



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS B/L Y Fb/H EN
EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE UN
ARRECIFE ARTIFICIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERÍA CIVIL

P R E S E N T A N:

MANUEL ARTURO CASTILLO RODRÍGUEZ
GUSTAVO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/090/15

Señores
MANUEL ARTURO CASTILLO RODRÍGUEZ
GUSTAVO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, que aprobó este Comité, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

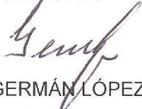
"INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS B/L Y FB/H EN EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE UN ARRECIFE ARTIFICIAL"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL DE ONDAS
- II. DINÁMICA DE LOS ARRECIFES ARTIFICIALES
- III. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS
- IV. RESULTADOS
- V. CONCLUSIÓN

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 1 de septiembre del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

Manuel:

A la Facultad de Ingeniería, al Instituto de Ingeniería, a la UNAM por permitirme ser parte de esta gran familia, la familia Universitaria.

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin por ser el tutor de esta tesis y permitirme realizar tanto el servicio social como la tesis en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, además de permitir adentrarme a un nuevo campo de la hidráulica.

A mi familia por el apoyo en todos estos años de estudio, a mi señora madre Ana María y a mi señor padre Manuel por creer en el esfuerzo para ser ingeniero.

A Adriana G. por el cariño y la paciencia que me brindo para poder concluir con esta etapa, así como los consejos que me brindo.

A mis compañeros del Laboratorio que directamente o indirectamente estuvieron involucrados en este trabajo, a Gustavo R. por ser el la mano derecha de esta tesis, a Geovanni R. Alejandro A. Ana R. Erick G. Guadalupe S. por estar al pendiente de esta tesis y aportar ideas y conocimiento.

A las grandes personas que he tenido la oportunidad de conocer en toda la trayectoria de estudio desde mis amigos de primaria y secundaria, pasando mis grandes equipos de CCH y terminando con mis amigos de la Facultad de Ingeniería.

A todos ellos Gracias!!!

Agradecimientos

Gustavo

A los doctores Edgar y Rodolfo, por permitirme ser parte del Laboratorio de Costas y Puertos de la UNAM, así como hacer uso de las instalaciones y poder realizar las pruebas para esta tesis, esta experiencia me es muy grata, me deja muy contento por todo lo aprendido.

Agradezco a mi papá Octaviano y a mi mamá Rosy, por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, por ese gran apoyo familiar en donde no puedo estar más agradecido, son lo más preciado que tengo.

A mis hermanos, Mary y Memo, porque quizá no soy el mejor hermano pero ellos siempre han estado conmigo en los momentos buenos o malos, gracias por su apoyo, los estimo mucho y los quiero.

A mis compañeros y amigos por todo su apoyo, a lo largo de mi vida he conocido pocas personas como ustedes, les agradezco su tiempo y experiencias que han compartido conmigo. Para mis buenos amigos Rubén, Alejandro, Ana, Erick, Giovanni y Manuel.

Gracias a la Facultad de Ingeniería, por todo el conocimiento y por la gran formación que me brinda para ser un buen profesionalista.

Y por último a mi amada *alma mater* la UNAM.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el análisis de la influencia de los parámetros B/L y Fb/H en el comportamiento hidrodinámico de un arrecife artificial, los principales procesos a estudiar serán: reflexión, transmisión y disipación.

Para los experimentos que se llevaron a cabo en un canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se utilizaron dos tipos de oleaje, el oleaje regular y el oleaje irregular, para cada prueba se variaron las condiciones del oleaje, con el fin de tener un rango amplio de estudio, se utilizaron los siguientes periodos: 0.59, 0.65, 0.74, 0.80, 0.88 y 1.13 segundos y para las alturas de ola fueron: 3, 4, 6, 8, 10 y 17 centímetros.

Las dimensiones de los diques fueron las siguientes: 30 cm de altura, pendiente de 1:1.5, el ancho de corona vario de: 30, 50, 60, 70, 90 y 110 centímetros. Se usaron francobordos de 0, 3, 6, 9, 12 y 15 centímetros.

Se realizaron en total 720 pruebas, con el análisis temporal se obtuvieron las características del oleaje de cada prueba como lo son el periodo y la altura significativa, lo cual permitió realizar los respectivos análisis para reflexión, transmisión y disipación.

Contenido

I.	Introducción	1
1.1	Motivación y justificación.....	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Organización del trabajo	4
II.	Análisis temporal y espectral de ondas	5
2.1	Representación matemática del oleaje	5
2.1.1	Teoría de ondas	5
2.1.2	Clasificación del oleaje	6
2.1.3	Descripción física del oleaje.....	7
2.1.4	Descripción matemática del oleaje.....	8
2.1.5	Descripción estadística del oleaje.....	8
2.1.5.1	El oleaje como proceso estocástico.....	9
2.1.5.2	El oleaje como un proceso estacionario	9
2.1.6	Definición de estado de mar	10
2.2	Análisis temporal	11
2.2.1	La muestra.....	11
2.2.1.1	Corrección del nivel medio	13
2.2.1.2	Caracterización de la señal.....	15
2.2.1.3	Determinación de los parámetros del oleaje	19
2.2.1.4	Determinación de parámetros de velocidades orbitales	21
2.2.1.5	Determinación de la dirección de oleaje	21
2.2.1.6	Agrupamiento del oleaje	22
2.3	Análisis espectral	25
2.3.1	Análisis espectral digital de series temporales.....	25
2.3.2	Estado de saturación	26
2.3.3	Modelos espectrales de un estado de mar	27
2.3.3.1	Modelo de Phillips	27
2.3.3.2	Espectro de Neumann	28
2.3.3.3	Espectro Pierson-Moskowitz	28
2.3.3.4	Espectro de Bretschneider.....	29

2.3.3.5 Espectro de Kitaigorodskii-Toba	30
2.3.3.6 Espectro ISSC	31
2.3.3.7 Espectro de Krylov	31
2.3.3.8 Espectro ITTC.....	32
2.3.3.9 Espectro JONSWAP	32
2.3.3.10 Espectro de Ochi-Hubble	33
2.3.3.11 Espectro TMA.....	33
2.4 Teoría de generación de oleaje en laboratorio	34
2.4.1 Ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno	35
2.4.2 Generación de oleaje de primer orden	38
2.4.2.1 Generador de oleaje tipo pistón y tipo aleta.....	41
III. Dinámica de los arrecifes artificiales	43
3.1 Perturbación del oleaje por un obstáculo sumergido	43
3.1.1 Arrecifes artificiales	43
3.1.2 Diques sumergidos.....	43
3.1.3 Procesos de transformación de oleaje	44
3.2 Rotura.....	49
3.2.1 Tipos de rotura	49
3.3 Cálculo de las fuerzas de oleaje en un obstáculo sumergido	52
3.3.1 La hipótesis de Froude Kriloff	52
3.4 Diseño mecánico de diques sumergidos	55
3.4.1 Esfuerzos.....	55
3.4.2 Tipos clásicos de fallo.....	56
3.4.3 Estabilidad.....	56
3.4.4 Estabilidad estructural y Estabilidad hidrodinámica.....	57
3.4.5 Diseño de diques sumergidos.....	58
IV. Descripción de los experimentos	65
4.1 Arreglo experimental	65
4.1.1 Geometría de la estructura	70
4.1.2 Material de construcción	72
4.2 Metodología experimental	73
4.3 Observaciones	77

V.	Resultados.....	79
5.1	Análisis del parámetro B/L	79
5.2	Análisis del parámetro F_b/H	87
5.3	Rotura.....	95
VI.	Conclusiones.....	97
	Bibliografía	99
	Anexos	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. II-1 Características de las ondas	5
Fig. II-2 Oleaje sea a la izquierda y oleaje swell a la derecha	7
Fig. II-3 Parámetros que definen el oleaje	12
Fig. II-4 Marea semidiurna (Silva, 2005)	15
Fig. II-5 Discretización de la altura de ola utilizando el método de los pasos ascendentes (Silva, 2005)	17
Fig. II-6 Definición de las olas por el método de pasos descendentes (Silva, 2005)	17
Fig. II-7 Definición de las olas por el método de distancias entre crestas (Silva, 2005)	18
Fig. II-8 Separación entre olas por el método de valles (Silva, 2005)	18
Fig. II-9 Ubicación de un aparato de medición en la costa (Silva, 2005)	22
Fig. II-10 Ejemplo de un registro de oleaje con agrupamiento (Silva, 2005)	23
Fig. II-11 Definición de los paquetes de olas (Silva, 2005)	23
Fig. II-12 Diagrama de flujo para el análisis temporal de señales de oleaje sin considerar la evaluación del agrupamiento del oleaje (Silva, 2005)	24
Fig. II-13 Definición de canal de dos dimensiones	35
Fig. III-1 Someramiento	45
Fig. III-2 Refracción	45
Fig. III-3 Difracción del oleaje	46
Fig. III-4 Reflexión provocada por un dique vertical	47
Fig. III-5 Rotura spilling	50
Fig. III-6 Rotura Plunging	51
Fig. III-7 Rotura Collapsing	51
Fig. III-8 Rotura Surging	52
Fig. III-9 definición para el cuerpo 2 - D en coordenadas cartesianas	53
Fig. III-10 Ubicación de los diferentes sectores de un dique rebasable o sumergido	59
Fig. IV-1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM	65
Fig. IV-2 Datalogger y sensores de nivel	66
Fig. IV-3 Arreglo de los sensores de nivel en el canal de oleaje	67
Fig. IV-4 Sensores de presión	68
Fig. IV-5 Diferentes niveles nivel de agua en reposo (NAR)	69
Fig. IV-6 Geometrías propuestas en centímetros.	71
Fig. IV-7 Modelo fabricado con cubos.	72
Fig. IV-8 Interfaz del programa AwaSys6	75
Fig. V-1 Gráficas representativas del dique de 0.30 m de coronación con oleaje regular	80
Fig. V-2 Gráficas representativas del dique de 0.60m de coronación con oleaje irregular	81
Fig. V-3 Comparación parámetro B/L y reflexión con oleaje regular	82
Fig. V-4 Comparación parámetro B/L y reflexión con oleaje irregular	83
Fig. V-5 Comparación parámetro B/L y transmisión con oleaje regular	84
Fig. V-6 Comparación parámetro B/L y transmisión con oleaje irregular	85
Fig. V-7 Comparación parámetro B/L y disipación con oleaje regular	85

<i>Fig. V-8 Comparación parámetro B/L y disipación con oleaje irregular.....</i>	<i>86</i>
<i>Fig. V-10 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 30 cm.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. V-9 Comparación del parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. V-11 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 50 cm.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. V-12 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 70 cm.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. V-13 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 90 cm.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. V-14 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 110 cm.....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. V-15 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 60 cm.....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. V-16 Comparación del parámetro Fb/H y transmisión con oleaje regular.....</i>	<i>90</i>
<i>Fig. V-17 Comparación del parámetro Fb/H y disipación con oleaje regular.....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. V-18 Comparación del parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular.....</i>	<i>92</i>
<i>Fig. V-20 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 50 cm.....</i>	<i>92</i>
<i>Fig. V-19 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 30 cm.....</i>	<i>92</i>
<i>Fig. V-21 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 90 cm.....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. V-22 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 70 cm.....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. V-24 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 60 cm.....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. V-23 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 110 cm.....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. V-25 Comparación del parámetro Fb/H y transmisión con oleaje regular.....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. V-26 Comparación del parámetro Fb/H y disipación con oleaje regular.....</i>	<i>95</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla II-1 Características de los parámetros adimensionales para las distintas teorías de ondas.</i>	8
<i>Tabla II-2 Metodología para el análisis temporal del oleaje (Silva, 2005).</i>	13
<i>Tabla II-3 Metodología para el análisis espectral del oleaje (Silva, 2005)</i>	26
<i>Tabla II-4 : Ecuaciones bidimensionales para generación de olas</i>	37
<i>Tabla III-1 Valores del número de Iribarren para los diferentes tipos de rotura según Battjes (1974).</i> 50	
<i>Tabla III-2 Parámetros de ajustes para el diseño del talud exterior</i>	60
<i>Tabla III-3 Parámetros de ajuste para el diseño de la coronación</i>	61
<i>Tabla III-4 parámetros de ajuste para el diseño del talud exterior</i>	62
<i>Tabla III-5 Parámetros de ajuste para el diseño del morro</i>	63
<i>Tabla IV-1 Distancia entre sensores</i>	67
<i>Tabla IV-2 Condiciones de oleaje</i>	69
<i>Tabla IV-3 Obtención de las alturas de ola (H)</i>	70
<i>Tabla IV-4 Características del material del dique</i>	72
<i>Tabla IV-5 Pruebas</i>	73
<i>Tabla IV-6 Duración de las pruebas</i>	73
<i>Tabla IV-7 Distancia entre sensores</i>	74
<i>Tabla V-1 Resumen de los rangos en los que se encuentran los parámetros para oleaje regular</i>	86
<i>Tabla V-2 Resumen de los rangos en los que se encuentran los parámetros para oleaje regular</i>	87
<i>Tabla V-3 Tipo de rotura para diques con ancho de corona 30, 50, 70, 90 y 110 cm</i>	95
<i>Tabla V-4 Tipo de rotura para dique con ancho de corona de 60 cm</i>	96

I. Introducción

La costa es una zona importante tanto para los asentamientos humanos como para el desarrollo económico. Esta delgada región se encuentra sometida a grandes desequilibrios como consecuencia de la interacción simultánea de múltiples y variados agentes: oleaje, mareas, corrientes, construcción de obras marítimas que interrumpen las corrientes litorales y el transporte de sedimentos, variaciones del nivel medio del mar, desarrollo de áreas costeras y urbanismo masivo en la zona activa de las playas. Todo ello, sea que la causa última resulta natural o no, ha resultado en que un gran número de playas (sobre todo aquellas formadas por arena), se encuentren en francos procesos de erosión así como de degradación ambiental.

Derivado de lo anterior, los asentamientos humanos, la infraestructura industrial y los desarrollos turísticos requieren de nuevas acciones que eviten mayores daños a las costas, para que sigan siendo rentables dentro de su periodo de operación, lo cual es una necesidad imperante a fin de evitar el decaimiento de la actividad económica y de la calidad de vida de los habitantes de la costa.

Dentro de los elementos para reducir la energía del oleaje que además interfieren en menor medida con el aspecto visual de la zona de interés, se encuentran los diques sumergidos.

La finalidad de este tipo de estructuras es controlar la energía del oleaje incidente, de tal forma que permita la estabilización de la playa vía la reducción del movimiento de sedimentos. Este funcionamiento tiene el potencial de revertir los procesos erosivos en las playas, a un costo razonable y minimizando los impactos negativos en la zona.

Estas obras constituyen una tipología estructural utilizada para la protección de playas desde mediados del siglo XX, fundamentalmente desde la década de los años setenta. Los efectos obtenidos con ellos han sido diversos, desde notables éxitos hasta reconocidos fracasos.

1.1 Motivación y justificación

Los diques sumergidos son diseñados con la intención de controlar la energía del oleaje, ya sea por la rotura del mismo o generando la pérdida de energía por fricción que se genera cuando el oleaje pasa a través y sobre de la estructura o, en su caso, cuando la ola impacta con el dique, permitiendo que exista una cierta transmisión de la energía sin que esta sea significativa en términos de estabilidad de la playa.

Los diques sumergidos son una alternativa interesante ya que, además de reducir el impacto visual de la estructura, permiten la renovación de las aguas en la zona protegida a la vez que se reducen los costos, comparados con obras de gran envergadura, ya que necesitan menor cantidad de material al coronar a una cota menor y, al mismo tiempo, las solicitaciones del oleaje son menores.

Los diques sumergidos funcionan como un filtro de olas, es decir, cuando se tiene un francobordo considerable algunas olas consiguen pasar sobre el dique sin perder energía o haciéndolo de manera despreciable; mientras que las olas con mayor altura rompen en la estructura perdiendo gran parte de la energía.

En el diseño de las estructuras sumergidas se deben tener en cuenta dos tipos de parámetros: los relacionados con el oleaje y los geométricos, aunque en muchas de las metodologías de diseño sólo se consideran estos últimos (Lozada-Benavente, Xavier, Universidad politécnica de Cataluña 2004).

En la literatura especializada respecto al diseño de diques sumergidos no existe una descripción única entre la interacción estructura y oleaje que permita conocer qué porcentaje de energía es reflejada transmitida o disipada. Esto se puede determinar, sin embargo, a partir del coeficiente de transmisión, K_t , si en cálculo del cual se involucran parámetros geométricos del dique.

La transferencia de energía entre el oleaje y la estructura involucra un amplio número de procesos, de ahí que las formulaciones que se han desarrollado para estimar las solicitaciones hidrodinámicas en las estructuras sumergidas se basan en la experimentación y análisis de parámetros como:

- Altura y ancho de coronación del dique
- Pendiente del talud
- Material
- Rango de mareas de la zona

- Periodo y altura del oleaje incidente

Se han desarrollado, durante la segunda mitad del siglo XX, (Van der Meer 1990, K. d'Angremond et al. 1996), multitud de relaciones analíticas, principalmente para estimar un coeficiente de transmisión asociado al dique, sin embargo, menos esfuerzos se han dedicado a conocer y caracterizar los coeficientes de reflexión, disipación y transmisión a partir de parámetros de la geometría de la estructura y del oleaje.

Por ello, en este trabajo, se tomaron como base dos parámetros geométricos, el ancho de la corona y el francobordo, y dos parámetros del oleaje, la longitud de onda y la altura de ola incidente, para, en forma adimensional, caracterizar el comportamiento hidrodinámico de los diques sumergidos.

1.2 Objetivos

Objetivo general

El objetivo central de este trabajo es obtener experimentalmente los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación como función de los parámetros Fb/H y B/L , para avanzar en el entendimiento de la interacción entre la geometría de una estructura tipo dique sumergido con el oleaje.

Objetivos secundarios

- Determinar si el comportamiento hidrodinámico de una estructura es similar para diferentes valores del parámetro Fb/H en términos de la energía disipada, reflejada y transmitida por la estructura.
- Determinar si el comportamiento hidrodinámico de una estructura es similar para diferentes valores del parámetro B/L en términos de la energía disipada, reflejada y transmitida por la estructura.

1.3 Organización del trabajo

El trabajo se conforma de seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1 Introducción

Este capítulo hace mención a la función que realiza un arrecife artificial, en cuyo caso para este trabajo será un dique sumergido; además, se detallan los objetivos y se presenta la justificación del trabajo.

Capítulo 2 Análisis temporal y espectral de ondas

El segundo capítulo se hace referencia a los aspectos generales del oleaje, conceptos y clasificaciones, así como teorías de las ondas, análisis temporal y análisis espectral de los estados de mar.

Capítulo 3 Dinámica de los arrecifes artificiales

En dicho capítulo se presentan las condiciones de cómo puede un dique sumergido transformar el oleaje, explicando algunos procesos y cálculos de las fuerzas y procesos que afectan el oleaje, así como la metodología usada para el diseño de diques sumergidos.

Capítulo 4 Descripción de los experimentos

En este capítulo se presenta el trabajo realizado en el laboratorio de Costas y Puertos, la instrumentación necesaria para las pruebas, se hace mención de las condiciones hidrodinámicas usadas para las pruebas, además de mostrar la geometría y medidas de los diques usados.

Capítulo 5 Resultados

Con dicho capítulo se presenta los resultados obtenidos con los parámetros B/L y Fb/H , mediante una serie de gráficas y tablas obtenidas en cada ensayo.

Capítulo 6 Conclusiones

Se presentan las conclusiones obtenidas de acuerdo con el análisis de las pruebas realizadas, y se estudia a fondo la interacción del comportamiento de los coeficientes de reflexión y transmisión con los parámetros geométricos y las condiciones hidrodinámicas.

II. Análisis temporal y espectral de ondas

2.1 Representación matemática del oleaje

2.1.1 Teoría de ondas

El oleaje históricamente ha sido uno de los fenómenos más intrigantes para el hombre, por lo que se han realizado un sinnúmero de esfuerzos por entender su generación y transformación. Desde la antigua Grecia ya existía una conciencia de la interacción entre el mar y la atmósfera que incluso Aristóteles en su libro “*Acerca del cielo*”; meteorólogos (Gredos, 1996) menciona la importancia del viento en la generación del oleaje.

Las ondas marinas pueden definirse como ondas provocadas por la propagación de energía mecánica a lo largo de la superficie del agua. Los mecanismos que aportan esta energía son de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, sismos, atracción de cuerpos celestes, entre otros. Estos mecanismos también podrán definir el tipo de onda que generan. Siendo el oleaje, aquellas ondas generadas, principalmente, por el viento y la fuerza de atracción gravitacional terrestre.

La forma más simple de representar una ola es por medio de ondas sinusoidales, donde se define como cresta la parte más alta que puede alcanzar una onda y el valle como la parte más baja. La longitud de onda L , es la distancia horizontal entre dos crestas adyacentes; la altura de ola H es la distancia vertical entre el máximo de la cresta y el fondo del valle (Fig. II.1).

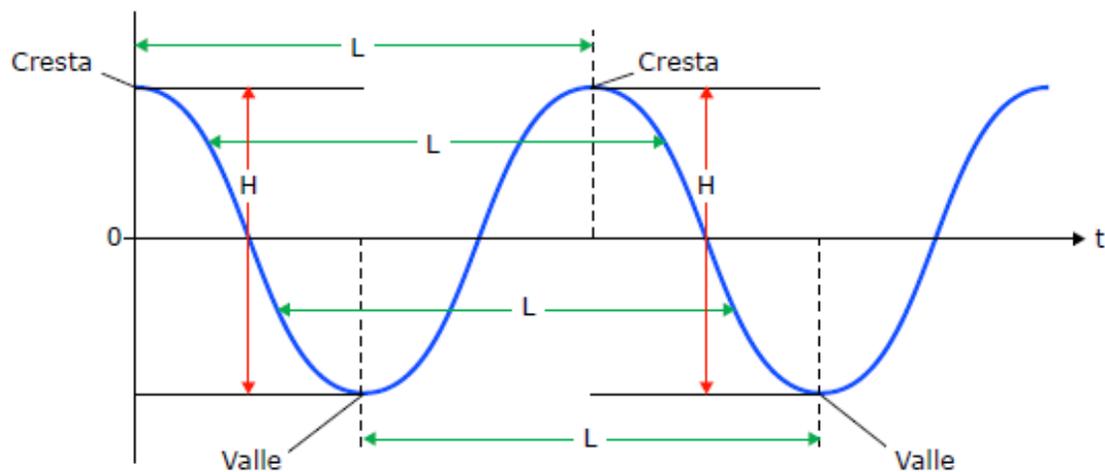


Fig. II-1 Características de las ondas

El tiempo necesario para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto se define como periodo de onda, T , mientras que su inverso $1/T$ será la frecuencia. La celeridad (c) es la velocidad a la que viaja una onda y estará dada por la relación entre la longitud y el periodo (L/T), la mitad de la altura de la onda será la amplitud.

En el caso de una ola representada por una onda, la distancia vertical entre el fondo y la elevación media de la superficie del agua es la profundidad de ola, h .

2.1.2 Clasificación del oleaje

Cuando el viento le transfiere su energía a la superficie del mar se genera un oleaje. En ingeniería oceanográfica, se llama área de generación (*fetch*) a la región o zona donde dicho evento ocurre. A medida que el oleaje se propaga fuera de la zona de generación, las ondas se dispersan separándose en componentes, aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación.

De acuerdo con su génesis, se suelen distinguir dos tipos extremos de oleaje, entre los cuales existen un sinnúmero de estados intermedios. Se denominan por las palabras inglesas, universalmente aceptadas, *sea* y *swell* o su traducción al español como *oleaje local* y *oleaje distante*.

Oleaje local o sea

Este tipo de oleaje se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido. Las características que definen este tipo de oleaje son:

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad.
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas.
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda.

Oleaje distante o swell

Cuando el oleaje se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos (Losada y Jiménez-Curto, 1978):

- Pierden energía, las olas viajan a expensas de su propia energía (decaimiento).
- El oleaje sufre una doble dispersión. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo *swell*.

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde a los fenómenos descritos anteriormente se añade el de la refracción, que hace que las olas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas. Así, el oleaje que se acerca a la costa es más regular, forma frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, y se presentan ciertas direcciones predominantes (Fig. II-2). Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno.



Fig. II-2 Oleaje sea a la izquierda y oleaje swell a la derecha

2.1.3 Descripción física del oleaje

Desde el punto de vista de la física, las ondas propagadas en el agua pueden clasificarse de dos formas:

- Ondas oscilatorias. Estas ondas se caracterizan por no presentar transporte de masa, dentro de las ondas oscilatorias están las ondas progresivas y las ondas estacionarias.
- Ondas translatórias. Estas ondas se caracterizan por presentar transporte de masa en la dirección de propagación de la onda. Dentro de estas ondas se identifican las ondas solitarias y las mareas.

2.1.4 Descripción matemática del oleaje

Existe una clasificación con base en parámetros adimensionales que, a su vez, son funciones de las características de las ondas.

- Altura relativa de la onda (α). Es la relación entre la altura de la ola y la profundidad de la misma.

$$\alpha = H/h \quad (2.1)$$

- Peralte de la onda (β). Es la relación entre la altura y la longitud de onda.

$$\beta = H/L \quad (2.2)$$

- Profundidad relativa (λ). Es la relación entre la profundidad de la ola y su longitud.

$$\lambda = h/L \quad (2.3)$$

De acuerdo con estas relaciones, se tiene parámetros para su caracterización.

Tabla II-1 Características de los parámetros adimensionales para las distintas teorías de ondas.

