

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE ONDAS Y REFLEXIÓN
EN LABORATORIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

QUIÑONES HUERTA JOSÉ LUIS

D I R E C T O R D E T E S I S:

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MEXICO, D.F

NOVIEMBRE 2005

m.339822



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Quirónes Huerte José Luis

FECHA: 10-Ene-2005

FIRMA: *JLH*



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/089/04

Señor
JOSÉ LUIS QUIÑONES HUERTA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS DE ONDAS Y REFLEXIÓN EN LABORATORIO"

- INTRODUCCIÓN
- I. TEORÍA DE ONDAS
 - II. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE
 - III. GENERACIÓN DE OLEAJE EN LABORATORIO
 - IV. ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN
 - V. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL
 - VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 16 de noviembre del 2004.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/ccr.

Dedico este trabajo a mi madre, por que siempre ha estado ahí para apoyarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud a mis compañeros y amigos del Grupo de Ríos y Costas que me apoyaron durante la realización de este trabajo, sus comentarios y sugerencias que enriquecieron el contenido de este. En particular al Dr. Rodolfo Silva C., por sus atenciones y confianza brindada durante la realización de este proyecto, M.I. Víctor Franco por darme la oportunidad de ingresar al Instituto de Ingeniería.

Así mismo quiero aprovechar estas líneas para agradecer a Noe, Gerardo y Luis Carlos por su valiosa ayuda durante la preparación del equipo de medición, así como del dique artificial empleado durante los ensayos. A Edgar y Evelin por su infinita paciencia y consejos.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
I. INTRODUCCIÓN	X
II. DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	XIV
III. OBJETIVOS	XVI
1. DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE	1
1.1 PRINCIPALES PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR UNA ONDA	1
1.2 OLEAJE	2
1.2.1 FUERZAS GENERADORA Y RESTAURADORA	2
1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS OCEÁNICAS	2
1.2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS CON BASE EN SU PERÍODO	2
1.2.5 CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE DE ACUERDO A SU GÉNESIS Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA	4
1.2.6 CLASIFICACIÓN DEBIDO A LA PROFUNDIDAD RELATIVA	5
1.3 PROCESOS DEL OLEAJE	6
1.3.1 <i>Refracción</i>	7
1.3.2 <i>Difracción</i>	7
1.3.3 <i>Reflexión</i>	8
1.3.4 <i>Rotura</i>	8
2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE	11
2.1 HIPÓTESIS BÁSICAS	11
2.2 ESTADO DE MAR	12
2.3 ANÁLISIS TEMPORAL	13
2.3.1 <i>Corrección del nivel medio</i>	13
2.3.2 <i>Caracterización de la señal</i>	15
2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL	21
2.4.1 <i>Corrección del nivel medio</i>	24
2.4.2 <i>Caracterización de la señal</i>	24

2.5	MODELOS ESTADÍSTICOS DE APLICACIÓN RECIENTE	30
3.	GENERACIÓN DE OLEAJE EN LABORATORIO	35
3.1	TEORÍA DE LA GENERACIÓN DE ONDAS	35
3.1.2	<i>Teoría de generación de ondas producidas por una paleta o tipo pistón</i>	<i>36</i>
3.1.3	<i>Teoría de generación de ondas producidas por un agitador (Flap)abisagrado al fondo 43</i>	
3.2	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	47
3.3	ABSORCIÓN DINÁMICA DE LAS ONDAS	49
4.	ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN	52
4.1	SEPARACIÓN DE LAS ONDAS INCIDENTE Y REFLEJADA	52
4.2	MÉTODO DE MANSARD	52
4.2.1	<i>Descripción del método</i>	<i>53</i>
4.3	MÉTODO DE GODA.....	57
4.3.1	<i>Descripción del método</i>	<i>57</i>
4.4	OTROS MÉTODOS	60
5.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	65
5.1	DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO.....	65
5.1.1.	<i>Características del Canal de oleaje.....</i>	<i>66</i>
5.1.2.	<i>Especificaciones del generador de oleaje.....</i>	<i>66</i>
5.1.3.	<i>Equipo de medición.....</i>	<i>67</i>
5.2	MEDICIONES Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES	67
5.2.1	<i>Descripción del experimento</i>	<i>67</i>
5.2.2	<i>Hipótesis</i>	<i>67</i>
5.2.3	<i>Modelos a utilizar</i>	<i>68</i>
5.2.4	<i>Mediciones</i>	<i>71</i>
5.3	RESULTADOS	72
6.	CONCLUSIONES.....	75
7.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	77
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	78
9.	REFERENCIAS.....	80

Lista de figuras

FIGURA 1.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA.....	1
FIGURA 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS REFERIDAS AL PERÍODO – ENERGÍA	3
FIGURA 1.3 OLEAJE TIPO SEA	4
FIGURA 1.4 OLEAJE TIPO SWELL	5
FIGURA 1.5 CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE DE ACUERDO CON LA PROFUNDIDAD EN QUE VIAJA LA OLA.....	6
FIGURA 1.6 REFRACCIÓN DEL OLEAJE EN LA LÍNEA COSTERA	7
FIGURA 1.7 EFECTO DE LA DIFRACCIÓN DEBIDO A LA PRESENCIA DE UN ROMPEOLAS.....	8
FIGURA 1.8 REFLEXIÓN DEL OLEAJE DEBIDO A LA PRESENCIA DE UN ROMPEOLAS.....	8
FIGURA 1.9 TIPO DE ROTURA DEL OLEAJE (SPM, 1984).....	9
FIGURA 2.1 COMPORTAMIENTO ALEATORIO DEL OLEAJE.....	11
FIGURA 2.2 REGISTRO DE UNA SEÑAL DE OLEAJE, SE PUDE APRECIAR QUE LA VARIACIÓN DEL OLEAJE ES LENTA (PROCESO ESTACIONARIO).....	12
FIGURA 2.3 EN EL GRÁFICO SE MUESTRAN LAS ZONAS DE VALIDEZ DE LA CORRECCIÓN DEL NIVEL MEDIO MENCIONADOS.....	14
FIG.3.1..REBASE DEL OLEAJE SOBRE UN DIQUE DE PROTECCIÓN QUE SIRVE ADEMÁS DE CAMINO.....	35
FIGURA 3.2. ESTRUCTURA GENERAL DEL PROBLEMA DE VALOR EN LA FRONTERA EN DOS DIMENSIONES, A) CONDICIÓN DE FRONTERA LATERAL, B) CONDICIÓN DE FRONTERA EN EL FONDO, C) CONDICIÓN DE FRONTERA CINEMÁTICA Y DINÁMICA EN LA SUPERFICIE LIBRE DEL FLUIDO, D) H TIRANTE DE AGUA.....	36
FIG.3.3. PROBLEMA DE VALOR EN LA FRONTERA EXPRESADO EN TÉRMINOS MATEMÁTICOS, A)CONDICIONES CINEMÁTICAS. TODAS LAS PARTÍCULAS DEL AGUA DE LA SUPERFICIE PERMANECEN EN ELLA Y DINÁMICAS EN LA SUPERFICIE, LA PRESIÓN ES CONSTANTE EN LA SUPERFICIE.,B) DESPLAZAMIENTO DEL AGUA DEBIDO AL MOVIMIENTO DE LA PALA., C) ECUACIÓN DE LAPLACE. D) LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA ES DE FORMA CONSTANTE, Y E) EL FONDO ES IMPERMEABLE.....	40
FIG.3.3.- GENERADOR DE OLEAJE MEDIANTE UNA PALETA (INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM)	43
FIG.3.4.- GENERADOR DE OLEAJE TIPO FLAP.....	47
FIG.3.5.- GENERADOR A BASE DE UN MOTOR ELÉCTRICO.....	48
FIG. 3.5.-PROCESO DE GENERACIÓN DE OLEAJE EN LABORATORIO	49
FIG.3.6.- PLAYA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A BASE COSTALES LLENOS DE GRAVA Y ROCA EN EL CANAL DE OLEAJE DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.....	49
FIG.3.7.- SENSORES EN LA PARTE FRONTAL DE LA PALETA, UTILIZADOS POR EL SISTEMA DE ABSORCIÓN, CANAL DE OLEAJE, I.I. UNAM.....	50
FIG. 5.1.- CANAL DE OLEAJE DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.....	65
FIG. 5.2.-POSICIÓN RELATIVA DE LOS SENSORES EN PLAYA Y DIQUE	70
FIG 5.3.-SE MUESTRA PARA LOS ENSAYOS 321 Y 328 EL RUIDO INTRODUCIDO POR LA NO LINEALIDAD DE LA ONDA.....	74

Lista de Tablas

TABLA 1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS REFERIDAS AL PERÍODO	3
TABLA 1.2 CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD RELATIVA EN QUE VIAJA	6
TABLA 2.1.- MODELOS ESPECTRALES PARA UN ESTADO DE MAR	22
TABLA 5.1.-RANGO DE VALORES DEL NÚMERO DE IRIBARREN PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ROTURA, SILVA,1997	68
TABLA 5.2.-VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE SE UTILIZADOS EN LOS ENSAYES.....	71
TABLA 5.3.- VALORES DE LOS COEFICIENTES DE REFLEXIÓN OBTENIDOS	73
TABLA 5.3.-TIPO DE ROTURA PRESENTADA EN CADA UNO DE LOS ENSAYOS, CON BASE AL NÚMERO DE IRIBARREN	73

Lista de símbolos

A, a	amplitud de la onda.
A_n, B_n, a_n, b_n	coeficientes de Fourier.
$A0, A1$	coeficientes del ajuste lineal.
$B0, B1, B2$	coeficientes del ajuste parabólico.
β	factor de corrección al aplicar una función ventana.
c	celeridad de la onda.
d	profundidad.
d_r/L	profundidad relativa.
$Erfc$	función de error complementaria.
ϵ, ν	anchura espectral.
$F(\sigma)$	transformada compleja de Fourier en función de la frecuencia angular.
$F(f)$	transformada compleja de Fourier en función de la frecuencia de la onda.
Δf	intervalo de frecuencia.
$F(x, z, t)$	función que describe la superficie del agua debido al movimiento del generador.
GF	factor de grupo.
g	aceleración debida a la gravedad.
H	altura de ola.
h	tirante de agua.
H_{rms}	altura cuadrática media.
H_{m0}	altura de ola asociada al momento de orden cero.
\bar{H}	altura media.
$h_s(f)$	profundidad de peso.
I	ola incidente.
k	número de onda
K_0	número de onda asociado a la frecuencia media.
K_p	número de ondas progresiva o incidente.
K_s	número de ondas estacionaria.
L	longitud de onda.
m_n	momento de orden n.

m_0, m_1, m_2	momento de orden cero, uno y dos.
n	vector normal.
nmm	nivel medio del mar.
N	número de datos que integran la señal.
Nr, Yr	parámetros empleados en el ajuste lineal.
N_0	número de ondas individuales de todo el registro.
$\bar{\eta}_N$	promedio aritmético del perfil corregido.
η_{max}	punto máximo local del registro de una señal.
η_{min}	punto mínimo local del registro de una señal.
η_{rms}	variación media cuadrática de la superficie libre del agua.
$\eta(t^*)$	perfil una vez aplicado una función ventana.
$\eta(x, y, t)$	desplazamiento vertical de la superficie libre del agua. con respecto al nivel medio del mar.
$P(\eta)$	distribución de desplazamiento de la superficie libre del agua.
$P(H \geq H_0)$	distribución de la altura de Carter.
$P(H/H_{rms})$	distribución de la altura de Rayleigh.
$P(\xi, N)$	distribución de la altura de Tayfun.
$P(H)$	distribución de la altura de Longuet-Higgins.
$P(H, T)$	distribución conjunta periodo y altura de ola tipo Cavanié.
$P(H, T)$	distribución conjunta periodo y altura de ola tipo Longuet-Higgins.
$P(T)$	distribución de periodos de ola.
Qp	agudeza de pico.
R	ola reflejada.
$S(z)$	desplazamiento del mecanismo empleado en la generación de oleaje.
$S(f)$	función de densidad espectral.
$S(f)$	espectro suavizado.
$\hat{S}(f)$	espectro de energía promediado.
$S_n(f_j)$	espectro de energía j-ésimo.
T	periodo asociado a la onda.

t	tiempo.
Δt	intervalo de tiempo.
ta, tb	parámetros empleados en la estimación del periodo.
\bar{T}	periodo medio.
T_{01}	periodo asociado al momento de orden cero y uno.
T_{02}	periodo asociado al momento de orden cero y dos.
\vec{U}	vector velocidad.
u_x	componente horizontal de la velocidad.
W	función de peso utilizada.
u_y	componente vertical de la velocidad.
x, y	posición espacial de la onda.
Δr	separación entre sensores.
z	profundidad de interés.
σ	frecuencia angular.
Δ	parámetro empleado en el ajuste parabólico.
θ	ángulo de incidencia.
$\nabla^2 \phi$	ecuación de Laplace.
ϕ	potencial.

I. Introducción

El medio costero es de gran importancia, desde muy diversos ámbitos como lo son el social, el económico, el ambiental, turístico y geopolítico. Entre otras, por esta razón el estudio del clima marítimo y la influencia que tiene sobre la morfodinámica de las costas y estructuras es importante. Para llevar a cabo los estudios referentes a los cambios físicos en la frontera mar-tierra es necesaria la recolección de datos en campo y laboratorio, el empleo de herramientas computacionales y la consecuente aplicación de criterios de diseño.

México destaca entre los países del mundo, ocupando el 8° lugar, por la extensión de sus litorales, que es del orden de 11,122 Km., exclusivamente en su parte continental, sin incluir litorales insulares. Sin embargo pese a esta gran extensión costera, su desarrollo es limitado. El desarrollo potencial a futuro demanda la realización de estudios de las características del oleaje con el objeto proponer criterios de diseño que minimicen el costo constructivo de una gran variedad de obras marítimas, como puertos, rompeolas, diques, conductos submarinos y plataformas petroleras.

En la naturaleza, cuando el oleaje se propaga sobre la costa sufre una serie de modificaciones debidas a diversos fenómenos, a saber, reflexión, someramiento, refracción, difracción y rotura. El fenómeno de la reflexión es uno de los más importantes y se debe a dos situaciones básicas: cambio significativo en la profundidad en una playa y la existencia de obstáculos, principalmente para protección costera

Hasta hace pocos años se empezó a considerar la necesidad de realizar estudios más a detalle sobre el fenómeno de la reflexión, debido a que éste se relaciona con otros fenómenos como son: la rotura del oleaje, la generación de corrientes y el transporte de sedimentos a lo largo del litoral. Además, para evaluar la cantidad de energía disipada, por rotura o fricción de fondo en una playa, en relación con la energía incidente, es necesario determinar la cantidad de energía que ha sido reflejada.

En particular, el estudio del oleaje, se remonta a tiempos muy lejanos, como ejemplo se puede citar que los antiguos griegos estaban conscientes de la interacción entre el mar y la atmósfera, más aun, Aristóteles señalaba la importancia del viento en la generación del oleaje. Posterior a esta época y durante el renacimiento no hubo grandes avances en el estudio de la generación y transformación del oleaje, sino fue a partir del periodo comprendido entre los siglos XVI al XIX, cuando se dieron las contribuciones más importantes en el plano teórico del estudio del oleaje. En 1802 el matemático Gerstner publicó la teoría trocoidal del oleaje para aguas profundas, posteriormente el inglés Airy desarrolló la teoría de la pequeña amplitud, válida para aguas profundas. En 1844 Stokes estableció la teoría de ondas de amplitud finita para aguas profundas que posteriormente extendió a aguas someras. Más tarde, el estudio de una onda solitaria con una sola cresta fue desarrollado por Russell (1844) y su descripción teórica fue dada por Boussinesq en 1871. Posteriormente, de forma independiente por Rayleigh (1876), Korteweg y De Vries (1895) derivaron la teoría de olas periódicas en aguas someras conocida como teoría Cnoidal.

En la época contemporánea, Sainflou (1928) desarrolló un modelo para la estimación de la presión debido al oleaje, cuyo uso práctico se extendió rápidamente para el diseño de rompeolas verticales. Durante la segunda guerra mundial, las operaciones militares propiciaron el estudio de predicción de las características del oleaje, así, los oceanógrafos H.U. Sverdrup y W. H. Munk, combinando relaciones teóricas y empíricas desarrollaron un método de previsión de altura significativa ($H_{1/3}$), más tarde esta teoría mejoró, dando origen al método SMB, desarrollado por Sverdrup, Munk y Bretschneider.

Más adelante Neumann (1953) introdujo el concepto de representación espectral del oleaje y los estudios de Rice (1944-1945), determinaron las relaciones analíticas entre energía espectral y la probabilidad de amplitud de onda en un proceso Gaussiano aleatorio, permitiendo con ello la estimación del periodo y altura de la onda, vía el análisis espectral. El primero en realizar un análisis de las características del oleaje a partir de un registro fue Longuet-Higgins (1952), quien presentó conceptos como oleaje direccional, oleaje no Gaussiano y oleaje no lineal. Por otra parte St. Denis y Pierson (1953) establecieron un enfoque estocástico para el estudio del oleaje.

De las teorías citadas, son consideradas clásicas las desarrolladas por Stokes y Airy, siendo esta última la base de otras teorías más complejas, las cuales se clasifican en teorías para fondo horizontal y variable. Las primeras desarrolladas por la necesidad de representar el comportamiento de la superficie libre, perfiles de velocidad y presión en una columna de agua conociendo características como periodo y amplitud de la onda, dentro de éste grupo están las aproximaciones de Stokes de 1^o, 2^o, 3^o ...orden, teoría de Airy, Cnoidal y de la onda solitaria. Las segundas incluyen a la teoría del rayo (modelo semi-gráfico basado en conceptos óptico-geométricos, principalmente en la ley de Snell) y a la ecuación de la pendiente suave (desarrollada originalmente por Berkhoff (1972) y descrita más concisamente por Smith y Sprinks (1975), útil para estimar la transformación del oleaje hacia la costa). Teniendo como base esta teoría y bajo ciertas hipótesis, se originaron los denominados modelos de refracción-difracción, los primeros son una forma alternativa de la teoría del rayo para estudiar los casos donde únicamente se tiene influencia de la refracción y el someramiento, los modelos de difracción, en estos se desprecia las variaciones de fondo, son útiles al analizar únicamente este proceso en forma aislada, fondo plano y provocado por obstáculos verticales e impermeables.

Otros modelos son los desarrollados para aguas someras (cuando la longitud y amplitud de la onda son comparables en magnitud con la onda), ecuaciones de aguas someras, de continuidad y cantidad de movimiento, que son aplicables en los casos donde la hidrodinámica está dominada por ondas de marea y modelos tipo Boussinesq, estos fueron desarrollados para el análisis en aguas someras, cercanas a la zona de rompiente o para ondas restituidas después de la rotura.

Cuando se proyectan estructuras marítimas, el ingeniero considera como parámetro de diseño el oleaje que se tiene antes de su construcción, oleaje incidente, con lo que se comete el 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.

En el diseño de estructuras marítimas de protección es de vital importancia el conocimiento adecuado de este fenómeno para conocer la eficiencia de la estructura, es decir, su capacidad disipativa, la cual se determina a través de evaluar las componentes del oleaje, las partes reflejada, incidente, transmitida y disipada por la estructura.

Por otra parte, en laboratorio, cuando se realizan ensayos para el estudio de la transformación y efectos del oleaje, es necesario controlar las condiciones de preestablecidas. Con lo que se debe de tomar en cuenta y compensar la parte de la energía del oleaje que se refleja y se re-refleja en la pala generadora, modelos y paredes del tanque. Se conocen varios métodos analíticos para separar las ondas incidente y reflejada en experimentos realizados en laboratorios, la mayor parte de estas técnicas precisan los registros de la superficie libre en distintos puntos.

Estos métodos pueden agruparse de acuerdo al número de puntos de medición que se consideren: con dos registros temporales de superficie libre y con tres o más series de oleaje, de igual forma se pueden clasificar de acuerdo al tipo de oleaje para el que fueron deducidos, unidireccional (normal a la estructura) o multidireccional.

Todas estas técnicas de separación asumen válida la superposición lineal de componentes, teoría lineal, y por tanto es posible el uso del análisis de Fourier para el estudio del oleaje.

El presente trabajo tiene como objeto central estudiar las metodologías existentes para la evaluación de la reflexión en campo y laboratorio y calibrar un sistema de absorción dinámica en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

II. Descripción y organización del trabajo

Capítulo I.-Teoría de ondas

En este capítulo se describirán los procesos que dan pauta a la generación y transformación del oleaje, debido a la presencia de estructuras y cambios de la batimetría del fondo marino. Se describen los parámetros más relevantes para su caracterización, los cuales generalmente se determinan en campo o en laboratorio para ser utilizados en el diseño de estructuras marítimas.

