dique 1 y 2.



Figura 0.9 Perfil inicial del dique de talud 1.5:1



Figura 0.10 Perfil final del dique de talud 1.5:1 sometido a oleaje regular

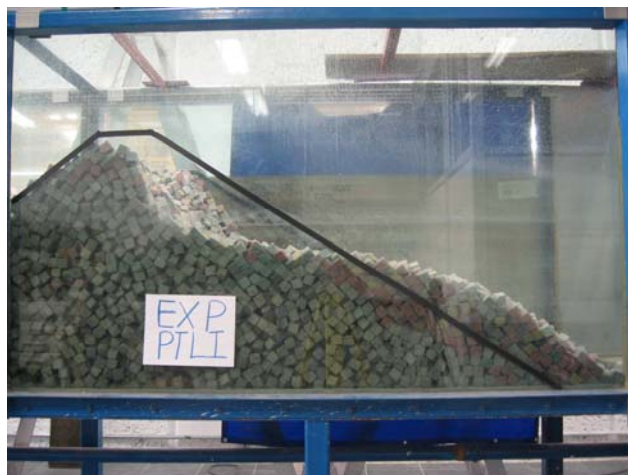


Figura 0.11 Perfil final del dique de talud 1.5:1 sometido a oleaje irregular

FUENTES CONSULTADAS

- ⊕ Baquerizo A, Asunción. “*Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción*”, Tesis doctoral. Santander, Universidad de Cantabria, España, 1995.
- ⊕ Benedicto, Izaskun “*Influencia de la Reflexión en la estabilidad de los diques en talud*”. Grupo de puertos y Costas, Universidad de Granada, 2002.
- ⊕ Goda, Y. “*Random Seas and Design of Maritime Structures*”. University of Tokio Press, 1985
- ⊕ HR Wallingford, 2002. “*Manual para la generación de oleaje y adquisición de datos*”
- ⊕ Losada, M. A. “*Reflexión y transmisión de ondas en diques verticales de escollera*”. Revista de Obras Publicas, España 1990, 137 (3288); 11-22
- ⊕ Losada, M. A. “*Mound breakwater stability versus wave reflection*”. Coastal Structures Conference
- ⊕ Pedrozo, Adrián. “*Análisis frecuencial y temporal del oleaje*”. Tesis licenciatura, UNAM, 1999.
- ⊕ Pedrozo, Adrián. “*Estimación de la Reflexión del Oleaje debida a estructuras verticales*”. Tesis maestría, UNAM, 2001.
- ⊕ Quiñones, J.L. “*Análisis de ondas y reflexión en laboratorio*”. Tesis licenciatura, UNAM, 2004.
- ⊕ Ramos T, Victoria. “*Sobre la estabilidad de los diques en talud. Análisis experimental*”. Investigación tutelada, 2003 – 2004, Universidad de Granada.
- ⊕ Silva C, Rodolfo. “*Análisis y descripción estadística del oleaje*”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005.
- ⊕ Vidal, C., Losada, M.A. y Median, R. 1991 “*Estabilidad del morro de los diques en talud. Influencia de su geometría*” Revista de Obras Publicas, España.
- ⊕ Vidal, C. 1996. “*Análisis comparativo de las formulaciones mas comunes utilizadas en diques rompeolas*”. Universidad de Cantabria, España.