Tipo de onda	$\lambda = h/L$	$\alpha = H/h$	$\beta = H/L$
Pequeña amplitud	≥ 1	$\ll 1$	$\ll 1$
Ondas largas	$\ll 1$	–	–
Ondas largas lineal	–	$\alpha \ll \lambda^2$	–
Boussinesq	–	$\alpha \sim \lambda^2$	–
Onda larga no lineal	–	$\alpha \gg \lambda^2$	–

2.1.5 Descripción estadística del oleaje

A pesar de los intentos por estudiar y caracterizar el oleaje desde diferentes puntos de vista, es difícil representarlo por medio de un modelo tan sencillo como el de la onda, pues el oleaje es un fenómeno que no se logra reproducir en su totalidad fuera del mar. Además por su naturaleza variable hace imposible predecir a partir de una altura de ola, cuál será la siguiente altura de ola en ese mismo punto. Por lo tanto, la mejor manera de caracterizarlo es a través de modelos estadísticos, tratando al oleaje como un fenómeno no aleatorio.

2.1.5.1 El oleaje como proceso estocástico

Al ser el oleaje un proceso aleatorio, no tienen periodicidad con respecto al tiempo, se le puede considerar un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones, con diferentes amplitudes, frecuencias y fases, de tal forma que pueda ser estudiado como una superposición lineal de ondas armónicas simples, descritos como:

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos\left[\frac{\sigma_i^2}{g}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i\right] \quad (2.4)$$

Donde:

a Amplitud

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

Si para cualquiera n instantes t_1, t_2, \dots, t_n se conoce la función de distribución; entonces el proceso $\eta(t)$ puede considerarse definido.

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P[\eta(t_1) \leq x_1, \eta(t_2) \leq x_2, \dots, \eta(t_n) \leq x_n] \quad (2.5)$$

De la variable n dimensional $\eta(t_1, t_2, \dots, t_n)$.

Para simplificar el estudio del proceso estocástico $\eta(t)$ que constituye el oleaje (estudio estadístico) es necesario tomar en cuenta tres hipótesis estadísticas importantes, consistentes en considerar al oleaje como un proceso estacionario, ergódico y gaussiano.

2.1.5.2 El oleaje como un proceso estacionario

Cuando las características externas que influyen en un fenómeno físico permanecen constantes durante un periodo de tiempo, el fenómeno físico se puede considerar como estacionario, de tal forma que en ese

periodo exista un equilibrio de fuerzas generadoras y restauradoras que intervienen, manteniendo así una manifestación aproximadamente estacionaria. Este periodo de tiempo es conocido como estado de mar. El proceso $\eta(t)$ es estacionario cuando todas las funciones de distribución que lo definen permanecen constantes en cualquier intervalo de tiempo τ , esto es:

$$F_{t_1+\tau, t_2+\tau, \dots, t_n+\tau}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.6)$$

Donde el valor medio está dado por

$$\mu(k) = \mu \quad (2.7)$$

Y la función de correlación depende de la diferencia $\tau = 1 + \tau$ tal que

$$R_{\eta\eta}(k) = R_{\eta\eta} \quad (2.8)$$

Para fines prácticos es suficiente considerar al oleaje como un fenómeno débilmente estacionario.

2.1.5.3 El oleaje como proceso ergódico

El teorema de ergodicidad menciona:

“Si un proceso aleatorio $\eta(t_1)$ es estacionario y tanto $\mu_\eta(k)$ como $R_{\eta\eta}$ definidos en el proceso estacionario, no difieren cuando se calculan sobre diferentes muestras, se dice que el proceso es ergódico.”

De esta forma, la hipótesis de ergodicidad permite utilizar promedios temporales sobre una realización, en vez de utilizar los promedios espaciales de realizaciones.

2.1.6 Definición de estado de mar

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.

Así el oleaje puede considerarse formado por dos tipos de variaciones:

- Variación de periodo corto, donde la variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.
- Variación de periodo largo, la variación es lenta se da del orden de horas y en ella evoluciona el estado del mar.

En la práctica, cuando se registran variaciones de la superficie libre, se debe fijar un periodo de medición que sea lo suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionariedad y que además de que sea lo suficientemente largo para que al analizar la muestra se tenga un número representativo de olas para su tratamiento.

Dicho periodo se suele fijar en el intervalo de 10 a 20 minutos por cada hora. Los parámetros estadísticos obtenidos del estado de mar son por cada hora.

2.2 Análisis temporal

Respetando el orden cronológico en que ha evolucionado el uso de las diferentes metodologías para el análisis y caracterización de estados de mar, primero se explicará el análisis de señales en el dominio del tiempo, posteriormente se mostrará al análisis de las señales en el dominio de la frecuencia.

2.2.1 La muestra

Normalmente, la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística temporal de un estado de mar es un registro de oleaje medido por un aparato, usualmente un sensor de presión, ubicado en algún punto del mar. Con carácter general, es posible afirmar que estos registros tienen un aspecto similar al de la *Fig II.3*. En esta misma figura, se muestran los parámetros fundamentales que definen al oleaje, los cuales son la altura de ola, H , y su periodo asociado, T .

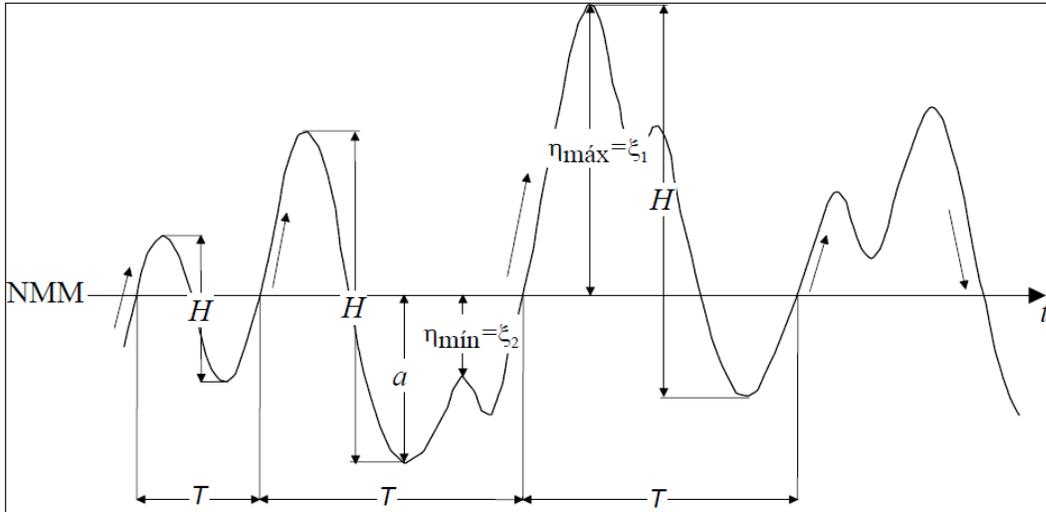


Fig. II-3 Parámetros que definen el oleaje

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

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

Antes de llevar a cabo la evaluación de los parámetros descritos, es necesario realizar algunas operaciones matemáticas que ayuden a evitar errores en el cálculo y que además no alteren la información estadística contenida en la muestra. Para ello se sugiere realizar la metodología descrita en la Tabla II.2, y en los apartados siguientes se detalla cada uno de los procesos involucrados.

Tabla II-2 Metodología para el análisis temporal del oleaje (Silva, 2005).

A. Corrección del nivel medio	Media Lineal Parabólica
B. Discretización de la señal (separa H y T)	<ul style="list-style-type: none"> • Método de pasos ascendentes por cero • Método de pasos descendentes por cero • Método de crestas • Método de valles
C. Estimación de cruces	
D. Evaluación de parámetros y velocidades orbitales	
E. Determinación de la dirección del oleaje	<ul style="list-style-type: none"> • Método gráfico con la velocidades

2.2.1.1 Corrección del nivel medio

Por lo general, los registros de oleaje contienen la influencia de ondas largas; de mareas, por ejemplo, y en algunos casos llega a ser muy importante su influencia sobre el nivel medio del registro. Por esta razón, es necesario realizar la corrección de dicho nivel y evitar una distorsión en el análisis estadístico.

En el dominio del tiempo, existen tres formas muy utilizadas para llevar a cabo la corrección del nivel medio (Goda, 2000). El procedimiento es el siguiente: se calcula el valor medio que puede ser de orden cero o promedio aritmético, de primer orden o una recta o de segundo orden o una parábola. En los dos últimos casos, los coeficientes de la recta o parábola se pueden obtener aplicando la técnica de mínimos cuadrados. Una vez calculado el valor medio se resta del valor original de cada uno de los datos, tal que:

$$\eta_{i_corregida} = \eta_{i_original} - \bar{\eta}_i \quad (2.9)$$

A continuación se presentan las ecuaciones para evaluar el nivel medio.

Media aritmética. Consiste en obtener la media aritmética de la superficie libre para todo el registro, para posteriormente restarla a cada dato; así, el valor medio se obtiene como

$$\bar{\eta}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \quad (2.10)$$

Siendo N el número de puntos de la muestra.

Es conveniente hacer mención de que este criterio es adecuado cuando los efectos de ondas largas no tienen gran influencia sobre el registro del oleaje.

Corrección lineal. A través del uso de la técnica de ajuste por mínimos cuadrados se obtiene una expresión que representa una variación lineal del nivel medio, la cual se utiliza posteriormente para eliminar el efecto de ondas de más largo periodo. La ecuación para realizar esta corrección es:

$$\bar{\eta}_n = A_0 + A_1 n \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.11)$$

Donde

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_1 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad (2.12)$$

$$N_r = \sum_{n=1}^N n^r, \quad Y_r = \sum_{n=1}^N n^r \eta_n \quad (2.13)$$

Este tipo de corrección será adecuado si se tiene un registro de oleaje superpuesto a una onda de marea semidiurna y dicho registro tiene una duración mucho menor que el periodo de la marea, y si se encuentra en la franja de ascenso, zona 1 de la Fig. II.4.

Corrección parabólica. Utilizando la técnica de mínimos cuadrados, la ecuación para realizar una corrección de tipo parabólico es:

$$\bar{\eta}_n = B_0 + B_1 n + B_2 n^2 \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.14)$$

Donde

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2 N_4 - N_3^2) + Y_1(N_2 N_3 - N_1 N_4) + Y_2(N_1 N_3 - N_2^2)],$$

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2 N_3 - N_1 N_4) + Y_1(N_0 N_4 - N_2^2) + Y_2(N_1 N_2 - N_0 N_3)],$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_1 N_3 - N_2^2) + Y_1(N_1 N_2 - N_0 N_3) + Y_2(N_0 N_2 - N_1^2)],$$

$$\Delta = N_0 N_2 N_4 + 2N_1 N_2 N_3 - N_2^3 - N_0 N_3^2 - N_1^2 N_4 \quad (2.15)$$

Este tipo de corrección se emplea en los casos en los que, además de que la carrera de marea es importante, la muestra de oleaje que se desea analizar tiene una influencia que se puede ajustar a una parábola. Por ejemplo, si se tiene un registro de oleaje ubicado en la zona 2 de la Fig II.4.

Si en un registro se observa la influencia de variaciones de periodo largo, del orden de minutos, para la determinación correcta del nivel medio se deberá aplicar un filtro espectral.

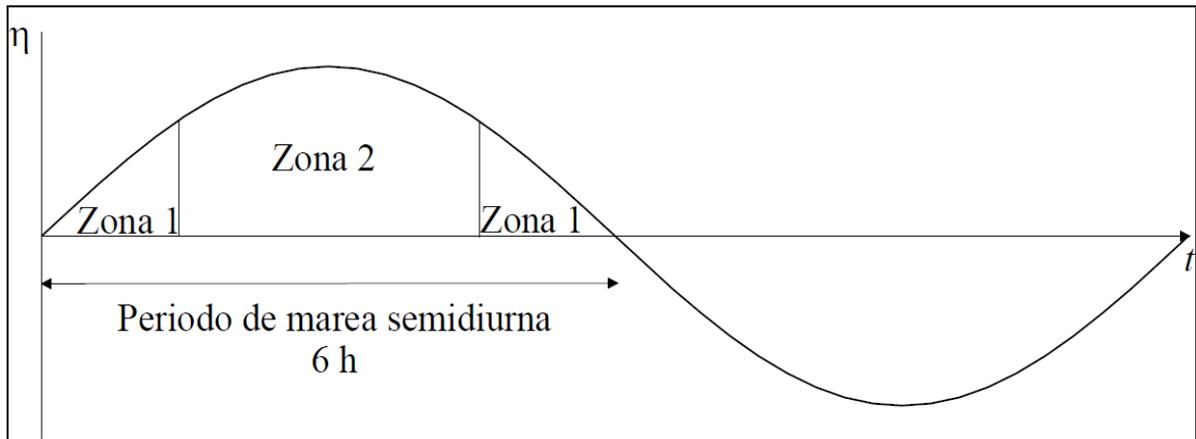


Fig. II-4 Marea semidiurna (Silva, 2005)

2.2.1.2 Caracterización de la señal

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

Método de pasos ascendentes por cero

Para la implementación de este método se determinan los pasos ascendentes a través del siguiente criterio:

$$\eta_i \eta_{i+1} < 0 \quad \text{y} \quad \eta_{i+1} > 0 \quad (2.16)$$

Donde η_i representa el i ésimo dato de la elevación de la superficie después de la corrección del nivel medio. El tiempo en el cual cruza el nivel medio se determina por medio de una interpolación lineal entre

el tiempo de muestreo de η_i y η_{i+1} . La diferencia temporal de este punto al siguiente paso ascendente define el periodo.

La condición para definir un máximo en el perfil es

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad y \quad \eta_i > \eta_{i+1} \quad (2.17)$$

Con el fin de eliminar el problema de subestimación del máximo real entre dos puntos discretos, deben ser estimados el tiempo y la elevación máxima después de ajustar la curva parabólica en función de tres puntos η_{i-1} , η_i , η_{i+1} . La ecuación para el ajuste parabólico se puede expresar como:

$$\eta_{m\acute{a}x} = C - \frac{B^2}{4A}, \quad y \quad t_{m\acute{a}x} = t_i - \frac{\Delta t B}{2A} \quad (2.18)$$

Donde

$$A = \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}), \quad B = \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}), \quad C = \eta_i \quad (2.19)$$

Para determinar la altura de ola, el punto más alto sobre la elevación de la superficie libre debe ser encontrado dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes. Una vez que se identificó este punto, se denota como η_i y entonces $\eta_{m\acute{a}x}$ es estimada por medio de las ecs 2.18 y 2.19. El punto más bajo o valle de la elevación, $\eta_{m\acute{i}n}$ es calculado por medio de un proceso similar, y la altura de ola es calculada como la resta del valor máximo menos el mínimo, $\eta_{m\acute{a}x}$ y $\eta_{m\acute{i}n}$.

En la *Fig. II.5* se presenta el procedimiento de forma gráfica.

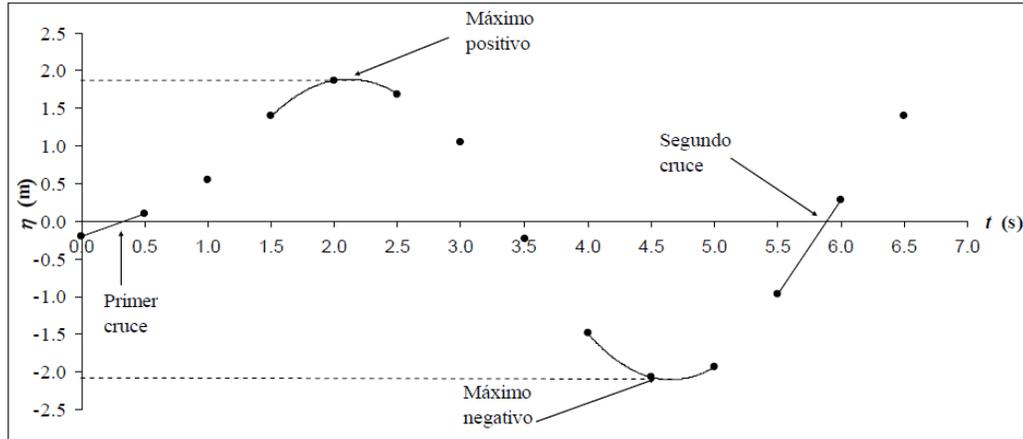


Fig. II-5 Discretización de la altura de ola utilizando el método de los pasos ascendentes (Silva, 2005)

Método de pasos descendentes por cero

Este método es análogo al de pasos ascendentes por cero, la única diferencia estriba en que ahora las olas se definen en el cambio de signo de positivo a negativo, como se puede ver en la Fig. II.6.

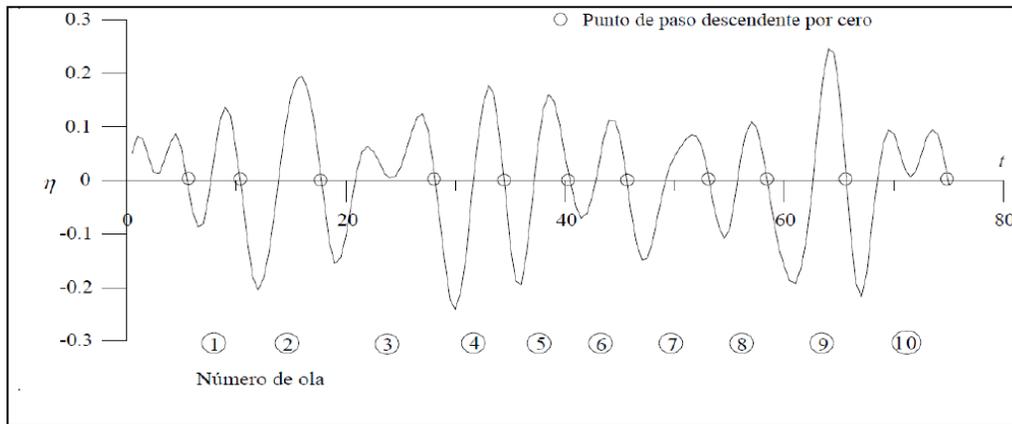


Fig. II-6 Definición de las olas por el método de pasos descendentes (Silva, 2005)

El criterio para definir cada ola es el siguiente:

$$\eta_i \eta_{i+1} < 0 \quad y \quad \eta_{i-1} > 0 \quad (2.20)$$

Método de distancia entre crestas

Debido a la asimetría natural que se presenta en el oleaje, es decir, a que no se tiene el mismo número de puntos del lado positivo que del negativo, el IAHR (1989) recomendó que una altura de ola se debe definir a partir de la distancia entre cresta y cresta de la serie, tal como se muestra en la *Fig. II.7*.

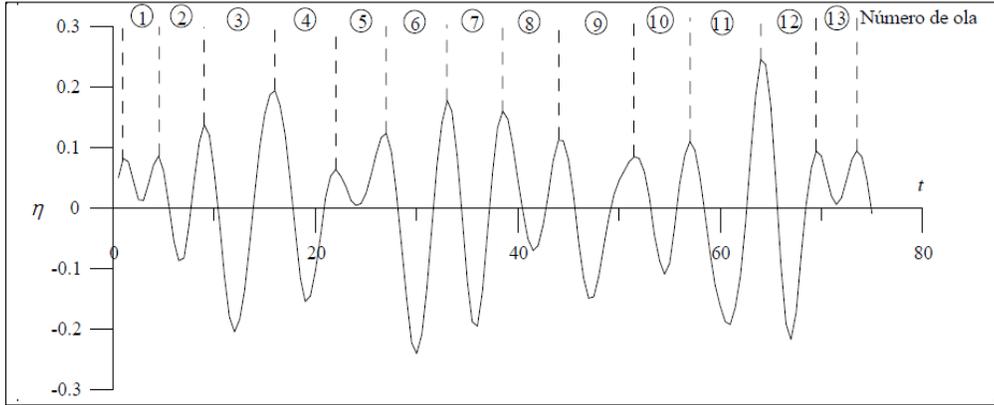


Fig. II-7 Definición de la olas por el método de distancias entre crestas (Silva, 2005)

Como resultado de este procedimiento, si se compara con el método de pasos ascendentes o descendentes por cero, se contabilizan un mayor número de olas. Sin embargo, tiene el inconveniente de agregar a la estadística olas pequeñas que suelen distorsionar los resultados.

Método de distancia entre valles

Este método es análogo al de la distancia entre crestas, la diferencia estriba en encontrar los mínimos para separar las olas, como se muestra en la *Fig. II.8*.

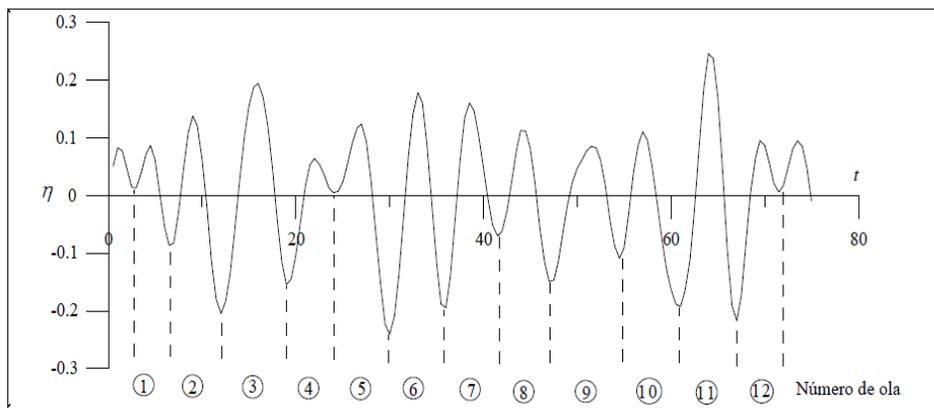


Fig. II-8 Separación entre olas por el método de valles (Silva, 2005)

2.2.1.3 Determinación de los parámetros del oleaje

Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son:

La variación del nivel medio del mar:

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (2.21)$$

Donde

η_i Elevación de la superficie libre del mar en el tiempo t_i

N Número de eventos o muestras.

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

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (2.22)$$

La altura media y el periodo medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (2.23)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (2.24)$$

Donde

N_0 Número de olas individuales de todo el registro

H_i Altura de ola

T_i Periodo de ola.

La altura cuadrática media, H_{rms} , queda definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (2.25)$$

La falta de oblicuidad o asimetría es evaluada a través de la siguiente expresión:

$$Swk = \frac{1}{N_0 \eta_{rms}^3} \sum_{i=1}^N \eta_i^3 \quad (2.26)$$

Para evaluar otros parámetros relevantes, como los estadísticos de orden, significativo, un décimo, etc, primero se ordenan, en función de la altura de ola, de mayor a menor los valores correspondientes de altura-periodo de ola (H, T), de manera que, por ejemplo:

- la altura de ola *un medio*, $H_{1/2}$, es el promedio del 50 % de las olas más altas
- la altura *un tercio o significativa*, $H_S = H_{1/3}$, está definida como la media aritmética del 33 % de las alturas de ola más altas
- la altura de ola *un décimo*, $H_{1/10}$, es el promedio del 10 % de las olas más altas
- la altura de ola *un centésimo*, $H_{1/100}$, es el promedio del 1 % de las olas más altas
- la altura de ola *un milésimo*, $H_{1/1000}$, es el promedio del 0.1 % de las olas más altas, etcétera.

Mientras que, para el caso de los periodos:

- el periodo de ola *un medio*, $T_{1/2}$, es el promedio de los periodos asociados al 50 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un tercio o significativa*, $T_{1/3} = T_S$, es el promedio de los periodos asociados al 33 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un décimo*, $T_{1/10}$, es el promedio de los periodos asociados al 10 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un centésimo*, $T_{1/100}$, es el promedio de los periodos asociados al 1 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un milésimo*, $T_{1/1000}$, es el promedio de los periodos asociados al 0.1 % de las olas más altas de un registro, etcétera.

En ocasiones, para evaluar las estadísticas de los periodos de ola se aplica el mismo criterio que para las alturas de ola. Sin embargo, en ingeniería y sobretodo en el proceso de diseño o caracterización, lo más conveniente es asociar las alturas con los periodos de ola.

2.2.1.4 Determinación de parámetros de velocidades orbitales

Es común que cuando los equipos de medición proporcionan datos de corriente se determine el valor máximo y la media para ambas componentes. A partir de las siguientes expresiones, se puede evaluar el valor medio:

$$\overline{Ux} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ux_i \quad (2.27)$$

$$\overline{Uy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Uy_i \quad (2.28)$$

2.2.1.5 Determinación de la dirección de oleaje

En la naturaleza, normalmente el oleaje no se propaga en una dirección específica, por el contrario, se distribuye a lo largo de varias direcciones, dependiendo de factores como la intensidad del viento, que el oleaje se encuentre en el área de generación o no, efectos de refracción, difracción, reflexión, por citar algunos de los más importantes. Para mediciones de oleaje cerca de la costa, fuera del área de generación, la dirección del oleaje tiende a asemejarse a la dirección del viento; sin embargo, para determinarla a través de las mediciones temporales, se utilizan los datos de velocidades orbitales asociadas al oleaje. La metodología para lograr esto se basa principalmente en utilizar los registros de Ux y Uy , junto con el dato de brújula para determinar la orientación del sistema de referencia del equipo.

En la *Fig. II.9*, se muestra un esquema tipo de la ubicación de un aparato de medición cerca de la costa, y se puede observar que los ejes que conforman el sistema de referencia del aparato están rotados con respecto al norte, este ángulo es el dato que normalmente se almacena en la brújula y se emplea para obtener la dirección del oleaje respecto al norte.