Capítulo II.- Análisis estadístico del oleaje

Aquí se abordarán las principales metodologías para el tratamiento estadístico de una señal, producto de la medición del oleaje en campo o en laboratorio. Éstas son 1) la descripción estadística temporal y 2) la descripción estadística espectral de regímenes del oleaje y una breve descripción del análisis a largo plazo o extremal y su importancia en el diseño marítimo.

Capítulo III.-Generación de oleaje en laboratorio

Se describirán las teorías de generación de oleaje referente a los dos principales mecanismos utilizados en laboratorio para la generación y simulación de un estado de mar. Así mismo la función de transferencia de estos dispositivos y los mecanismos empleados en laboratorio para la absorción de energía de mayor uso.

Capítulo IV.- Estimación de la reflexión

Se mencionarán y describirán los métodos, en el análisis de dos dimensiones, de Mansard (1980) y Goda (1976) utilizados para la separación de la onda incidente y reflejada de una señal de oleaje medida en laboratorio.

Capítulo V.-Validación experimental

Se describen brevemente las instalaciones del laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos, equipo con que se cuenta, proceso seguido para la recolección de los datos y análisis de los resultados obtenidos.

III. Objetivos

Los objetivos planteados en el presente trabajo son los siguientes:

- Describir los procesos que caracterizan la generación y transformación del oleaje, así como los parámetros más relevantes para su clasificación.
- Estudiar y describir de los métodos utilizados para el tratamiento estadístico de una señal de oleaje, sus hipótesis y modelos.
- Describir las teorías referentes a la generación de oleaje en laboratorio, modelos e hipótesis, así como de los principales mecanismos utilizados para tal fin y los métodos más ampliamente utilizados para la absorción dinámica de las ondas.
- Desarrollar los diferentes métodos utilizados para la separación de la onda incidente y reflejada, abordando aspectos fundamentales como son sus hipótesis e intervalo de validez.
- Evaluar la reflexión en laboratorio empleando el sistema de absorción dinámica y playa disipadora, y realizar una comparación entre ambos sistemas y determinar que tan eficientes son para la disipación de la energía para diferentes condiciones de operación.

1. Descripción del oleaje

1.1 Principales parámetros para caracterizar una onda

Para entender los fenómenos que ocurren en la naturaleza, se han desarrollado un sin fin de teorías, que son un intento de explicar mediante modelos matemáticos tales fenómenos. Así, para representar la generación y transformación del oleaje y consecuentemente el desarrollo de modelos, es necesario definir los parámetros necesarios y suficientes para su caracterización. Estos son:

- Altura de ola, H , distancia vertical entre la cresta y el valle.
- Longitud de onda, L , es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos.
- Periodo, T , tiempo que tardan en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivamente.
- Celeridad, C , velocidad con la cual se desplaza la ola, es decir $C = \frac{L}{T}$.
- Profundidad, h , distancia vertical medida a partir del nivel de aguas tranquilas.
- Perfil de la superficie de agua η , es el desplazamiento de la superficie del agua con relación al nivel medio del mar.
- Amplitud de la ola, A , es igual a la mitad de la altura de la ola.

Los parámetros citados se muestran en la figura 1.1, donde se presenta una onda periódica que se propaga en la dirección x .

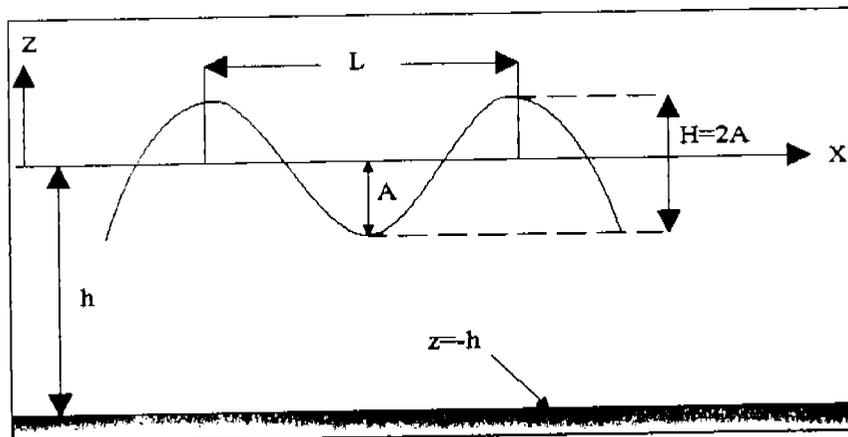


Figura 1.1 Características de una onda

1.2 Oleaje

Al arrojar un objeto en un cuerpo de agua, se observa la formación de pequeñas ondulaciones que se propagan a una cierta distancia y velocidad hasta desaparecer totalmente, así mismo al soplar el viento, sobre la superficie de agua, se forman ondulaciones que se propagan en la dirección predominante del viento tendiendo a la calma cuando este cesa. En la masa de agua del mar ocurre lo mismo, la superficie oceánica presenta una perturbación causada principalmente por la acción del viento, pero también puede ser provocada por terremotos, desprendimientos de grandes masas de tierra y la atracción gravitatoria.

Dicha perturbación, se denomina oleaje, el cual siempre está presente, y su comportamiento es totalmente aleatorio.

De lo descrito hasta aquí se define al oleaje, como una perturbación en un medio continuo (masa de agua), debida a una fuerza generadora, principalmente el viento, y a las fuerzas restauradoras que son las que tratan de regresar al medio a su estado original.

1.2.1 Fuerzas generadora y restauradora

Las fuerzas que intervienen en la generación de oleaje, como las que tratan de restablecer su condición de equilibrio son de diversa índole, y dependiendo de sus magnitudes y características tienen campos bien definidos de acción. Estos campos dan origen a diferentes tipos de oleaje u ondas. Así, como principales fuerzas generadoras se tiene al viento, sismos y derrumbes y como principales fuerzas restauradoras se tiene a la tensión superficial, la atracción gravitatoria y la fuerza de Coriolis.

1.2.3 Clasificación de las ondas oceánicas

La clasificación de las ondas oceánicas, se puede realizar desde diferentes puntos de vista, como es, el período, la fuerza generadora, la profundidad relativa en la que se propaga la onda y la zona de transmisión de energía debida al viento. A continuación se describe cada uno de estos.

1.2.4 Clasificación de las ondas con base en su período

Un registro de oleaje, está constituido por una amplia gama de períodos, asociado a las condiciones de oleaje presentes en la zona bajo estudio. Se pueden distinguir varios tipos de ondas atendiendo solo al período, sin embargo, como se presenta en la Tabla 1.1 cada tipo de onda tiene amplitudes y longitudes de onda asociadas. Por otra parte, en la figura 2.5 se muestra un esquema en el que además del período, las ondas se clasifican en función de la energía que transportan, así como de la fuerza que las generan y de equilibrio.

Tabla 1.1 Clasificación de las ondas referidas al periodo

Nombre	Período T	Longitud L	Altura H	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 - 0.1 s	2 - 7 cm	1 - 2 mm	viento	tensión superficial
Ultragravedad	0.1 s - 1 s	centímetros	centímetros	viento	tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 s - 30 s	metros a cientos de metros	centímetros - 15 m	viento	Gravedad
Infragravedad	30 s - 30 min	100 - 200 m	pequeña	viento	gravedad, Coriolis
Largo período	5 min - 24 hr	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 - 5 m	sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	gravedad, Coriolis
Transmarea	más de 24 hr	-	0 - 12 m	Oscilaciones climáticas	gravedad, Coriolis

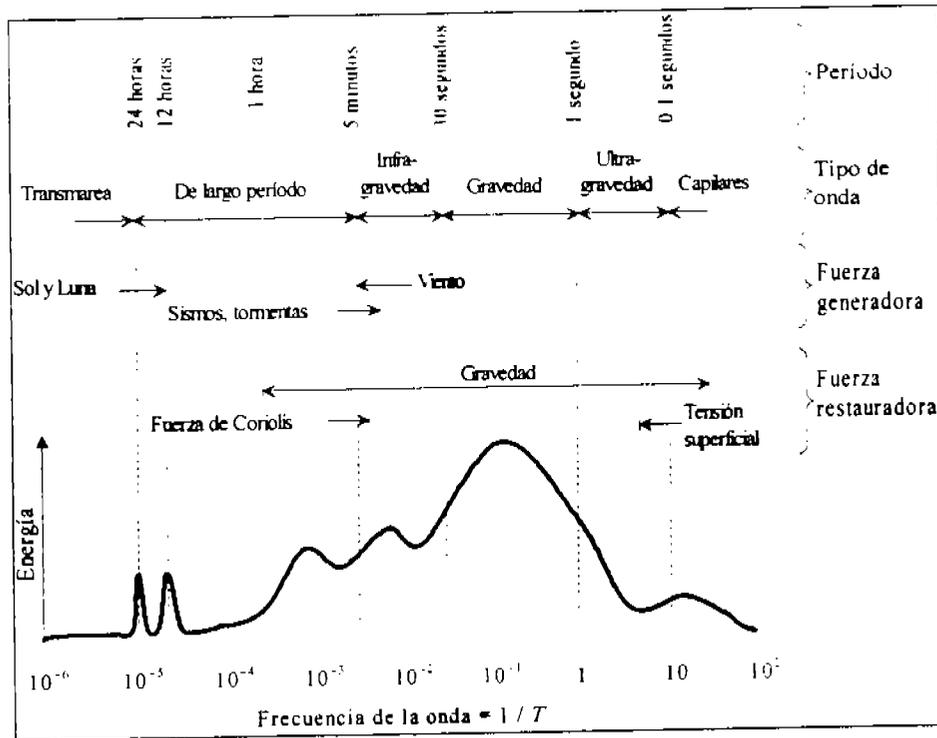


Figura 1.2 Clasificación de las ondas referidas al periodo - energía

1.2.5 Clasificación del oleaje de acuerdo a su génesis y transmisión de energía

La generación de ondas que se forman en la superficie del mar obedece a diferentes causas, de las que la principal es el viento. Atendiendo a lo anterior, se denomina como zona de generación a la región donde el viento trasmite su energía al mar, dicha transmisión depende de la velocidad del viento y de su duración

Con base a lo anterior se distinguen dos tipos extremos de oleaje, a sabiendas que existen entre ambos un sin número de estados intermedios. Estos extremos se denominan por las palabras inglesas, SEA y SWELL.

- OLEAJE SEA o LOCAL. este se encuentra en la zona de generación, donde el oleaje es totalmente caótico, y la superficie del mar es impredecible. Existe asimetría entre la forma del valle y la cresta de las olas además de un gran peralte en éstas últimas.
- OLEAJE SWELL o DISTANTE, se denomina así al oleaje que se propaga fuera del área generación teniendo como característica principal frentes de onda más regulares. Se distinguen además tres fenómenos:
 - i. El oleaje viaja a expensas de su propia energía, la cual va atenuándose en su camino hacia la costa.
 - ii. El oleaje sufre una doble dispersión. una angular en la que las olas se dispersan en todas direcciones y otra radial. asociada a la velocidad del oleaje. Así las olas más largas viajan a mayor velocidad que las más cortas produciéndose un filtrado de olas.
 - iii. Fenómeno de soldadura, es decir, las olas con periodos semejantes se fusionan, lo que. reduce la superficie caótica y tiende a un oleaje regular.

Las características del sistema oleaje-viento están determinadas por la distancia en la cual actúa el viento (Fetch) y el tiempo de duración. Se tendrá oleaje tipo SEA si se presentan las siguientes condiciones:

- Fetch real < Fetch mínimo, oleaje limitado por distancia
- Duración real < Duración mínima, oleaje limitado por duración



Figura 1.3 Oleaje tipo SEA

En tanto que el oleaje tipo SWELL se presenta cuando:

- Fetch real > Fetch mínimo
- Duración real > Duración mínima

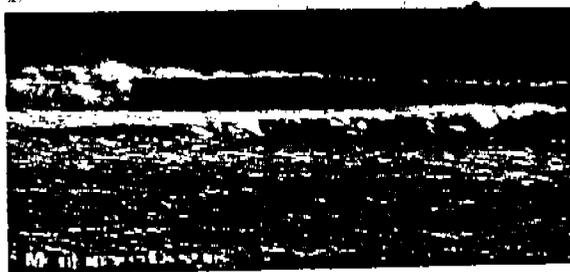


Figura 1.4 Oleaje tipo SWELL

Ambas condiciones deben cumplirse.

1.2.6 Clasificación debido a la profundidad relativa

La importancia de esta clasificación obedece a la influencia que tiene el fondo marino en la propagación del oleaje. Dicha influencia está asociada a la fricción que ejerce el fondo al desplazarse la onda de aguas profundas hacia aguas someras, lo cual se refleja en una disminución de la velocidad de las partículas de agua bajo la superficie al avanzar hacia la costa, en tanto las que se encuentran arriba se propagan a una mayor velocidad provocando la rotura en la costa. Así de acuerdo a la profundidad en que se desplaza el oleaje se divide en los siguientes grupos:

- Oleaje en aguas profundas, se caracteriza por que el movimiento de las partículas no experimenta modificaciones debido a la influencia del fondo marino.
- Oleaje en aguas intermedias, esta condición se presenta cuando inicia la influencia del fondo marino.
- Oleaje en aguas someras o poco profundas, se presenta cuando la forma y movimiento de las partículas está completamente influenciados por el fondo marino.

Para determinar en que condición se encuentra una onda, se utiliza como parámetro de referencia a la profundidad relativa $\frac{d}{L}$ y la relación existente con la función $\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$. En la tabla 1.2 se presentan los diferentes intervalos de clasificación del oleaje de acuerdo a la profundidad en que se propaga la ola.

Tabla 1.2 Clasificación del oleaje en función de la profundidad relativa |en que viaja

Clasificación	d/L	$2 \pi d/L$	$\tanh(2 \pi d/L)$
Aguas profundas	$>1/2$	$> \pi$	Aprox. 1 (0.9964)
Aguas intermedias	$1/20$ a $1/2$	$1/4$ a π	$\tanh(2 \pi d/L)$
Aguas someras	$<1/25$	$<1/4$	Aprox. $2 \pi d/L$

La figura 1.5 se presenta un esquema en el que se muestra la influencia del fondo en las velocidades orbitales de las partículas del flujo.

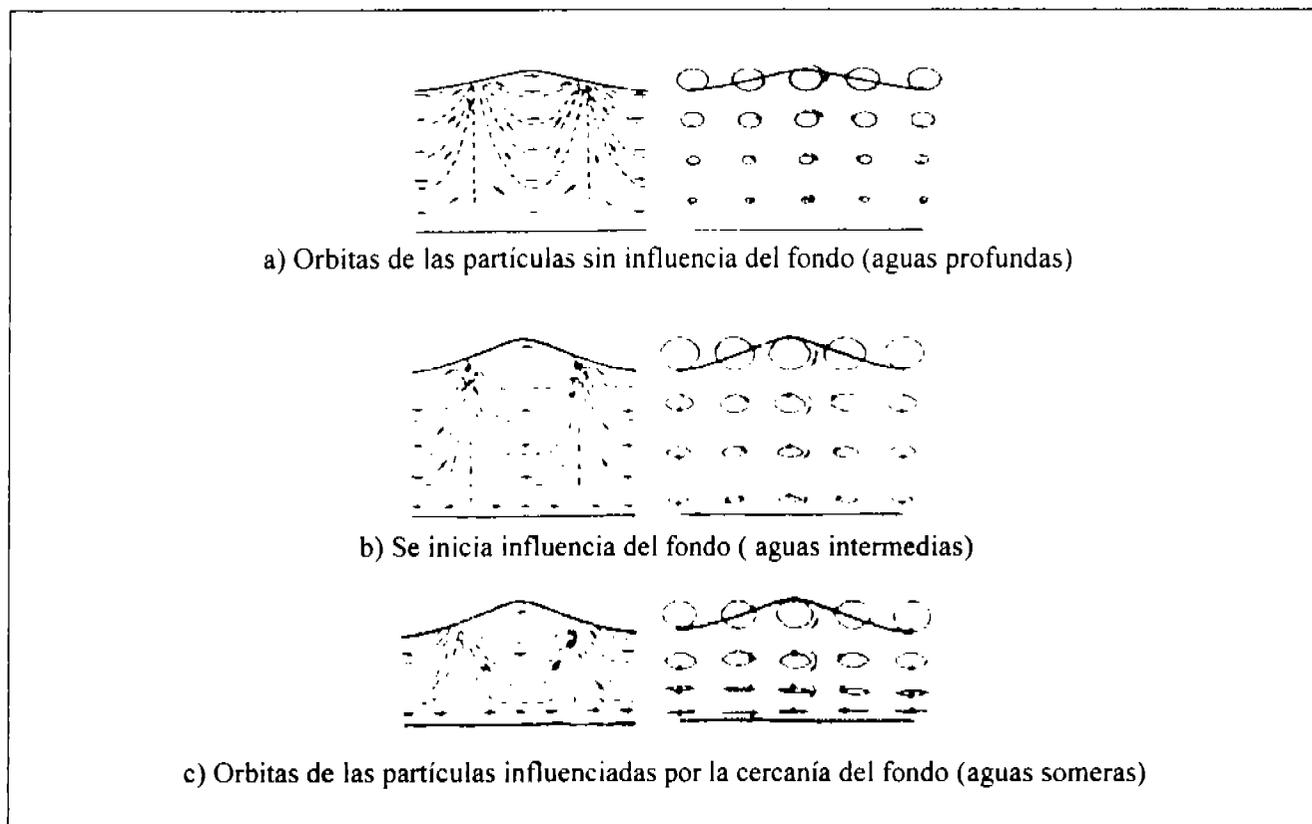


Figura 1.5 Clasificación del oleaje de acuerdo con la profundidad en que viaja la ola

1.3 Procesos del oleaje

Durante su propagación el oleaje experimenta una serie de transformaciones respecto a las condiciones iniciales. Estas modificaciones son debidas, entre otras causas, al cambio en la batimetría del fondo y a la presencia de obstáculos, como escolleras, rompeolas, espaldones o instalaciones portuarias.

La predicción del oleaje, como sus características sobre las playas, la línea costera y mar adentro es de suma importancia para decidir y realizar diseños satisfactorios de las obras permanentes en la costa, como también las obras realizadas costa afuera, por ejemplo las plataformas petroleras.

Estos procesos son refracción, difracción, reflexión, rotura, someramiento o la combinación de estos, lo cual 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.

1.3.1 Refracción

Es el proceso de transformación del oleaje caracterizado por que el frente de ola tiende hacerse paralelo a la línea de costa, debido a la variación de la batimetría. En la práctica esta transformación es importante por las razones siguientes:

- En conjunto con el someramiento, la refracción tiene influencia en la altura y la distribución de la energía de la ola a lo largo de la costa.
- El cambio en la dirección de la onda y de las distintas partes de la onda resulta en una convergencia y divergencia de la onda y efectos de las fuerzas ejercidas por las ondas sobre estructuras.
- Influye en los cambios topográficos del fondo, por sus efectos en la erosión y depósito de sedimentos.

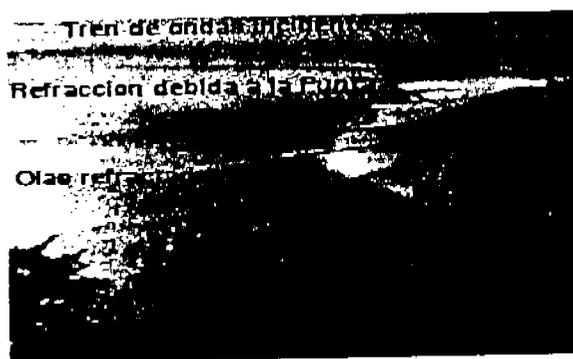


Figura 1.6 Refracción del oleaje en la línea costera

1.3.2 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. Por esta razón el conocimiento de este proceso es de vital importancia en la planeación de instalaciones portuarias, instalaciones recreativas o marinas.