A continuación se presenta la metodología recomendada para determinar la dirección del oleaje a partir de datos temporales de velocidad:

1. Obtener las velocidades orbitales, U_x y U_y
2. Estimar los valores medios por registro
3. Dibujar ambas velocidades en el sistema de referencia del aparato XY
4. Rotar el sistema de referencia XY los grados que indica la brújula en el aparato
5. Determinar el sentido del oleaje de acuerdo con la posición de la costa.

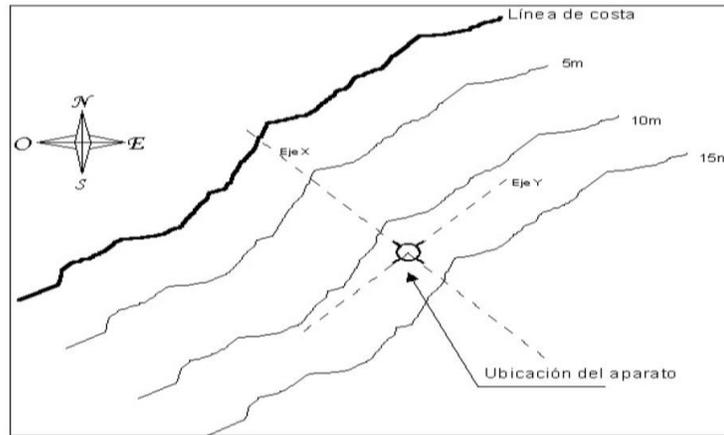


Fig. II-9 Ubicación de un aparato de medición en la costa (Silva, 2005)

2.2.1.6 Agrupamiento del oleaje

Estudios recientes han comprobado que la caracterización de un estado de mar puede ser más adecuada si se analizan factores como el agrupamiento de las olas en un registro de oleaje, pues a pesar de su naturaleza aleatoria, se sabe que las olas de mayor magnitud no se dan de forma individual sino que tienden a aparecer en grupos o paquetes de olas que poseen mayor energía. Como ejemplo, la Fig. II.10 muestra un perfil de oleaje que exhibe dicho agrupamiento.

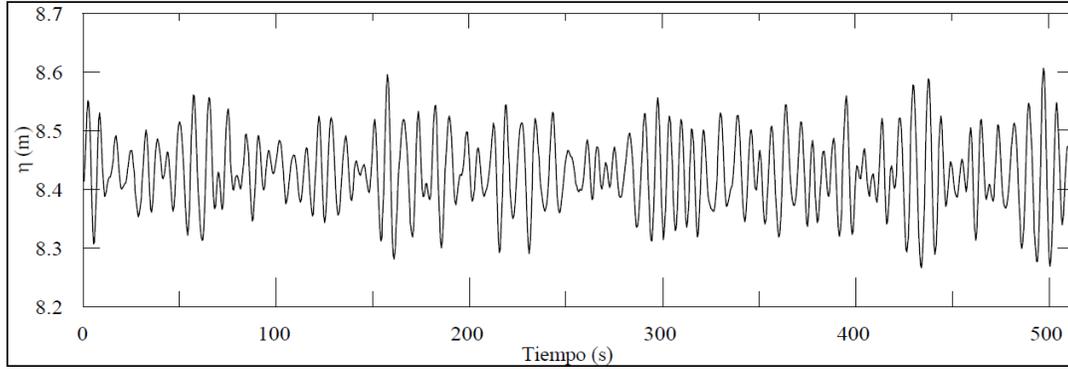


Fig. II-10 Ejemplo de un registro de oleaje con agrupamiento (Silva, 2005)

En 1987, Johnson *et al* (1978) mostraron que dicho fenómeno es muy relevante, pues se sabe que tiene influencia en:

- El número de olas necesarias para generar resonancia en las estructuras o para voltear embarcaciones
- La estabilidad de las piezas del manto de rompeolas y estructuras de protección costera.

Además, algunos autores, como Goda (2000), han hecho notar que un agrupamiento bien desarrollado de un campo de oleaje está regularmente asociado a la presencia de ondas de periodo largo.

El agrupamiento del oleaje puede ser cuantitativamente descrito si se agrupan conjuntos de olas que exceden un cierto valor umbral de altura de ola, H_c . A la sucesión de estas alturas de ola se les denomina *paquetes* de alturas de ola de magnitud importante y el número de olas que constituyen el conjunto se conoce como longitud del conjunto.

La Fig. II.11 es un esquema que define gráficamente un conjunto de olas, su longitud j_1 , y el valor umbral que los define. Como se observa, los paquetes se delimitan de forma muy parecida a como se define el periodo por medio del método de pasos ascendentes por cero.

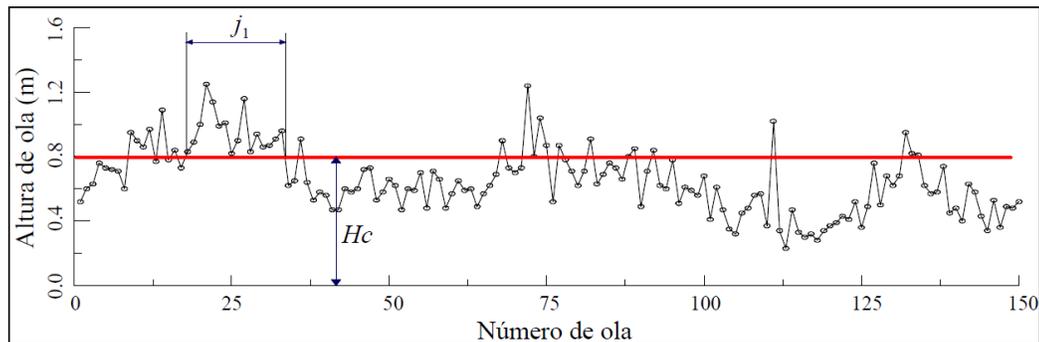


Fig. II-11 Definición de los paquetes de olas (Silva, 2005)

A manera de resumen, en la Fig. II.12 se presenta un diagrama de flujo para llevar a cabo la metodología necesaria para realizar el análisis temporal del oleaje.

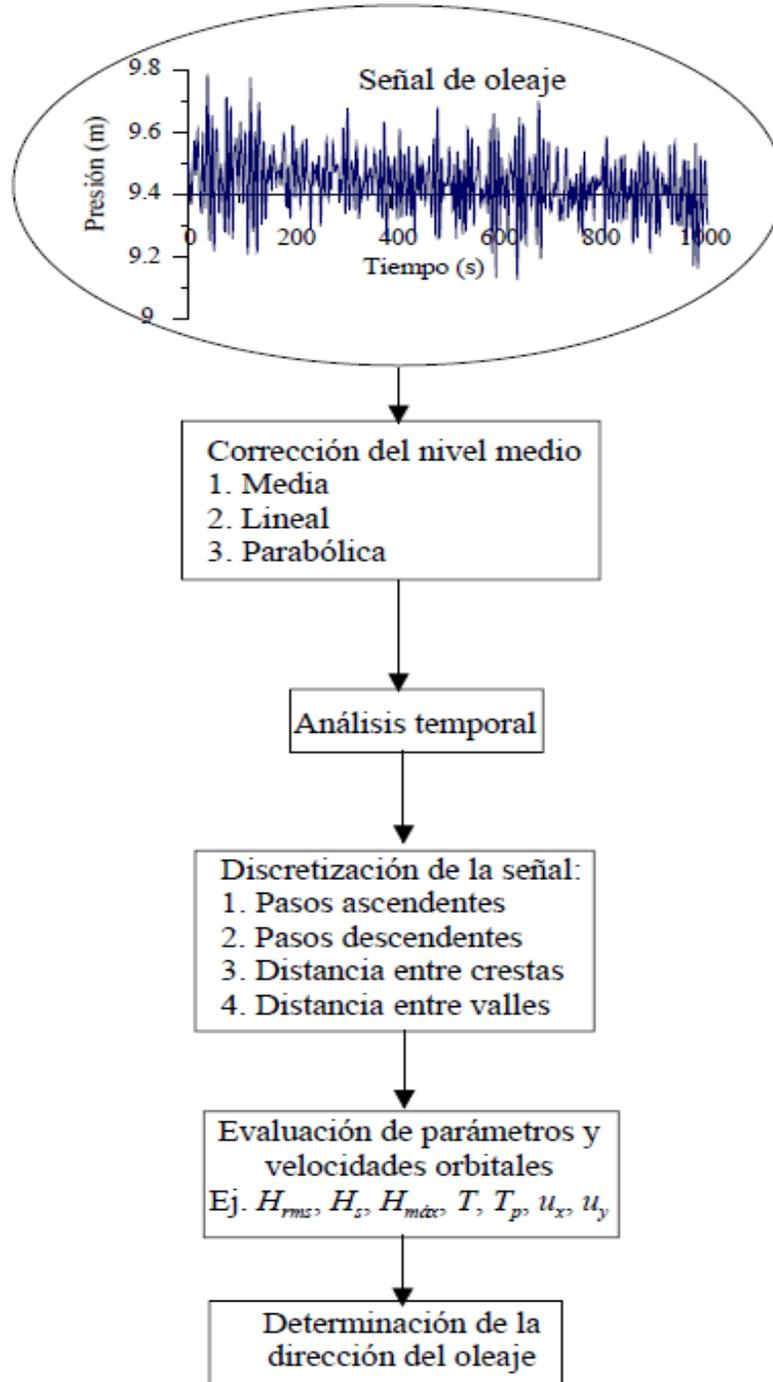


Fig. II-12 Diagrama de flujo para el análisis temporal de señales de oleaje sin considerar la evaluación del agrupamiento del oleaje (Silva, 2005)

2.3 Análisis espectral

2.3.1 Análisis espectral digital de series temporales

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

$$a_i^2 = 2S(f_i)\Delta f_i \quad (2.36)$$

Donde $S(f_i)$ es la densidad espectral de energía, y a_i es la amplitud de una onda cualquiera.

Si se asume válida la aplicación de la teoría lineal de Airy (1845), es posible afirmar que la energía contenida en la banda de frecuencia Δf está asociada a una onda, obtenida por unidad de superficie, que se define como:

$$\frac{1}{8}\rho g H^2 = \frac{1}{2}\rho g a^2 = \frac{1}{2}\gamma a^2 \quad (2.37)$$

Donde γ representa el peso específico del agua de mar.

Al sustituir la ec. 2.36 en la 2.37, la energía por unidad de superficie contenida en la banda de frecuencias Δf_i se expresa:

$$\frac{1}{2}\gamma [2S(f_i)\Delta f_i] \quad (2.38)$$

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

$$\frac{1}{2}\gamma \left[\sum_i 2S(f_i)\Delta f_i \right] \quad (2.39)$$

Si se representa la sumatoria como una integral, la energía total del oleaje por unidad de superficie es expresada por:

$$Energía = \gamma \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.40)$$

Se puede afirmar que el fenómeno queda perfectamente definido a través del espectro si se aceptan las hipótesis estadísticas que permiten estudiarlo. La precisión en el cálculo de la función de distribución espectral es muy importante para la validación del estudio a través de este tipo de análisis. La elección del tratamiento al cual será sometida la serie es, en consecuencia, bastante subjetiva y en cada caso debe estudiarse la resolución espectral y el nivel de confianza que se desea tener para la estimación de los parámetros. Para calcular los valores del espectro se utilizan las series de Fourier. En la *Tabla II.3* se presenta la metodología para realizar un análisis del oleaje.

Tabla II-3 Metodología para el análisis espectral del oleaje (Silva, 2005)

A) Corrección del nivel medio	<ul style="list-style-type: none"> • Media • Ec Lineal • Ec Parabólica • Filtro espectral
B) Aplicación de una función ventana	<ul style="list-style-type: none"> • Ventana tipo trapezoide • Ventana tipo coseno
C) Estimaciones de la componentes de Fourier	
D) Cálculo del espectro de energía	
E) Suavizado del espectro de energía	
F) Parámetros espectrales	
G) Estimación de la dirección del oleaje	<ul style="list-style-type: none"> • Espectro direccional

Para realizar un análisis espectral adecuado es conveniente que los registros contengan al menos 100 olas y que el intervalo de muestreo sea de una décima a una vigésima parte del periodo significativo. Una vez seleccionado el intervalo de muestreo, Δt , la frecuencia máxima, conocida como frecuencia de Nyquist, para la cual el espectro es estimado se determina por la expresión:

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad (2.41)$$

2.3.2 Estado de saturación

La superficie del océano se encuentra siempre sometida a la acción del viento, por tanto es posible pensar que el oleaje debe aprovechar la energía de manera infinita. Si se acepta lo anterior, parecería que el fenómeno crecería de manera indefinida. Sin embargo, se sabe que el crecimiento de las olas bajo la influencia del viento no es infinito, la energía proporcionada por el viento está balanceada por la

disipación de energía y por las interacciones del oleaje, el cual transfiere energía de una frecuencia dada a otras. En aguas profundas, la disipación toma la forma de espuma (*white caps*) de menor escala que la longitud de onda. Dicho fenómeno sucede cuando dos crestas son superpuestas o cuando ondas más cortas pasan sobre ondas más largas.

El crecimiento del oleaje está limitado también por la formación de olas capilares, las cuales obtienen energía de las crestas de ondas primarias con gran curvatura (Phillips, 1977). Es conveniente mencionar que la capa superficial de la corriente producida por el esfuerzo cortante del viento incrementa la rotura de las olas, produciendo una gran reducción de su amplitud.

La presencia de cualquiera de los mecanismos anteriormente descritos es un indicador de que se ha llegado al estado de saturación de los componentes del oleaje, donde se produce un balance entre la energía suministrada por el viento y las pérdidas debidas a la disipación; dicho estado se caracteriza porque existe un límite superior para la densidad de la energía espectral. Debido a esto, el estado de saturación debe ser exclusivamente descrito por los parámetros físicos locales que gobiernan la configuración extrema de las olas; por ejemplo, la aceleración de la gravedad (g), la velocidad del viento sobre la superficie libre (U), de la dimensión del fetch (x) y de la frecuencia local (f).

2.3.3 Modelos espectrales de un estado de mar

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

Un espectro de oleaje puede ser generado sintéticamente por medio de los parámetros que caracterizan su desarrollo. Los modelos espectrales están basados generalmente en uno o más parámetros. A continuación se describen los modelos más comunes para este propósito.

2.3.3.1 Modelo de Phillips

Phillips (1958), al estudiar la variación de la energía del oleaje en función de la velocidad del viento, observó dicho estado de saturación y determinó que el espectro puede ser definido a partir de los siguientes parámetros: la frecuencia, la gravedad, la velocidad del viento y el fetch. Sin embargo, para

tomar en consideración el efecto de saturación en el espectro de energía hizo depender su modelo de dos parámetros:

- la velocidad al cortante del viento
- el fetch

Éste es expresado por:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} \quad (2.42)$$

Donde:

g es la aceleración de la gravedad

α depende del fetch y del viento.

2.3.3.2 Espectro de Neumann

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

$$S(f) = 1.466 H_{m_0}^2 \frac{f_p^5}{f^6} \exp \left[-3 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2} \right] \quad (2.43)$$

Donde H_{m_0} , es la altura de ola del momento de orden cero, la cual es aproximadamente igual a la altura de ola significativa, $H_s \approx H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}$, es la frecuencia de pico espectral que puede ser obtenida a través de la siguiente expresión:

$$f_p = \sqrt{\frac{1}{6} \frac{g}{\pi U_{10}}} \quad (2.44)$$

2.3.3.3 Espectro Pierson-Moskowitz

En 1964, Pierson y Moskowitz estudiaron los espectros de oleaje del Atlántico Norte y crearon una expresión que representa estados de mar completamente desarrollados generados por el viento.

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp[-0.24(2\pi U_{19.5} f/g)^{-4}] \quad (2.45)$$

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

Si se emplea la frecuencia de pico espectral, puede ser representado por

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \quad (2.46)$$

En este caso la frecuencia de pico espectral f_p , está dada por

$$f_p = \frac{0.0805g}{\pi H_s} \quad (2.47)$$

Dado que normalmente la velocidad del viento se reporta sobre una altura de 10 m sobre el nivel del mar, la siguiente relación puede ser de mucha utilidad:

$$U_w = U_{10}(y/10)^{1/7} \quad (2.48)$$

Donde

y es la distancia vertical sobre el nivel medio del mar (snmm)

U_{10} es la velocidad a una altura de 10 msnmm.

2.3.3.4 Espectro de Bretschneider

Bretschneider (1959), realizó un modelo matemático que describe el comportamiento unidireccional de la superficie del mar con olas irregulares en aguas profundas:

$$S(f) = 0.1687 H_s^2 \frac{f_s^4}{f^5} \exp \left[-0.675 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4 \right] \quad (2.49)$$

Donde $f_s = 1/T_s$

De dicho modelo es posible deducir que

$$T_s = 0.946 T_p \quad (2.50)$$

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

2.3.3.5 Espectro de Kitaigorodskii-Toba

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

$$S(f) = \left(\frac{g^2}{f^5}\right) F(\bar{f}, \bar{x}) \quad (2.51)$$

Donde

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

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

u_* = velocidad de fricción del viento (cortante)

x = fetch

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

$$S(f) = \beta u_* g f^{-4} \quad (2.52)$$

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_a} \quad (2.53)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire y τ_0 es la fricción tangencial del viento.

A partir de datos de laboratorio, se determinó que $\beta = 0.02$; por su parte, Wu (1969, 1980 y 1982) realizó una serie de ensayos para modelar las características sobre una superficie del mar y obtuvo la velocidad del cortante como una función de la velocidad media a 10 m de altura:

$$u_* = \sqrt{C_{10}} \bar{U}_{10} \quad (2.54)$$

Donde C_{10} es el coeficiente de superficie de arrastre evaluado con una velocidad del viento a 10 m de altura (sus unidades están dadas en m/s),

$$C_{10} = (0.8 + 0.065\bar{U}_{10})x10^3 \quad (2.55)$$

La evaluación del viento a cualquier altura puede hacerse a través de la siguiente relación

$$\bar{U}_z = \bar{U}_{10} + u_* \ln\left(\frac{z}{10}\right) \quad (2.56)$$

2.3.3.6 Espectro ISSC

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

$$S(f) = 0.1107H_s^2 \frac{\bar{f}^4}{f^5} \left[-0.4427 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4 \right] \quad (2.57)$$

La relación entre la frecuencia de pico, f_p , y la frecuencia media f para el espectro ISSC es:

$$\bar{f} = 1.296f_p \quad (2.58)$$

2.3.3.7 Espectro de Krylov

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

$$S(f) = \frac{\pi m_0}{\bar{f}_0} \left(\frac{f}{\bar{f}_0} \right)^{-7} e^{\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{f}{\bar{f}_0} \right)^{-4} \right)} \quad (2.59)$$

Donde

$$\bar{f}_0 = \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{\sqrt{m_0/m_2}} \quad (2.60)$$

2.3.3.8 Espectro ITTC

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

$$S(f) = 1.272m_0f_z^4f^{-5} \exp \left[-0.318 \left(\frac{f_z}{f} \right)^4 \right] \quad (2.61)$$

2.3.3.9 Espectro JONSWAP

Hasselmann *et al* (1973) propusieron el espectro JONSWAP, el cual fue generado con datos tomados a finales de la década de los sesenta por un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP, por sus siglas en inglés (*Joint North Sea Wave Project*).

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

$$S_J(f) = S_P(f)\phi_{PM} \left(\frac{f}{f_P} \right) \phi_J(f, f_P, \gamma, \sigma) \quad (2.62)$$

$S_P(f)$ Es la ecuación de Phillips dada por la ec 2.42

$\phi_{PM}(f/f_P)$ Es la función de forma de Pierson-Moskowitz

$$\phi_{PM} \left(\frac{f}{f_P} \right) = e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_P} \right)^{-4}} \quad (2.63)$$

ϕ_J es el factor de forma del espectro JONSWAP

$$\phi_J = \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_P)^2}{2\sigma^2 f_P^2} \right]} \quad (2.64)$$

Donde

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_A & f_P \leq f \\ \sigma_B & f_P > f \end{pmatrix} \quad (2.65)$$

Sustituyendo

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]} \quad (2.66)$$

2.3.3.10 Espectro de Ochi-Hubble

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

$$S(f) = \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^2 \frac{\left[4\lambda_j (2\pi f_{0j})^4\right]^{\lambda_j}}{\Gamma\lambda_j} \frac{H_{s_j}^2}{(2\pi f)^{4\lambda_j+1}} \exp\left[-\left(\frac{4\lambda_j+1}{4}\right)\left(\frac{f_{0j}}{f}\right)^4\right] \quad (2.67)$$

donde H_{s1} , f_{01} y λ_1 representan la altura de ola significativa, la frecuencia modal y el factor de forma para las componentes de baja frecuencia, mientras que H_{s2} , f_{02} y λ_2 corresponden a las componentes de alta frecuencia. Por tanto, λ_j , es el llamado parámetro de forma espectral ya que si $\lambda_1 = 1$ y $\lambda_2 = 0$, se obtiene un espectro de tipo Pierson-Moskowitz.

2.3.3.11 Espectro TMA

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

$$\phi(\omega_H) = \tanh^2(kh) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \quad (2.68)$$

Adaptando el factor de transformación inicialmente introducido para aguas poco profundas, el espectro queda definido por

$$S_{TMA} = S_J \phi(\omega_H) \quad (2.69)$$

Los diversos efectos propios de aguas someras, tales como la fricción de fondo, rompiente y refracción se incluyen dentro del parámetro ϕ_k Goda recomienda usar este espectro con reservas, ya que fue formulado para oleaje de crecimiento en el área de generación.

2.4 Teoría de generación de oleaje en laboratorio

El uso de modelos físicos en la ingeniería costera se vería seriamente limitado si no se hubiera podido crear oleaje en modelos a pequeña escala que exhibieran muchas de las características de las olas en la naturaleza. Aunque el viento se puede utilizar en un pequeño tanque o canal para generar olas a diferentes escalas, el tanque debe de ser cerrado y de longitud suficiente para que el viento genere la condición deseada.

Las primeras máquinas generadoras de olas, generaban olas uniformes moviendo la pala de generación en un movimiento sinusoidal con una amplitud y período de oscilación dado. Aunque se trataba de una aproximación muy simplificada de las olas del mundo real, estas sencillas olas ajustaban razonablemente bien a la teoría de las ondas lineales, los investigadores pioneros utilizaron esta capacidad de laboratorio para hacer unos grandes avances en la ingeniería costera.

Pronto los motores impulsores de las palas de generación fueron reemplazados por servo-sistemas hidráulicos que dieron más control sobre la pala de generación. Este avance permitió la simulación bidimensional de oleaje irregular y sinusoidal y olas solitarias en canales de oleaje.

Muchos aspectos mecánicos de las máquinas, junto con la teoría lineal de generación de oleaje, se presenta en una serie de documentos franceses originalmente publicada en *La Houille Blanche*. Una cita común para estos artículos es la traducción en inglés que hace referencia colectivamente a los artículos de Biesel y Suquet (1954). Funke y Mansard (1987) presentaron una interesante revisión a fondo de la historia de la generación de ondas de laboratorio.

Se tratan numerosos temas relacionados con la generación de olas de laboratorio. La teoría de generación de oleaje de primer orden en dos dimensiones se presenta con una buena cantidad de detalle para las olas regulares y una variedad de configuraciones de generación de oleaje.

También incluye:

- Generación de ondas no lineales Stokes, olas cnoidales, y olas solitarias

- Generación de onda transitoria
- Síntesis y generación de ondas irregulares de dos dimensiones trenes
- Las correcciones para bidimensional de segundo orden inferior y armónicos más altos
- Generación de olas irregulares, oblicuas y multidireccionales
- Temas varios sobre la generación de ondas de laboratorio

2.4.1 Ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno

Una teoría general para la generación de onda mecánica fue presentada por Havelock (1929), y ésta es generalmente considerada como el fundamento de la teoría de generación de oleaje. Investigaciones teóricas y aspectos prácticos de generadores de tipo pistón y tipo aleta fueron descritos por Biesel y Suquet (1954).

El movimiento de un fluido no viscoso, irrotacional de un canal de oleaje se describe por la ecuación de Laplace en dos dimensiones junto con las condiciones de contorno adecuadas. En el plano cartesiano bidimensional, sistema representado en la *figura II.13*, la ecuación de Laplace en términos del potencial de velocidad es

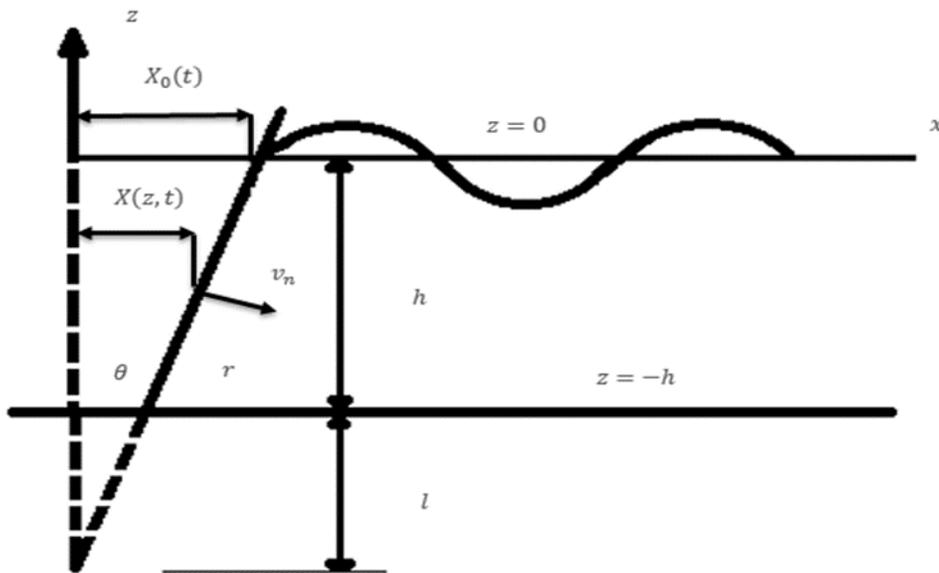


Fig. II-13 Definición de canal de dos dimensiones

Ecuación de Laplace (en el dominio de líquidos)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.70)$$

Condición de fondo (en $z = -h$)

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2.71)$$

Condición cinemática de superficie libre (en $z = \eta$)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2.72)$$

Condición dinámica de superficie libre (al $z = \eta$)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (2.73)$$

Condición en la pala de generación (en $x = X(z, t)$)

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left(1 + \frac{z}{h+l} \right) \frac{\partial X_0(t)}{\partial t} \quad (2.74)$$

Cuando $l = 0$, la ecuación 2.74 representa la condición de contorno para una pala de generación tipo aleta con bisagras en la parte inferior del canal de oleaje; y cuando $l \rightarrow \infty$, la ecuación representa la condición límite para una pala de generación tipo pistón.