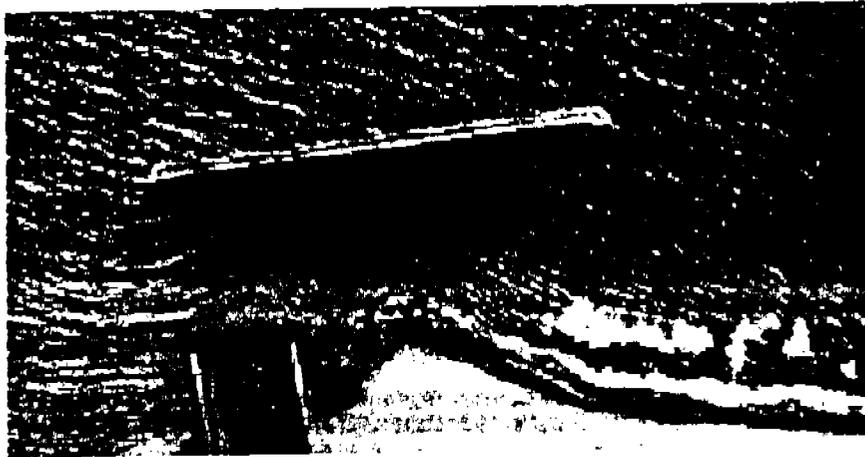


Figura 1.7 Efecto de la difracción debido a la presencia de un rompeolas

1.3.3 Reflexión

El estudio de la reflexión es tan importante como los fenómenos antes descritos, es la alteración de las características del oleaje al chocar con un obstáculo, el cual si es totalmente impermeable la reflexión es máxima pudiendo llegar a la resonancia, en cambio si el medio es permeable parte de la energía se disipa disminuyendo el efecto de la reflexión.



Figura 1.8 Reflexión del oleaje debido a la presencia de un rompeolas

1.3.4 Rotura

Para el caso de la rompiente, los mecanismos que intervienen en este proceso del oleaje son complejos, esto ocurre cuando el peralte de la ola sobrepasa un cierto límite. La rotura de las ondas ha sido clasificada dentro de cuatro grupos, *Descrestamiento (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 descrestamiento y voluta se presentan también en aguas profundas.

Como se ha mencionado, cuando el oleaje se propaga de aguas profundas hacia aguas someras, sufre una serie de transformaciones, como la rotura, que puede traducirse en un movimiento de sedimentos a lo largo de la playa, causando erosión o daño a estructuras.

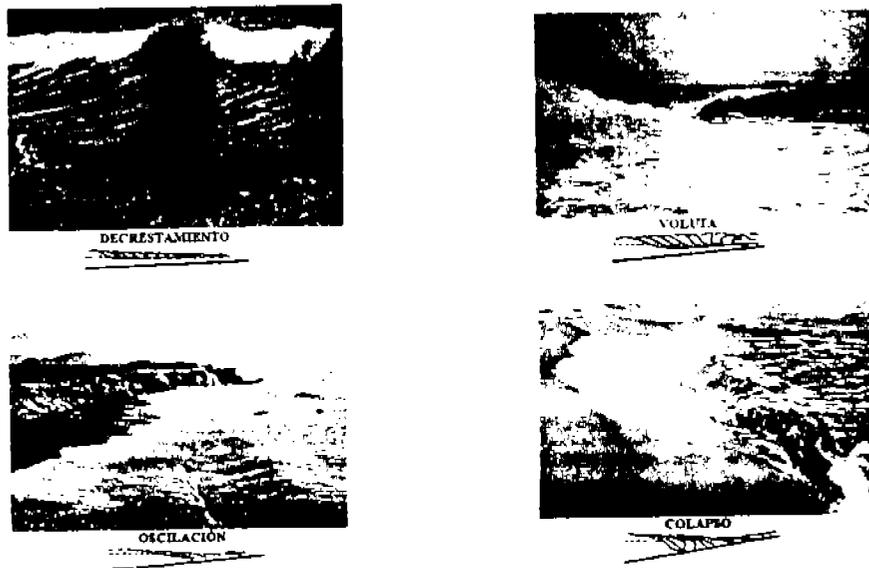


Figura 1.9 Tipo de rotura del oleaje (SPM, 1984)

2. Análisis estadístico del oleaje

Las señales producto de una medición se pueden clasificar en general en estacionarias y dinámicas, estas últimas en transitorias y periódicas, como también en deterministas y aleatorias. Las primeras se pueden representar por una función en el tiempo o si se realizan muestreos por intervalos de tiempos iguales se pueden representar por una serie de tiempo. Por otro lado las señales aleatorias o estocásticas no siguen un modelo determinístico, esto implica que no pueden predecirse por una función antes de que ocurran, como ocurre con el oleaje, y es necesario describir su comportamiento por medio de parámetros estadísticos. Con base en lo anterior una señal producto de una medición de oleaje está dentro del grupo de señales dinámicas y dentro de éstas pertenecen al grupo de transitorias .

Dado el gran número de parámetros que intervienen en la generación y transformación del oleaje, los cuales se han descrito en el capítulo anterior, la representación matemática del mismo puede llegar a tomarse una tarea muy complicada. Diversos autores han tratado de simplificar el problema aceptando "*a priori*", y en función de los recursos disponibles en cada época, hipótesis que facilitarían la caracterización del clima marítimo.

Como ejemplo, se han desarrollado diversas metodologías para el tratamiento estadístico de una señal, producto de la medición del oleaje en campo o en laboratorio. Actualmente existen dos corrientes. Estas son 1) la descripción estadística temporal 2) la descripción estadística espectral del oleaje. Éstas vertientes de análisis se describirán en el presente capítulo.

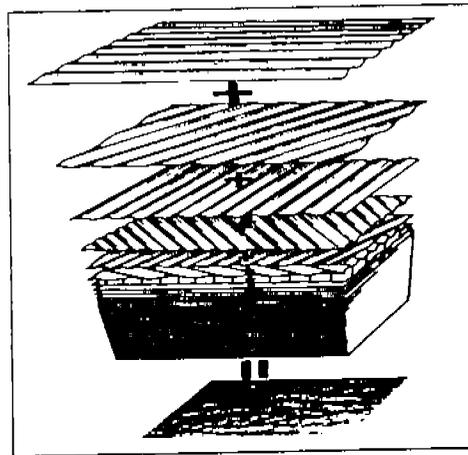


Figura 2.1 Comportamiento aleatorio del oleaje.

2.1 Hipótesis básicas

Para comprender, analizar y realizar el estudio de algún fenómeno que ocurre en la naturaleza, como el oleaje, es necesario la introducción de ciertas hipótesis que faciliten su representación y consecuentemente el desarrollo de modelos matemáticos, que permitan simular su evolución en el tiempo y el espacio.

Dichas hipótesis son las siguientes:

- Se considera como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones y con características diferentes.
- Se considera un fenómeno estocástico, es decir, como resultado de un experimento, se tiene una función, de modo que una muestra es una función de funciones. Dicha muestra es resultado de una observación o medición en campo o en laboratorio, denotada como $\eta_i(t)$.
- Es considerado como un fenómeno estacionario, es decir, la superficie del agua no cambia temporal ni espacialmente por un tiempo, Δt , o bien su transformación es demasiado lenta. La validación de tal argumento se describe en el siguiente subcapítulo.
- El oleaje es un fenómeno ergódico, este teorema, indica que si un proceso es aleatorio y estocástico, como lo es el oleaje, y que satisface ciertas condiciones es posible sustituir los promedios espaciales de varias funciones muestra por promedios temporales de una única realización.

2.2 Estado de mar

Un estado de mar, se refiere a las condiciones que presenta el oleaje en un determinado periodo de tiempo, en el cual existe un equilibrio entre las fuerzas generadoras y restauradoras. Bajo este punto de vista el oleaje puede considerarse formado por dos tipos de variaciones una *Variación de corto periodo*, implicando una variación muy rápida, del orden de segundos y una *Variación de largo periodo*, del orden de horas. Durante estos procesos el oleaje es considerado estacionario, es decir, sus características no cambian en el espacio ni en el tiempo, por un intervalo de tiempo, Δt , como puede apreciarse en la figura 2.2.

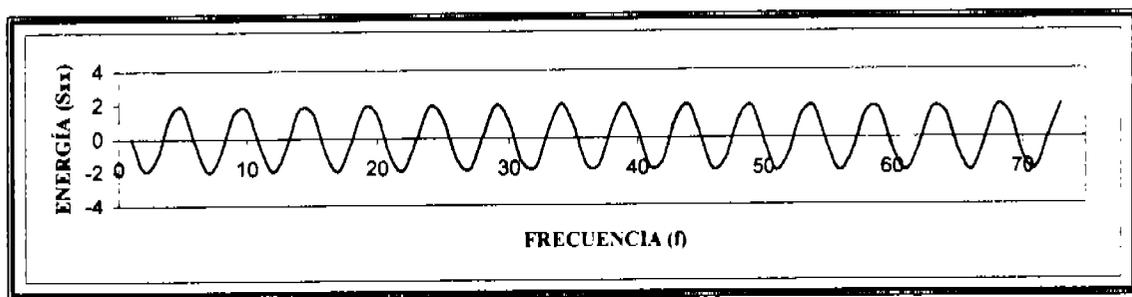


Figura 2.2 Registro de una señal de oleaje, se puede apreciar que la variación del oleaje es lenta (Proceso estacionario).

El estado de mar con base en su definición, puede expresarse de la forma siguiente:

$$\eta(x, y, t)_i = \eta(x, y, t)_{i+1} \quad \forall i, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.1)$$

Donde N indica el número total de datos que conforman al registro y $\eta(x, y, t)$, denota el perfil de la superficie libre del agua en cada instante, Δt , considerado, lo cual se expresa:

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[\frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad (2.2)$$

donde:

- a amplitud de la onda.
- σ frecuencia angular ($2\pi/T$).
- T periodo de la onda.
- θ ángulo de incidencia con respecto al eje X .
- ε fase
- x, y posición espacial de la onda.
- t tiempo

Aunque para un determinado tiempo, Δt , el oleaje es considerado estacionario, sus características de un punto a otro son totalmente impredecibles (comportamiento aleatorio). Por esta razón la forma más conveniente de estudiarlo es mediante un análisis estadístico, el cual se describe enseguida, haciendo hincapié en las metodologías de mayor uso práctico.

2.3 Análisis temporal

En este tipo de análisis la muestra es un registro de oleaje producto de una medición de un aparato, localizado en un punto del mar o en laboratorio. Este método se basa en el análisis en el dominio del tiempo.

Antes de determinar los parámetros que definen al oleaje es necesario realizar una corrección al registro ya que estos contienen la influencia de ondas largas (mareas), y posteriormente realizar la discretización de la señal, es decir, la separación de H y T .

2.3.1 Corrección del nivel medio

Los métodos más comúnmente utilizados para la corrección del nivel medio se describen a continuación:

- Corrección de orden cero o promedio aritmético, que consiste en sumar todos los datos y dividirlos entre el de datos, esto es:

$$\bar{\eta}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \quad (2.3)$$

Aplicado la metodología descrita, la corrección se realiza de la forma siguiente, el valor medio se resta del valor original de cada uno de los datos, lo cual queda expresado de la forma siguiente:

$$\eta_{\text{corregida}} = \eta_{\text{ideregistro}} - \overline{\eta}_{\text{ipromediocorregido}} \quad (2.8)$$

2.3.2 Caracterización de la señal

Una vez corregido el nivel medio, se procede al cálculo de alturas y periodos, para lo cual existen diversos métodos, los cuales se describen a continuación.

- Pasos ascendentes por cero, las olas se definen en el cambio de signo de negativo a positivo, mediante el criterio siguiente:

$$\eta_i \cdot \eta_{i+1} < 0 \quad \eta_{i+1} > 0 \quad (2.9)$$

El periodo, T, se determina calculando el primer tiempo de cambio de signo de negativo a positivo y posteriormente el segundo cambio ascendente, la diferencia entre estos tiempos es el periodo. Este se define de la forma siguiente:

$$t_a = \frac{\eta_{i-1} t_i - \eta_i t_{i+1}}{\eta_{i-1} - \eta_i} \quad t_b = \frac{\eta_{i-1} t_i - \eta_i t_{i-1}}{\eta_{i-1} - \eta_i} \quad T = t_b - t_a \quad (2.10)$$

La altura de la ola se determina realizando un ajuste parabólico entre tres puntos η_{i-1} , η_i y η_{i+1} . Para la determinación del punto máximo local de la superficie, este debe encontrarse dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes, una vez encontrado, se determina η_{max} mediante las formulaciones siguientes:

$$A = \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}) \quad B = \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}) \quad C = \eta_i \quad (2.11)$$

$$\eta_{\text{max}} = C - \frac{B^2}{4A} \quad t_{\text{max}} = t_i - \frac{\Delta t B}{2A} \quad (2.12)$$

El punto mínimo local de la elevación se determina de manera similar y la altura se define como la diferencia del valor máximo, η_{max} , y el valor mínimo, η_{min} . Por lo tanto la altura de ola es:

$$H = \eta_{\text{max}} - \eta_{\text{min}} \quad (2.13)$$

- Pasos descendentes por cero, las olas se definen en el cambio de signo de positivo a negativo, matemáticamente se expresa de la forma siguiente:

$$\eta_{i-1} - \eta_i > 0 \quad \eta_{i-1} > 0 \quad (2.14)$$

Para la determinación de los parámetros H y T se emplean las mismas expresiones que en el método anterior siguiendo una metodología similar

- Los métodos de distancia entre cresta y valles, no son de aplicación extendida, ya que presentan el inconveniente de agregar a la estadística olas pequeñas que suelen distorsionar los resultados.

Corregido el nivel medio, se prosigue a la definición de los parámetros más importantes de una serie de tiempo necesarios para definir un estado de mar y son:

- La variación del nivel medio del mar:

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (2.15)$$

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 media cuadrática de la superficie del agua:

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (2.16)$$

- La altura media y el período medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad \bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (2.17)$$

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:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (2.18)$$

Para la evaluación de otros parámetros relevantes, como altura significativa o un tercio, o la un medio, así como sus periodos asociados, se realiza el ordenamiento de mayor a menor de los datos de altura de ola y su periodo asociado. Así, por ejemplo, $H_{1/3}$ se define 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. Para alturas de oleaje que se ajustan a una distribución tipo Rayleigh, se cumple:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 1.41H_{rms} & H_{1/100} &= 2.36H_{rms} \\ H_{1/10} &= 1.80H_{rms} & H_{rms} &= \left[\frac{\sum H_i^2 \cdot f}{\sum f} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

donde:

f frecuencia de la onda.

H_i altura del registro i-ésimo.

El diseño de estructuras, requiere conocer los valores críticos que pueden presentarse durante su vida útil. Sin embargo generalmente los datos reportados corresponden a los parámetros más representativos. Por ello diversos investigadores han desarrollado y propuesto distribuciones estadísticas del oleaje, como un intento analítico de poder predecir las condiciones que más se apegan a la realidad.

Dichas distribuciones son las siguientes:

- **Distribución normal de desplazamientos de la superficie**

$$p(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms} \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2} \frac{\eta^2}{\eta_{rms}^2}\right)} \quad (2.20)$$

donde:

η_{rms} varianza.

- **Distribuciones de altura de ola**

Este parámetro es el de mayor relevancia tanto en ingeniería de costas como en oceanografía, y bajo las hipótesis de que el desplazamiento de la superficie libre sigue una distribución normal, la correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es igual a uno, la correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es igual a cero, la correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es arbitraria, la altura de ola está limitada por efectos de rotura y además se considera un espectro de banda ancha, se desarrollaron las siguientes distribuciones de probabilidad:

a) Distribución de Carter (1981)

$$p(H \geq H_0) = 1 - \left(e^{-8 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} + 2 \frac{H_0}{H_s} e^{-4 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} \int_0^{\frac{H_0}{H_s}} e^{-\frac{u^2}{4}} du \right) \quad (2.21)$$

H_0 altura de ola en aguas profundas.

b) Distribución de Rayleigh

$$p\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) = 2 \frac{H}{H_{rms}} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.22)$$

c) Distribución de Tayfun (1981)

$$p(\xi, N) = \xi \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad 0 \leq \xi \leq N^{1/2} \quad (2.23)$$

$$p(\xi, N) = \xi \left[1 - \frac{4}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{N^{1/2}}{\xi} \right) \right] \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad N^{1/2} \leq \xi \leq (2N)^{1/2} \quad (2.24)$$

$$N = \left(\frac{\pi \tanh(k_0 h)}{7\sqrt{2} k_0 \sqrt{2m_0}} \right) \text{ parámetro de Tayfun} \quad (2.25)$$

$$\xi = \frac{H}{H_{rms}} \quad (2.26)$$

J_0 es la función de Bessel de orden cero y k_0 es el número de onda asociado a la frecuencia media, el cual se obtiene a partir de la relación de la dispersión:

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = k_0 h \tanh(k_0 h) \quad (2.27)$$

d) Distribución de Longuet-Higgins (1983)

$$p(H) = \frac{L(v)H}{8m_0v \cdot e^{\frac{H^2}{2\sqrt{2m_0v}}}} \operatorname{Erfc} \left[-\frac{H}{2\sqrt{2m_0v}} \right] \quad (2.28)$$

donde:

$$\operatorname{Erfc} \left(-\frac{H}{2\sqrt{2m_0v}} \right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{H}{2\sqrt{2m_0v}}\right)^2} dH \quad (2.29)$$

es la función de error complementaria.

$$\frac{1}{L(v)} = \frac{1}{2} \left[1 + (1 + v^2)^{-1/2} \right] \quad (2.30)$$

v anchura espectral.

m₀ momento de orden cero.

- **Distribuciones conjuntas de periodo y altura de ola**

Estudios recientes han demostrado la importancia del periodo de las olas para el diseño de estructuras marinas, en fenómenos tales como el run-up o la estabilidad de piezas en un rompeolas, de ahí la importancia de este tipo de distribuciones. A continuación se presentan las distribuciones más empleadas, cabe señalar, la importancia de considerarlas en su forma dimensional y adimensional, la primera para cálculos prácticos y la segunda para hacer una comparación entre ellas.

a) Distribución de Cavanié et al. (1976).

$$p(h, \tau) = \frac{\alpha^3 h^2}{4\sqrt{2\pi} \varepsilon (1 - \varepsilon^2) \bar{\tau}^4 \tau^5} e^{-\frac{h^2 (\bar{\tau} \tau)^4}{8\varepsilon^2} \left((\bar{\tau}^2 \tau^2 - \alpha^2)^2 + \beta^2 \alpha^4 \right)} \quad (\text{Forma adimensional}) \quad (2.31)$$

$$p(H, T) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi} m_0^2 \varepsilon (1 - \varepsilon) \bar{T}^4 T_z^5} e^{-\frac{\bar{T}_z^4 H^2}{8m_0 \varepsilon^2 \bar{T}^4 T_z^4} \left[\left(\bar{T}^2 \frac{T_z^2}{\bar{T}^4} - \alpha^2 \right)^2 + \alpha^4 \beta^2 \right]} \quad (\text{Forma dimensional}) \quad (2.32)$$

donde :

$$h = \frac{H}{\sqrt{m_0}} \quad \tau = \frac{T}{\bar{\tau} T_c} \quad T_c = \frac{2\pi}{\alpha} \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad \bar{\tau} = \left(\frac{T}{T_c} \right) \quad \text{Si } \varepsilon \leq 0.95 \rightarrow \bar{\tau} = 1$$

$$\beta^2 = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \quad \alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right) \quad (2.33)$$

En la forma adimensional se emplean los parámetros siguientes:

$$T_c = T \quad , \quad \tau = \frac{T}{\bar{T}} \quad \text{y} \quad h = \frac{H}{\sqrt{m_0}} \quad (2.34)$$

b) Distribución Longuet-Higgins (1983).

$$p(R, \tau) = \left(\frac{2}{v\pi^{1/2}} \right) \left(\frac{R^2}{\tau^2} \right) e^{-R^2 \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) \right]} L(v) \quad (\text{Forma adimensional}) \quad (2.35)$$

$$p(H, T) = \left(\frac{H^2 \bar{T}}{8v\sqrt{2\pi m_0^3} T^2} \right) e^{-\frac{H^2}{8m_0} \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{\bar{T}}{T} \right)^2 \right]} L(v) \quad (\text{Forma dimensional}) \quad (2.36)$$

donde:

$$\tau = \frac{T}{\bar{T}} \quad R = \frac{H}{2\sqrt{2m_0}} \quad \frac{1}{L(v)} = \frac{1}{2} \left[1 + (1 + v^2)^{-1/2} \right] \quad \bar{T} = \frac{m_0}{m_1} = T_{01} \quad (2.37)$$

- **Distribuciones de período de ola**

Estas distribuciones se derivan de las distribuciones conjuntas de período y altura de ola, siendo las de mayor difusión las siguientes:

a) Distribución de Bretschneider (1959).

$$p(T) = 2.7 \frac{T^3}{T^4} e^{-0.675 \left(\frac{T}{\bar{T}} \right)^4} \quad (2.38)$$

b) Distribución de Longuet-Higgins (1975).

$$p(T) = \frac{v^2 T_{01}^2}{2 \left[v^2 T_{01}^2 + (T - T_{01})^2 \right]^{3/2}} \quad (2.39)$$

c) Distribución Cavanié et al. (1976).

$$p(T) = \frac{\alpha^3 \beta^2 \bar{\delta}^2 T}{\bar{T}^2 \left[\left(\frac{\bar{\delta}^2 T^2}{\bar{T}^2} - \alpha^4 \beta^2 \right) \right]^{3/2}} \quad (2.40)$$

d) Distribución de Longuet-Higgins (1983).

$$p(T) = \frac{L(v)\bar{T}}{2vT^2} \left[1 + \left(1 - \frac{\bar{T}}{T} \right)^2 \frac{1}{v^2} \right]^{-3/2} \quad (2.41)$$

• *Determinación de la dirección del oleaje*, la metodología para determinar su orientación se describe a continuación:

1. Obtener las velocidades orbitales, en la dirección x , (U_x), y en la dirección y (U_y), estos parámetros se determinan con las expresiones siguientes:

$$\bar{U}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{x_i} \quad \bar{U}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{y_i} \quad (2.42)$$

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.