Cuando $x \rightarrow \infty$ la solución a la generación de oleaje debe convertirse en la de una onda progresiva que se mueve en la dirección positiva x .

El problema de la generación de oleaje dado por las ecuaciones. 2.70, 2.71, 2.72 2.73 y 2.74 puede resolverse utilizando técnicas de perturbación estándar. Esto da lugar a conjuntos de ecuaciones para diferentes órdenes del parámetro de perturbación. Lo primero es asumir el potencial de velocidad,

superficie libre, ángulo de pala de generación, y el fondo horizontal puede ser representado por series de potencias.

Las ecuaciones y condiciones de contorno que se utilizarán en la solución de primer y segundo orden en generación de olas en la pala generadora en dos dimensiones que se muestra en la *Figura II.12* se resumen en la *Tabla II-4*. Las condiciones de contorno para superficie libre dinámica se han combinado con las condiciones de contorno para superficie libre cinemática a fin de eliminar derivadas parciales de η para primer y según orden (Flick y Guza 1980).

Tabla II-4 : Ecuaciones bidimensionales para generación de olas

Ecuaciones de primer orden		
$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = 0$	En fluidos	(2.75)
$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0$	$z = -h$	(2.76)
$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_1}{\partial z}$	$z = 0$	(2.77//2.78)
$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = f(z) \frac{dX_{01}}{dt}$	$x = 0$	(2.79)
$f(z) = \left(1 + \frac{z}{h+l}\right)$		(2.80)
Ecuaciones de segundo orden		
$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial z^2} = 0$	En fluidos	(2.81)
$\frac{\partial \phi_2}{\partial z} = 0$	$z = -h$	(2.82)
$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_2}{\partial z} = -\eta_1 \left(g \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^3 \phi_1}{\partial z \partial t^2} \right) - 2 \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x \partial t} + \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z \partial t} \right)$	$z = 0$	(2.83/2.84)
$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} = f(z) \frac{dX_{02}}{dt} - X_{01} \left[f(z) \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} - \frac{1}{l+h} \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right]$	$x = 0$	(2.85)
$f(z) = \left(1 + \frac{z}{h+l}\right)$		(2.80)

2.4.2 Generación de oleaje de primer orden

La solución del problema de generación de olas de primer orden, especificado por las ecuaciones en la Tabla II.4, se obtiene suponiendo que el potencial de velocidad puede ser representado por tres funciones de tal manera que:

$$\phi_1(x, z, t) = X(x)Y(y)T(t) \quad (2.86)$$

Esto permite que la ecuación de Laplace pueda ser separada en diferencial ordinaria. En el sentido más general, la función potencial debe incluir todas las soluciones posibles, así que sumar las soluciones que surgen cuando la "constante de separación" es real, imaginario, y cero. De acuerdo con Dean y Dalrymple (1984), el potencial de velocidad en general puede formularse como

$$\phi_1(x, z, t) = \phi_{k_1} + \phi_{k_2} + \phi_{k_3} \quad (2.87)$$

Donde

Caso 1: $k_1^2 > 1$

$$\phi_{k_1} = [A_1 \cos(k_1 x + \alpha_1)](C_1 e^{k_1 z} + D_1 e^{-k_1 z})T_1(t) \quad (2.88)$$

Caso 2: $k_2 = 0$

$$\phi_{k_2} = (A_2 x + B_2)(C_2 z + D_2)T_2(t) \quad (2.89)$$

Caso 3: $k_3^2 = < 1$

$$\phi_{k_3} = (A_3 e^{|k_3| x} + B_3 e^{-|k_3| x})(C_3 \cos|k_3| z + D_3 \sin|k_3| z)T_3(t) \quad (2.90)$$

El potencial de velocidad combinado se puede representar por

$$\phi_1(x, z, t) = A \cosh[k_1(h + z)] \sin(k_1 x - \sigma t) + \cos(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_{3n} x} \cos[k_{3n}(z + h)] \quad (2.91)$$

El primer término de la ecuación 2.91 es un proceso progresivo de olas que se propagan en la dirección positiva de x , y el segundo término es una serie de ondas estacionarias en decaimiento exponencial conforme se alejan de la pala. Estas ondas estacionarias son conocidas como "perturbaciones locales", y se deben a que la pala de generación no sigue exactamente la velocidad de movimiento progresivo bajo una ola de primer orden. Dean y Dalrymple (1984) estimaron que la amplitud de la primera ola (que es la más pronunciada) disminuirá un 4 % a una distancia $x = 2h$ de la pala de generación, y esto disminuirá a un 1 % en $x = 3h$.

Para la generación de oleaje de primer orden se sustituye ϕ_1 en la condición límite de pala de generación dada por la ecuación 2.79 y evaluar el resultado en $x = 0$. Suponiendo que la pala de generación es conducida en un movimiento sinusoidal correspondiente:

$$X_{01} = \frac{S_0}{2} \sin(\sigma t) \quad (2.92)$$

donde S_0 es la carrera de tabla de olas en $z = 0$, y así $S_0/2$ es la amplitud del movimiento, en ese caso:

$$\frac{dX_{01}}{dt} = \frac{\sigma S_0}{2} \cos(\sigma t) \quad (2.93)$$

y

$$Ak_1 \cosh[k_1(h+z)] - \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_{3n} \cos[k_{3n}(z+h)] = f(z) \frac{\sigma S_0}{2} \quad (2.94)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación 2.94 por $\cosh[k_1(h+z)]$, integrando la ecuación entre:

$z = -h$ y $z = 0$, queda

$$A = \frac{\sigma S_0 \int_{-h}^0 f(z) \cosh[k_1(h+z)] dz}{2k_1 \int_{-h}^0 \cosh^2[k_1(h+z)] dz} \quad (2.95)$$

Todos los términos de suma se han eliminado debido a la ortogonalidad dadas por la teoría de Sturm-Liouville (Dean y Dalrymple 1984).

Del mismo modo, multiplicando la ecuación 2.94 por $\cos[k_3(h+z)]$ y la realización de la integración, da como resultado que el término que representa el proceso progresivo de olas en dirección x tienda a cero.

$$C_n = -\frac{\sigma S_0}{2k_{3n}} \frac{\int_{-h}^0 f(z) \cos[k_{3n}(h+z)] dz}{\int_{-h}^0 \cos^2[k_{3n}(h+z)] dz} \quad (2.96)$$

El último paso es la formulación de la solución para la generación de primer orden. La elevación de la superficie del mar en el tanque de oleaje se encuentra sustituyendo el potencial de velocidad dada por la ec. 2.91 en la condición dinámica de superficie libre dado por la ec. 2.78 y evaluar la condición en $z = 0$, es decir,

$$\eta_1(x, t) = \frac{\sigma A}{g} \cosh(k_1 h) \cos(k_1 x - \sigma t) + \sin(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma C_n}{g} e^{-k_{3n} x} \cos(k_{3n} h) \quad (2.97)$$

Lejos de la pala de generación todos los términos de suma desaparecerán, y de primer orden, la superficie del mar se representa como la ola progresista solución

$$\eta_1(x, t) = \frac{H}{2} \cos(k_1 x - \sigma t) \quad (2.98)$$

Donde H es la altura de la ola. Igualando las ecuaciones 2.97 y 2.98 y el descarte los términos de la serie da la relación básica de generación de oleaje

$$H = \frac{2\sigma A}{g} \cosh(k_1 h) \quad (2.99)$$

Donde A está dada por la ecuación 2.95. La solución para un tipo específico de generador de oleaje es encontrado sustituyendo $f(z)$ en la ecuación 2.95 y resolviendo las integrales.

2.4.2.1 Generador de oleaje tipo pistón y tipo aleta

Para la pala de generación, en particular que se muestra en la *Figura II.12*, se ha especificado su geometría por la ec. 2.80, los coeficientes A y C_n , se puede obtener (después de algún álgebra) como

$$A = \frac{2\sigma S_0}{k(\sinh(2kh) + 2kh)} \left[\sinh(kh) + \frac{(1 - \cosh(kh))}{k(h+l)} \right] \quad (2.100)$$

y

$$C_n = -\frac{2\sigma S_0}{k_n(\sin(2k_n h) + 2k_n h)} \left[\sin(k_n h) + \frac{(\cos(k_n h) - 1)}{k_n(h+l)} \right] \quad (2.101)$$

Donde los subíndices numéricos sobre los números de onda, k_1 y k_3 , han sido retirados por conveniencia.

Relación de desplazamiento de la pala a la altura de ola, sustituyendo la ecuación 2.100 en la ecuación 2.99 y haciendo uso de la relación de dispersión. La solución general para generación de oleaje de primer orden se expresa

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left[\sinh kh + \frac{(l - \cosh kh)}{k(h+l)} \right] \quad (2.102)$$

Para el caso especial cuando $l \rightarrow \infty$, el segundo término de la ecuación 2.102 se desvanece, y el movimiento de la pala de generación es la de un pistón, es decir,

Solución para generador de oleaje de primer orden tipo pistón:

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} \quad o \quad \frac{H}{S_0} = \frac{2(\cos 2kh - 1)}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (2.103)$$

El caso especial de una pala de olas con bisagras en la parte inferior del tanque de oleaje es encontrado de la ecuación 2.102 cuando $l = 0$, es decir, solución para generador de oleaje de primer orden tipo aleta

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left[\sinh kh + \frac{(1 - \cosh kh)}{kh} \right] \quad (2.104)$$

III. Dinámica de los arrecifes artificiales

3.1 Perturbación del oleaje por un obstáculo sumergido

3.1.1 Arrecifes artificiales

Los arrecifes artificiales son estructuras permeables, normalmente hechas a base de rocas naturales o piezas artificiales de concreto, paralelas a la costa coronadas por debajo del nivel medio del mar. Pueden ser construidas para que trabajen individualmente o en serie y, actualmente, son una de las soluciones más empleadas por su bajo impacto en el paisaje costero; además de tener el valor añadido de incentivar el reforzamiento de hábitats. Para su diseño deben considerarse los siguientes aspectos: el costo es moderado y, en ocasiones, se requiere mantenimiento de la línea de playa; dependiendo de su ubicación, en ocasiones pueden incentivar zonas de erosión; sin embargo, si están bien diseñadas generan una zona de abrigo adecuada; debido a su sumergencia relativa, pueden ser peligrosas para la navegación y en condiciones de tormenta y marea de tormenta asociada, su efectividad disminuye considerablemente.

3.1.2 Diques sumergidos

Los diques sumergidos son estructuras que se construyen con el objeto de disipar una parte de la energía que contiene el oleaje, estas estructuras se encuentran coronadas por debajo del nivel medio del mar con la finalidad de reducir el impacto visual negativo, son un ejemplo de arrecifes artificiales.

Los diques sumergidos se encuentran separados de la línea de costa, lo cual favorece el desarrollo turístico, deportivo y de pesca de la zona. Además de esto, la ubicación de este tipo de diques puede volverse habitable para algunas especies de la zona, contribuyendo de esta forma al medio ambiente del lugar.

Debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar, una parte de la energía se transmite hacia la zona de protección, este proceso se realiza mediante el rebase de la estructura. En la mayoría de los casos estos diques son construidos con elementos permeables, como pueden ser rocas o algún tipo de elemento prefabricado, aunque la ubicación de los elementos y el constante movimiento de arena provocan que en un determinado periodo de tiempo estas estructuras se encuentren saturadas de arena provocando así la reducción de su porosidad original.

La disipación de energía inducida por los diques sumergidos, provoca una estabilidad en la línea de costa que puede permitir un incremento de playa seca de forma natural o con un relleno artificial, favoreciendo así un mejor potencial en la zona. Esta nueva estabilidad de la línea de costa y la estabilidad del relleno estarán en función del comportamiento adecuado del dique sumergido.

Las estructuras sumergidas, ya sean naturales o artificiales, condicionan fuertemente el comportamiento de las playas. El cambio del comportamiento de un perfil de playa debido a la presencia de estructuras sumergidas o un relleno artificial está en función de varios parámetros.

Las principales ventajas que ofrecen estos diques respecto a los convencionales son las siguientes:

- Al tener un francobordo menor dejan pasar una cierta cantidad del oleaje, lo cual supone un menor impacto en la morfología de la costa. Dicho impacto puede irse paliando con el empleo cíclico de alimentaciones artificiales.
- Menores costes constructivos, tanto en lo que se refiere al empleo de mano de obra como al del propio material necesario para su ejecución.
- No provocan un impacto visual tan acusado como el de los diques convencionales emergidos.

3.1.3 Procesos de transformación de oleaje

El oleaje se considera como una perturbación dentro de un medio continuo, esta perturbación como ya se mencionó es generada por el viento, sismos entre otras causas.

Cuando el oleaje se propaga de aguas profundas hacia aguas someras sufre cambios en su comportamiento dentro de los más notables se encuentran, el cambio de altura, la disminución de la longitud de onda, y en cambio de dirección. Estos cambios son originados por la variación de la profundidad, en otras palabras la afectación del fondo al comportamiento de la ola; el fondo provoca una deformación en las velocidades orbitales de la onda, originando una variación en la forma de la ola lo cual da como resultado la condición de rompiente, más adelante se explicará mejor este concepto, además del fondo, la presencia de obstáculos como estructuras de protección costera también provocan las variaciones del oleaje.

Someramiento

Cuando el oleaje se propaga desde aguas profundas hacia aguas someras, se produce un efecto debido a la presencia del fondo marino por el que la velocidad a la que se transporta se ve modificada. Ante la

ausencia de mecanismos de disipación, la celeridad y la longitud de las ondas decrecen a medida que la profundidad se reduce, mientras que el período permanece constante. Dado que el flujo de energía se conserva y la celeridad de grupo disminuye, la densidad de energía por área superficial unitaria tiene que aumentar.

Como consecuencia, el oleaje experimenta un incremento gradual de su altura; este proceso se conoce como someramiento del oleaje (*Fig. III-1*).

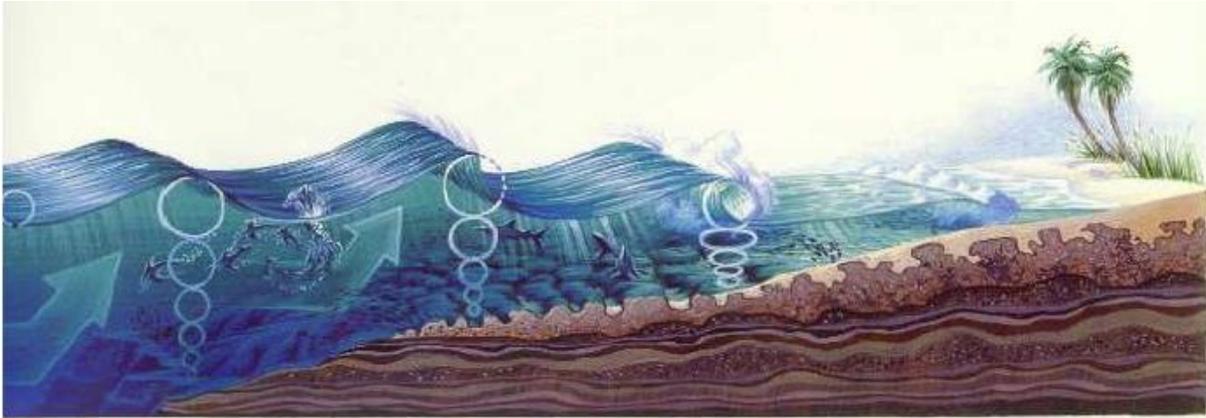


Fig. III-1 Someramiento

Refracción

El proceso de refracción se presenta cuando el oleaje viaja de aguas profundas a profundidades más someras con un ángulo respecto de la orientación de la costa. Este fenómeno ocasiona que el frente del oleaje tienda a alinearse con la orientación de los contornos batimétricos del fondo a medida que la profundidad decrece (*Fig. III-2*).



Fig. III-2 Refracción

Difracción

En hidrodinámica el proceso de difracción se presenta cuando, en su propagación, el oleaje se encuentra con un obstáculo sumergido o emergido, ya que parte de su energía se transferirá lateralmente de zonas más energéticas hacia la zona protegida con menor energía.

La difracción se define como el cambio en la trayectoria del oleaje debido a un obstáculo, provocando así cambio en dirección y magnitud de la ola. El proceso se entiende como una cesión lateral de energía debida al obstáculo que provoca un giro en la trayectoria de los frentes de onda, como se muestra en la *Fig.III-3*.

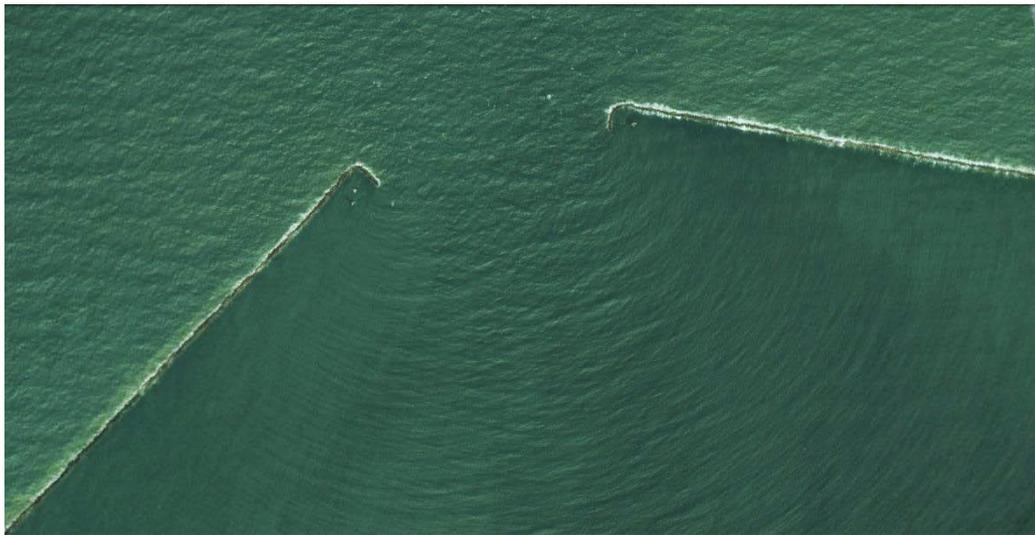


Fig. III-3 Difracción del oleaje

Reflexión

La reflexión es el proceso por el cual parte de la energía no disipada de un determinado tren de olas genera otro tren en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo. Cualquier estructura marítima o disminución de la profundidad provoca que el oleaje incidente experimente un proceso de reflexión y su intensidad depende en gran medida del poder disipador del medio con el cual interactúa

La reflexión del oleaje se genera por la presencia de un obstáculo, lo cual provoca un nuevo grupo de ondas viajando en dirección totalmente opuesto al oleaje incidente. La energía reflejada por el oleaje es función directamente de las propiedades de la estructura que provoca el cambio de dirección, la pérdida de energía puede ser mínima si se considera un elemento totalmente impermeable, en otros casos puede haber mayor disipación de energía si el elemento es permeable (*Fig. III-4*).

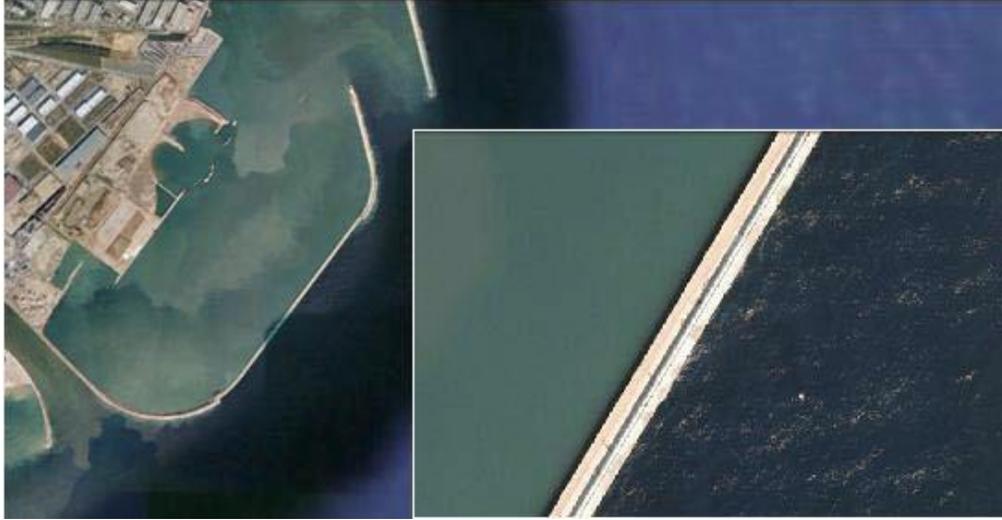


Fig. III-4 Reflexión provocada por un dique vertical

La reflexión se define mediante un coeficiente complejo,

$$R = |R| * e^{-i\varepsilon} \quad (3.1)$$

Donde

$|R| = \sqrt{R_R^2 + R_I^2}$ Es el módulo del coeficiente de reflexión.

$\varepsilon = \arctan(R_I/R_R)$ Es el argumento del coeficiente complejo.

Donde R_I es la amplitud de la ola incidente y R_R la amplitud de la onda reflejada.

Cuando el oleaje se encuentra con una estructura y parte de la energía es reflejada, la altura de ola reflejada se suma con el tren de olas incidente, modificando la altura de las olas totales. Así, para poder cuantificar correctamente la altura de ola reflejada, la altura de ola incidente, y con ello el coeficiente de reflexión, se debe realizar una separación de la señal de oleaje. Por ello se usó el método de Mansard y Funke (1980). El cual es un método basado en los mínimos cuadrados, utilizando datos de tres sensores de nivel.

El método supone la medida simultánea de tres sensores de nivel en tres puntos conocidos durante un tiempo total, T , de modo que $0 \leq t \leq T$. Una de las características que distingue a este método es la introducción de una variable de error, mediante la propia aplicación de la teoría de mínimos cuadrados.

Disipación

Antes de la zona de rompientes, la disipación debida a la fricción en el fondo es el proceso principal de atenuación energética. La disipación de energía ocurre principalmente en aguas poco profundas e induce una reducción de la altura de ola. Los efectos de fricción varían con el tipo de material en el fondo, así como de las características del oleaje, profundidad relativa y distancia de recorrido del oleaje, entre otros. Cuando las olas se propagan a través una zona relativamente amplia y poco profunda, su energía se disipa de forma importante. La disipación puede ser causada por el incremento de fricción en el fondo, la infiltración en los intersticios de estructuras porosas o fondos arenosos, el movimiento de fondos marinos cohesivos y por la resistencia inducida por la vegetación. Los mecanismos de disipación pueden provocar una disminución en la altura de las olas mayor que la estimada con métodos convencionales para fondos impermeables o arenosos. Los métodos disponibles se basan en el análisis de los parámetros que tienen una amplia gama de valores y puede ser de difícil estimación de manera fiable. El enfoque general para cuantificar la disipación puede implicar el uso de datos empíricos, posiblemente recogidos en el lugar de estudio o disponibles en un sitio similar. En la mayoría de situaciones, la cantidad de disipación será pequeña y el esfuerzo necesario para analizar los procesos de disipación puede ser grande.

A partir de la zona de rompientes, los efectos turbulentos dominan el proceso de disipación de energía y los efectos de fricción y percolación son menos importantes. La caracterización del proceso de rotura se aborda en la próxima sección.

Transmisión

Cuando se construye una estructura de protección, puede existir cierta agitación en la zona abrigada. Dicha agitación puede ser causada por las olas que rebasan la estructura o por las ondas que son transmitidas a través de ésta. Al fenómeno por el que parte de la energía de las ondas pasas a través de la estructura se le conoce como transmisión. Para estructuras emergidas, la transmisión del oleaje dependerá principalmente de la porosidad y anchura de la estructura, pues entre mayor sea ésta existirán mayores espacios por donde el oleaje podrá viajar de un lado a otro, mientras que a menor porosidad el oleaje tenderá a ser disipado por medio de la fricción del material de la estructura. Por otro lado, para estructuras sumergidas los niveles de transmisión del oleaje serán mayores, y la transmisión dependerá principalmente de la distancia existente entre la superficie libre del agua y la cresta de la estructura (francobordo); así, cuanto menor sea el francobordo (menor distancia entre la cresta del dique y la superficie libre del agua) la transmisión del oleaje será menor, y viceversa: cuanto mayor sea el francobordo, la transmisión del oleaje aumentará.

La transmisión del oleaje se caracteriza por medio de un coeficiente que se determina como el cociente de la altura de ola transmitida entre la altura de ola incidente, tal que:

$$K_T = \frac{H_{Transmitida}}{H_{incidente}} \quad (3.2)$$

3.2 Rotura

La rotura o rompiente de una onda de gravedad ocurre cuando la estructura del movimiento oscilatorio pierde la capacidad de mantenerse estable.

Las causas principales de la rotura son la celeridad y el peraltamiento que ocurre cuando el oleaje se propaga en aguas someras.

Durante la rotura una ola deja de serlo y pierde la mayor parte de la energía con que viajaba.

Este fenómeno se produce en las cercanías de la costa, debido al rompimiento de la ola, esto genera una zona de rompientes donde se producen la mayoría de los procesos litorales como el transporte de sedimentos. Debido a que la ola reduce la velocidad con la que se aproxima (fenómeno de asomeramiento), éstas crecen en su cresta, desestabilizándose, y a causa de la velocidad en su componente horizontal, provocan que esta caiga, que es lo que conocemos como rompimiento de la ola.

3.2.1 Tipos de rotura

El tipo de rotura que se presenta puede estar controlado por el número de Iribarren, también conocido como parámetro de rompientes:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (3.3)$$

Donde L_0 es la longitud de onda en aguas profundas $\left(\frac{gT^2}{2\pi}\right)$

g aceleración debida a la gravedad

T periodo de la onda

B ángulo de inclinación

H_0 es la altura de ola en aguas profundas

Dependiendo el número de Iribarren, se puede conocer el tipo de rotura como se muestra a continuación en la *Tabla III-1*

Tabla III-1 Valores del número de Iribarren para los diferentes tipos de rotura según Battjes (1974)

Tipo de rotura	Numero de Iribarren
Descrestamiento (spilling)	$Ir < 1.0$
Voluta (plunging)	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso (collapsing)	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilación (surfing)	$3.1 < Ir < 4.0$
No hay rotura	$4.0 < Ir$

Rotura tipo descrestamiento o spilling: la cresta de la ola se va haciendo cada vez más aguda, hasta hacerse inestable y se derrama hacia abajo por la pendiente frontal de la ola; generalmente se da en situaciones en donde el oleaje peraltado se propaga sobre playas con poca pendiente (*Fig.III-5*). En esta rotura el decaimiento de la altura es aproximadamente uniforme, con lo que hay gran disipación en la zona de rompientes y muy poca de su energía es reflejada hacia el mar.



Fig. III-5 Rotura spilling

Rotura tipo voluta o plunging: ocurre con olas con poco peralte en playas relativamente inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical, la cresta de la ola se hace más aguda, curvándose hacia el frente hasta que finalmente se precipita. El proceso de este tipo de rotura produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente. Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en rotura y suelen romper de nuevo muy cerca de la orilla del mar (*Fig. III-6*).



Fig. III-6 Rotura Plunging

Rotura tipo colapso o Collapsing: El frente de la onda se aproxima a la vertical y la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa. El aire queda parcialmente atrapado, formando espuma. El periodo de ascenso-descenso coincide con el periodo del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos (Fig.III-7). La reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia.



Fig. III-7 Rotura Collapsing

Rotura tipo surging o no rotura: Ocurre en playas con pendientes muy pronunciadas. Este tipo de rotura comienza a desarrollarse de una forma similar a la rotura tipo voluta, donde su cara frontal se hace muy vertical, pero con la particularidad de que la base de la ola llega a la playa antes de que se lleve a cabo la rotura, por lo que la cresta se colapsa y desaparece. Con este tipo de rotura (Fig. III-8), generalmente la zona de rompiente es muy estrecha y aproximadamente la mitad del *momentum* de las olas es reflejado hacia el mar.



Fig. III-8 Rotura Surging

3.3 Cálculo de las fuerzas de oleaje en un obstáculo sumergido

3.3.1 La hipótesis de Froude Kriloff

La hipótesis de Froude Kriloff sirve para estimar las cargas de presión hidrodinámica de una onda inducida en los cuerpos pequeños, lo que forma la base de la ecuación de Morison de cargas de fuerza/momento.

“Morison et al., 1950 representa la unión de dos ramas de la investigación en la mecánica de fluidos para tratar de determinar las fuerzas actuantes sobre un cilindro, siendo esta teoría todavía válida en la actualidad.”

La hidrodinámica en un campo de presión inducida por solamente el potencial de la onda incidente $\phi_w(x, y, z, t)$ produce una carga de Froude – Kriloff.

Esta aproximación constituye la primera estimación de las cargas de onda inducida en los cuerpos grandes; y se puede aplicar para calibrar la magnitud de los efectos de difracción en grandes cuerpos fijos.

El potencial de onda dispersada $\phi_s(x, y, z, t)$ resulta en una corrección de primer orden a la hidrodinámica del campo de presión inducida por la onda incidente. Si la carga de la onda difractada en un gran cuerpo fijo se normaliza por la carga Froude - Kriloff, la magnitud de la carga de onda dispersada se cuantifica fácilmente. Debido a esto, todas las cargas de onda difractadas en grandes cuerpos fijos

pueden ser normalizadas por la carga Froude Kriloff debido a que sólo la onda incidente en el campo de presión.

El cuerpo tridimensional relativamente grande se muestra en la Fig. III-9 se sumerge con la profundidad del centro de gravedad del cuerpo que se encuentra en $z = -d$. Un incidente normalmente, $2D$ onda de gravedad superficial en la ausencia del cuerpo puede ser descrita por un escalar potencial de velocidad dada por:

$$\phi_s(x, y, z, t) = -\left(\frac{Ag}{\omega}\right) \frac{\cosh kh \left(1 - \frac{z}{h}\right)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t - \nu) \quad (3.4)$$

Donde el ángulo de ν en la ecuación anterior se introduce para los datos de los análisis por Finitos de la Transformada de Fourier.

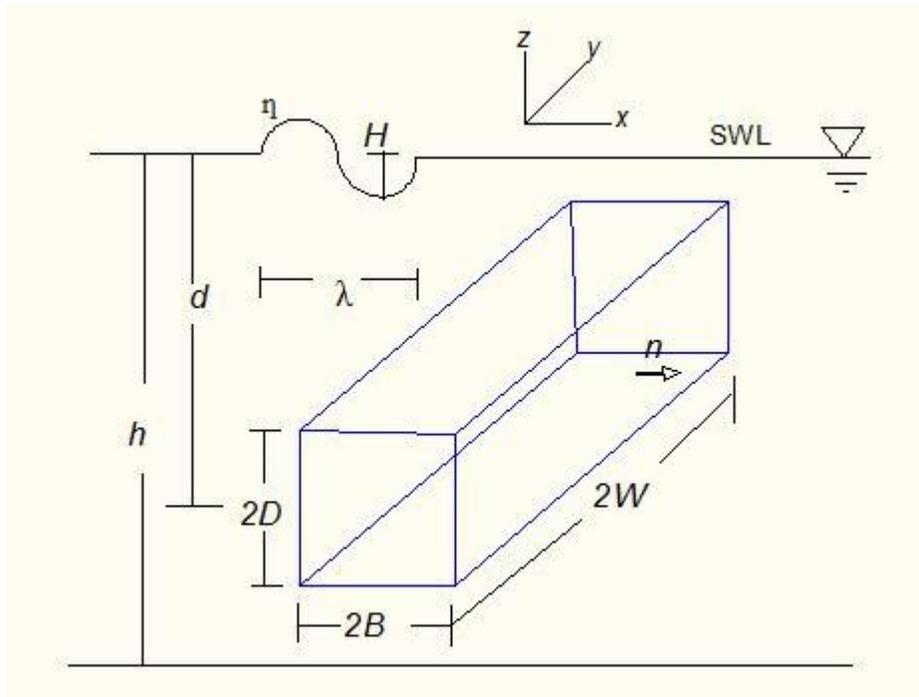


Fig. III-9 definición para el cuerpo 2 - D en coordenadas cartesianas

En el fluido de onda inducida la velocidad se calcula a partir del gradiente negativo de un potencial escalar de acuerdo con $\vec{q}(x, z, t) = -\vec{\nabla} \phi_s(x, z, t)$

La presión total liberada en el fluido se calcula a partir de los lineamientos de la ecuación de Bernoulli:

$$P(x, z, t) = -\rho g \left\{ z - A \frac{\cosh kh (1 + z/h)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t - v) \right\} \quad (3.5)$$

La carga de presión en el cuerpo puede estimarse a partir de

$$\vec{F}(t) = - \iint_{S_w} p \vec{n} dS \quad (3.6)$$

Donde:

- \vec{F} Fuerza de Froude-Krillof
- S_w Área de la superficie mojada del cuerpo
- p presión de la onda no perturbada
- n vector normal al cuerpo, apuntando a la dirección del agua

Esta expresión es corregida a través de coeficientes que son determinados experimentalmente, en términos prácticos puede ser aplicada cuando la dimensión del cuerpo es menor que la longitud de onda.

Los componentes horizontales de la superficie del vector $\vec{n}_1 dS$ en la ecuación anterior en la dirección X horizontal son

$$\vec{n}_1 dS = \pm dx dy \vec{e}_1 \quad (3.7)$$

Sustituyendo la ecuación 3.5 y 3.7 en la ecuación 3.6 por los componentes horizontales de la carga de la presión hidrodinámica e integrando sobre el total de superficies verticales del cuerpo horizontal en $\pm x$ direcciones dadas en la ecuación:

$$\vec{F}(t) = \frac{F_1(\tau)}{8\rho g(WBD)(A/h)} \quad (3.8)$$

La carga horizontal adimensional en la ecuación anterior puede ser verificada desde el componente horizontal de la ecuación de Euler.

$$\rho \frac{\delta u(x, z, t)}{\delta t} = dF_1(x, z, t) \quad (3.9)$$

Con el fin de obtener el componente horizontal neto, la ecuación 3.9 debe integrarse sobre el volumen de fluido desplazado por el cuerpo grande en equilibrio V_0 según en la *fig. III-9*.

$$F_1(t) = \iiint_{V_0} \rho \frac{\delta u(x, z, t)}{\delta t} dV \quad (3.10)$$

Los componentes verticales del vector en la ecuación 3.7 en la dirección Z vertical es:

$$\vec{n} dS = \pm dx dy \vec{e}_3 \quad (3.11)$$

Sustituyendo ahora los componentes verticales

$$\vec{F}(t) = \frac{F_3(\tau)}{8\gamma(WBD)(A/h)} \quad (3.12)$$

3.4 Diseño mecánico de diques sumergidos

El diseño de estructuras de protección costera es eminentemente funcional, esto es, muchos de los criterios con que se determinan las características geométricas y mecánicas de las obras dependen del uso e importancia de las mismas.

El diseño de estructuras costeras se puede dividir en dos grandes cálculos, el geométrico, que involucra las dimensiones generales de la obra y se determina en función del comportamiento hidráulico requerido o permisible y el mecánico, que es la determinación del tamaño y peso de las piezas que conformarán el talud expuesto al oleaje y deberán resistir las sollicitaciones que éste les imponga.

3.4.1 Esfuerzos

Una primera clasificación de las cargas que pueden solicitar una estructura costera es agruparlas en cargas hidráulicas, cargas de uso y peso propio. Entre las primeras se tienen cargas hidrostáticas y cargas dinámicas.

a) *Cargas exteriores.* Son las aplicadas sobre el frente expuesto del dique.

- Carga hidrostática
- Carga dinámica debida al oleaje

b) *Cargas interiores.* Son las aplicadas sobre la cara protegida del dique (lado de tierra)

- Cargas hidrostáticas
- Cargas dinámicas debidas al oleaje interior

c) *Subpresiones*. Son las cargas aplicadas verticalmente sobre la base del cajón.

- Cargas hidrostáticas
- Cargas dinámicas debidas a los oleajes en ambos lados.

d) *Peso*.

3.4.2 Tipos clásicos de fallo

Atendiendo a la causa que los genera, existen dos grandes grupos de fallos, los que suponen el cese en el cumplimiento de las funciones para las que se diseñó el dique denominados fallos funcionales y pueden ser permanentes u ocasionales. Por otro lado, desde el punto de vista estructural un fallo se produce cuando el dique diseñado pierde su geometría original.

Dentro de los fallos funcionales, el más conocido es el rebase. Éste es ocasional, puesto que supone el cese de determinadas funciones del dique solamente mientras prevalezcan las condiciones de clima marítimo con las que sucede. Luego, los fallos funcionales posibles para cada dique serán distintos según los usos a que esté sometido éste y según las exigencias de dichos usos.

- Deslizamiento
- Vuelco
- Asentamientos diferenciales
- Fallo generalizado del lecho marino

3.4.3 Estabilidad

El comportamiento de una estructura sujeta a la acción del oleaje está relacionado con el daño que éste le ocasionará.

Las estructuras costeras se diseñan para presentar falla de tipo dúctil, a fin de poder reparar el daño al término de la tormenta que lo provocó. (*Bruun 1979*) enlistó las posibles causas de la aparición de dicho daño y el eventual fallo de la estructura, a saber:

- Extracción de las piezas de la coraza principal a causa del oleaje
- Movimientos continuos de los cantos de la coraza principal sin grandes desplazamientos instantáneos, pero capaces de deformar a largo plazo la geometría de la coraza (falla por fatiga)
- Rotura de las piezas de la coraza principal a causa de choques

- Deslizamiento de la coraza por falta de fricción con las capas subyacentes
- Fallas debidas a una baja capacidad de carga del terreno de cimentación
- Averías en la coraza interior y en la corona causadas por rebase
- Discrepancias en las características de los materiales
- Defectos de construcción que crean zonas débiles
- Erosión de pie o socavación en la parte inferior del dique
- Falta de compacidad en las capas subyacentes, que al permitir el paso del agua al interior, producen fuerzas de levantamiento sobre el espaldón y capas inferiores
- Este conjunto de causas puede clasificarse en tres grupos.
- Falla de la coraza principal por movimiento o pérdida de piezas
- Averías de origen geotécnico
- Errores de construcción

3.4.4 Estabilidad estructural y Estabilidad hidrodinámica

Estabilidad estructural Es la capacidad de las piezas para resistir sin romperse, las tensiones producidas por la colocación, el medio granular, los desplazamientos y los movimientos bajo la acción del flujo. Es de especial atención la estabilidad de piezas esbeltas, las que al quebrarse, son fácilmente arrastradas por el flujo. En el caso de piezas monolíticas, la rotura es parcial (en las esquinas y en los bordes), lo que modifica el peso de las piezas y con ello el comportamiento de la estructura.

Estabilidad hidrodinámica Es la capacidad de oposición de las piezas al movimiento producido por la acción del flujo, suponiendo que no se rompen.

El movimiento que pueden presentar las piezas es de dos tipos.

- Cabeceos (giros) sobre sus ejes
- Deslizamiento desde su posición a otra nueva

Cuando el dique es atacado por olas de pequeña altura, éste permanece inalterado. Al aumentar la altura de las olas, comienza la extracción de piezas y a partir de un número de olas determinado, la extracción cesa.

3.4.5 Diseño de diques sumergidos

Los diques sumergidos, como ya se comentó, son aquellos que se diseñan de forma que, parte importante de la energía del oleaje se transmita a través o por encima de ellos. El mecanismo de transmisión más importante es el rebase sobre la coronación, aunque la transmisión a través del dique también puede ser significativa. La razón de ser de este tipo de diques obedece a aspectos visuales, ya que son estructuras que permanecen por debajo del nivel medio del mar y por tanto, su nivel de impacto visual es propiamente nulo.

Para el diseño de diques sumergidos existen diferentes metodologías que sirven para determinar la geometría y la estabilidad de estas estructuras. A continuación se presenta la metodología de Vidal et al. (1992), la cual fue desarrollada considerando los resultados experimentales de autores como Grace (1978), Jensen (1984), van der Meer (1988) y Kobayashi y Wurjanto (1990).

El método de Vidal et al, (1992) se desarrolla bajo una geometría dada de la escollera con un ángulo de $\cot \alpha = 1.5$ y un núcleo permeable. De esta forma para calcular el peso de las piezas del manto principal de las distintas partes del dique sumergido es necesario considerar dos hipótesis adicionales:

- Para un sector determinado del dique y un nivel de avería dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos francobordos diferentes, es independiente del tipo de piezas y del ángulo del talud.
- Para un francobordo dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos sectores distintos de un dique sólo depende del tipo de piezas y del ángulo de los taludes.

De acuerdo con estas dos hipótesis se logra que la estabilidad de las piezas y el ángulo del talud sea el mismo para cada uno de los diferentes sectores, de acuerdo con la metodología, dichos valores corresponden al talud exterior de los diques no rebasables.

Para la estimación del peso de las piezas de cada uno de los sectores del dique sumergido, (Vidal et al. 1992) utilizan la nomenclatura que se muestra en la *Fig. III.10*

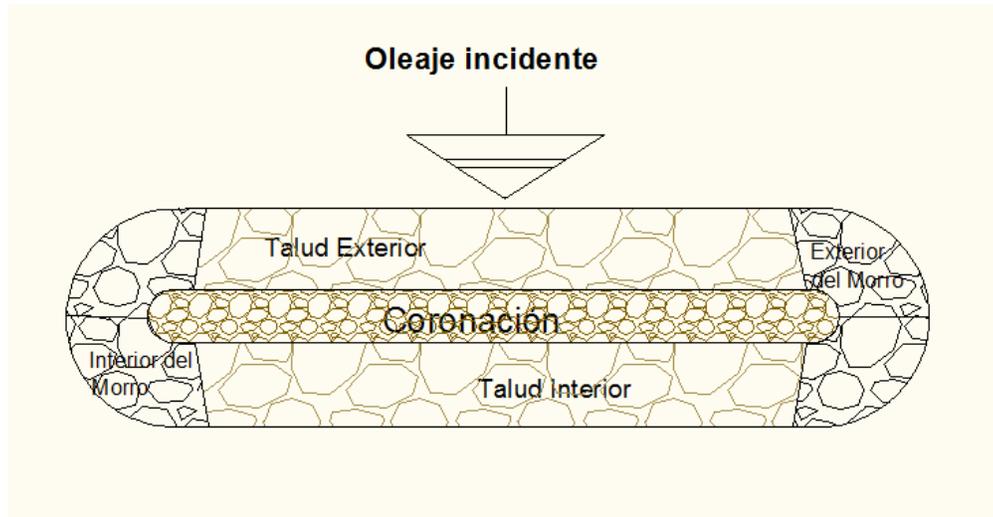


Fig. III-10 Ubicación de los diferentes sectores de un dique rebasable o sumergido

a) Talud exterior

El peso de las piezas el manto exterior, se calcula tomando en cuenta las dos hipótesis antes mencionadas y considerando un diseño de diques no rebasables, con las mismas características geométricas del dique se obtiene el peso de las piezas W_{nr} y el diámetro D_{nr} . El diámetro se utiliza para determinar el franco bordo adimensional del dique rebasable:

$$F_{dr} = \frac{F}{D_{nr}} \quad (3.13)$$

Donde

F_{dr} Francobordo adimensional del dique rebasable.

F_r Francobordo del dique rebasable

D_{nr} Diámetro de las piezas del dique no rebasable

Ahora, la variación del número de estabilidad respecto del franco bordo adimensional se puede describir por medio de la familia de parábolas:

$$N = A + BF + CF^2 \quad (3.14)$$

Cuyos coeficientes de ajuste y niveles de daño para el talud exterior se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III-2 Parámetros de ajustes para el diseño del talud exterior

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	1.831	-0.245	0.0119	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.256	-0.320	0.0189	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.650	-0.313	0.0129	3.15
D	-2.01 a 2.41	3.237	-0.357	0.0357	3.90

La ecuación anterior se utiliza para determinar el número de estabilidad del francobordo de no rebasa N_{snr} como el número de estabilidad para el franco bordo del dique rebasable N_{ste} . La relación entre los números de estabilidad N_{snr}/N_{ste} es inversa a la relación de los diámetros de las piezas del manto principal del dique no rebasable D_{nr} y del dique rebasable D_{te} . De esta manera, el diámetro de las piezas del talud exterior del dique rebasable se calcula con:

$$D_{te} = D_{nr} \frac{N_{snr}}{N_{ste}} \quad (3.15)$$

Donde

D_{nr} Diámetro de las piezas de la coraza principal del dique no rebasable

D_{te} Diámetro de las piezas del talud exterior del dique rebasable

N_{snr} Número de estabilidad para francobordo de dique no rebasable

N_{ste} Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable

b) Coronación

El peso necesario para las piezas de la coronación se puede determinar mediante comparación con el talud exterior a través del francobordo adimensional de dicho talud, el cual se calcula como

$$F_{dte} = F/D_{te} \quad (3.16)$$

Donde

F_{dte} Francobordo adimensional para coronación, diques rebasable

F Francobordo del dique rebasable o sumergido

D_{te} Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

El sector de referencia para el cálculo del diámetro de la coronación es un talud exterior con pendiente 1.5:1, por lo que si el talud exterior del dique por diseñar fuera diferente, es necesario calcular el peso de las piezas, tanto del talud exterior como de la coraza principal del dique no rebasable, para una pendiente 1.5:1 y con dichos valores evaluar la ecuación anterior.

Ahora podemos determinar el número de estabilidad N_{sc} como función de F_{dte} esto es:

$$N_{sc} = A + BF_{dte} + CF_{dte}^2 \quad (3.17)$$

También coeficientes de ajuste y niveles de daño para el talud exterior se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III-3 Parámetros de ajuste para el diseño de la coronación

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	1.652	0.0182	0.1590	----
AI	-2.01 a 2.41	2.122	0.0434	0.1590	----
ID	-2.01 a 2.41	2.734	0.123	0.1770	----
D	-2.01 a 1.00	3.210	0.0965	0.1750	----

La relación de los números de estabilidad es inversa a la relación de los diámetros de las piezas del talud exterior, D_{te} y de la coronación D_c , por lo que el valor de diámetro de las piezas de la coronación se obtiene como:

$$D_c = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sc}} \quad (3.18)$$

Donde:

D_c Diámetro de piezas, coronación, dique rebasable

D_{te} Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

N_{ste} Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable

N_{sc} Número de estabilidad para coronación de dique rebasable

c) **Talud interior**

Se realiza un procedimiento similar al de la coronación, comparando el talud exterior del francobordo adimensional con el correspondiente F_{dte} . Si los taludes exterior e interior tienen la misma pendiente la aplicación es directa. En el caso de que las pendientes del talud exterior e interior no sean las mismas, es necesario volver a calcular el peso y el diámetro de las piezas del talud exterior con la pendiente del talud interior, de esta forma es posible calcular el diámetro de las piezas en el interior, de no contar con diferentes pendientes entre talud exterior e interior el procedimiento se aplica de manera directa. Los coeficientes de ajuste y niveles de daño para el talud exterior se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III-4 parámetros de ajuste para el diseño del talud exterior

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	2.575	-0.540	-0.1150	-----
AI	0.80 a 2.41	5.628	-1.459	0.0837	-----
ID	1.60 a 2.41	8.669	-2.272	-----	-----

$$N_{sti} = A + BF_{dte} + CF_{dte}^2 \quad (3.19)$$

Siendo N_{sti} el número de estabilidad del francobordo del talud interior

De nuevo, por relación inversa de diámetro y números de estabilidad, el diámetro de las piezas del talud interior es:

$$D_{ti} = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sti}} \quad (3.20)$$

Donde D_{ti} es el diámetro de las piezas de la coraza interior.

d) **Morros**

Para determinar el diámetro de las piezas del dique sumergido en la sección del morro, se sigue un procedimiento similar considerando un dique no rebasable, con las mismas características de talud y tipo de piezas en el morro; una vez calculado el peso y diámetro de las piezas D_{mnr} se procede de igual manera que en los casos anteriores.

El morro es más inestable en la zona interior, debido a esto, se diseñan tanto el exterior como el interior con el mismo diámetro de piezas, así se siguen las siguientes ecuaciones:

$$F_{dmr} = \frac{F}{D_{mnr}} \quad (3.21)$$

Donde

F_{dmr} Francobordo adimensional del morro del dique rebasable

D_{mnr} Diámetro de las piezas del morro del dique rebasable

F Francobordo del dique sumergido

$$D_{mr} = D_{mnr} \frac{N_{smnr}}{N_{smr}} \quad (3.22)$$

Donde:

D_{mr} Diámetro de las piezas en el morro del dique rebasable

N_{smnr} Número de estabilidad en el morro para diques no rebasables

N_{smr} Número de estabilidad en diques en diques rebasables

D_{mnr} Diámetro de las piezas en el morro del dique no rebasable

Al igual se muestran los parámetros de ajuste para el morro en la siguiente tabla:

Tabla III-5 Parámetros de ajuste para el diseño del morro

Avería	Rango de Fd	A	B	C	Fdnr
IA	-2.01 a 2.41	1.681	-0.474	0.1050	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.046	-0.499	0.0913	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.517	-0.536	0.0613	3.15
D	-0.01 a 2.41	3.027	-0.756	0.1200	3.90

IV. Descripción de los experimentos

4.1 Arreglo experimental

a) Canal de oleaje

El canal de oleaje tiene una longitud de 37 metros, un ancho de 80 centímetros y una profundidad de 120 centímetros. Está construido, en unos de sus costados y en el fondo, con lámina de acero inoxidable, mientras que el otro costado está compuesto por paneles de vidrio con un espesor de 20 mm y marcos de acero en los extremos del canal (*Fig.IV-1*).

Lleno a su máxima capacidad, el canal requiere cerca de 24,000 litros de agua y en condiciones normales de operación 15,000 litros. Esta gran cantidad de agua es recirculada y almacenada en una cisterna con lo cual se evita su desperdicio. Para llevar el agua de la cisterna al canal se utilizan tres bombas de dos caballos de fuerza, cada una llena el canal a razón de un centímetro de profundidad por minuto.