2.4 Análisis espectral

La importancia de este análisis se debe a que proporciona una buena idea sobre la distribución de la energía del oleaje en función de la frecuencia. El análisis se basa en el estudio del espectro, existiendo diversos modelos que han sido desarrollados para diferentes condiciones de oleaje y en función de la velocidad del viento. Estos modelos se presentan en la tabla 2.1.

Tabla.-2.1.- Modelos espectrales para un estado de mar

NOMBRE	MODELO
Modelo Phillips	$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4}$
Espectro de Neuman	$S(f) = 1.466 H_m^2 \frac{f_p^5}{f^6} e^{-3 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2}}$
Espectro Bretschneider	$S(f) = 0.1687 H_s^2 \frac{f_s^4}{f^5} e^{-0.675 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4} L$ $L = e^{-0.675 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4}$
Espectro Pierson-Moskowitz	$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} K$ $k = e^{-0.24 \left(2\pi U_{19.5} \frac{f}{g} \right)^4} \dots\dots 1$ $S(f) = 8.1 \times 10^{-3} g^2 (2\pi)^{-4} L$ $L = e^{-\frac{4}{5} \left[\frac{f_p}{f} \right]^4} \dots\dots\dots 2$ <p>La expresión 1 es función de la velocidad del viento, La expresión 2 es función de la frecuencia de pico espectral.</p>
Espectro Pierson-Moskowitz	$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} K$ $k = e^{-0.24 \left(2\pi U_{19.5} \frac{f}{g} \right)^4} \dots\dots 1$ $S(f) = 8.1 \times 10^{-3} g^2 (2\pi)^{-4} L$ $L = e^{-\frac{4}{5} \left[\frac{f_p}{f} \right]^4} \dots\dots\dots 2$ <p>La expresión 1 es función de la velocidad del viento, La expresión 2 es función de la frecuencia de pico espectral.</p>
Espectro Kitaigorodskii-Toba	$S(f) = \left(\frac{g^2}{f^5} \right) F(\bar{f}, \bar{x}) \dots\dots 1$ $S(f) = \beta u_* g f^{-4} \dots\dots\dots 2$ <p>Espectro de Kitaigorodski (1) Espectro modificado por toba(2)</p>

Espectro ISSC	$S(f) = 0.1107 H_s^2 \frac{f^{-4}}{f^5} M$ $M = e^{\left[-0.4427 \left(\frac{f_x}{f} \right)^4 \right]}$
Espectro Krylov	$S(f) = \frac{\pi m_0}{f_0} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-7} e^{\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{f}{f_0} \right)^4 \right)}$
Espectro ITTC	$S(f) = 1.272 m_0 f_z^4 f^{-5} e^{\left[-3.18 \left(\frac{f_x}{f} \right)^4 \right]}$
Espectro Davidian et al.	$S(f) = \frac{6.5 m_0}{f_p} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-1.18} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-5.5}$
Espectro Davidian et al.	$S(f) = \frac{6.5 m_0}{f_p} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-1.18} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-5.5}$
Espectro JONSWAP	$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} k L$ $L = \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]}, k = e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)}$

Las hipótesis para realizar el análisis estadístico de la señal y posteriormente obtener los parámetros que caracterizan el oleaje, son las siguientes:

- Se asume que la señal a estudiar, es una superposición de un gran número de ondas sinusoidales, que se representan mediante el siguiente modelo:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \sin(2\pi f_n t) \right] \quad (2.43)$$

donde:

a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

- Condición necesaria 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, $T_{1/3}$, con la finalidad de poder estimar la máxima frecuencia, mejor conocida, como *frecuencia de Nyquist*:

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad (2.44)$$

- Además de tener en cuenta las hipótesis descritas, se deben considerar las hipótesis hechas en el análisis temporal.

De manera semejante a lo realizado en el análisis temporal, se debe realizar previamente la corrección del nivel medio para evitar distorsiones en el espectro denominado *efecto de solapamiento o aliasing*. La metodología de análisis se describe en seguida.

2.4.1 Corrección del nivel medio

La corrección espectral del nivel medio se lleva a cabo ya que se puede tener la influencia de marea o de ondas largas importante en el registro normalmente menores a 0.02 Hz. El proceso para realizar este tipo de corrección consiste en lo siguiente:

- *Filtro espectral*, este proceso consiste en eliminar de un espectro la energía debida a la influencia de la marea o de ondas largas, aplicando un filtrado a la señal.
- Además si no existe la influencia de ondas largas la corrección se puede realizar empleando las correcciones consideradas para el análisis temporal.

2.4.2 Caracterización de la señal

Una vez corregido el nivel medio, se procede a la corrección de los datos que conforman a la señal para evitar las discontinuidades que se pudieran presentar al unir los extremos de esta, es decir bajar los extremos a cero. La metodología se describe a continuación:

- *Función ventana*, este proceso de corrección se aplica a los datos que conforman el registro antes de realizar un análisis armónico de Fourier a una señal, esto con la finalidad de evitar discontinuidades al unir los extremos de la señal y se define como:

$$\eta(t_*) = b(t)\eta(t) \quad (2.45)$$

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 de peso de mayor uso son las siguientes:

$$\bullet \text{ Ventana tipo trapezoide} \quad b_1(t) = \begin{cases} \frac{t}{l} & : 0 \leq t \leq l \\ 1 & : l \leq t \leq N-l \\ \frac{N-t}{l} & : N-l < t \leq N \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\bullet \text{ Ventana tipo coseno} \quad b_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{l}\right) \right] & : 0 < t < l \\ 1 & : l \leq t \leq N-l \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(N-t)}{l}\right) \right] & : N-l < t \leq N \end{cases} \quad (2.47)$$

donde:

$$l = 0.1$$

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

N total de datos que constituyen a la muestra.

Al aplicar una ventana a una señal, el espectro de energía se ve afectado, manifestándose en una disminución de la energía, por lo que se debe de aplicar un factor de corrección. Dicho factor es:

$$\beta = \frac{N}{\sum_{n=1}^N [b(t_n)]^2} \quad (2.48)$$

- Análisis armónico de Fourier, una vez aplicada una función ventana a los datos que conforman la señal se procede a realizar el análisis armónico de Fourier. Al aplicar la teoría del análisis de Fourier para el cálculo de los valores del espectro en el dominio de la frecuencia, el perfil de la superficie de agua es común que se represente en forma compleja, que dando expresada:

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\sigma) e^{i\sigma t} d\sigma = 2 \int_0^{\infty} F(\sigma) e^{i\sigma t} d\sigma \quad (2.49)$$

donde:

$$F(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{i\sigma t} dt \quad (2.50)$$

La ecuación (2.50) es conocida como transformada compleja de Fourier. Sin embargo en la literatura es común encontrarla en función de la frecuencia f de la onda, en lugar de la frecuencia angular, σ :

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-if t} dt \quad (2.51)$$

La frecuencia angular σ y la frecuencia, f , están relacionadas mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_j = 2\pi f_j = \frac{2\pi j}{T} = \frac{2\pi j}{N\Delta t} = 2\pi j \Delta f \quad (2.52)$$

Las expresiones (2.49) y (2.50) se pueden representar, en forma discreta, de la forma siguiente:

$$F(\sigma_j) = \frac{1}{N} \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i\sigma_j n \Delta t} \quad j = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (2.53)$$

$$F(f_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi f_j n \Delta t} \quad j = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (2.54)$$

La expresión (2.54) permite estimar los coeficientes de Fourier en el dominio de la frecuencia, f . Una manera sencilla de estimar dichos coeficientes es mediante el empleo del siguiente algoritmo:

1. $\Delta f = \frac{1}{t_{\max}} = \frac{1}{N\Delta t}$
2. Inicie con un valor de $j = 0$.
3. Evalúe $f_j = j\Delta f$.
4. Calcule $F(f_j)$, utilizar expresión (2.53).
5. Incremente j en 1.
6. Vuelva al paso 2 hasta que $j = N/2$, N número total de datos del registro.

El inconveniente de este algoritmo, es que al tener un gran número de datos el tiempo de cómputo es muy grande, para evitar esto se utiliza la transformada rápida de Fourier, que debe de cumplir con la condición de que el número de datos del registro sea una potencia de 2 ($N = 2^m$, $m = 1, 2, 3, \dots, n$).

Por esta razón los dispositivos utilizados en la obtención de señales de oleaje, al programarlos deben cumplir esta condición u otro procedimiento es ajustar los datos, eliminando el exceso de estos o añadiendo los ceros necesarios al final del registro.

- Estimación del espectro, se refiere al cálculo de la energía del espectro, que se realiza a través de la transformada rápida de Fourier a través de la densidad espectral de energía. Ésta se define de la forma siguiente:

$$S(f_n) = \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_n)|^2 \quad \text{para } n = 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (2.55)$$

$$S(f_n) = 0 \quad \text{para } n = 0 \quad (2.56)$$

donde:

$F(f_n)$ transformada compleja de Fourier, ecuación (2.52).

$|2F(f_n)|$ representa el módulo del número complejo resultante.

$\Delta f = \frac{1}{\Delta t N}$ intervalo de frecuencia.

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 o filtrado del espectro, con el fin de aumentar la fiabilidad a costa de perder resolución.

- Suavizado del espectro, una vez que se estimo el espectro de energía, los valores espectrales estimados fluctúan en torno al real, para atenuar este comportamiento se realiza un suavizado del espectro utilizando una función de peso. Siendo las de mayor uso las siguientes:

1. Filtro rectangular

$$W_1(f_j) = \frac{1}{m} \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right] \quad (2.57)$$

m representa el número de valores no suavizados que se utilizaron para el promedio (2.57)

2. Filtro triangular

$$W_2(f_j) = \frac{1}{W_2} \left\{ 1 - \frac{|j|}{[(m-1/2)]} \right\} \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right] \quad (2.58)$$

3. Filtro parabólico

$$W_3(f_j) = \frac{1}{W_3} \left\{ 1 - \left(\frac{j}{[(m-1)/2]} \right)^2 \right\} \quad - \left[\frac{(m-1)}{2} \right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2} \right] \quad (2.59)$$

Estimada la función de peso se aplica al espectro, que en la practica se calcula como un promedio ponderado y deforma discreta:

$$\hat{S}(f) = \sum_{j=k-m}^{j=k+m} W(f_k - f_j) S(f_j) \quad (2.60)$$

donde:

$\bar{S}(f)$	espectro suavizado.
W	función de peso utilizada.
S(fi)	es el espectro sin suavizar.

Sí el registro es lo suficientemente largo, algunos tramos pueden considerarse representativos del estado de mar analizado, por lo que se pueden elegir segmentos de la misma longitud y promediarlos. Esto se puede estimar aplicando la expresión siguiente:

$$\hat{S}(f_*) = \frac{1}{n_s} \sum_{n=1}^{n_s} S_n(f_j) \quad (2.61)$$

donde:

n_s	número de segmentos tomados.
$\hat{S}(f_*)$	espectro de energía promediado.
$S_n(f_j)$	espectro de energía j-ésimo.

- Parámetros espectrales, los principales parámetros para definir un estado de mar a partir de un análisis espectral son:

1.- Momento de orden n, el cual se expresa de forma discreta como:

$$m_n = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^n S(f_i) \quad (2.62)$$

donde:

Δf incremento de la frecuencia.

m_n momento de orden n.

$n = 1 \dots 4$

$S(f_i)$ función de densidad espectral

f_i frecuencia.

- Anchura espectral, \mathcal{E} , que se define:

$$\mathcal{E} = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

si es de banda angosta $\mathcal{E} \rightarrow 0$ y si es de banda ancha $\mathcal{E} \rightarrow 1$.

Sin embargo, el momento de orden cuatro es muy sensible en los valores de alta frecuencia, lo cual se puede apreciar mejor al estimar al anchura espectral con la siguiente expresión, que define la forma del espectro, propuesta por Longuet-Higgins:

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (2.64)$$

Agudeza del pico Q_p , es un parámetro propuesto por Goda, y define la forma del espectro, señalando que es cercano a dos para olas generadas por viento. En forma discreta:

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \sum_{n=1}^k f_i (S(f_i))^2 \quad (2.65)$$

donde:

Q_p agudeza de pico.

m_0 momento cero.

f_i frecuencia.

k número total de datos de la muestra.

$S(f_i)$ densidad espectral de energía.

- *Variación cuadrática media de la superficie*

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad (2.66)$$

- *Altura de ola, se tienen los siguientes tipos:*

1. *Altura de ola media cuadrática* $H_{rms} = \sqrt{8m_0}$

2. *Altura de ola de momento cero* $H_{m_0} = 4.004\sqrt{m_0}$

Para la estimación de los periodos se tienen las siguientes expresiones:

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.67)$$

- *Estimación de la dirección del oleaje*, consiste en determinar la forma en que se distribuye su energía sobre frecuencias y direcciones en forma simultánea, es decir una distribución espectral y angular.

Para lo cual existe varias metodologías como es el método estocástico, análisis del espectro cruzado, métodos paramétricos, método de máxima verosimilitud, método de máxima entropía, método bayesiano, entre otros.

Además de los tipos de análisis mencionados, 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. En el siguiente apartado se dará una breve descripción de ellos.

2.5 Modelos estadísticos de aplicación reciente

Conforme han evolucionado las ideas sobre la caracterización de un estado de mar y consecuentemente su modelación matemática, aunado al avance que se tiene en la informática y los dispositivos generadores de oleaje existentes en laboratorios, a permitido la implementación de nuevas técnicas de análisis estadísticos, para entender el comportamiento aleatorio del oleaje. Algunas de estas nuevas formas de análisis son las siguientes:

- *Agrupamiento del oleaje*, este tipo de análisis se desarrollo a partir de observar que las olas de mayor amplitud se presentan en grupos que poseen mayor energía.

Así el agrupamiento del oleaje, puede ser descrito como el agrupamiento de un conjunto de olas que sobrepasan una cierta altura crítica, H_c , denominados paquetes de altura de magnitud importante y al número de olas que constituyen dicho conjunto se les llama longitud del conjunto.

Este tipo de análisis es importante ya que:

1. Tiene influencia en el número necesario de olas para generar resonancia en las estructuras o para voltear embarcaciones.
2. Influencia en la estabilidad de las piezas del manto de rompeolas y estructuras de protección costera.
3. Un agrupamiento bien desarrollado está asociado a la presencia de ondas de largo periodo.

Otro método para describir el agrupamiento del oleaje es a través de la envolvente de energía del oleaje, propuesta por Funke y Mansard, denominada SIWEH. El factor de agrupamiento para este método se define como:

$$GF = \frac{\sqrt{m_{E0}}}{m_0} \quad GF = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E(t) - \bar{E})^2 dt}}{\bar{E}} \quad (2.68)$$

donde:

GF factor de agrupamiento

m_{E0} y m_0 , momentos de orden cero de la función densidad espectral.

En general, en cuanto más regular es el oleaje el factor de agrupamiento es menor.

- *Análisis alargo plazo o extremal*, el objetivo de este tipo de análisis es el tratar de predecir las condiciones a las que estará sometida una estructura, por ejemplo, un rompeolas, una escollera, un difusor, etc., a lo largo de su vida útil, empleando modelos y reproduciendo las posibles condiciones críticas a las que estarán sometidas éstas en laboratorio. Esto con el objetivo de erradicar en lo posible las incertidumbres en los datos que se emplearán en el diseño y con ello menor será el riesgo de obtener obras sobreestimadas u subestimadas que pueden fallar en cualquier momento.

De esta forma los tipos de fallo a los que está expuesta, se clasifican en los siguientes:

- 1) Los relacionados con la seguridad estructural que se subdividen en: estados límite últimos, son aquellos que ocasionan la destrucción total de la obra o parte de ella debido a pérdida del equilibrio estático, deformación, inestabilidad, fatiga y colapso progresivo.
- 2) De servicio, son lo que ocasionan la pérdida funcional de la obra o parte de ella debido a alteraciones geométricas, deformaciones excesivas, vibraciones que sobrepasan cierto umbral, estados límites estéticos, ambientales y legales.
- 3) Los relacionados con la explotación de las obras denominados límites operativos, que ocasionan que se suspendan las actividades para la que fue hecha la obra sin que exista daño estructural, como por ejemplo, el rebase en diques.

Generalmente los estados límite últimos son abordados a través del concepto de análisis de régimen extremal en tanto que los operativos a través de el estudio de régimen medio. Estas formas de análisis se presentan enseguida.

El objeto del análisis extremal se cito párrafos arriba, en seguida se mencionan los principales parámetros que se evalúan en este tipo de análisis:

1. Excedencias, se refiere al hecho de que una variable en estudio sobrepase cierto límite preestablecido, para el cual su comportamiento ya no es adecuado.
2. Periodo de retorno, es el tiempo medio que tarda en retornar un suceso.
3. Valores característicos, se refiere al valor promedio que puede tener una variable en estudio durante un periodo de tiempo determinado, se define de la forma siguiente: Se dice que un valor u_n es el valor característico para máximos de un periodo de duración n si el valor medio del número de excedencias de ese valor en dicho periodo es unitario.
4. Estadísticos de orden, consiste en ordenar una serie de observaciones, en nuestro caso el ordenamiento de valores extremos, de forma ascendente. De esta manera el último valor es el máximo y el primero el mínimo y son los valores que pertenecen a los extremos y que juegan un papel importante en las aplicaciones de diseño.

Sin embargo, no existe un método totalmente aceptado basado en un análisis extremal, siendo los de mayor uso y aceptación los siguientes:

1. El método basado en los máximos de las series anuales, que utiliza los valores máximos de cada año.
2. El método basado en los picos, que utiliza los picos de los temporales.
3. El método basado en las series completas, que emplea todos los valores registrados durante el período de observación.
4. El método basado en las excedencias, que emplea todos los valores que excedan un cierto umbral.

Otros puntos de análisis que se consideran en diseño probabilístico son: distribuciones asintóticas del máximo y el mínimo, dominios de atracción, estimación de parámetros y dibujo en papel probabilístico tipo Gumbel, entre otros. Así para el diseño o estudio de las características océano-meteorológicas se requiere información estadística que permitan estimar de manera confiable las funciones de probabilidad de la superficie libre, altura de ola, periodo y la conjunta altura de ola periodo.

- *Análisis de régimen medio*, se refiere a las condiciones en promedio que se pueden presentar en un cierto intervalo de tiempo, para el caso particular de la ingeniería marítima dichas condiciones son evaluadas por medio de un determinado umbral, por ejemplo, de altura de ola significativa que se supera al año. Este tipo de estudio es posible realizarlo gracias a la disponibilidad de series temporales de estado de mar.

El objetivo es conocer el intervalo de tiempo que dura una excedencia, denotada con la letra Δ , para un determinado parámetro como altura significativa H_s , para cada dirección θ , para obtener un modelo matemático y obtener la distribución de la variable aleatoria, $f(HS, D)$.

3. Generación de oleaje en laboratorio

Los efectos que puede producir el oleaje sobre las diferentes obras marítimas, ya sean portuarias, de protección, mar a dentro o cercanas a la costa, así como estudios relacionados con la predicción de los movimientos de buques y artefactos, la evolución del perfil de playas debido a la influencia del oleaje, estudio de arrastre de sedimentos, entre otros efectos relacionados, son difíciles de estimar analíticamente, por ello es indispensable la realización de modelos y observar su comportamiento en laboratorio.

El éxito o fracaso en el diseño de algún tipo de obra o estudio en ingeniería, al igual que en otras áreas de la ciencia, depende en gran medida de la adecuada modelación y reproducción de las acciones a la que estará sometida una determinada obra en particular. En cuanto a las obras correspondientes a la ingeniería marítima, dichas acciones se deben principalmente al oleaje, viento, corrientes y posiblemente terremotos. De las acciones mencionadas, las debidas al oleaje son las de mayor importancia e influencia en el diseño de las obras citadas, ver figura 3.1.

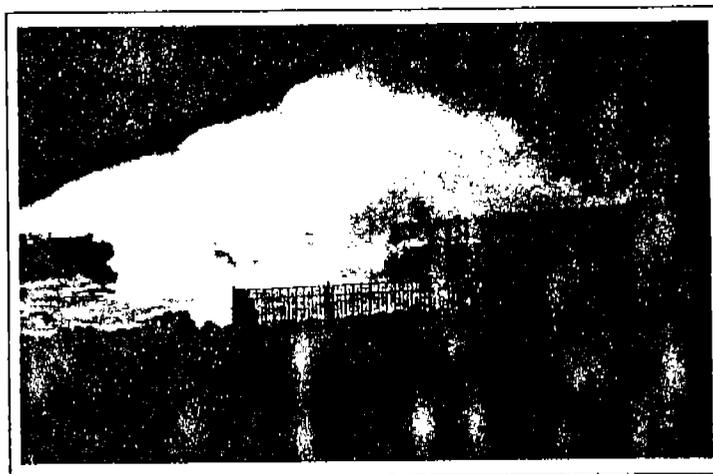


Fig.3.1..Rebase del oleaje sobre un dique de protección que sirve además de camino.

Sin embargo, la generación de oleaje con determinadas características mediante un dispositivo no ha sido sencilla. Para la representación de éste se han desarrollado diversos modelos matemáticos y consecuentemente diversos dispositivos para laboratorio. Este conjunto de ideas relacionadas con la generación de oleaje de forma artificial se denomina "Teoría de generación de ondas" que a continuación se describe.

3.1 Teoría de la generación de ondas

Uno de los primeros investigadores en proponer la generación de oleaje mediante el uso de un dispositivo fue Thomas H. Havelock (1877-1968), a partir de entonces se han desarrollado diversas teorías sobre la generación de oleaje en laboratorio y conjuntamente de dispositivos.

Dichos dispositivos se clasifican en dos grandes grupos, lo cual obedece a si el generador está en contacto directo con el agua o no, y son los siguientes: *activos*, estos generadores consisten de mecanismos de varios tipos desplazándose en dirección de la onda, estando en contacto directo con el agua y *pasivos*, los cuales no contienen partes móviles ni están en contacto directo con el agua, estos usan aire para producir la oscilación de la superficie del agua.

Los métodos de generación más utilizados en este estudio son: a) mediante una paleta o pistón accionada por medio de motores, o sistemas servo-hidráulico y b) mediante un agitador abisagrado en el fondo, existiendo dos tipos, los de una sola bisagra o articulación y los de doble, accionados con mecanismos semejantes al de la paleta.

El modelo que relaciona el movimiento de estos mecanismos con los parámetros del oleaje, se plantea y resuelve como un problema de valor en la frontera, el cual es desarrollado basado en el tipo de generador y su movimiento. Dicha relación, es entre la altura de ola generada por el movimiento de una la paleta, agitador u otro dispositivo, y el desplazamiento de éstos.

Se ha mencionado que los mecanismos de mayor uso para la generación de oleaje en dos dimensiones, en laboratorio, es mediante el uso de un agitador o empleando una paleta, sin embargo existen otros métodos, como generadores tipo espiral, que son ideales para el estudio de arrastre de sedimentos, generadores tipo serpentín, que es usado para la generación de oleaje en tres dimensiones, tipo cilíndricos, de cuña, neumáticos, entre otros. En el presente capítulo se abordaran las teorías de generación de oleaje referente a los dos principales mecanismos utilizados en laboratorio, los cuales se describen a continuación.

3.1.2 Teoría de generación de ondas producidas por una paleta o tipo pistón

Para la generación de oleaje mediante este procedimiento, igual que en los demás casos que se abordarán, se asume que el fluido es incompresible e irrotacional y el problema de valor en la frontera se plantea en dos dimensiones. El problema de valor en la frontera, es la expresión en términos matemáticos de una situación física, así para desarrollar el modelo que gobierna dicha situación primeramente se establece una región de interés y posteriormente se especifica una ecuación diferencial que debe ser satisfecha dentro de ésta (ver figura 3.2).

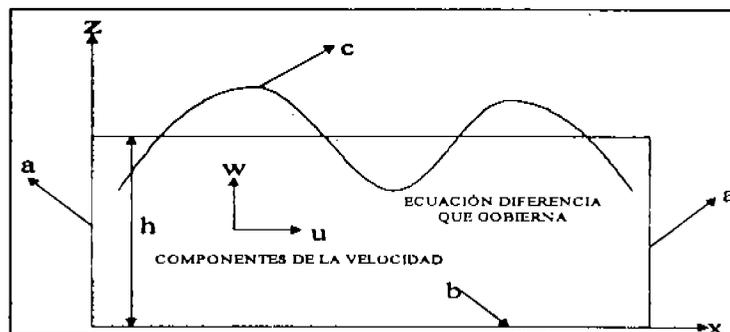


Figura 3.2. Estructura general del problema de valor en la frontera en dos dimensiones, a) condición de frontera lateral, b) condición de frontera en el fondo, c) condición de frontera cinemática y dinámica en la superficie libre del fluido, d) h tirante de agua.

Posteriormente de las múltiples soluciones se elige la primera o más soluciones que son relevantes para el problema físico en estudio.

Al suponer que el fluido es irrotacional e incompresible, permite usar a la velocidad potencial para describir el flujo, la cual debe satisfacer la ecuación de Laplace que se expresa como:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

Como el problema es analizado en dos dimensiones, el segundo término desaparece, así reescribiendo la ecuación (3.1), se tiene:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.2)$$

Otra de las condiciones que son necesarias definir son las condiciones de frontera cinemática y dinámica de la superficie libre del agua, que en su forma lineal, se expresan de la forma siguiente, respectivamente:

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad z = 0 \quad (3.3)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad z = 0 \quad (3.4)$$

donde :

η perfil de la superficie libre.

ϕ potencial velocidad.

El potencial velocidad en términos de H, σ, h y k , para el caso de estudio, queda expresado como:

$$\phi = \frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \quad (3.5)$$

donde:

k número de onda.

H Altura de la ola.

$\sigma = \frac{2\pi}{T}$ frecuencia angular.

T periodo.

z parte del dispositivo que no está en contacto con el agua.

h	tirante de agua en el modelo
t	tiempo.

Para especificar la condición de frontera en el fondo, se asume que no hay flujo, por lo tanto la velocidad potencial es igual a cero, quedando expresada de la forma siguiente:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

,el signo negativo se debe a que el sentido positivo es hacia arriba, ver figura (3.2)

Para definir la condición de frontera lateral, que es la única que cambia, partimos de lo siguiente:

- Si $S(z)$, es el golpe del generador de olas, su desplazamiento horizontal es:

$$x = \frac{S(z)}{2} \sin \sigma t \quad (3.7)$$

La función que describe la superficie del agua debido al movimiento del generador es:

$$F(x, z, t) = x - \frac{S(z)}{2} \sin \sigma t = 0 \quad (3.8)$$

La expresión general para las condiciones de frontera cinemática, para el caso de dos dimensiones se expresa de la forma siguiente:

$$u \cdot n = \frac{-\partial F / \partial t}{|\nabla F|} \quad (3.9)$$

donde:

$$|\nabla F| = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \mathbf{z}$$

$$u = ui + wk \quad \text{vector de velocidades.}$$

$$n = \frac{\nabla F}{|\nabla F|} \quad \text{vector normal a la superficie.}$$

Sustituyendo la ecuación 3.8 en 3.9 y operando se obtiene:

$$u - \frac{w}{2} \frac{dS(z)}{dz} \sin \sigma t = \frac{S(z)}{2} \sigma \cos \sigma t \quad F(x, z, t) = 0 \quad (3.10)$$

Considerando pequeños desplazamientos, $S(z)$, y pequeñas velocidades, se puede linealizar la ecuación anterior. Este proceso se realiza mediante el método de la serie de Taylor truncada, de esta forma se tiene:

$$\left[u - \frac{S(z)}{2} \sigma \cos \sigma t \right]_{x=[S(z)/2] \sin \sigma t} = \left[u - \frac{S(z)}{2} \sigma \cos \sigma t \right]_{x=0} + \frac{S(z)}{2} \sin \sigma t \frac{\partial}{\partial x} \left[u - \frac{S(z)}{2} \sigma \cos \sigma t \right]_{x=0} + \dots$$

Aplicado el método, se observa que el primer término de la expansión es lineal, y es el que se toma para determinar la condición de frontera lateral, los restantes se desprecian. Así despejando u del primer término obtenemos:

$$u(0, z, t) = \frac{S(z)}{2} \sigma \cos \sigma t \quad (3.11)$$

La expresión (3.11), describe la condición de frontera lateral. Una vez definidas todas las condiciones de frontera. Sustituyendo en (3.4), el potencial de velocidad (3.5) y el perfil de la superficie del agua, η , este último se expresa de la forma siguiente:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx \cos \sigma t \quad (3.12)$$

Sustituyendo en (3.4) y operando se obtiene:

$$-\frac{Hg k \sinh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \Big|_{z=0} = -\frac{H}{2} \sigma \cos kx \sin \sigma t, \quad \left(\frac{d \cos x}{dx} = -\sin x dx \right)$$

Simplificando y agrupando términos semejantes, finalmente se llega a la ecuación de dispersión, que indica si se está en aguas someras, intermedias o profundas, expresada para ondas progresivas y estacionarias, de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= gk_p \tan k_p h && \text{(ondas progresivas)} \\ \sigma^2 &= -gk_s \tan k_s h && \text{(ondas estacionarias)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Una vez definido las condiciones de frontera, procedemos a resolver el problema de valor en la frontera, que en términos matemáticos se muestran en la figura 3.3, y para éste caso de estudio queda expresado como:

$$\phi(x, z, t) = A_p \cosh k_p (h+z) \sin(k_p x - \sigma t) + (A x + B) + C_m e^{-k_s x} \cos k_s (h+z) \cos \sigma t \quad (3.14)$$

donde:

$k_p = \frac{2\pi}{L}$ número de onda progresiva.

$k_s = \frac{2\pi}{L}$ número de ondas estacionaria.

h tirante de agua.

$\sigma = \frac{2\pi}{T}$ frecuencia angular.

T periodo.

t tiempo.

z indica la parte del dispositivo que no está en contacto con el agua.

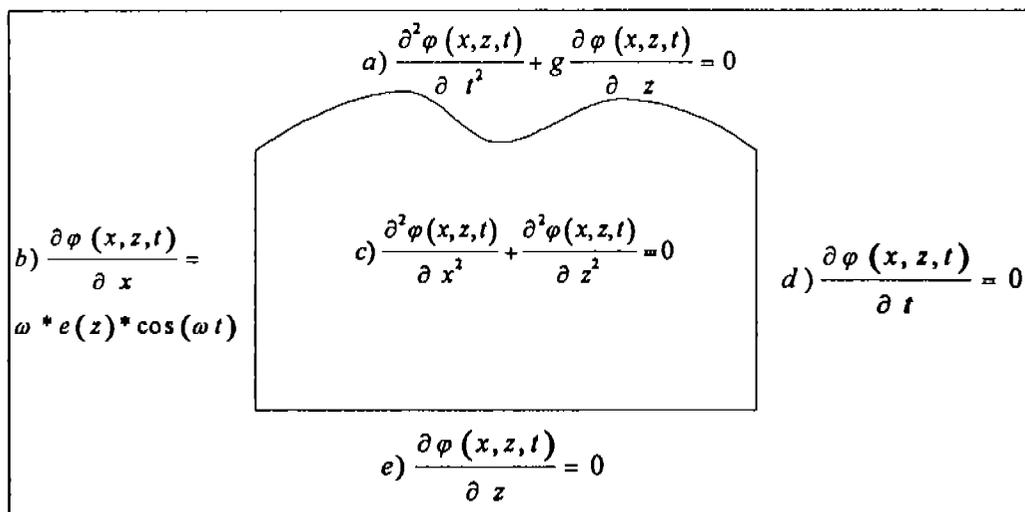


Fig.3.3. Problema de valor en la frontera expresado en términos matemáticos, a) condiciones cinemáticas, todas las partículas del agua de la superficie permanecen en ella y dinámicas en la superficie, la presión es constante en la superficie., b) desplazamiento del agua debido al movimiento de la pala., c) ecuación de Laplace. d) la propagación de la onda es de forma constante, y e) el fondo es impermeable.

Para el problema del generador de oleaje, los términos A y B son nulos, reescribiendo la ecuación (3.14), el problema de valor en la frontera queda definido como:

$$\phi(x, z, t) = A_p \cosh k_p (h + z) \sin(k_p - \sigma t) + C_m e^{-k_p x} \cos k_s (h + z) \cos \sigma t \quad (3.15)$$

Para resolver el problema, falta definir los términos A_p y C_m , los cuales son determinados a partir de la condición de frontera lateral, quedando expresados como sigue:

$$A_p = \frac{-\int_h^0 \frac{S(z)}{2} \sigma \cosh k_p(n)(h+z) dz}{k_p(n) \int_h^0 \cosh^2 k_p(h+z) dz}$$

$$C_m = \frac{-\int_h^0 \frac{S(z)}{2} \sigma \cosh [k_s(m)(h+z)] dz}{k_s(m) \int_h^0 \cos^2 [k_s(m)(h+z)] dz} \quad (3.16)$$

donde m y n son enteros y denotan cada solución en particular.

Dependiendo de la forma funcional de S(z), son definidos, así para el caso de un movimiento debido a una paleta, se define de la forma siguiente:

$$S(z) = S \quad (3.17)$$

Para el problema que se estudia únicamente interesa el caso de la ola progresiva, por lo tanto sustituyendo y operando en la expresión de A_p se obtiene:

$$-\int_h^0 \frac{S}{2} \sigma \cosh k_p(h+z) dz \dots 1$$

$$u = k_p(h+z) \quad du = k_p dz$$

$$-\int_h^0 \frac{S}{2} \sigma \cosh k_p(h+z) dz \quad (3.18)$$

$$= \frac{-S\sigma}{2k_p} \int_h^0 \cosh k_p(h+z) dz$$

$$= \frac{-S\sigma}{2k_p} \operatorname{senh} k_p(h+z) \Big|_{-h}^0$$

$$= \frac{-S\sigma}{2k_p} \operatorname{senh} k_p h \dots 2 \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
 & k_p \int_{-h}^0 \cosh^2 k_p (h+z) dz \dots 3 \\
 & u = k_p (h+z) \quad du = k_p dz \\
 & \int_{-h}^0 \cosh^2 k_p (h+z) dz \\
 & = \frac{1}{4} \sinh 2(k_p (h+z)) + \frac{k_p (h+z)}{2} \\
 & = \frac{1}{4} \sinh 2(k_p (h+z)) + \frac{k_p (h+z)}{2} \Big|_{-h}^0
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$= \frac{1}{4} \sinh 2k_p h + \frac{k_p h}{2} \tag{3.21}$$

$$A_p = \frac{-2S\sigma \sinh k_p h}{k_p (\sinh 2(k_p h) + 2k_p h)} \tag{3.22}$$

Sustituyendo (3.15) en (3.3), operando y considerando solamente la parte correspondiente a la ola progresiva se tiene:

$$\eta = -\frac{A_p}{g} \sigma \cosh k_p h \cos(k_p x - \sigma t) \tag{3.23}$$

Sustituyendo (3.22) en (3.23), operando y simplificando se tiene:

$$\sigma^2 = g k_p \tanh k_p h = g k_p \left(\frac{\sinh k_p h}{\cosh k_p h} \right) \tag{3.24}$$

$$\eta = \frac{2S \sinh^2 k_p h M}{\sinh 2k_p h + 2k_p h} \tag{3.25}$$

Para ondas progresivas y para $x \gg h$ se cumple:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(k_p x - \sigma t) \tag{3.26}$$

Igualando (3.25) y (3.26) se tiene:

$$\frac{2S \operatorname{senh}^2 k_p h \cos(k_p x - \sigma t)}{\operatorname{senh} 2k_p h + 2k_p h} = \frac{H}{2} \cos(k_p x - \sigma t) \quad (3.27)$$

La relación entre la altura de ola y el desplazamiento de la paleta, que se expresa como sigue:

En la figura (3.3) se muestra un dispositivo generador de oleaje, mediante una paleta.

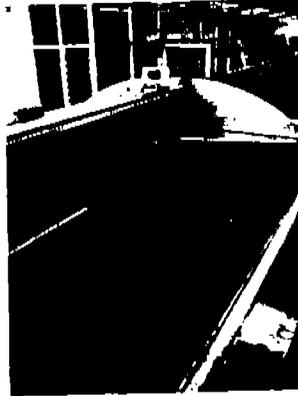


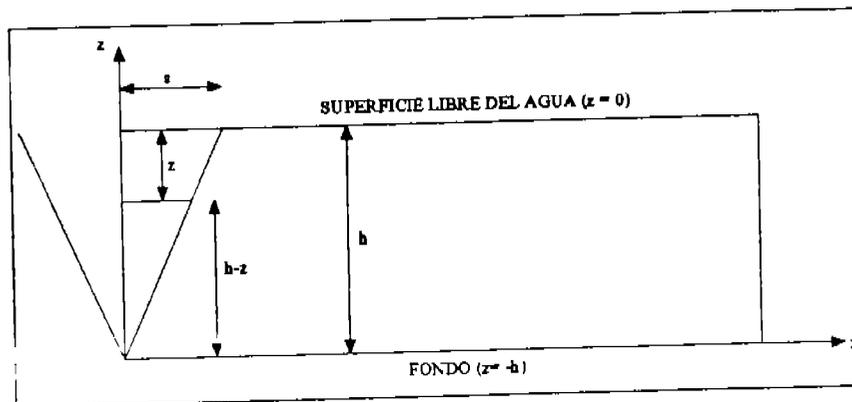
Fig.3.3.- Generador de oleaje mediante una paleta (Instituto de Ingeniería, UNAM)

3.1.3 Teoría de generación de ondas producidas por un agitador (Flap) abisagrado al fondo

Para obtener la relación entre la altura de ola el desplazamiento del flap, se parte de las mismas hipótesis que para un generador de paleta, siguiendo un procedimiento semejante, se deduce la relación entre la altura de ola generada y el desplazamiento S , la cual se describe a continuación.