Fig. IV-1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM

El canal cuenta con un sistema de generación de oleaje que es capaz de producir oleaje regular y oleaje irregular con espectros pre-cargados o con el que el usuario defina. El generador es de tipo pistón y consiste en una placa de acero conocida como pala o paleta de generación sostenida por un riel, que permite un movimiento hacia adelante y atrás; este elemento está sostenido por una estructura que se encuentra fija al piso del laboratorio la cual cumple la función de mantener estable el mecanismo de generación de oleaje.

El sistema de generación de oleaje cuenta con un sistema de absorción dinámica que permite minimizar el oleaje re-reflejado que es generado cuando se coloca una estructura reflejante, que de acuerdo con la geometría del canal, pueda provocar que las olas viajen en ambos sentidos y que los datos obtenidos de esta forma se contaminen por las re-reflexiones.

b) Instrumentación para la medición

Sensores de nivel

El mecanismo de funcionamiento de los sensores de nivel es el siguiente: para registrar un nivel de superficie del agua en un instante determinado, utiliza las propiedades conductivas del agua y las propiedades aislantes del aire, así, al generar un voltaje en dicho sensor, el circuito se cierra solo en la parte sumergida, de acuerdo con esto, se puede obtener la relación entre el voltaje y la longitud sumergida, determinando así la profundidad en cada instante dado.



Fig. IV-2 Dattalogger y sensores de nivel

Para las pruebas se instalaron 11 sensores de nivel a lo largo del canal de oleaje, los cuales son conectados al sistema *SPARTAN* (Fig. IV.2) este a su vez conectado al ordenador donde se registran y se guardan los datos obtenidos por los sensores.

Los sensores fueron puestos en grupos de tres sensores, con excepción del primer y último sensor, tomando como referencia la pala de generación. El cálculo de la distancia entre los sensores del grupo de tres se describirá más adelante ya que este depende del periodo de oleaje utilizado, la distancia se presenta en la *Fig.IV.3* y en la *Tabla IV-1*.

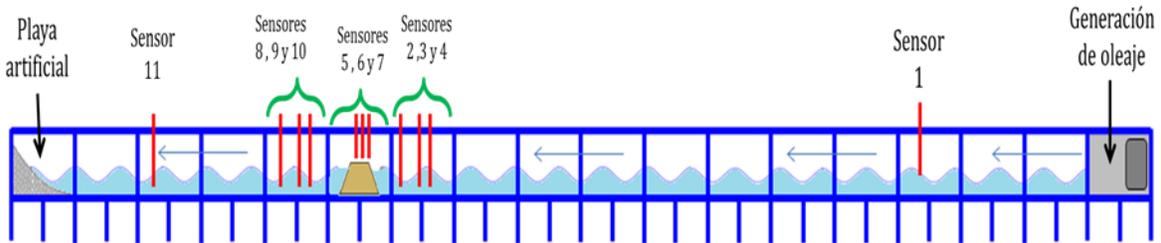


Fig. IV-3 Arreglo de los sensores de nivel en el canal de oleaje

Tabla IV-1 Distancia entre sensores

Periodo "T" (s)	Distancia entre sensores (cm)	
	1° y 2° sensor	2° y 3° sensor
1.13, 0.88, 0.8	15	40
0.74, 0.65, 0.59	12	25

c) Sensores de presión

El laboratorio cuenta con sensores de presión con capacidad de respuesta rápida *fig.IV-4*, que permiten medir los cambios de presión generados en los perfiles de playa provocados por los impactos del oleaje. Las celdas de presión están compuestas por un diafragma capaz de registrar variaciones muy pequeñas del medio que las rodea, estas, son conectadas a un circuito con corriente que transforma las señales a diferencias de voltaje, lo cual es transformado a metros de columna de agua.



Fig. IV-4 Sensores de presión

Se utilizaron 5 sensores de presión en las pruebas, colocados debajo del dique, la distancia a la que se colocaron dependía de la corona de cada dique por lo que se colocaban a distancias equidistantes.

Variación del nivel de agua en reposo

Las variaciones del nivel medio del mar pueden provocar un cambio importante en el funcionamiento de la estructura y del perfil de playa, esto como consecuencia del cambio de la sumergencia relativa, así, por ejemplo, cuando ésta aumenta la protección que ofrece un dique sumergido, disminuye. El resultado de este fenómeno para el comportamiento de la estructura, es que el dique sumergido disipa menos energía, ya que un menor número de olas rompen y la capacidad de movimiento de los áridos es mayor.

Durante el periodo de vida de una estructura, es muy probable que se presente una combinación entre fenómenos atmosféricos y meteorológicos desfavorables para el funcionamiento hidráulico de las estructuras sumergidas, los cuales deben ser considerados en el proceso de diseño.

Para las pruebas de este trabajo se utilizaron diferentes tirantes o variaciones del nivel de agua, comenzando con 30 cm, es decir, con la corona del dique al mismo nivel del agua en reposo. Las demás alturas irán aumentando 3 centímetros hasta llegar a la altura de 45 cm (*Fig.IV-5*).

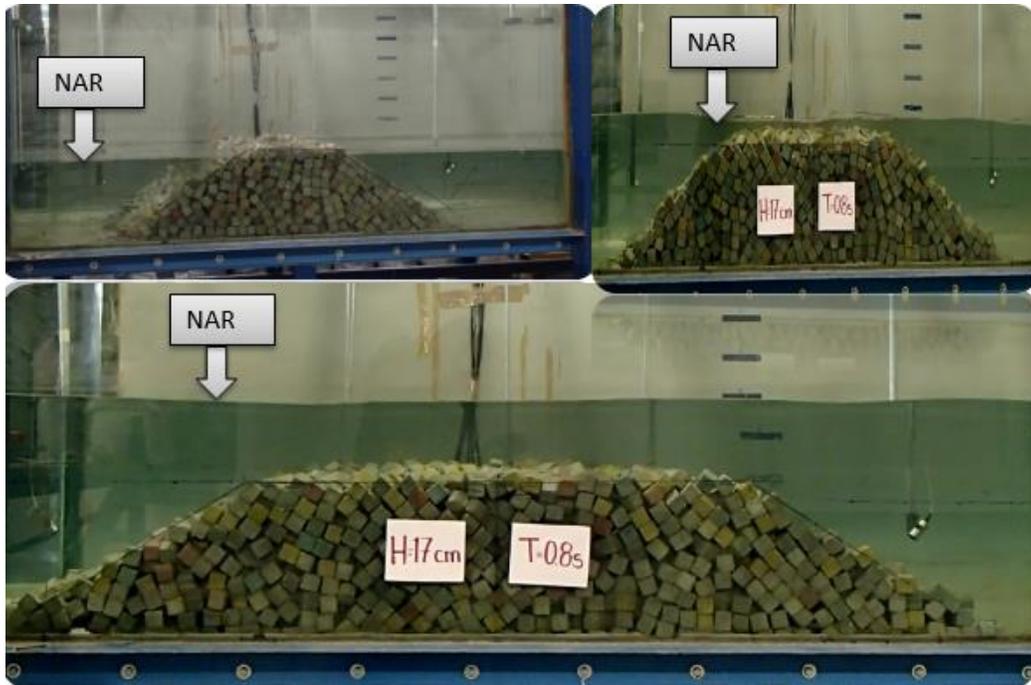


Fig. IV-5 Diferentes niveles nivel de agua en reposo (NAR)

Condiciones de oleaje

Las condiciones hidrodinámicas (tipo de oleaje, periodo y altura de ola) bajo las cuales se realizaron las pruebas experimentales de laboratorio.

Tabla IV-2 Condiciones de oleaje

Tipo de oleaje	Altura de ola H (m)	Periodo T (s)
Regular e irregular	0.03	0.8
	0.04	
	0.06	
	0.08	
	0.1	
	0.17	

La tabla anterior muestra las condiciones para todos los diques con excepción del de 0.60 m de ancho de corona, para este dique en especial se usarán otros periodos descritos más adelante, sin variar las alturas de ola.

Altura de ola (H)

Se probaron un total de seis alturas de ola, con lo que se obtuvieron los siguientes valores de Fb/H .

Tabla IV-3 Obtención de las alturas de ola (H)

H		Fb			
Fb/H	0.1	Fb	h	0.05	H
0		0	0.3		--
0.3		0.03	0.33		0.17
0.6		0.06	0.36		0.08
0.9		0.09	0.39		0.06
1.2		0.12	0.42		0.04
1.5		0.15	0.45		0.03

Periodo

La longitud de ola es función del periodo de la onda y de la profundidad local. Bajo la presencia de periodos largos, la longitud del oleaje se modifica más rápidamente que cuando se tienen periodos de onda cortos. Si el peralte de la ola, H/L , supera un umbral determinado se presentará una disipación asociada a los efectos de turbulencia que se generan durante el proceso de rotura. Una de las funciones que se busca cumplir con los diques arrecifes es la de abrigo a la playa, la cual se logra a través de la inducción de la rotura de los oleajes más energéticos sobre los diques.

En estas pruebas se utilizaron seis periodos de ola, elegidos a partir de relaciones B/L establecidas.

4.1.1 Geometría de la estructura

Un diseño geométrico adecuado de diques sumergidos implica una optimización del material, sin que esto origine una disminución de sus capacidades de trabajo hidrodinámico y mecánico. El diseño de la estructura debe garantizar que los taludes, peso y volumen de las piezas de los elementos sean las apropiadas para soportar los efectos del oleaje, que la anchura de la coronación y altura de la estructura tengan una longitud tal que disipen un porcentaje dado de energía que garantice su eficiencia

hidrodinámica. Con base en lo anterior, las secciones de dique que se probaron en el laboratorio son las que se muestran en la *fig. IV-6*.

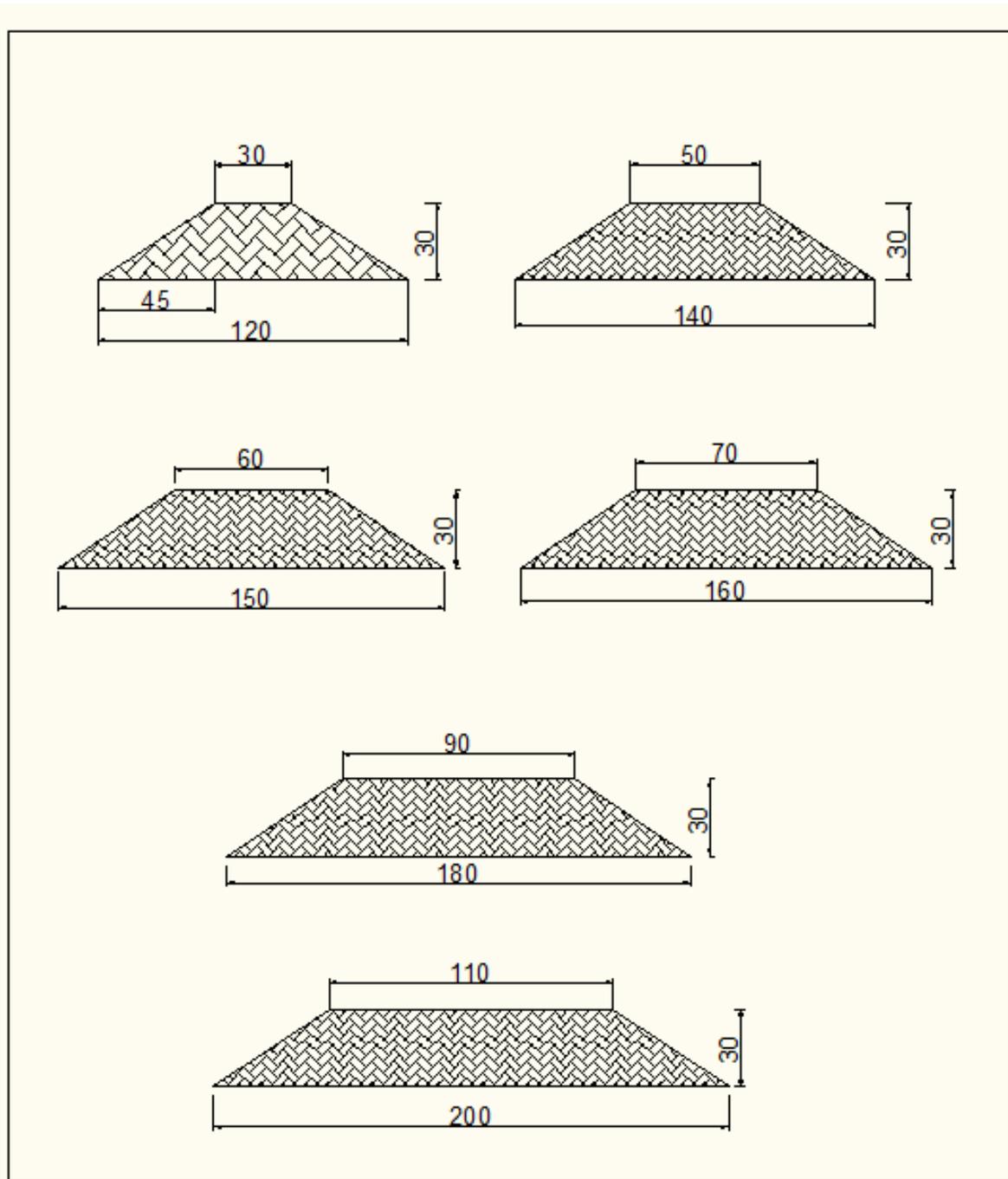


Fig. IV-6 Geometrías propuestas en centímetros.

4.1.2 Material de construcción

Dentro de las características más importantes de los elementos de construcción de los diques sumergidos se encuentran: el peso del material, dimensiones, densidad y porosidad.

Cubos

Las restricciones ambientales para la explotación de bancos de roca o la ausencia de ésta en sitios cercanos es un reto común en la ingeniería de costas, en sustitución de la roca, los cubos son uno de los elementos más comunes para el diseño de protecciones costeras, ya que presentan un comportamiento mecánico adecuado, aunque en ocasiones, el cabeceo de las piezas provoca que las esquinas del cubo sufran un redondeo que les restan parte de la trabazón entre las piezas. El movimiento de sedimento en el fondo puede funcionar como cementante y provocar que después de un determinado periodo de tiempo parte del dique funcione como una estructura impermeable. En general este tipo de elementos funciona de manera adecuada y su proceso constructivo no es muy complicado, además que de su forma provee de una zona ambientalmente favorable para el desarrollo de especies marinas del lugar. Por esta razón, los diques objeto de este trabajo se fabricaron con cubos de concreto (*Fig. IV-7*) cuyas características se muestran en la *Tabla IV-4*.

Tabla IV-4 Características del material del dique

Tipo de material	Concreto
Peso [kg]	0.060
Dimensiones [cm]	3x3x3
Densidad [kg/m3]	2200



Fig. IV-7 Modelo fabricado con cubos.

4.2 Metodología experimental

En este capítulo se describe el procedimiento utilizado en las pruebas experimentales de “Influencia de los parámetros B/L y Fb/H en el comportamiento hidrodinámico de un arrecife artificial”.

Para las pruebas se tomó en consideración varios aspectos: la geometría de los distintos diques, el tirante de agua para cada prueba, los tipos de oleaje utilizando fueron regular e irregular, se variaron las alturas de olas, así como sus periodos; resultó que se deberían de realizar 6 diques distintos, variar el nivel del agua con 6 tirantes distintos, dos tipos de oleaje, con 6 alturas de olas y 6 periodos, en total se realizaron 720 pruebas, en resumen se muestra en la *Tabla IV-5*.

Tabla IV-5 Pruebas

Ancho del dique	Nivel del agua	Altura de ola	Periodo	Tipos de oleaje	Total de pruebas
6	6	6	6	2	720

Se consideró dividir las pruebas en dos partes, para la primera de ellas el dique que se utilizó fue de un ancho de corona de 60 cm el cual se mantuvo constante, pero se variaron los periodos de cada ola y para la segunda parte se varió el ancho de corona para cada dique y se mantuvo constante el periodo el cual fue de 0.8 s. Para cada prueba se decidió observar el comportamiento de 120 olas para lo cual las prueba tendría una duración diferente como se muestra en la *Tabla IV-6*.

Tabla IV-6 Duración de las pruebas

Periodo T (s)	Duración de la prueba (s)
1.13	135.6
0.88	105.6
0.8	127.99
0.74	92.15
0.65	81.91
0.59	71.67

Como se explicó anteriormente, para cada dique se tiene una geometría diferente, cambiando las medidas de la base y el ancho de corona, la altura del dique fue constante para todos los diques siendo de 30 cm, así como la pendiente de todos los diques que fue 1:1.5.

Para cada dique se siguió un procedimiento similar, el cual consistió en marcar en el canal la silueta de cada dique, esto con el fin de tener una referencia al momento de depositar el material a volteo. Este tipo de colocación permitió que la porosidad del dique fuera lo más apegado a la realidad posible.

Cada dique se instrumentó con 5 sensores de presión, los cuales fueron colocados debajo de la estructura, cada uno de ellos fue colocado de manera equidistante en referencia al ancho de corona.

Habiendo instrumentado y construido cada dique se procedió al llenado del canal, los niveles de los tirantes de agua variaron desde el menor de 30 cm, hasta el mayor de 45 cm, esto con un incremento para cada prueba de 3 cm. Para cada nivel utilizado fue necesario realizar la calibración de la pala de generación.

Los sensores de nivel se colocaron siguiendo la *Fig. IV.3*, la distancia que se usó para cada grupo de 3 sensores se calculó con las siguientes formulas:

Primero se necesita conocer la longitud de onda, para lo cual es necesario usar la ecuación de aguas profundas.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4.1)$$

La distancia entre sensores de nivel en cada prueba debe estar dentro del intervalo $\frac{\pi}{10} \leq k\Delta x \leq \frac{9\pi}{10}$. Las distancias obtenidas para cada periodo se muestran en la *Tabla IV-7*.

Tabla IV-7 Distancia entre sensores

T	L	K	Δx_{min}	Δx_{max}
1.13	2.00	3.14	0.10	0.90
0.88	1.20	5.24	0.06	0.54
0.8	1.00	6.29	0.05	0.45
0.74	0.86	7.33	0.04	0.39
0.65	0.67	9.42	0.03	0.30
0.59	0.55	11.52	0.03	0.25

Colocados los sensores de nivel se deben calibrar desde el programa *SPARTAN* y sus monitores.

Los sensores *S1* y *S11*, se colocaron como testigos, con éstos se conoce si las olas eran las deseadas antes y después de la estructura. Los sensores *s2*, *s3*, *s4* se utilizaron para conocer, en el posterior análisis, la reflexión de energía, colocado delante del dique.

Las señales de los sensores *s5*, *s6*, *s7* colocados arriba del dique sirvieron para observar lo que ocurría con el oleaje al estar en presencia de un obstáculo sumergido, cabe aclarar que cuando la variación del nivel del agua era de 30 cm y 33 cm estos sensores no se tomaron en cuenta.

Los sensores *s8*, *s9*, y *s10* colocados después de la estructura servirán para conocer el oleaje que es transmitido.

Como se mencionó anteriormente la generación de olas se produce gracias al sistema de generación y con ayuda del programa *AwaSys6* (Fig.IV-8) es posible especificar las características hidrodinámicas deseadas (periodo, altura, tipo de oleaje etc.), además de calibrar el sistema dependiendo del nivel de agua utilizado al momento de cada prueba, también este software permite especificar la generación de diversos estados del mar, en nuestro caso oleaje regular e irregular.

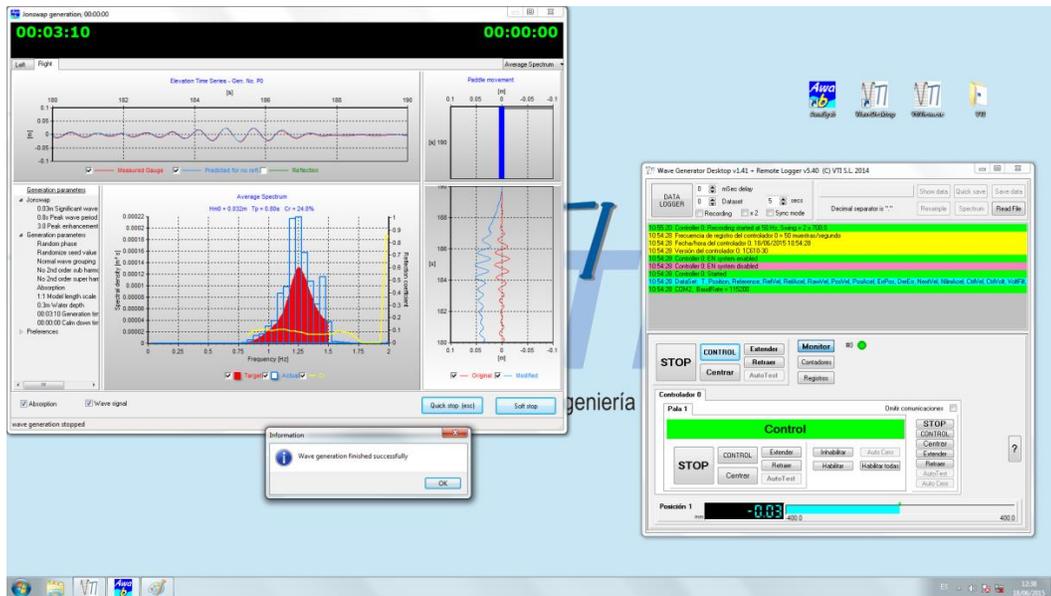


Fig. IV-8 Interfaz del programa *AwaSys6*

El sistema de medición de alta precisión de nombre *SPARTAN* de la firma imc, se utilizó para llevar a cabo los registros de los sensores de nivel y los de presión. La adquisición de los datos recabados por el

SPARTAN se realizó a través del software de operación y configuración *imc STUDIO*, el cual permite capturar, procesar y visualizar las señales analógicas y digitales.

El procesamiento de los datos obtenidos, fue realizado con la ayuda del software *imc FAMOS (Fast Analysis and Monitoring of Signals)*, el cual es un programa de la misma firma para el análisis y evaluación de los resultados de las mediciones.

Con dicho programa fue posible generar, a partir del sistema de ondas, los datos en hojas de cálculo para su mejor manejo.

Análisis para datos de los sensores de nivel: los resultados generados por el *imc FAMOS*, en formato .txt, fueron corregidos siguiendo la metodología para el análisis temporal del oleaje corrigiendo primeramente el nivel medio utilizando la media cuadrática. Posteriormente se analizaron estos datos con rutinas de cálculo desarrolladas por el grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La primer rutina, llamada *LEE*, necesita una configuración sencilla, este fue usado para conocer y rectificar el periodo y la altura de ola que cada sensor registró, en otras palabras, discretiza la señal separando altura (H) y periodo (T).

El segundo programa *REFLAB* que requiere una configuración previa para la ubicación de los sensores de nivel, como se mencionó en la parte de la instrumentación, el grupo de 3 sensores debe tener una separación entre ellos conocida.

Los sensores que se analizaron fueron los 3 sensores colocados antes de la estructuras s_2 , s_3 , s_4 , con ello se puede estimar la energía que el dique refleja (R), además de obtener la altura media cuadrática que registra el grupo de tres sensores.

Estos pasos se realizaron con las señales obtenidas de cada dique. Teniendo estos datos se conjuntaron en tablas de Excel para un mejor manejo.

Teniendo las alturas registradas con cada sensor, se usaron los sensores S_9 , S_{10} , S_{11} obteniendo el valor promedio de estos tres el cual será la altura de ola transmitida (H_T), y teniendo el dato de la altura media cuadrática que arrojó el programa *REFLAB*, se obtuvo la energía transmitida con la ecuación 4.2.

$$T = \frac{H_T}{H_i} \quad (4.2)$$

Para conocer la energía disipada en cada prueba se necesitó de la ecuación 4.3

$$D = \sqrt{1 - T^2 - R^2} \quad (4.3)$$

Además, se obtuvo la longitud de onda y con ella el número de Iribarren a fin de categorizar el tipo de rotura esperado en cada una de las pruebas.

4.3 Observaciones

- Diques con ancho de corona 0.30, 0.40, 0.50, 0.70, 0.90 y 1.10. En cada uno de los diques, se utilizaron las 6 alturas de ola descritas y los niveles de altura de agua también ya mencionados, en estos diques el periodo que se utilizó fue de 0.8 segundos el cual se mantuvo fijo para analizar solo la relación B/L . Mientras que para el dique de 0.60 metros se decidió usar más periodos manteniendo fijo el ancho de corona y así estudiar solo la relación Fb/H .
- Se optó por analizar los parámetros B/L y Fb/H para todos los diques, con el fin de contar con un mayor número de datos y de esta manera conocer mejor su comportamiento.
- La construcción de los diques se realizó de manera que, tomando en consideración la instrumentación del dique con sensores de presión que fueron colocados en la base del dique fueran cubiertos con una cama de cubo de concreto; y el resto del material fue colocado a volteo de manera que cumpliera con las dimensiones del dique requerido.
- La distancia de los sensores en grupo, en un inicio sería diferentes para los periodos de 0.74, 0.65 y 0.59 segundos pero por problemas de espacio permitido fueron ajustados a lo máximo posible.
- Para las pruebas de laboratorio se contempló que serían 6 alturas de ola, pero cuando se analizaron, la altura de ola de 17 centímetros se observó que con los periodos usados las olas rompían antes de llegar a la estructura dique. Por lo que aunque se consideró en la realización de las pruebas, para el análisis de las mismas no se consideró.
- El tiempo que dura cada prueba ya está contemplado el tiempo en que tardaría el oleaje en llegar al dique y en que se estabilizara tipo de oleaje deseado (regular o irregular). De esta manera se garantiza que se cuenta con el número de datos necesarios para el análisis, tomando en cuenta que se debería de obtener 120 olas para cada prueba.