Para este tipo de dispositivo $S(Z)$, se define de la forma siguiente:

- Sea el triángulo formado por s , h y z , como se muestra en la figura siguiente:



Por triángulos semejantes se tiene:

$$\frac{s}{x} = \frac{h}{h-z} \quad x = \frac{s(h-z)}{h} \quad (3.28)$$

Por el sistema de referencia indicado $h = -h$, rescribiendo (3.28), se tiene:

$$x = \frac{S(-h-z)}{-h} \quad x = S\left(1 + \frac{z}{h}\right) \quad (3.29)$$

Por lo tanto $S(z)$, se define para una profundidad cualquiera de la forma siguiente:

$$S(z) = S\left(1 + \frac{z}{h}\right) \quad (3.30)$$

Como el problema en estudio es el de una onda progresiva, sustituimos (3.30) en A_p , por lo tanto se tiene:

$$A_p = \frac{-\int_{-h}^0 \frac{S\left(1 + \frac{z}{h}\right)}{2} \sigma \cosh k_p(h+z) dz}{k_p \int_{-h}^0 \cosh^2 k_p(h+z) dz} \quad (3.31)$$

Desarrollando y operando (3.31) se tiene:

$$\begin{aligned} & -\int_{-h}^0 \frac{S\left(\frac{h+z}{h}\right)}{2} \sigma \cosh k_p(h+z) dz \\ &= -\int_{-h}^0 S\left(\frac{h+z}{2h}\right) \sigma \cosh k_p(h+z) dz \quad (3.32) \end{aligned}$$

$$= -\frac{S\sigma}{2h} \int_{-h}^0 (h+z) \cosh k_p(h+z) dz$$

$$h \int_{-h}^0 \cosh k_p(h+z) dz \quad (3.33)$$

$$\int_{-h}^0 z \cosh k_p(h+z) dz \quad (3.34)$$

Desarrollando (3.33) se tiene:

$$\begin{aligned}
 & h \int_{-h}^0 \cosh k_p (h+z) dz \\
 & u = k_p (h+z) \quad du = k_p dz \\
 & \frac{h}{k_p} \int_{-h}^0 \cosh k_p (h+z) dz \\
 & = \frac{h}{k_p} \operatorname{senh} k_p (h+z) \Big|_{-h}^0 \quad (3.35)
 \end{aligned}$$

Desarrollando (3.34) se tiene:

$$\begin{aligned}
 & \int_{-h}^0 z \cosh k_p (h+z) dz \\
 & u = z \quad dv = \cosh k_p (h+z) dz \\
 & du = dz \quad v = \frac{1}{k_p} \operatorname{senh} k_p (h+z) \\
 & \frac{z}{k_p} \operatorname{senh} k_p (h+z) \Big|_{-h}^0 - \frac{1}{k_p} \int_{-h}^0 \operatorname{senh} k_p (h+z) dz \quad (3.36)
 \end{aligned}$$

Desarrollando la integral de (3.36) se tiene:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{k_p} \int_{-h}^0 \operatorname{senh} k_p (h+z) dz \\
 & u = k_p (h+z) \quad du = k_p dz \\
 & -\frac{1}{k_p^2} \cosh k_p (h+z) \Big|_{-h}^0 \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

Finalmente la ecuación (3.18) queda:

$$-\frac{S\sigma}{2h} \left[\frac{h}{k_p} \operatorname{senh} k_p (h+z) + \frac{z}{k_p} \operatorname{senh} k_p (h+z) - \frac{1}{k_p^2} \cosh k_p (h+z) \right]_{-h}^0 \quad (3.38)$$

$$k_p \int_{-h}^0 \cosh^2 k_p (h+z) dz$$

$$u = k_p (h+z) \quad du = k_p dz$$

$$= \frac{1}{4} \sinh 2k_p (h+z) + \frac{k_p (h+z)}{2} \Big|_{-h}^0 \quad (3.39)$$

Evaluando (3.38) y (3.39) se obtiene:

$$-\frac{S\sigma}{2h} \left[\left(\frac{h}{k_p} \sinh k_p h \right) - \frac{1}{k_p^2} \cosh k_p h + \frac{1}{k_p^2} \right] \quad (3.40)$$

$$\frac{1}{4} \sinh k_p h + \frac{k_p h}{2} \quad (3.41)$$

Dividiendo (3.40) entre (3.41) se tiene:

$$\frac{-\frac{S\sigma}{2h} \left[\frac{k_p h \sinh k_p h - \cosh k_p h + 1}{k_p^2} \right]}{\frac{\sinh k_p h + 2k_p h}{4}} = \frac{-2S\sigma (k_p h \sinh k_p h - \cosh k_p h + 1)}{k_p^2 h (\sinh k_p h + 2k_p h)} \quad (3.42)$$

Sustituyendo en (3.3) y operando se tiene:

$$\frac{2S\sigma^2 \left[(k_p h \sinh k_p h - \cosh k_p h + 1) \cosh k_p h \cos(k_p x - \sigma t) \right]}{gk_p^2 h [\sinh k_p h + 2k_p h]} \quad (3.43)$$

$$\sigma^2 = gk_p \tanh k_p h, \quad \tanh k_p h = \frac{\sinh k_p h}{\cosh k_p h} \quad (3.44)$$

Sustituyendo las expresiones de (3.44) en (3.43), operando y simplificando se tiene:

$$\frac{2S \sinh k_p h \left[(k_p h \sinh k_p h - \cosh k_p h + 1) \cos(k_p x - \sigma t) \right]}{k_p [\sinh k_p h + 2k_p h]} \quad (3.45)$$

Igualando (3.45) con (3.26) obtenemos:

$$\frac{2S \operatorname{senh} k_p h \left[(k_p h \operatorname{senh} k_p h - \cosh k_p h + 1) \cos(k_p x - \sigma t) \right]}{k_p \left[\operatorname{senh} k_p h + 2k_p h \right]} = \frac{H}{2} \cos(k_p x - \sigma t) \quad (3.46)$$

Simplificando y operando se obtiene finalmente la relación entre el desplazamiento y la altura de ola para un flap, quedando expresa de la forma siguiente:

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \operatorname{senh} k_p h (k_p h \operatorname{senh} k_p h - \cosh k_p h + 1)}{k_p (\operatorname{senh} k_p h + 2k_p h)} \quad (3.47)$$

En la figura siguiente se muestra un generador de este tipo.

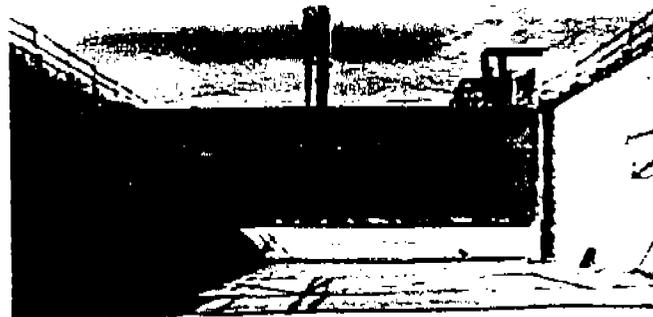


Fig.3.4.- Generador de oleaje tipo flap.

3.2 Funciones de transferencia

En la naturaleza existen diversos sistemas que se encuentran relacionados entre sí, y lo que repercute en uno a corto o largo plazo afecta a los demás. De manera semejante al reproducir un fenómeno físico o para la validación de modelos numéricos en laboratorio, se emplean diversos dispositivos, mecánicos, acústicos, electrónicos, ópticos, entre otros, formando sistemas sujetos a una señal de entrada o excitación que produce una salida. De esta forma para la generación de oleaje de forma artificial en laboratorio, se usan diversos tipos de generadores que son controlados mediante actuadores, dispositivos que controlan el movimiento de estos y en conjunto forman el mecanismo generador de oleaje.

Los tipos de actuadores empleados, por lo general son cilindros hidráulicos, motores hidráulicos y eléctricos tipo AC, DC y de paso, cada uno con sus ventajas y desventajas. Así en costos de mantenimiento los sistemas eléctricos son más baratos que los sistemas hidráulicos y a lo referente a la operación los sistemas que utilizan motores eléctricos presentan problemas con la realización movimientos lentos (periodos largos).



Fig.3.5.- Generador a base de un motor eléctrico

Análogamente, a cuando se mide alguna característica física de un medio, empleando un dispositivo, fue necesario desarrollar una función que relacionará la variable que se desea medir con las características eléctricas, mecánicas o de otro tipo del dispositivo empleado y así poder programarla. Para poder reproducir un oleaje con determinadas características mediante el uso de generadores de oleaje fue necesario el desarrollo de funciones que relacionaran el desplazamiento del generador con la altura de ola. Estas funciones que mediante una excitación, para nuestro caso generalmente es una altura de ola, un periodo y una profundidad de agua, producir una salida, en nuestro caso un tipo de oleaje inducido por el desplazamiento de la paleta, flap u otro dispositivo empleado en la generación de ondas en laboratorio, se denominan *funciones de transferencia*.

Las funciones de transferencia referentes a la generación de oleaje, fueron resueltas para diferentes tipos de generadores de oleaje por Biéssel y Suquet quienes las presentaron en 1951, en un artículo titulado "Les Appareils Generateurs de Houle en Laboratoire", lo que significó un gran paso en las técnicas de generación de ondas y las bases de hoy en día en la generación de oleaje en laboratorios de hidráulica.

Las funciones de transferencia, para un generador tipo pistón y flap, desarrolladas en el subcapítulo anterior y a las cuales llegaron los investigadores citados son:

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \operatorname{senh}^2 k_p h}{\operatorname{sinh} 2 k_p h + 2 k_p h}$$

Función de transferencia para un generador tipo pistón

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \operatorname{senh} k_p h (k_p h \operatorname{senh} k_p h - \cosh k_p h + 1)}{k_p (\operatorname{senh} k_p h + 2 k_p h)}$$

Función de transferencia para un generador tipo flap abisagrado en el fondo

Las funciones mencionadas no consideran parámetros de diseño, como la fricción en los actuadores, la ejercida entre las paredes del canal y el dispositivo, peso del material empleado, entre otros de importancia, por lo que se ven modificadas al momento de su programación. En la figura 3.5 se muestra un diagrama de flujo para la generación de oleaje en laboratorio.

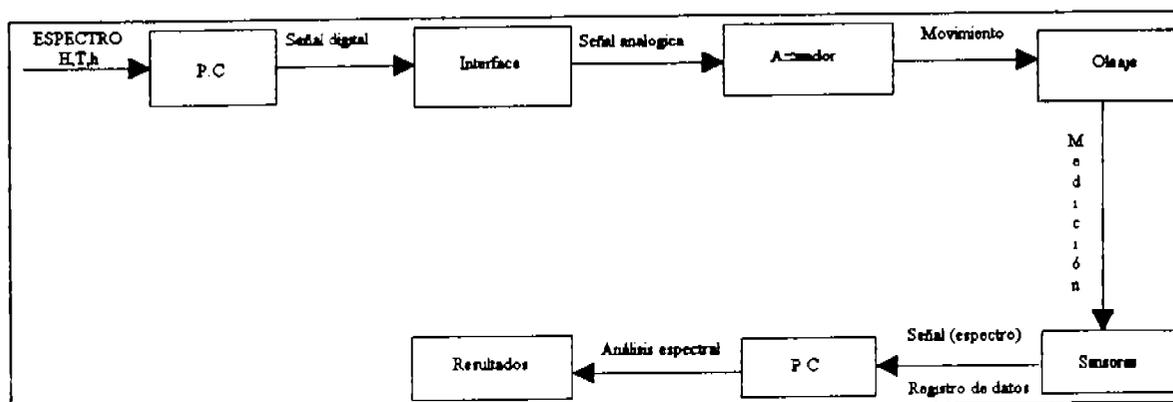


Fig. 3.5.-Proceso de generación de oleaje en laboratorio

3.3 Absorción dinámica de las ondas

Al propagarse el oleaje hacia la costa siempre se presenta el fenómeno de la reflexión, debido a un cambio significativo en la batimetría de la playa y debido a la presencia de estructuras de protección costera. Este proceso es de gran importancia, tanto para el diseño de estructuras y por que está relacionado con otros procesos como la rotura, generación de corrientes y transporte de sedimentos.

Por otra parte en los laboratorios de hidráulica marítima, cuando se realizan ensayos para el estudio del oleaje, es necesario simular lo más apegado posible a la realidad las condiciones de mar abierto, por lo que se debe tomar en cuenta la energía del oleaje que se refleja y re-refleja en la pala generadora y paredes del canal. Por las razones mencionadas es necesario contar con un eficiente sistema de disipación de energía en los canales de oleaje, siendo lo más común el uso de playas artificiales de pendiente constante.

Dichas playas son construidas de diversos materiales permeables, por ejemplo, de arena, grava, roca o combinación de estos, ver figura 3.6. Las pendientes de las playas deben de ser suaves para una eficiente absorción de la energía.



Fig.3.6.- Playa para la disipación de energía a base costales llenos de grava y roca en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Otro tipo de taludes que son empleados para este fin son los de pendiente variable, cuyo uso reduce la longitud de la playa y las de pendiente parabólica formadas con un material menos rugoso y materiales porosos. Otro concepto que es considerado en los laboratorios es la absorción de ondas progresivas, para lo cual existen diversos métodos, como por ejemplo, mediante la construcción de múltiples filas de láminas colocadas verticalmente de diferente porosidad con el mismo espacio entre una y otra, las cuales son fijadas a un armazón.

Otra de las formas utilizadas para absorber la energía del oleaje y minimizar el efecto de la reflexión en laboratorio, es mediante el movimiento del dispositivo empleado en la generación de oleaje.

Esta metodología fue presentada y desarrollada por Milgram en 1970. Así al presentarse el problema de la reflexión el dispositivo generador realiza un movimiento hacia delante y hacia atrás formando una cresta que afecta la sobre elevación debida a la onda reflejada, haciendo esto parecer que las ondas han pasado por un punto más bajo, logrando con ello disipar parte de la energía de la onda reflejada.

El procedimiento para detectar y absorber la onda reflejada cuando simultáneamente se está generando oleaje, es midiendo la elevación de la superficie mediante un sensor colocado en la parte frontal de la paleta, ver figura 3.7

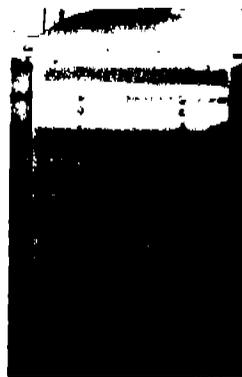


Fig.3.7.- Sensores en la parte frontal de la paleta, utilizados por el sistema de absorción, canal de oleaje, I.I. UNAM.

Así la señal de la onda reflejada es determinada como la diferencia entre la señal medida de la elevación de la superficie y la señal de la elevación de la superficie generada por el dispositivo, la cual es conocida, ya que es un dato que es ingresado para la generación de oleaje.

Para estimar que tan eficiente, de los posibles usados para la disipación de energía, se utiliza como parámetro de referencia el coeficiente de reflexión, que se define como:

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (3.48)$$

donde:

H_r altura de onda reflejada

H_i altura de onda incidente

C_r coeficiente de reflexión

Existen varios métodos para separar la onda incidente y reflejada en experimentos realizados en laboratorio en los que se simula el oleaje, los cuales se abordaran en el siguiente capítulo.

4. Estimación de la reflexión

Se ha indicado la importancia que tiene el conocimiento de las características de la reflexión, tanto en el diseño de estructuras para conocer, entre otros parámetros, su capacidad disipativa, lo cual se determina al evaluar la componente del oleaje, es decir, la parte reflejada, incidente, transmitida y disipada por la estructura. Así mismo la influencia que tiene este fenómeno en la realización de ensayos, surgiendo con ello la necesidad de la separación de la ola incidente, ola generada por la pala, y la reflejada de los registros medidos en laboratorio.

4.1 Separación de las ondas incidente y reflejada

Existen diferentes métodos empleados para la separación de la onda incidente y reflejada en ensayos realizados en laboratorio. Estos se dividen en dos importantes grupos, lo cual obedece al número de puntos de medición que se consideren para precisar el nivel de la superficie libre, los que contemplan dos registros temporales de la superficie libre (métodos en dos dimensiones) y los que consideran tres o más series de oleaje (métodos en tres dimensiones). Otra clasificación se basa en el tipo de oleaje para el que fueron desarrollados, en unidireccionales (normal a la estructura) o multidireccionales. Todas las técnicas de separación trabajan en el dominio de la frecuencia y asumen válida la teoría lineal de ondas, la cual fue 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 unidireccionales 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.

En tanto en los multidireccionales, la propagación y reflexión de las ondas, se da en diferentes direcciones y con diferentes características, es decir presentan un comportamiento totalmente aleatorio.

Los métodos de mayor uso para la separación de la onda incidente y reflejada en dos dimensiones se encuentra el propuesto por Mansard y Funke y el de Goda y Suzuki, existiendo otros, como los desarrollados por Zelt y Skjelbreia (1992), Frigaard y Brorsen (1993).

4.2 Método de Mansard

Este método, presentado y desarrollado por Mansard & Funke en 1980, tienen como base los trabajos realizados por Marcou (1969). 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 el desarrollo de este método son las siguientes:

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

4.2.1 Descripción del método

Partiendo de las hipótesis mencionadas y admitiendo que la superficie de agua en un campo de ondas en dos dimensiones, que puede ser representada como la superposición de N ondas con diferentes características.

Con lo cuál el perfil de la superficie libre del agua puede expresarse en la forma siguiente:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n) \quad (4.1)$$

donde:

- η perfil de la superficie libre del agua.
- x indica la posición del dispositivo de medición.
- t es el tiempo.
- a_n es la amplitud.
- k_n número de onda.
- σ_n frecuencia angular de la onda.
- Φ_n es la fase.

Al presentarse el problema de la reflexión, dicho perfil se ve afectado. De esta 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 (4.1) se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{I,n}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{R,n}) \quad (4.2)$$

donde:

- I onda incidente.
- R onda reflejada.

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 este error de medición, además de introducir una función de error que toma en cuenta otros tipos de errores no considerados, como los ruidos y los aspectos no lineales en los sensores, efectos no lineales de propagación del oleaje y los efectos viscosos, por lo tanto reescribiendo la ecuación (4.2), se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n + \theta_s) + \Omega(t) \quad (4.3)$$

donde:

θ_s fase introducida para tomar en cuenta el error de medición.

$\Omega(t)$ función de error.

Haciendo:

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

$\Delta x = X_{i+1} - X_i$ distancia existente entre el primer indicador y n-indicador, $n = 1, 2$.

P se refiere al sensor.

Se tiene:

$$\eta_p = \sum_{n=1}^N a_I \cos(k(x_1 + \Delta x) - \sigma t + \Phi) + a_R \cos(k(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + \sigma t + \Phi + \theta_s) + \Omega_p(t) \quad (4.4)$$

El objetivo es minimizar la función de error (la fase), $\Omega(t)$, para ello es necesario aplicar la transformada de Fourier a la ecuación (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 obtenemos:

$$A_p + iB_p = a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} + a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} + Y_p e^{(i\rho_p)} \quad (4.5)$$

Haciendo:

$$\begin{aligned} Z_I &= a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} \\ Z_R &= a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} \\ Z_{N,p} &= Y_p e^{(i\rho_p)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

donde:

Z_I representa la proporción de η_p asociado a la ola progresiva.

Z_R representa la proporción de η_R asociado a la ola reflejada.

$Z_{N,p}$ representa la función de error.

A_p y B_p son los coeficientes de Fourier.

Reescribiendo (4.5) en términos de la expresión (4.6), obtenemos:

$$A_p + iB_p = Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - Z_{N,p} \quad (4.7)$$

Desarrollando la expresión (4.7) para cada uno de los sensores, se tiene:

$$A_1 + iB_1 = Z_I + Z_R + Z_{N,1}, \text{ para el primer sensor.}$$

$$A_2 + iB_2 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,2})} + Z_{N,2}, \text{ para el segundo sensor.}$$

$$A_3 + iB_3 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,3})} + Z_{N,3}, \text{ para el tercer sensor.}$$

De las expresiones anteriores despejamos la función de error, la cual queremos minimizar, por lo tanto se tiene para cada sensor:

$$\text{Haciendo } \varepsilon_i = Z_{N,p}, \quad \forall N, p, i = 1, 2, 3.$$

$$\varepsilon_1 = Z_I + Z_R - (A_1 + iB_1) \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_2 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,2})} - (A_2 + iB_2) \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_3 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,3})} - (A_3 + iB_3) \quad (4.10)$$

donde:

$$\varepsilon_p = -Z_{N,p} + f_e(Z_I, Z_R) \quad (4.11)$$

El objetivo del método es minimizar la ecuación de error, $\Omega(t)$, que toma valores no negativos, por lo que tiene sentido matemático y físico buscar un punto Z_I y Z_R , tal que la función (4.10) es lo más pequeña posible, en otras palabras que minimicen dicha función.

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

$$\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_p)^2 = \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right)^2 \quad (4.12)$$

Este mínimo debe verificar:

$$\frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_I} = \frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_R} \quad (4.13)$$

Desarrollando ecuación (4.13) obtenemos:

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(ikx_{1,p})} = 0 \quad (4.14)$$

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(-ikx_{1,p})} = 0 \quad (4.15)$$

Desarrollando e incluyendo el subíndice n en las ecuaciones (4.12) y (4.13) se obtiene:

$$\begin{aligned} & Z_{I,n} \left(1 + \exp(i2k_n x_{1,2}) + \exp(i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{R,n} = \\ & (A_{1,n} + iB_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(ik_n x_{1,3}) \\ \\ & Z_{R,n} \left(1 + \exp(-i2k_n x_{1,2}) + \exp(-i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{I,n} = \\ & (A_{1,n} + iB_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(-ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(-ik_n x_{1,3}) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Desarrollando (4.16) y despejando $Z_{I,n}$ y $Z_{R,n}$, obtenemos:

$$\begin{aligned} Z_{I,n} = \frac{1}{D_n} & [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} + iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} + iQ_{2,n}) + \\ & (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} + iQ_{3,n})] \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} Z_{R,n} = \frac{1}{D_n} & [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} - iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} - iQ_{2,n}) + \\ & (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} - iQ_{3,n})] \end{aligned} \quad (4.18)$$

donde:

$$D_n = 2(\sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3}) + \sin^2((k_n x_{1,3}) - (k_n x_{1,2})))$$

$$R_{1,n} = \sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3})$$

$$Q_{1,n} = \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,2}) + \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3})$$

$$R_{2,n} = \sin(k_n x_{1,3}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2})$$

$$Q_{2,n} = \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,2})$$

$$R_{3,n} = -\sin(k_n x_{1,2}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2})$$

$$Q_{3,n} = \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,3})$$

Sin embargo el método presenta limitaciones de aplicación, que se deben a la pérdida de coherencia entre señales y para ciertas frecuencias, que ocurre cuando D_n es igual a cero y tiene la ventaja de que minimiza el error que se tiene al registrar la elevación de la superficie del agua.