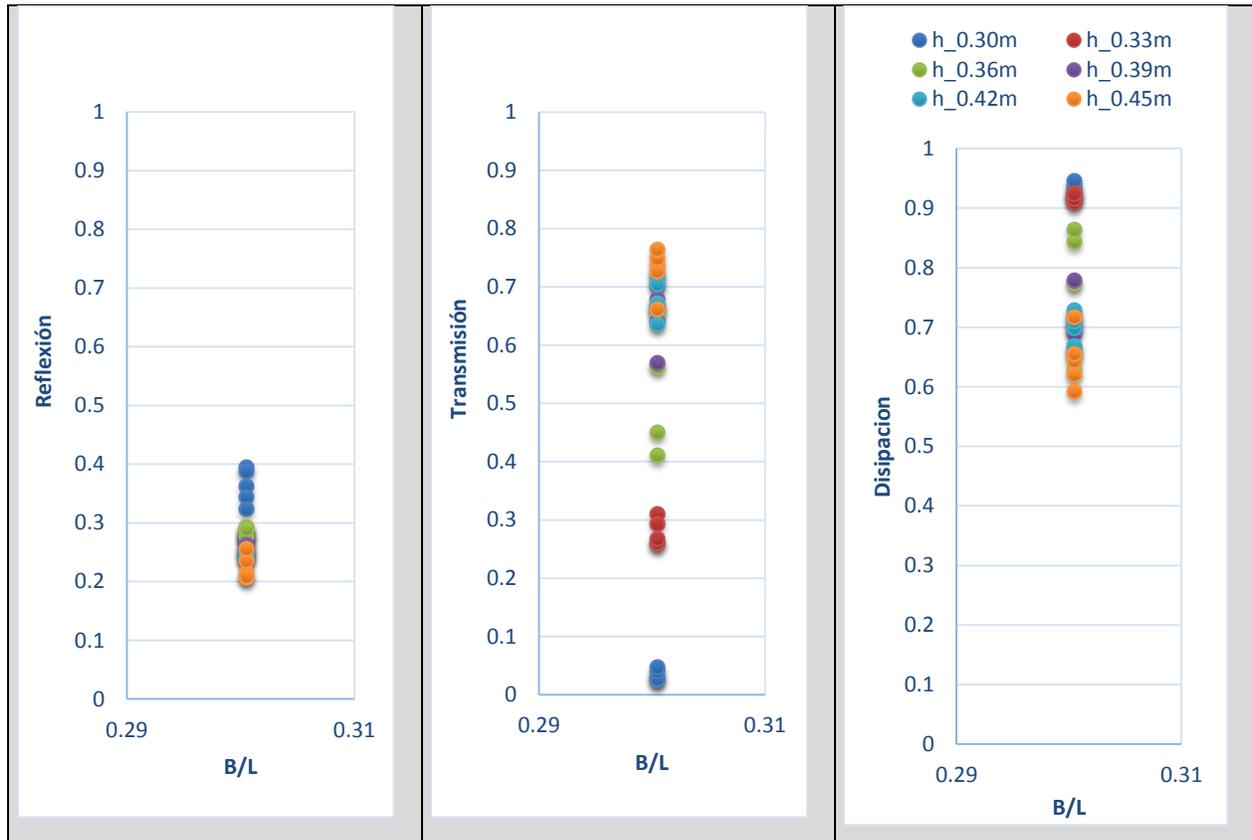
- Los datos obtenidos por los sensores de presión no fueron utilizados para estos análisis, ya que el interés principal se centró en los procesos de reflexión, disipación y transmisión. Pero serán de gran ayuda para estudios posteriores.
- El periodo de 0.69 segundos propuesto para el dique de ancho de corona de 60 cm, para el análisis de datos fue suprimido porque las olas rompían mucho antes de llegar al dique.
- Los datos registrados por los sensores son grabados en volts pero el programa *imc STUDIO*, junto con las curvas e calibración permiten tener, de manera automática, los valores en centímetros.

V. Resultados

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos y de los datos de todos los diques.

5.1 Análisis del parámetro B/L

Para el análisis del parámetro B/L que conforma el ancho de coronación (B) y la longitud de onda (L) se realizó lo siguiente, primero conociendo cada dique se graficó el parámetro B/L contra los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación respectivamente, para observar el comportamiento de cada dique respecto a estos parámetros. Recordando que para cada variación del nivel medio existen 5 alturas de ola, puesto que la altura de ola de 17 cm ya no fue considerada en el manejo de los datos.



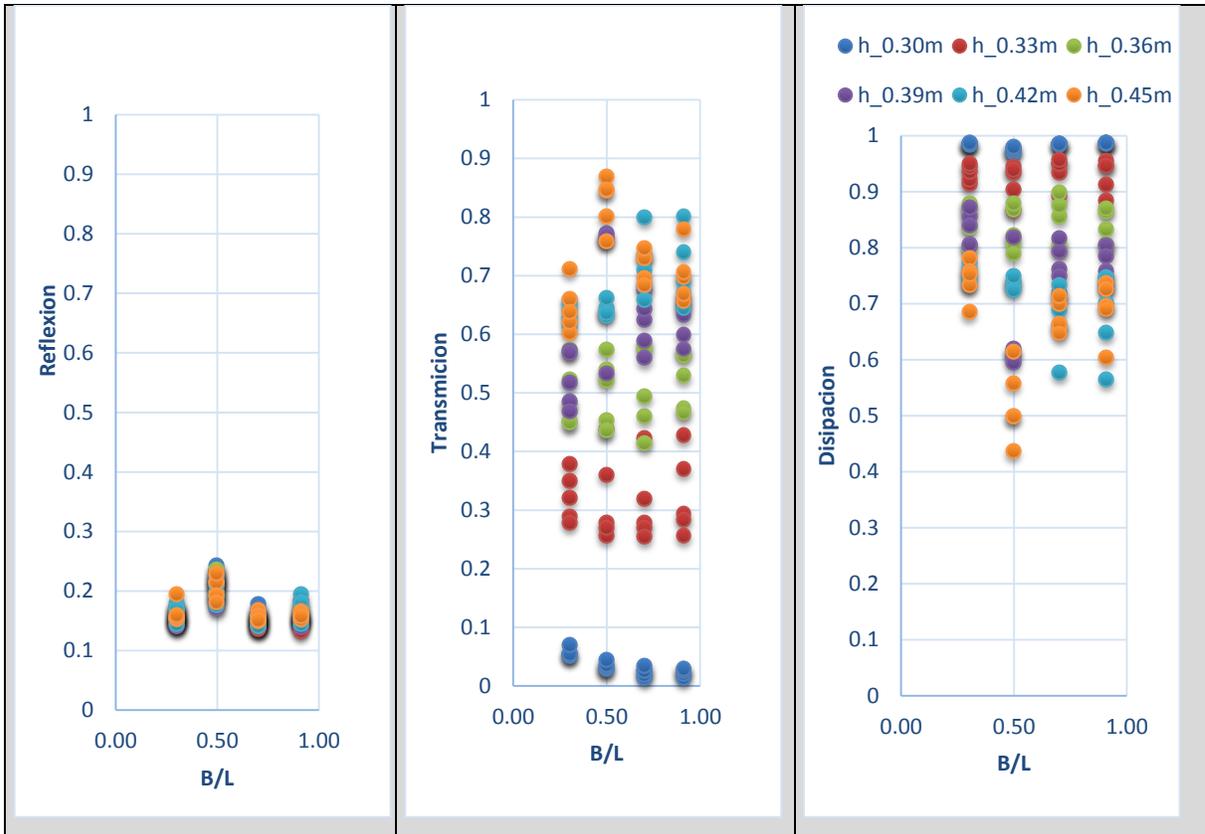
<p>Tipo de oleaje: Regular Dique de corona: 30 cm Periodo: 0.8 Alturas de ola (m): 0.03, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10. Variación del nivel medio (m): 0.30, 0.33, 0.36, 0.39, 0.42, 0.45.</p>	
---	--

Fig. V-1 *Graficas representativas del dique de 0.30 m de coronación con oleaje regular*

En las gráficas de la *Fig. V-1*, que corresponden al dique de 30 centímetros de ancho de coronación y oleaje regular, se observa que la reflexión para el tirante de agua de 30 cm es la más alta (0.35- 0.40), mientras las demás pruebas se mantienen en un rango de entre 0.20 a 0.29 lo que indica oleaje rompiendo en la estructura.

En los valores del coeficiente de transmisión existe una clara correlación con la reflexión, lo que se esperaba y es, en cierto modo, una validación de las mediciones. La disipación muestra que este dique es capaz de disipar mayor energía cuando el nivel del agua en reposo es menor.

En los demás diques en los cuales se utilizó un solo periodo (0.8 s), se observó un comportamiento similar, lo cual se puede verificar en el Anexo I donde se muestran los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de todas las pruebas realizadas.



Características usadas para el dique:

Tipo de oleaje: Irregular

Dique de corona: 60 cm

Periodos: 0.65s, 0.74s, 0.88s, 1.13s.

Alturas de ola: 0.03m, 0.04m, 0.06m, 0.08m, 0.10m.

Variación del nivel medio: 0.30m, 0.33m, 0.36m, 0.39m, 0.42m, 0.45m.

Fig. V-2 Gráficas representativas del dique de 0.60m de coronación con oleaje irregular

En las gráficas de coeficientes del dique de 0.60 m de ancho de corona con oleaje irregular (*Fig. V-2*), se observaron distintos rangos que responden a los 4 periodos empleados en las pruebas.

Respecto del coeficiente de reflexión, la prueba con B/L de 0.50 presenta valores entre 0.17 y 0.24, mientras que para las demás pruebas el coeficiente solo oscila entre 0.13 a 0.20. En el coeficiente de transmisión se observa que la mayor parte de los datos cae en un rango de 0.10 a 0.90 con excepción del caso de $h=30$ cm. En la gráfica de disipación se observa que tiene una relación con la gráfica de reflexión siendo que en el parámetro $B/L=0.50$ se obtiene mucha variación en el rango, el cual la altura de tirante de 0.45 metros es el que ocasiona la mayor variación, siendo estas pruebas las de 0.88 segundos de

periodo. Esto puede ser ocasionado por que las olas de esta prueba rompían antes de llegar a la estructura, lo que ocasionaría que los sensores captaran este fenómeno y observar también una reflexión mayor, puesto que para este B/L de 0.50 el periodo para todas las pruebas es de 0.88 segundos.

En las gráficas anteriores lo que podemos observar es la tendencia de la altura de ola en cada dique.

Reflexión

Para analizar mejor el comportamiento de los diques observando los rangos de cada parámetro se optó por graficar los datos de todos los diques en una sola gráfica como se muestra a continuación;

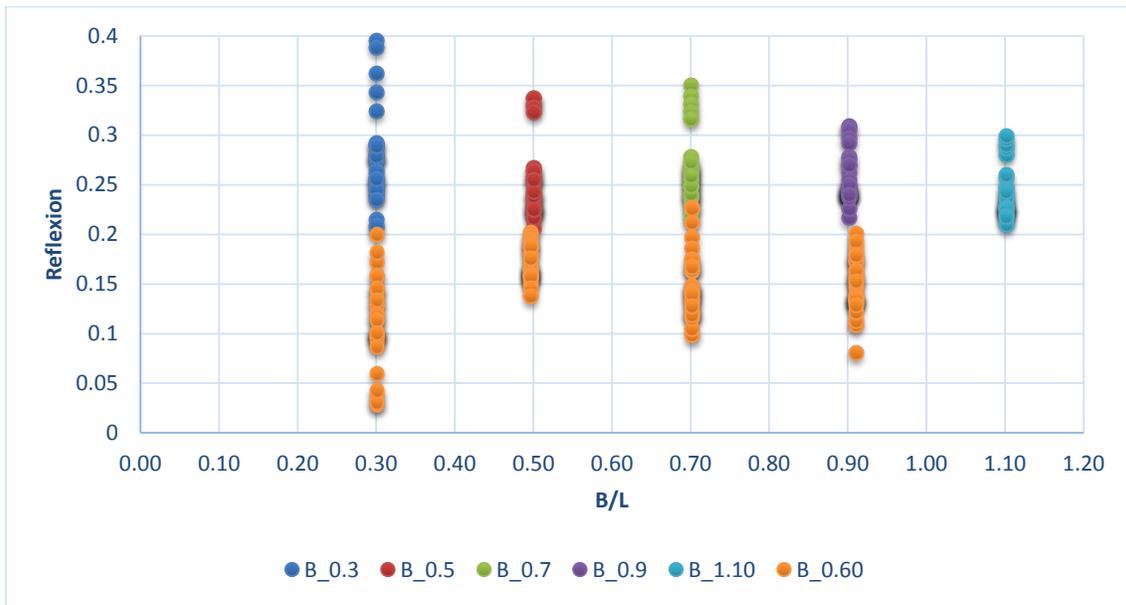


Fig. V-3 Comparación parámetro B/L y reflexión con oleaje regular

La *fig. V-3* muestra la reflexión de todos los diques comparándolos con los valores de B/L obtenidos para cada prueba, este caso corresponde a oleaje Regular. Se observa que el B/L de 0.30 corresponde a un dique de ancho de 0.30 con periodo de 0.8s pero también corresponde a un dique de 0.60 m de ancho pero con un periodo de 1.13 s. En la cual vemos que el rango que refleja está entre un 0.05 y el 0.2 para el dique de ancho mayor, mientras que el dique de ancho menor disipa entre 0.2 y 0.4, rangos en los cuales la altura de ola y la variación del nivel medio no tiene gran impacto en la reflexión puesto que el promedio que refleja oscila entre el 28 %.

El B/L igual a 0.5 es del dique de ancho de 0.5 m con el periodo de 0.8 s, y del dique de 0.60 m con un periodo de 0.88 s observamos que para el primero la reflexión está dentro de un 0.2 a un 0.35 mientras que en el segundo dique se encuentra en un rango menor de 0.14 a 0.20.

El B/L de 0.7 es del dique con ancho de 0.7 m y el dique de ancho de 0.60 m con un periodo de 0.74 s también observamos la tendencia de que el rango del primero se encuentra por arriba del dique de ancho mayor, pero vemos que hay dos puntos en los que llegan a juntarse del dique de 0.60 m los cuales son alturas de variación del agua de 0.42 y 0.30 m con altura de ola y periodo de 0.03 m y T de 0.8 s y el otro de 0.06 m y T 0.74 respectivamente. El último B/L que contiene los diques de 0.90m con periodo de 0.8s y el dique de 0.60m con un periodo de 0.65s encontramos que el rango está más separado.

La razón por la que existe una separación en la reflexión en todos los diques aun teniendo una misma relación B/L puede ser debida a la interacción entre las olas incidentes y las reflejadas, es decir, en la medida que las ondas reflejadas se desfasan de las incidentes, menores olas totales serán registradas por los sensores. Este desfase parece ser función de la longitud de onda y la sumergencia relativa.

La Fig. V-4 que corresponde a la de reflexión vs B/L con oleaje Irregular, muestra un comportamiento similar al caso de oleaje Regular.

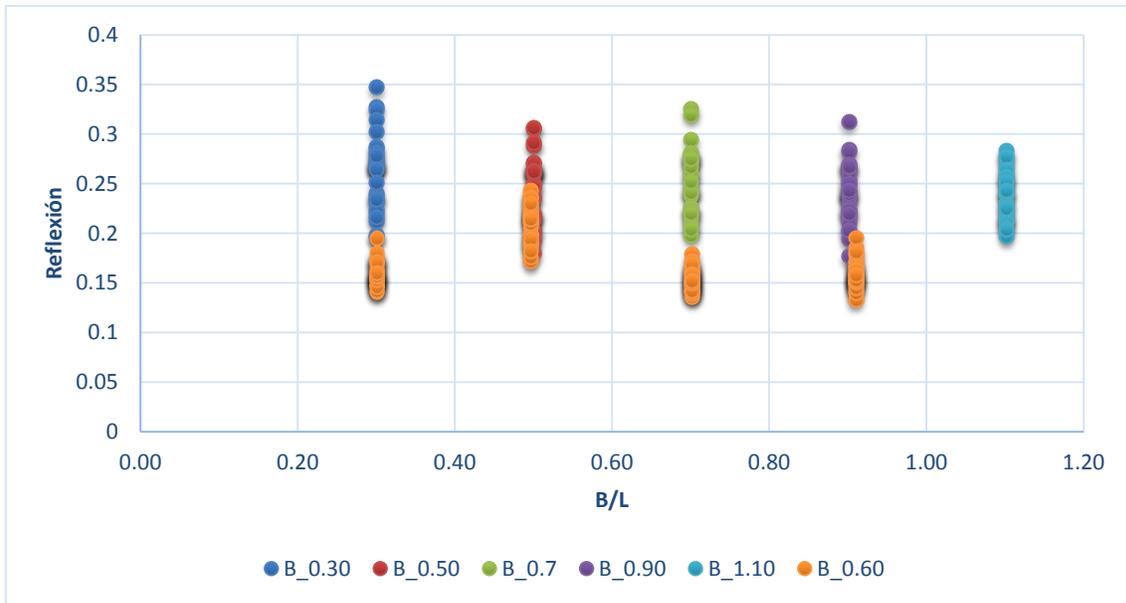


Fig. V-4 Comparación parámetro B/L y reflexión con oleaje irregular

Vemos que en la relación B/L de 0.30 la dispersión es muy alta y solo se identifica un punto en el que coincide la reflexión (0.19), este punto en el dique de 0.30 m es con una altura de ola de 0.10 m un

periodo de 0.8 s y un NAR de 0.42 m, en el caso del dique de 0.60 m de ancho es con un periodo de 1.13 s una altura de ola de 0.04 m y un NAR de 0.45 m. La coincidencia parece ser fortuita.

En el caso del B/L de 0.5 los dos diques muestran rangos más parecidos, con excepción de algunos puntos del dique de ancho de 0.50 m los cuales son datos que corresponden a alturas de ola pequeñas, mientras que en el B/L de 0.7 se alejan los rangos de los dos diques lo que puede ser ocasionado, como se dijo antes, por la interacción entre las ondas reflejadas e incidentes.

Transmisión

Por lo que respecta a transmisión con oleaje regular encontramos en la *fig. V.5* que tanto para oleaje regular como irregular, los mismos valores de B/L significan los mismos valores de transmisión. Si descartamos los valores de las pruebas con 30 cm de calado, donde el dique no es estrictamente sumergido, tendremos un rango de valores de 0.1 a 0.8; para estos casos de transmisión existe un rango de valores más estrecho en todas las pruebas.

Vemos que la altura de ola transmitida siempre es menor que la incidente, lo que indica que en ningún caso la ola se peraltó por efecto del dique.

También podemos observar que si el nivel del agua en reposo es pequeño la transmisión será menor, mientras que en los niveles altos la transmisión igual será mayor, sin importar que altura de ola se usara.

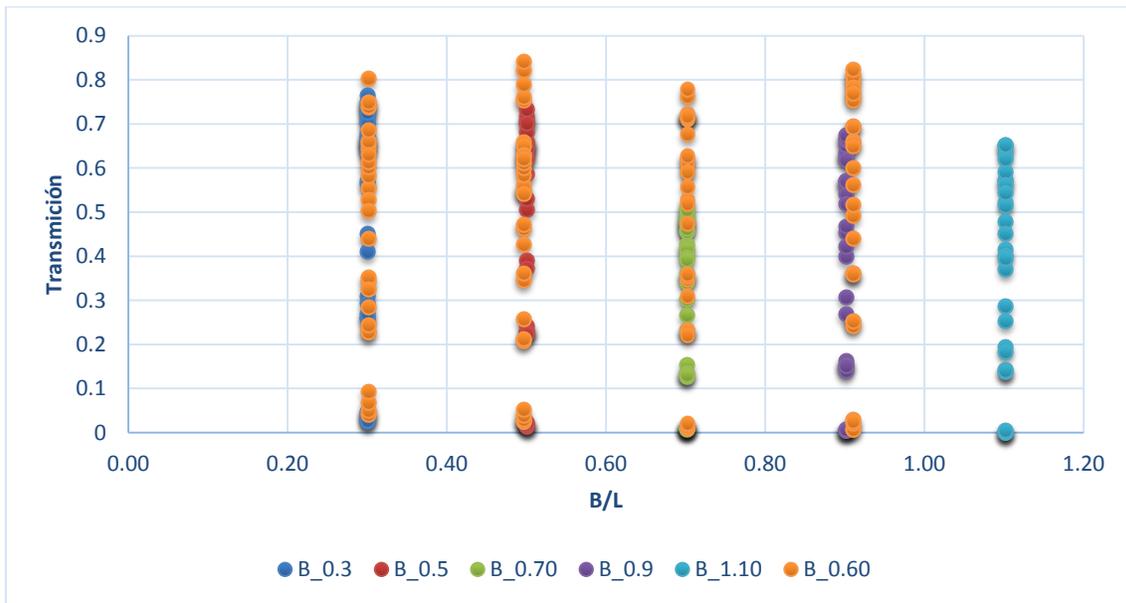


Fig. V-5 Comparación parámetro B/L y transmisión con oleaje regular

Un comportamiento similar se aprecia en las pruebas con oleaje irregular (fig. V-5), donde encontramos una muy alta correlación entre B/L y la transmisión.

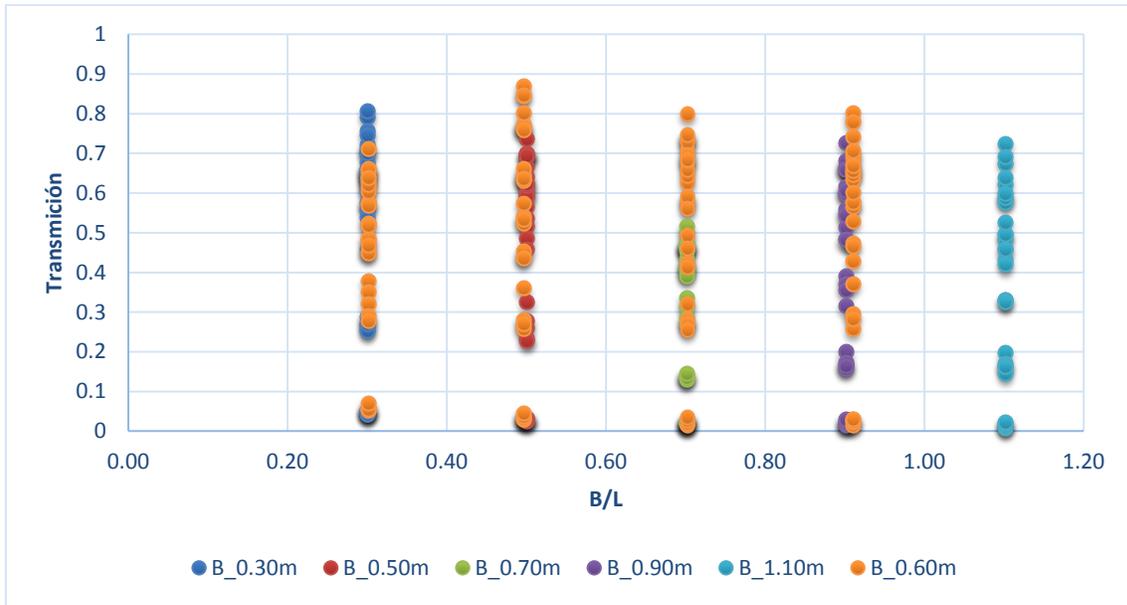


Fig. V-6 Comparación parámetro B/L y transmisión con oleaje irregular

Disipación

En las gráficas de disipación con oleaje regular observamos que todos los parámetros están en un rango más compacto, los rangos en los que se observa la disipación son de 0.2 a muy cercano a 1.

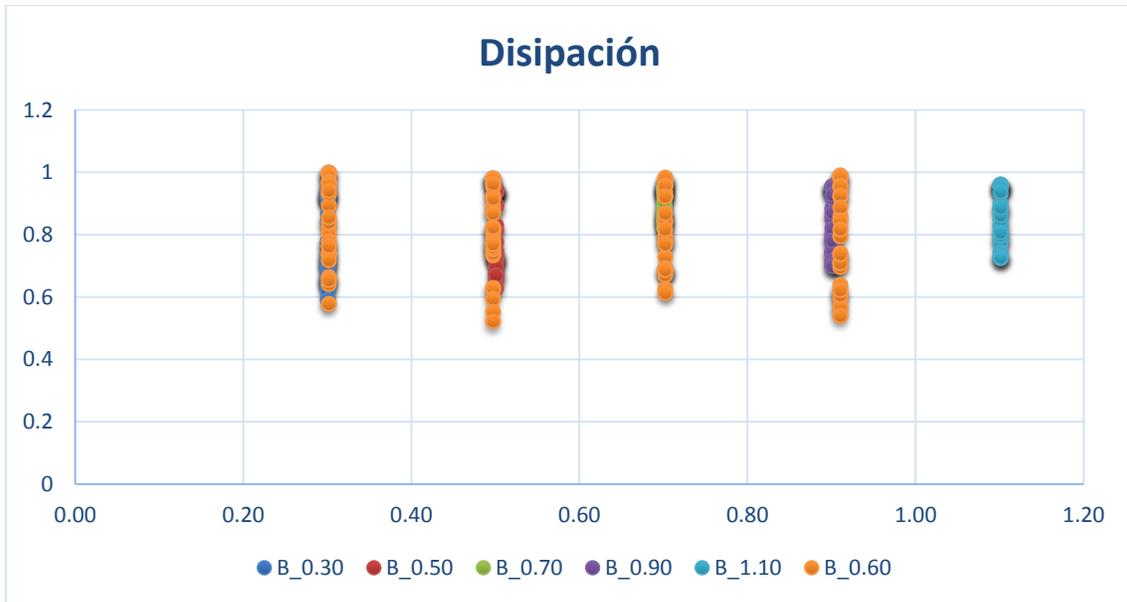


Fig. V-7 Comparación parámetro B/L y disipación con oleaje regular

Mientras que en la gráfica de oleaje irregular observamos un comportamiento semejante al del oleaje regular.