4.3 Método de Goda

Este método fue presentado por Goda y Suzuki en 1976, y es el más simple de todos los métodos desarrollado para oleaje unidireccional. A diferencia del método anterior, este utiliza dos puntos de medición e introduce el concepto de la transformada rápida de Fourier para la separación de cada onda de los registros.

Las hipótesis que se plantea este método son las siguientes:

- Se tiene fondo horizontal.
- Admite la validez de la teoría lineal.
- El oleaje puede expresarse como la suma de diferentes ondas lineales (análisis espectral).

4.3.1 Descripción del método

Con base a las hipótesis citadas, el perfil del agua puede ser representado por la ecuación (4.1). Dicho perfil al presentarse el fenómeno de la reflexión queda constituido por la componente incidente y reflejada, por lo tanto al considerar estos efectos en la ecuación (4.1) se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^{N/2} a_{i,n} \cos(k_n x - \sigma_n t) + b_{i,n} \sin(k_n x - \sigma_n t) + \sum_{n=1}^{N/2} a_{r,n} \cos(k_n x - \sigma_n t) + b_{r,n} \sin(k_n x - \sigma_n t) \quad (4.19)$$

donde:

- I, r denotan la onda incidente y reflejada, respectivamente.
- N número de ondas que componen el registro.
- σ_n denota la frecuencia angular de la ondas.
- t tiempo.
- K_n número de onda.
- $a_{i,n}, a_{r,n}, b_{i,n}, b_{r,n}$ son coeficientes desconocidos para los trenes de onda.

Expresando (4.19) en su forma de componente de Fourier se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^{N/2} \{ [a_{i,n} + a_{r,n}] \cos(k_n x) + [b_{i,n} + b_{r,n}] \sin(k_n x) \} \cos \sigma_n t + \{ [b_{i,n} - b_{r,n}] \cos(k_n x) + [a_{i,n} - a_{r,n}] \sin(k_n x) \} \sin \sigma_n t \quad (4.20)$$

Por otro lado, se puede definir las diferentes series temporales medidas en los diferentes puntos, de la forma siguiente:

$$\eta(x_i, t) = \sum_{n=1}^{N/2} [a'_n \cos(\sigma_n t) + b'_n \sin(\sigma_n t)] \text{ para } 0 \leq t \leq t_{\max} \quad (4.21)$$

donde:

- a'_{in} y b'_{in} coeficientes de Fourier.

Igualando (4.17) y (4.18) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 a_n' &= [a_{i,n} + a_{r,n}] \cos(k_n x_i) + [b_{i,n} + b_{r,n}] \sin(k_n x_i) \\
 b_n' &= [b_{i,r} + b_{i,n}] \cos(k_n x_i) + [a_{i,n} - a_{r,n}] \sin(k_n x_i)
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

La expresión (4.22) se consideró un solo aparato, al considerar un segundo, j , con $x_i > x_j$ y $j > i$ se obtiene un sistema de ecuaciones, cuya solución para los coeficientes $a_{i,n}$, $a_{r,n}$, $b_{i,n}$, $b_{r,n}$, se obtiene:

$$a_{i,n} = \frac{1}{2 \sin k_n (x_i - x_j)} \left[-a_n' \sin k_n x_j + a_n' \sin k_n x_i + b_n' \cos k_n x_j - b_n' \cos k_n x_i \right]
 \tag{4.23}$$

$$b_{i,n} = \frac{1}{2 \sin k_n (x_i - x_j)} \left[+a_n' \sin k_n x_j - a_n' \cos k_n x_i + b_n' \sin k_n x_j - b_n' \sin k_n x_i \right]
 \tag{4.24}$$

$$a_{r,n} = \frac{1}{2 \sin k_n (x_i - x_j)} \left[-a_n' \sin k_n x_j + a_n' \sin k_n x_i - b_n' \cos k_n x_j + b_n' \cos k_n x_i \right]
 \tag{4.25}$$

$$b_{r,n} = \frac{1}{2 \sin k_n (x_i - x_j)} \left[+a_n' \cos k_n x_j - a_n' \cos k_n x_i - b_n' \sin k_n x_j + b_n' \sin k_n x_i \right]
 \tag{4.26}$$

Una vez evaluados los coeficientes, se aplica la transformada de Fourier a estos con lo que se obtiene las series de tiempo de los oleaje incidente y reflejado, expresión (4.18).

Goda y Suzuki recomiendan que el rango de resolución de frecuencias se limite a:

$$\frac{\pi}{10} \leq k_n \Delta x \leq \frac{9\pi}{10}
 \tag{4.27}$$

De esta forma el umbral del mínimo de solución está limitado por la máxima distancia entre aparatos y para frecuencias por debajo de este límite el método no tiene solución. Así la frecuencia mínima se deduce de la ecuación de dispersión, por lo tanto se tiene:

$$(2\pi f_{\min}) = g k_{\max} \tanh(k_{\max} h)
 \tag{4.28}$$

donde:

$$K_{\max} = \frac{9\pi}{10 \Delta x_{\min}}
 \tag{4.29}$$

De forma semejante la frecuencia máxima se determina a partir de la ecuación de dispersión, de esta forma:

$$(2\pi f_{\max}) = gk_{mim} \tanh(k_{mim}h) \quad (4.30)$$

donde:

$$K_{mim} = \frac{9\pi}{10\Delta x_{\max}} \quad (4.31)$$

En las expresiones anteriores h , es la profundidad, Δx , representa la distancia entre aparatos, k representa el número de ondas.

Finalmente, el coeficiente de reflexión se estima a partir de los correspondientes a los oleajes incidente y reflejado y queda definido como:

$$C_r = \sqrt{\frac{S_{r,n}}{S_{i,n}}} \quad (4.32)$$

donde:

$S_{r,n}$ y $S_{i,n}$ representan los espectros suavizados del oleaje reflejado e incidente.

4.4 Otros métodos

Además de los métodos descritos para la separación de la onda incidente y reflejada de las mediciones realizadas en laboratorio, existen otros en dos dimensiones utilizados con el mismo fin.

Uno de los primeros investigadores en proponer un método que utiliza las series temporales utilizando dos puntos de medición alineados en la dirección de propagación del oleaje fue Kajima en 1969, bajo la hipótesis de fondo horizontal, validación de la teoría lineal y análisis espectral de señales, mismas en las que se basó Goda y Suzuki para el desarrollo de su método, el método fue desarrollado para un oleaje unidireccional.

Posteriormente Thornton y Calhoun , 1972, bajo las mismas hipótesis de Kajima y también a partir de los datos de superficie libre medidos en dos puntos de la línea de propagación del oleaje realizan un análisis espectral para la obtención de las distintas ondas componentes, reflejada e incidente, estudiándolas por separado obtienen las amplitudes de estas ondas a partir de tres parámetros: la altura de ola en cada punto, la diferencia de fase entre dos señales y el método de falla para aquellas frecuencias cuya longitud de onda L , verifica:

$$\frac{\Delta x}{L} = \frac{n}{2} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.33)$$

donde:

Δx separación entre sensores.

Morden, Richey y Christensen, 1976, estudian la separación de la onda incidente y reflejada, a partir de las señales simultáneas de superficie medidas en dos puntos situados en la línea de propagación. Asumen que el proceso de la reflexión no altera la frecuencia y que cada componente es suficientemente larga y paralela a la estructura reflejante, que pasa por los dos sensores, es reflejada por la estructura y vuelve a pasar por los puntos de medida, además no es necesario conocer la distancia de los sensores. Primeramente realizaron un análisis espectral y después aplican a cada componente un método basado en la teoría lineal para obtener las alturas de las olas incidente y reflejada y finalmente estimar el coeficiente de reflexión.

Uno de los métodos desarrollado recientemente, es el propuesto por Zelt y Skjelbreia en 1992, el cual es aplicable a un número "n" de puntos de medición. Este se basa en las mismas hipótesis que los métodos descritos, sin embargo a diferencia de los anteriores introduce una función de peso en cada una de las mediciones realizadas, esto para controlar la posible influencia de singularidades que ocurren por algunas relaciones geométricas entre las distancias y las mediciones en los indicadores.

Nueva mente la elevación de la superficie libre del agua, una vez que se presenta el problema de la reflexión, es considerada como la suma de la onda incidente y reflejada, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned} \eta_p = & \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n(x_1 + x_{1,p}) - \sigma_n t + \Phi_n) \\ & + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n(x_1 + 2x_{R,1} - x_{1,p}) + \sigma_n t + \Phi_n + \theta_s) + \Omega_p(t) \end{aligned} \quad (4.34)$$

Al igual que en el método de Mansard, se busca minimizar la función de error, que en su forma general se expresa:

$$\varepsilon_{p,n} = Z_{I,n} \exp(ik_n x_{1,p}) + Z_{R,n} \exp(-ik_n x_{1,p}) - (A_{p,n} + iB_{p,n}) \quad (4.35)$$

Posteriormente una función de peso es elegida para hacer la suma de los cuadrados de $\varepsilon_{p,n}$, esto es:

$$E_n = \sum_{p=1}^P w_{p,n} \varepsilon_{p,n} \varepsilon_{p,n}^* \quad (4.36)$$

donde:

$w_{p,n} > 0$ denota los coeficientes de la función de peso.

Se asume que el mínimo de (4.36) ocurre cuando las derivadas parciales con respecto a $Z_{l,n}$ y $Z_{R,n}$ son igual a cero, por lo tanto se tiene:

$$\sum_{p=1}^N w_{p,n} \varepsilon_{p,n} \exp(\pm ik_n x_{1,p}) = 0 \quad (4.37)$$

Sustituyendo (4.35) en (4.37) se tiene:

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P w_{p,n} Z_{l,n} \exp(i2k_n x_{1,p}) + \sum_{p=1}^P w_{p,n} Z_{R,n} \\ &= \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(ik_n x_{1,p}) \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P w_{p,n} Z_{l,n} + \sum_{p=1}^P w_{p,n} Z_{R,n} \exp(-i2k_n x_{1,p}) \\ &= \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(-ik_n x_{1,p}) \end{aligned} \quad (4.39)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior con respecto a $Z_{l,n}$ y $Z_{R,n}$ eliminando a_l y $a_{R,n}$ se obtiene :

$$\begin{aligned} Z_{l,n} &= \frac{1}{D_n} \left(S_n \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(-ik_n x_{1,p}) \right) \\ & - \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(ik_n x_{1,p}) \sum_{q=1}^P w_{q,n} \exp(-i2k_n x_{1,q}) \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned}
 Z_{R,n} = \frac{1}{D_n} & \left(S_n \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(ik_n x_{1,p}) \right) \\
 & - \sum_{p=1}^P w_{p,n} (A_{p,n} + iB_{p,n}) \exp(-ik_n x_{1,p}) \sum_{q=1}^P W_{q,n} \exp(i2k_n x_{1,q})
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

donde:

$$D_n = S_n^2 - \sum_{p=1}^P W_{p,n} \exp(i2k_n x_{1,p}) \sum_{q=1}^P w_{q,n} \exp(-i2k_n x_{1,q})$$

$$S_n = \sum_{p=1}^P w_{p,n}$$

5. Validación experimental

Al plantear y desarrollar una teoría para explicar algún fenómeno, los modelos resultantes, que pueden ser clasificados en físicos, matemáticos, gráficos o semánticos, deben ser corroborados, ya sea con datos que se tengan referente al caso bajo investigación o bien mediante la realización de experimentos en laboratorio, para posteriormente realizar la calibración de este.

A lo referente a los laboratorios de investigación marítima, estos se puede clasificar de diferentes formas, se pueden dividir, atendiendo el fenómeno simulado, en generadores de oleaje y en generadores de corriente, una segunda clasificación obedece al tipo de oleaje generado, clasificándose en canales de generación de oleaje bidimensional, en el cual se generan ondas que se propagan en una sola dirección y en multi-direccionales o en tres dimensiones y una tercera clasificación se debe a las dimensiones donde se simula el fenómeno, en tanques, éstos son generalmente construidos para la simulación de oleaje tridimensional y corrientes y en canales, los cuales son utilizados para la generación de oleaje en dos dimensiones.

Los modelos empleados en investigación marítima se clasifican en dos grandes grupos, en modelos de demostración donde generalmente este tipo de modelos son empleados para la explicación de conceptos, y modelos ingenieriles que son empleados en la colección de datos útiles para el diseño, que a su vez se dividen en modelos a escala y en modelos de medición.

5.1 Descripción del laboratorio

El laboratorio de ingeniería marítima, del Instituto de Ingeniería, UNAM, recientemente construido, pertenece al grupo de generadores de oleaje bidimensional, ocupa una superficie de 290 m^2 , de la cual 28.8 m^2 son ocupados por el canal de oleaje, 25.30 m^2 es ocupado por un depósito de agua utilizada, para llenar dicho canal, con una capacidad de 25.30 m^3 (25300 lts.) aproximadamente. Además de una cabina de donde se controla la generación de oleaje y recolección de datos.



Fig. 5.1.- Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería, UNAM.

5.1.1. Características del Canal de oleaje

- **Dimensiones:**
 - a) Longitud: 37 m.
 - b) Ancho: 0.80m.
 - c) Altura: 1.20m
- **Materiales de construcción:**
 - a) Fondo: lámina de acero inoxidable.
 - b) Pared frontal: es de vidrio templado de 2 cm de espesor, lo que permite una completa visualización del fenómeno.
 - c) Pared opuesta: es de lámina de acero inoxidable, excepto una parte que es de vidrio cerca de la parte final del canal.
 - d) Sistema de absorción: el generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción dinámica, único en su tipo en Latino América, además de una playa artificial de geometría parabólica.
 - e) Soporte: el canal es soportado por una estructura de acero, a una altura de 0.80m sobre el nivel del piso.

5.1.2. Especificaciones del generador de oleaje

- Tipo: Pistón horizontal.
- Actuador: motor eléctrico de A.C.
- Desplazamiento total de la pala: 0.85m.
- Velocidad máxima de la pala: 0.81 m/s.
- Fuerza máxima de la pala: 3.5 KN.
- Tipo de oleaje generado: regular e irregular.
- Altura máxima de agua: 0.70-0.75 m.
- Altura máxima de ola: 0.35-0.40 m, lo cual obedece a la limitante que se tiene por el tirante máximo de agua de capacidad y la propia geometría del canal.

5.1.3. Equipo de medición

- Sensores de nivel: 12.
- Sensores de presión: 8.
- Micromolinetes: 4 con sus respectivas interfaces.
- Velocímetro Acústico Doppler (ADV):1.
- Equipo de cómputo: se cuenta con dos equipos de computo, para la generación de la señal (oleaje) y adquisición de datos.

5.2 Mediciones y análisis experimentales

Para saber que tan eficiente es un sistema para realizar una determinada función, es necesaria la realización de una serie de ensayos bajo diferentes condiciones de operación y con ello poder comparar los resultados con datos existentes de experimentos similares o teóricos y dictaminar confiablemente sobre las características de operación del sistema analizado.

Uno de los objetivos planteados al inicio del presente trabajo es la determinación de la eficiencia de los sistemas de absorción empleado en el canal de generación de oleaje, el cual está constituido por a) el sistema de absorción dinámica y b) playa disipadora. En este capítulo se describirá la metodología seguida para tal fin.

5.2.1 Descripción del experimento

Para la determinación de la eficiencia de los sistemas de absorción citados se llevarán acabo los siguientes en sayo mediante la acción de un oleaje regular, con y sin el uso del sistema de absorción.

Para cuantificar la eficiencia del sistema de absorción dinámica se colocará a una distancia de dos veces la longitud $2L$, del oleaje que se pretende generar, (ya que es una condición necesaria del propio dispositivo para estar en el rango de validez de la teoría lineal), un dique de madera de una longitud de 2.86 m , al cual se le variará la pendiente. De manera semejante se procederá para la estimación de la eficiencia de la playa de geometría parabólica, la cual se diseñó como perfil de Dean para absorber la energía del oleaje incidente.

Otro de los parámetros a determinar es el tipo de rotura que se presenta tanto en la playa como en dique para los diferentes periodos, pendientes y profundidades propuestas. Para la determinación del tipo de rotura que se presenta se emplea como un indicador al número de Iribarren.

5.2.2 Hipótesis

- Para la realización de los en sayos se considera al talud del dique como liso y por consiguiente la fricción es despreciable, lo cual es valido por las alturas que se generarán y tamaño del modelo utilizado.
- Las ondas generadas están dentro del rango de validez de la teoría lineal.

- La separación entre los sensores está dentro del intervalo que los métodos a utilizar sugieren para tener lecturas aceptables.
- Los datos por onda son los suficientes para definir completamente a ésta.
- Se cumple con las hipótesis planteadas para cada uno de los métodos empleados para la separación de la onda incidente y reflejada, valores necesarios para determinar el coeficiente de reflexión, el cual es un indicador empleado en hidráulica marítima para determinar que tan eficiente es un sistema para absorber la energía del oleaje incidente.

5.2.3 Modelos a utilizar

En la realización de cualquier experimento, se tienen dos tipos de variables las de control y las dependientes relacionadas entre sí mediante una función de transferencia. lo que permite determinar los parámetros de interés de forma directa o indirectamente. Los modelos a utilizar son los siguientes:

- Número de Iribarren, se empleará para determinar el tipo de rotura que se presenta en cada uno de los ensayos a realizar, ver tabla 5.1, y se define de la forma siguiente:

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (5.1)$$

donde:

- $\tan \alpha$ pendiente de la estructura.
- H altura de la ola.
- L_0 longitud en aguas profundas.

TIPO DE ROTURA	NÚMERO DE IRIBARREN
DESCRESTAMIENTO (SPILLING)	$I_r < 1.0$
VOLUTA (PLUNGING)	$1.0 < I_r < 2.6$
COLAPSO (COLAPSING)	$2.6 < I_r < 3.1$
OSCILACIÓN (SURGING)	$3.1 < I_r < 4.0$
NO EXISTE ROTURA	$I_r > 4.0$

Tabla 5.1.-Rango de valores del número de Iribarren para los diferentes tipos de rotura

- Número de Ursell, parámetro utilizado para verificar la linealidad de la onda, para lo cual debe verificarse que $U_r \leq 40$. Se expresa como sigue:

$$U_r = \frac{L^2 H}{h} \quad (5.2)$$

donde:

- L longitud de la onda.
- H altura de la ola.
- h profundidad del agua.

- Coeficiente de reflexión, es utilizado como un indicador de la capacidad disipativa que tiene una estructura, y es función de la ola incidente y reflejada, se expresa :

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (5.3)$$

donde:

- H_r altura de ola reflejada.
- H_i altura de ola incidente.

- *Número de onda*, se define como:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (5.4)$$

donde:

- L longitud de onda

- Separación entre sensores, el método a emplear para la separación de la onda incidente y reflejada, recomienda una distancia máxima y mínima entre los 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:

$$\Delta x_{\min} = \frac{\pi}{10k} \quad (5.5)$$

$$\Delta x_{\max} = \frac{9\pi}{10k} \quad (5.6)$$

donde:

Δx_{\min} separación mínima entre sensores.

Δx_{\max} separación máxima entre sensores

Tales separaciones se muestran en la figura siguiente:

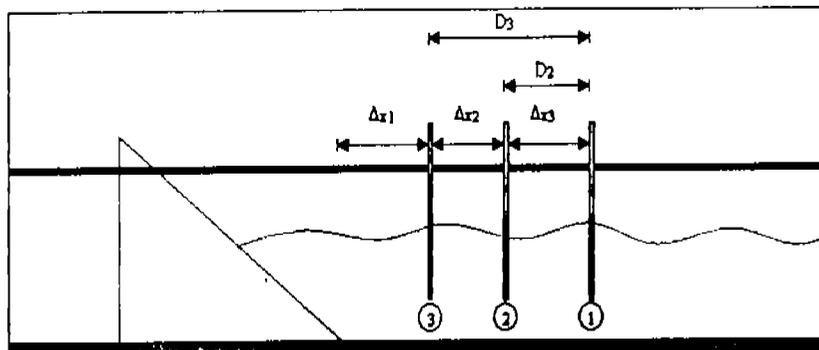


Fig. 5.2.-Posición relativa de los sensores en playa y dique

donde:

Δx_i distancia entre sensores durante los ensayos.

D_i distancias que se introducen como dato al correr el programa para la separación de la onda incidente y reflejada.

- Longitud de onda en aguas intermedias, se utilizó para estimar la longitud de onda para los diferentes periodos y profundidades propuestas, estimándose mediante un proceso de iteración. Ésta se expresa de la forma siguiente:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (5.7)$$

donde:

T periodo.

h profundidad.

g aceleración de la gravedad.

L longitud de onda.

5.2.4 Mediciones

Para realizar el análisis estadístico de una señal de oleaje es conveniente que los registros contengan al menos 100 datos, por lo cual, los ensayos a realizar contendrán 200 datos por registro. Para la determinación de los parámetros mencionados al inicio del capítulo se propusieron los datos que se muestran en la tabla 5.1, como las variables de control.

Datos para una inclinación de 60°										
Intervalo de tiempo Δt_i (s)	Periodo T_i (s)	Profundidad h_i (m)	Número de Ursell		Altura de ola (m)		Longitud de Onda L_i (m)	Número de onda K_i	Separación Entre sensores	
			U1	U2	H1	H2			Δx_2	Δx_3
0.083	2.500	0.600	2.681	5.363	0.05	0.10	5.673	1.07	1.700	0.300
0.070	2.100	0.600	1.784	3.569	0.05	0.10	4.627	1.357	1.700	0.300

Datos para una inclinación de 47°										
Intervalo de tiempo Δt_i (s)	Periodo T_i (s)	Profundidad h_i (m)	Número de Ursell		Altura de ola (m)		Longitud de Onda L_i (m)	Número de onda K_i	Separación Entre sensores	
			U1	U2	H1	H2			Δx_2	Δx_3
0.040	1.200	0.600	0.375	0.751	0.05	0.10	2.122	2.956	0.700	0.200
0.056	1.700	0.600	1.049	2.099	0.05	0.10	3.548	1.770	1.200	0.300
0.0833	2.500	0.600	2.682	5.363	0.05	0.10	5.673	1.07	1.700	0.300
0.0700	2.100	0.600	1.784	3.569	0.05	0.10	4.627	1.357	1.700	0.300

Datos para una inclinación de 30° (Playa artificial)									
Intervalo de tiempo Δt_i (s)	Periodo T_i (s)	Profundidad h_i (m)	Número de Ursell	Altura de ola (m)	Longitud de Onda L_i (m)	Número de onda K_i	Separación Entre sensores		
							U	H	Δx_2
0.025	0.750	0.500	0.077	0.05	0.877	7.165	0.200	0.150	
0.033	1.000	0.500	0.457	0.10	1.512	4.152	0.400	0.200	
0.050	1.500	0.500	2.396	0.15	2.826	2.222	1.000	0.200	
0.066	2.000	0.500	6.581	0.20	4.056	1.548	1.500	0.300	

Datos para una inclinación de 15°										
Intervalo de tiempo Δt_i (s)	Periodo T_i (s)	Profundidad h_i (m)	Número de Ursell		Altura de ola (m)		Longitud de Onda L_i (m)	Número de onda K_i	Separación Entre sensores	
			U1	U2	H1	H2			Δx_2	Δx_3
0.0250	0.750	0.250	0.140	0.224	0.05	0.08	0.837	7.499	0.200	0.150
0.0333	1.000	0.250	0.680	0.680	0.05	0.10	1.303	4.819	0.400	0.200
0.0416	1.250	0.250	1.220	1.220	0.05	0.10	1.746	3.597	0.500	0.200

Tabla 5.2.-Valores de los parámetros que se utilizaron en los ensayos.

La medición y adquisición de datos para los diferentes estados de mar generados fue mediante la utilización de tres sensores de nivel, los cuales se espaciaron de acuerdo al periodo y altura que se muestran en la tabla 5.1, bajo el criterio dado por ecuaciones 5.5 y 5.6.

5.3 Resultados

Para generar las diferentes condiciones de oleaje se utilizo un programa cuyos datos de entrada son la frecuencia, profundidad y altura de ola que se pretende generar. Ambos programas, tanto el de generación como el de recolección datos forman parte del sistema de generación de oleaje.

Obtenidas las señales correspondientes a cada uno de los estados de mar generado, se procedió a transformar los voltajes de salida en datos (perfiles) y tiempos, posteriormente se realizo la separación de las ondas aplicando el método de Mansard, así como la determinación del tipo de rotura presentada y estimación del coeficiente de reflexión. Los resultados obtenidos se presentan a manera de resumen en la tabla 5.2.y 5.3 respectivamente, en donde se indican los periodos y alturas de ola propuestos y los coeficientes de reflexión y tipo de rotura asociado.

Resultados para una pendiente de 15°					
Periodo T (S)	Profundidad h (m)	Altura de ola H _i (m)	Coefficiente de reflexión %Cr	Coefficiente de reflexión %Crp	Altura de ola H _r (m)
0.75	0.25	0.08	35.21	1.80	0.0282
0.75	0.25	0.05	11.87	5.55	0.0059
1	0.25	0.10	91.74	17.60	0.0917
1	0.25	0.05	68.78	14.60	0.0344
1.25	0.25	0.10	54.63	36.47	0.0546
1.25	0.25	0.05	36.70	34.92	0.0183

Resultados para una pendiente de 30°					
Periodo T (S)	Profundidad h (m)	Altura de ola H _i (m)	Coefficiente de reflexión %Cr	Coefficiente de reflexión %Crp	Altura de ola H _r (m)
1.5	0.50	0.15	37.97	31.61	0.0570
2	0.50	0.20	68.46	29.74	0.1369
1	0.50	0.10	55.77	3.89	0.0558
0.75	0.50	0.05	12.54	7.52	0.0752

Resultados para una pendiente de 47°					
Periodo T (S)	Profundidad h (m)	Altura de ola H _i (m)	Coefficiente de reflexión %Cr	Coefficiente de reflexión %Crp	Altura de ola H _r (m)
1.2	0.60	0.10	83.44	80.71	0.0834
1.2	0.60	0.05	93.09	92.55	0.0465
1.7	0.60	0.10	100.00	100.00	0.1034
1.7	0.60	0.05	98.79	97.91	0.0494
2.5	0.60	0.10	97.51	95.40	0.0975
2.5	0.60	0.05	83.54	82.11	0.0418
2.1	0.60	0.10	87.02	84.06	0.0870

Tabla 5.3.- Valores de los coeficientes de reflexión obtenidos

Resultados para una pendiente de 60°					
Periodo T (S)	Profundidad h (m)	Altura de ola HI (m)	Coefficiente de reflexión %Cr	Coefficiente de reflexión %Crp	Altura de ola Hr (m)
2.5	0.60	0.05	93.99	94.60	0.0470
2.5	0.60	0.10	100.00	99.32	0.1002
2.1	0.60	0.05	94.94	89.42	0.0475
2.1	0.60	0.10	98.70	98.85	0.0987

Tabla 5.3.- Valores de los coeficientes de reflexión obtenidos

Resultados para una pendiente de 15°					
Altura de ola HI (m)	Periodo T (S)	Longitud en aguas profundas Lo (m)	TAN (α)	Número de Iribarren Ir	Tipo de rotura
0.08	0.75	0.8782	0.2679	0.8876	D
0.05	0.75	0.8782	0.2679	1.1228	V
0.10	1	1.5613	0.2679	1.0586	V
0.05	1	1.5613	0.2679	1.4970	V
0.10	1.25	2.4395	0.2679	1.3232	V
0.05	1.25	2.4395	0.2679	1.8713	V

Resultados para pendiente de 47°					
Altura de ola HI (m)	Periodo T (S)	Longitud en aguas profundas Lo (m)	TAN (α)	Número de Iribarren Ir	Tipo de rotura
0.10	1.2	2.2483	1.0723	5.0844	E
0.05	1.2	2.2483	1.0723	7.1904	E
0.10	1.7	4.5122	1.0723	7.2029	E
0.05	1.7	4.5122	1.0723	10.1865	E
0.10	2.5	9.7581	1.0723	10.5925	E
0.05	2.5	9.7581	1.0723	14.9801	E
0.10	2.1	6.8853	1.0723	8.8977	E

Resultados para pendiente de $\approx 30^\circ$					
Altura de ola HI (m)	Periodo T (S)	Longitud en aguas profundas Lo (m)	TAN (α)	Número de Iribarren Ir	Tipo de rotura
0.15	1.5	3.5129	0.5773	2.7938	C
0.20	2	6.2452	0.5773	3.2260	O
0.10	1	1.5613	0.5773	2.2811	C
0.05	0.75	0.8782	0.5773	2.4195	C

Resultados para una pendiente de 60°					
Altura de ola HI (m)	Periodo T (S)	Longitud en aguas profundas Lo (m)	TAN (α)	Número de Iribarren Ir	Tipo de rotura
0.05	2.5	9.7581	1.732	24.1961	E
0.10	2.5	9.7581	1.732	17.1093	E
0.05	2.1	6.8853	1.732	20.3248	E
0.10	2.1	6.8853	1.732	14.3718	E

Tabla 5.3.- Tipo de rotura presentada en cada uno de los ensayos, con base al número de Iribarren

donde:

- D Descrestamiento.
- V Voluta.
- C Colapso.
- O Oscilación.
- E No existe rotura.

Al estimar el coeficiente de reflexión para cada uno de los ensayos realizados, el cual indica la cantidad de energía reflejada, por simple inspección visual durante los ensayos se apreció que al tener pendientes fuertes, este se incrementa en gran proporción, y mientras que la pendiente se fue suavizando la energía disipada por la estructura fue mayor, consecuencia de la rotura de la ola incidente. Sin embargo al estimar el coeficiente de reflexión aplicando el método ya mencionado, el valor de este es muy grande. Tales resultados se deben en parte a que el oleaje reflejado no es totalmente lineal debido a la aparición de otros armónicos en parte inducidos por efectos de turbulencia y corrientes de retorno y pequeños movimientos del dique de madera. Lo mencionado se puede apreciar en la figura 5.3.

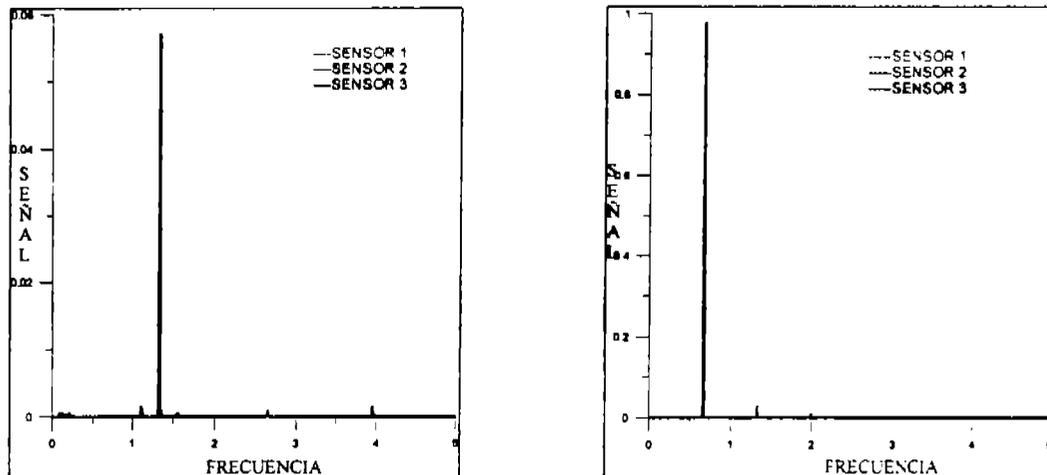


Fig 5.3.-Se muestra para los ensayos 321 y 328 el ruido introducido por la no linealidad de la onda

Este problema, debido a la no linealidad de la onda reflejada fue comentado por Baquerizo, quien realizo en 1991 en el C.E.R.C. (Costal Engineering Research Center) de la Universidad del Estado de Oregon, Corvallis, E.E.U.U, un estudio de la reflexión en playas dentro del proyecto experimental denominado Supertank, concluyendo con base a los resultados obtenidos las hipótesis de Miche sobre la saturación de la reflexión en playas.

Sin embargo al comparar el coeficiente total (C_r) con el coeficiente pico (C_p) los resultados presentados son aceptables al considerar este último como el coeficiente real, de acuerdo a lo visualizado en los ensayos.

Al determinar el tipo de rotura presentado en el dique y playa, para las pendientes fuertes no se presento rotura, en tanto que para taludes suaves predominaron el tipo colapso y voluta concordando con lo visualizado.

6. Conclusiones

- El oleaje es una perturbación en un medio continuo producido principalmente por la acción del viento y cuya principal fuerza de equilibrio es la acción de la gravedad, y al propagarse de aguas profundas hacia aguas someras sufre una serie de transformaciones que son de especial interés para el diseño de actividades en el litoral.
- La caracterización de un estado de mar se puede realizar a partir de datos de viento o bien de una señal obtenida de un dispositivo localizado en el mar o en laboratorio, en este último caso las señales producto de una medición son de tipo estocástico y su análisis se realiza mediante técnicas estadísticas, teniéndose dos vertientes una en el dominio del tiempo y otra en el dominio de la frecuencia, siendo ambas complementarias.
- El tipo de dispositivo empleado para generar oleaje en laboratorio depende, en gran medida, de los estudios a realizar. De los diferentes dispositivos existentes los de mayor uso son los de tipo pistón y agitador, siendo el primero más útil cuando se trabaja con tirantes de agua pequeños.

Por lo que respecta al análisis de los ensayos de laboratorio efectuados se concluye que:

- La eficiencia de disipación de energía de la playa empleada en el canal, resultó muy adecuada para los periodos y alturas propuestas, por lo que no fue necesario el uso del sistema de absorción, sin embargo, para tener un panorama más amplio sobre su eficiencia se requiere realizar ensayos de mayor duración (mas de dos horas) y evaluar si se presenta un comportamiento similar.
- Por lo referente al sistema de absorción dinámica, para las diferentes condiciones de operación a las que se sometió, su eficiencia para la disipación de la energía debida a la reflexión del oleaje es muy buena puesto que prácticamente elimina toda la reflexión inducida por la pala generadora.
- Al estimar el coeficiente de reflexión como función de toda la energía del oleaje, considerando el efecto de los sub y supra armónicos, los valores obtenidos parecen muy elevados. Esto se debe en primera instancia, a efectos relacionados con el material de la playa ensayada, pero también existe una cierta distorsión en virtud de la no linealidad de la onda reflejada.

7. Futuras líneas de trabajo

- Realizar un análisis más detallado del funcionamiento de todo el canal en su conjunto. Ajustes de los sistemas de generación y absorción dinámica incluyendo oleaje espectral.
- Realizar de ensayos en laboratorio enfocados a la eficiencia, como disipadores de la energía del oleaje, de diversos tipos de estructuras de protección costera.
- Establecer nuevos criterios de diseño en función de la energía que una estructura es capaz de absorber, disipar o reflejar.
- Estudios diversos sobre la hidrodinámica inducida por diferentes materiales en el talud.

8. Bibliografía

- Peter Frigaar, Michael Brorsen, *Notes for Ph.D. course in Experimental and Numerical wave Generation and Analysis*, 1997, Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering. Aalborg University: Aalborg.
- Robert G. Dean, Robert A., Dalrymple, *Water wave Mechanics for Engineers and Scientists*, 1984, p. 42-62, 170-185.
- Robert M. Sorensen, *Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers*, 1993, p. 1-5, 41-43.
- Subrata Kumar Chakrabarti, *Offshore Structure Modeling*, World Scientific volumen 9, 1994, p. 1, 75-76, 113-118, 130-135.
- *Shore Protection Manual*,
- Gabriel Aldape Echávez, *Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental*, 1996, pp. 124.
- Aristóteles, ed. *Acerca del cielo*; Metereológicos. 1996, Gredos: Madrid. 430.
- SPM, *Shore Protection Manual*. 1984, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, US Government Printing Office: Washington.
- Goda, Y., *Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum*. Coastal Engineering in Japan, 1988. 31(1): p. 39-52.
- Goda, Y., *Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum*, in *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.* 1975. p. 45 p.
- Goda, Y., *Random seas and design of maritime structures*. 2nd ed. Advances Series on Ocean Engineering. Vol. 15. 2000, Singapore: World Scientific. 443.
- Longuet-Higgins, M.S., *On the statistical distribution of the heights of sea waves*. J. Marine Research, 1952. 11: p. 245-266.
- Longuet-Higgins, M.S., *The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves*. Jour. of Fluid Mechanics, 1963. 17: p. 459-480.
- Longuet-Higgins, M.S., *On the joint distribution of the period and amplitudes of sea waves*. J. Geophys. Res., 1975. 80(18): p. 2088-2094.
- Longuet-Higgins, M.S., *On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field*. Proc. Roy. Soc., 1983(389): p. 241-258.
- Stokes, G.G., *On the oscillatory waves*. Transactions Cambridge Phil. Soc., 1847. 8(441): p. 157-229.

- Sverdrup, H.U.M., W.H., *Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting*. 1947, U.S. Navy Hydrographic Office Publication. p. 44.
- Tayfun, M.A., *Narrow-band nonlinear sea waves*. J. Geoph. Res., 1980. **85**(C3): p. 1548-1552.
- Tayfun, M.A., *Breaking Limited Wave Heights*. J. Wtrway., Port, Coast. and Ocean Engng., 1981. **107**(WW2): p. 59-69.
- Tayfun, M.A., *Distribution of crest-to-trough wave height*. Jour. Wat., Port, Coast., and Oce. Eng., 1981. **107**: p. 149-158.
- Vincent, C.L., *Deepwater Wind Wave Growth with Fetch and Duration*. 1984, US Army Engineer Waterways Experiment Station: Vicksburg, MS.
- Krylov, Y.M., *Spektralnyye Metody Issledovaniya i Razcheta Vetrovykh Voln (Spectral methods of studying and predicting of wind waves, Consultado en Massel, 1996)*. 1966, Leningrad: Gidrometeoizdat. 256.
- Koopmans, L.H., *The spectral analysis of time series*. 1974, New York: Academic Press.
- Kitaigorodskii, S.A., *Application of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process (Traducido del ruso 73-80)*. 1961, Bull. Akad, Nauk SSSR, Ser. Geophys. p. 105-117.
- Carter, D.J.T., Challenor, P.G. & et al., *Estimating wave parameters for engineering applications*. 1986, Dept. of Energy: London. p. 92.
- Brigg, M., Thompson, E. and Vincent, Ch., *Wave diffraction around breakwater*. J. Wtrway., Port, Coast. and Ocean Engng., 1995. **121**(1): p. 23-35.
- Bretschneider, C.L.R., R.O., *Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction*. 1954, The Agricultural and Mechanical Collage of Texas: Texas.
- Bretschneider, C.L., *Tropical Cyclones*, in *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. 1990, Gulf Publishing Co. p. 249-370.
- Bretschneider, C.L., *Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves*. 1959, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers: Washington, D.C.
- Airy, G.B., *Tides and waves*. Encycl. Metrop., Art, 1845. **192**: p. 241-396.

9. Referencias

- Asunción Baquerizo Azofra, 1995, *Reflexión del Oleaje en Playas*, Tesis doctoral, Santander, Universidad de Cantabria, España.
- *Manual para la generación de oleaje y adquisición de datos*, HR Wallingford, 2002.
- *Apuntes de la materia de Ríos y costas*, 2003. F.I., UNAM.
- Rodolfo Silva C., *Análisis y Descripción Estadística del Oleaje*, 2004, p. 11-153.
- David Simmonds, Adrián Pedrozo, *Estimación de la Reflexión por Estructuras XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cordoba, 2000.
- Alberto Avila A., Adrian Pedrozo A., Rodolfo Silva C., *Principales Teorías para el Modelado Matemático de la Propagación de oleaje*, IV congreso Internacional Acapulco, 2003.
- Goda, Y., *Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum*. Coastal Engineering in Japan, 1988. 31(1): p. 39-52.
- Losada, M.A.G.-C., L.A., *Análisis estadístico y espectral de regímenes*. Curso de Puertos. Vol. Tomo Cuarto-I. 1978, Santander, España: Universidad de Santander. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 56.
- Sanchez, C., Silva, R., Govaere, G. & Contreras, A. *Comparison of 4 wave prediction models*. in *5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*. 1998. Merburne, Florida.
- Pierson, W.J.M., L.A., *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii*. J. Geoph. Res., 1964. 69(24): p. 5181-5203.
- Pierson, W.J., Neumann, G. & James, R.W., *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. 1958, U.S. Navy Hydrogr. Off.: Washington D.C.
- Phillips, O.M., *The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves*. Journal of Fluid Mechanics, 1958. 4: p. 426-434.
- Funke, E.R.M., E.P.D., *Synthesis of Realistic Sea States in a Laboratory Flume*. 1979, National Research Council of Canada: Ottawa. p. 54.
- Cavanié, A., Arhan, M. & Ezraty, R. *A Statistical Relationship Between Individual Height and Periods of Storm Waves*. in *Int. Conf. on Behavior of Offshore Structures*. 1976. Trondheim: BOSS'76.