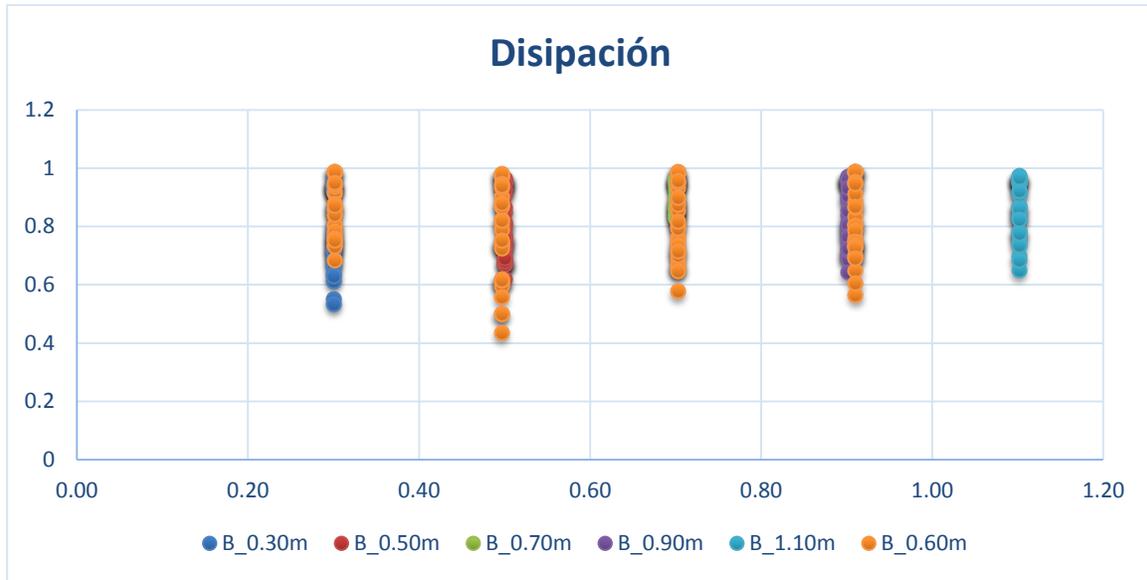


Fig. V-8 Comparación parámetro B/L y disipación con oleaje irregular

Estos resultados son llamativos puesto que tanto la disipación como en la transmisión de las gráficas anteriores dan valores muy altos. Esto se debe a que se obtuvo un rango amplio de respuestas hidrodinámicas al grado que se registraron casos que no disiparon prácticamente nada y otros que disiparon una gran cantidad de energía.

A continuación se agrupan los rangos en los que se encuentran cada parámetro reflexión, transmisión, disipación.

Tabla V-1 Resumen de los rangos en los que se encuentran los parámetros para oleaje regular

Ancho Dique m	B/L	rango de R	promedio	Rango de T	promedio	Rango de D	promedio
0.3	0.3	0.20-0.39	0.27	0.026-0.76	0.48	0.35-0.85	0.61
0.6	0.3	0.02-0.19	0.11	0.04-0.80	0.46	0.33-0.99	0.71
0.5	0.5	0.20-0.33	0.25	0.014-0.73	0.45	0.39-0.89	0.66
0.6	0.5	0.13-0.20	0.17	0.02-0.84	0.46	0.27-0.96	0.68
0.7	0.7	0.21-0.35	0.26	0.008-0.50	0.3	0.67-0.91	0.8
0.6	0.7	0.098-0.22	0.15	0.008-0.77	0.45	0.37-0.96	0.69
0.9	0.9	0.21-0.30	0.25	0.004-0.67	0.38	0.48-0.91	0.72
0.6	0.9	0.08-0.20	0.14	0.006-0.82	0.49	0.29-0.98	0.65
1.1	1.1	0.21-0.29	0.24	0.001-0.65	0.36	0.52-0.92	0.75

Tabla V-2 Resumen de los rangos en los que se encuentran los parámetros para oleaje regular

Dique	B/L	rango de R	promedio	Rango de T	promedio	Rango de D	promedio
0.3	0.3	0.19-0.34	0.26	0.04-0.80	0.49	0.28-0.91	0.62
0.6	0.3	0.14-0.19	0.16	0.05-0.71	0.44	0.47-0.97	0.73
0.5	0.5	0.18-0.30	0.24	0.02-0.73	0.46	0.38-0.93	0.66
0.6	0.5	0.17-0.24	0.21	0.02-0.86	0.5	0.19-0.96	0.62
0.7	0.7	0.19-0.32	0.25	0.018-0.51	0.3	0.68-0.92	0.81
0.6	0.7	0.13-0.17	0.15	0.014-0.79	0.48	0.33-0.97	0.67
0.9	0.9	0.17-0.31	0.24	0.014-0.72	0.39	0.41-0.94	0.72
0.6	0.9	0.13-0.19	0.15	0.013-0.80	0.48	0.32-0.97	0.67
1.1	1.1	0.19-0.28	0.23	0.008-0.72	0.37	0.42-0.94	0.74

5.2 Análisis del parámetro Fb/H

A continuación se presentan los resultados para la relación del parámetro Fb/H, obtenidos de un oleaje regular y un oleaje irregular, en este apartado se analizará la reflexión, transmisión y disipación.

Oleaje regular

Reflexión

Para la reflexión se muestra la *fig. V-9*, en donde se presentan los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm y 60 cm. Se puede observar que los datos se encuentran dentro de un rango de 0.1 a 0.3, lo que significa que las olas al impactar con el dique pueden reflejar hasta el 30 % de su energía de vuelta hacia su punto de origen.

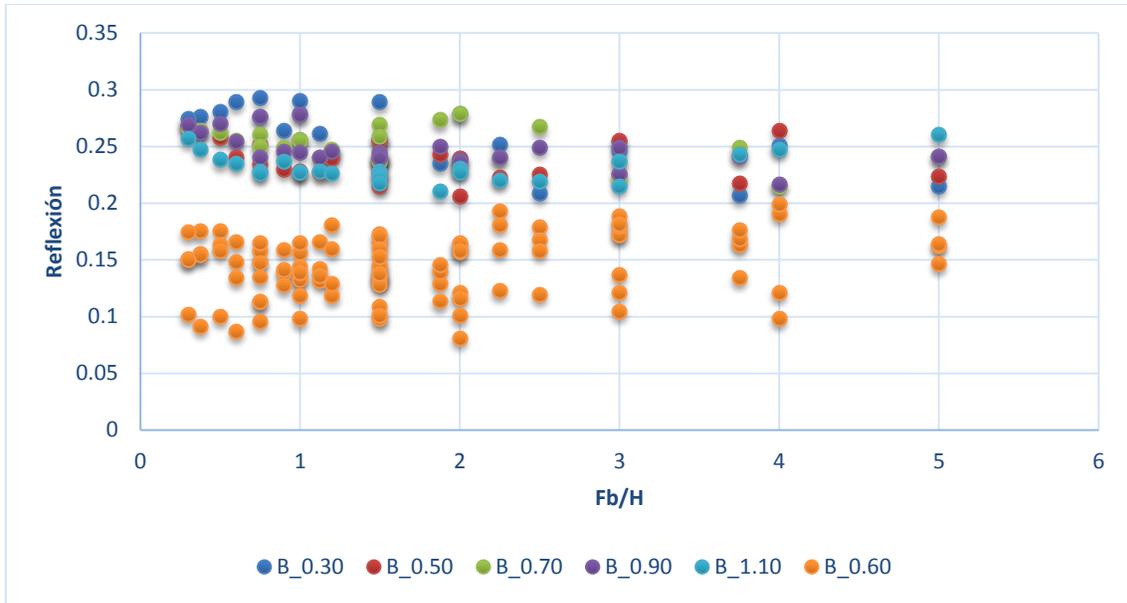


Fig. V-11 Comparación del parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular

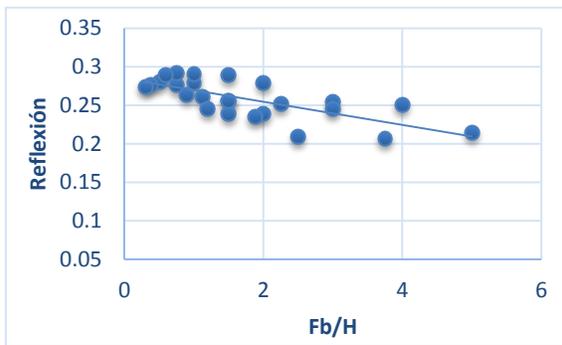


Fig. V-9 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 30 cm

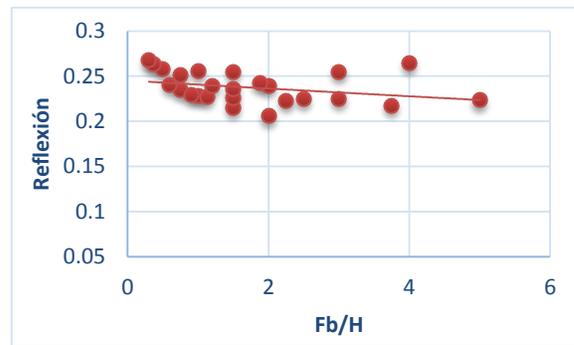


Fig. V-10 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 50 cm

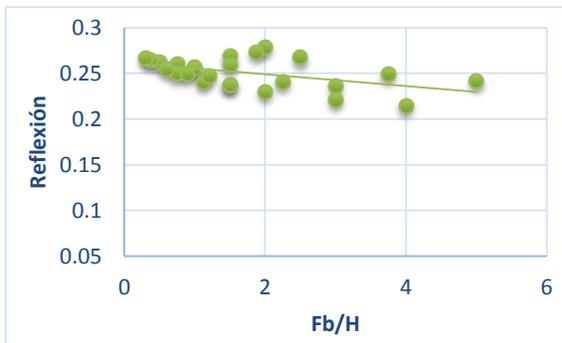


Fig. V-12 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 70 cm

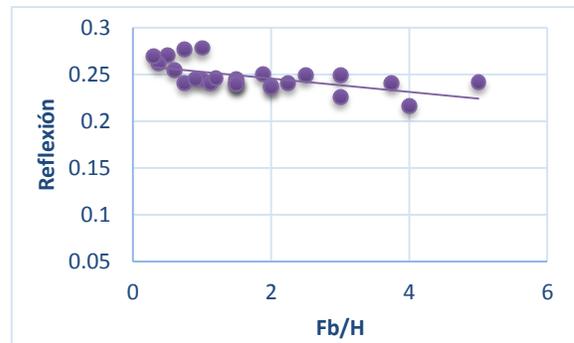


Fig. V-13 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 90 cm

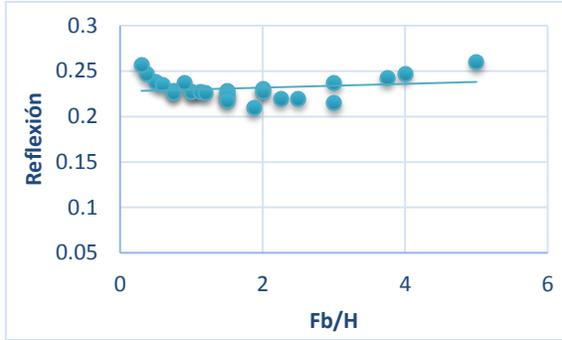


Fig. V-14 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 110 cm

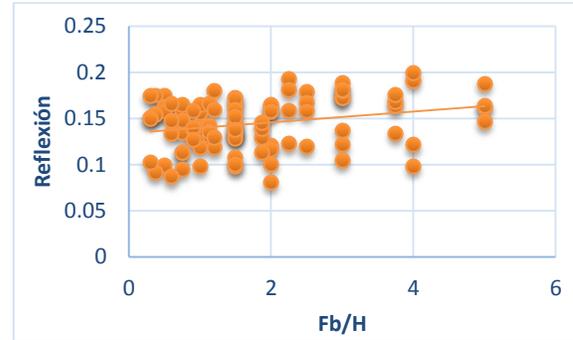


Fig. V-15 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 60 cm

Como se puede ver en la Figs. V-10, V-11, V-12 y V-13 viendo de izquierda a derecha existe una tendencia a la disminución de la reflexión conforme el parámetro Fb/H aumenta, siendo las alturas de ola más grandes las que presentan mayor reflexión y por el otro lado las olas de menor altura presentan una mínima reflexión, por otro lado cuando la profundidad es mayor observamos que la reflexión es menor a comparación de que si la estructura se encuentra con un francobordo menor en que vemos que la estructura influye en la energía reflejada. Este comportamiento se presenta en la mayoría de los diques de oleaje regular a excepción de los diques de $B_{1.10}$ m y $B_{0.60}$ m en los cuales la tendencia es en sentido contrario.

Para el dique de $B_{1.10}$ m su comportamiento puede afectarse por el ancho de corona ya que se puede presentar mayor fricción entre el material y el oleaje provocando que la mayor parte de la energía se refleje, en el caso del dique de $B_{0.60}$ m su comportamiento se puede deber a que los periodos pequeños con alturas grandes, suelen ser olas inestables que pueden romper en el trayecto entre la pala de generación al dique, por lo tanto se puede hablar de una menor energía llegando al dique, más la energía que disipa el dique es razonable que la reflexión sea menor.

De manera general se puede observar como los parámetros Fb/H con valores iguales dan reflexiones distintas, pero si se analiza de manera específica cada dique se observa que los valores obtenidos en cada caso son muy parecidos, en una primera estancia se puede decir que la reflexión se afecta por el ancho de corona de cada dique.

Transmisión

Para la transmisión se presenta la siguiente figura, en donde se presentan los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm y 60 cm.

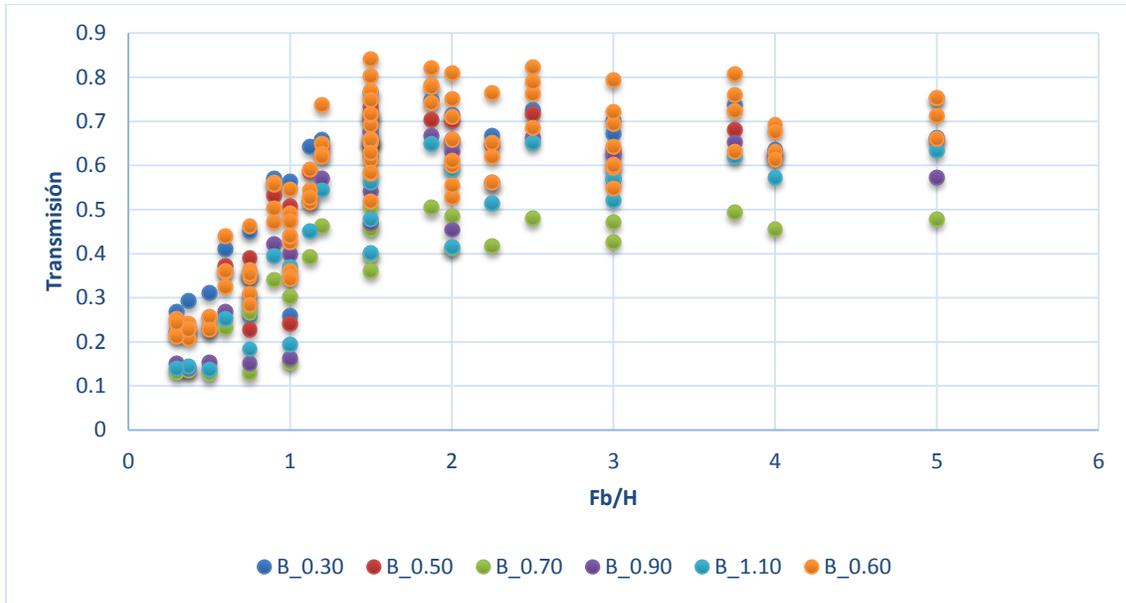


Fig. V-16 Comparación del parámetro Fb/H y transmisión con oleaje regular

La *fig. V-16* se puede analizar por dos secciones, se observa que inicialmente la transmisión es muy baja para relaciones de Fb/H pequeñas y se presenta una tendencia a aumentar hasta que se alcanza un valor máximo en el punto dado por la relación $Fb/H = 1.5$, esta sería la primera sección y la segunda sería la dada a partir de este punto, aquí la transmisión comienza a disminuir gradualmente mientras la relación Fb/H sea mayor. Se puede observar que los datos están en un rango de 0.1 a 0.8, lo que indica que el dique está funcionando de manera adecuada, ya que al tener casos de Fb/H con valores altos significa que se tiene un francobordo grande con una altura pequeña y por lo tanto la ola transmitirá gran parte de su energía, en cambio sí se trata de una ola grande con un francobordo pequeño se transmite muy poca energía.

Se puede observar que cuando los parámetros Fb/H son iguales las transmisiones son diferentes, lo cual se puede deber a distintos fenómenos que se presentan en el momento en que la ola llega al dique, tales como el “set-up” en donde la ola al momento de pasar la pendiente del dique presenta un cierto aperaltamiento en su altura y por lo tanto se transmitirá mayor energía, pero a su vez se verá reducida al momento de pasar por la corona del dique, en otros casos las olas rompen contra el dique y la energía que llegan a transmitir resulta ser muy poca, por tales motivos la transmisión suele ser diferente a pesar de tener el mismo valor de Fb/H .

Disipación

En la disipación se presenta la *fig. V-17*, en donde se muestran los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm y 60 cm. Se puede observar que los datos están en un rango de 0.30 a 0.90.

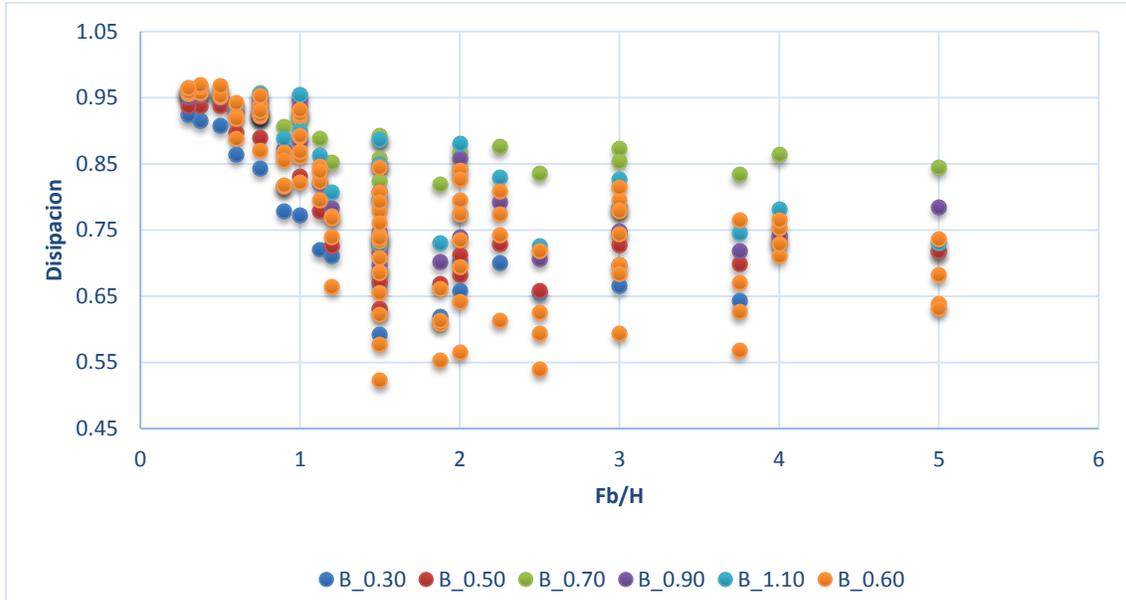


Fig. V-17 Comparación del parámetro Fb/H y disipación con oleaje regular

En la *Fig V-17* se puede observar un comportamiento opuesto a la transmisión, se tiene una disipación de 0.95 para todos los diques, después estos valores comienzan a disminuir mientras el parámetro Fb/H va aumentando hasta llegar a un mínimo dado en $Fb/H = 1.5$, después de este punto empieza a aumentar la disipación mientras va aumentando el parámetro Fb/H , este comportamiento se debe a que cuando se tienen olas grandes con francobordos pequeños el dique funciona disipando la mayor parte de la energía de la ola, en el otro extremo cuando se tienen francobordos grandes y olas pequeñas, las olas conservan prácticamente la mitad de su energía.

Cuando se tienen valores iguales de los parámetros Fb/H se tienen disipaciones distintas, esto es debido a que los anchos de corona disipan de distintas maneras el oleaje, también cuando se tienen periodos pequeños la mayoría de olas de mayor tamaño rompían antes de llegar al dique, por lo tanto se complica el análisis de disipación.

Oleaje irregular

Reflexión

En la reflexión se presenta la *fig. V-18*, en donde se presentan los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm y 60 cm. Se puede observar que los datos están en un rango de 0.15 a 0.30 de energía que se regresa al punto de origen del oleaje.

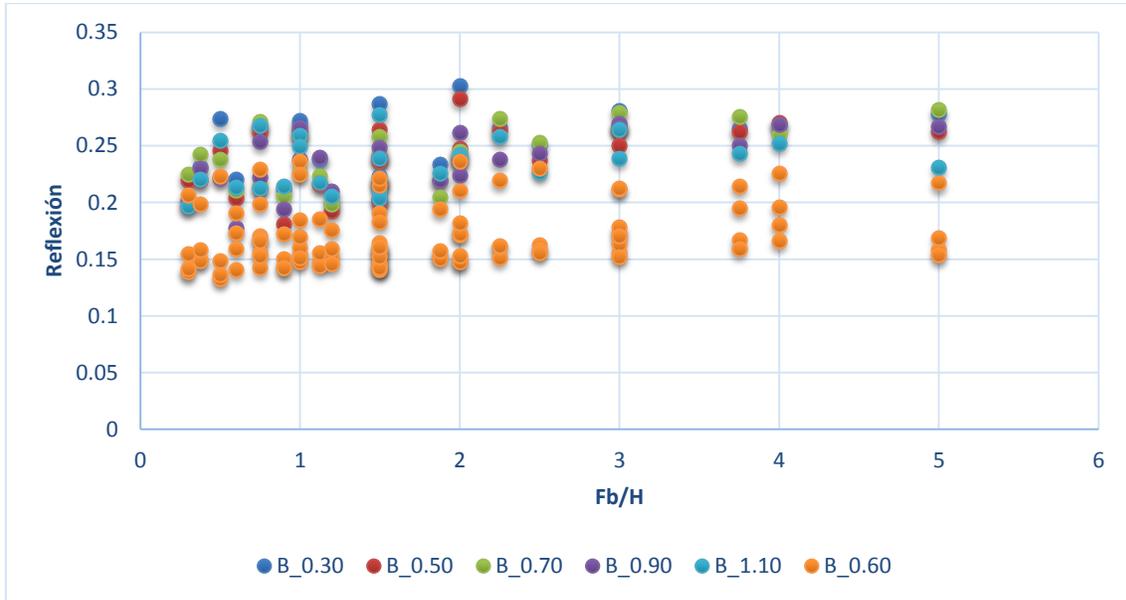


Fig. V-18 Comparación del parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular

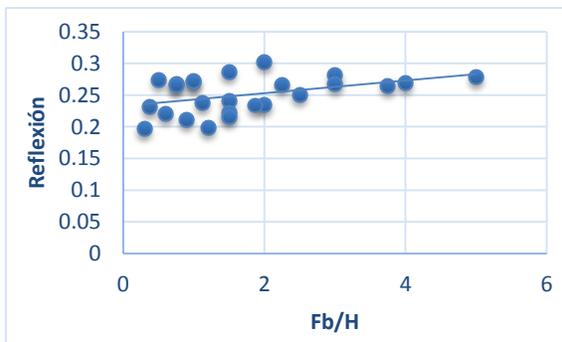


Fig. V-20 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 30 cm

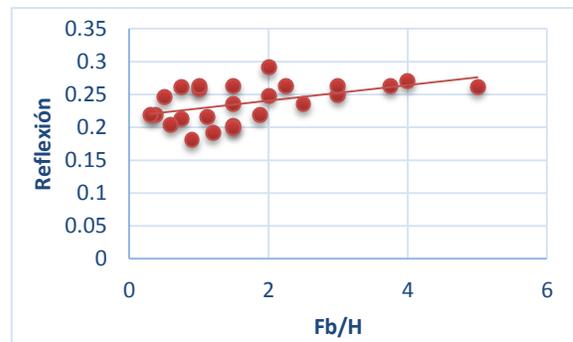


Fig. V-19 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 50 cm

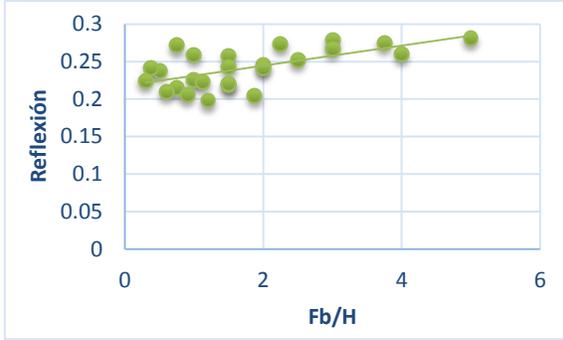


Fig. V-21 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 90 cm

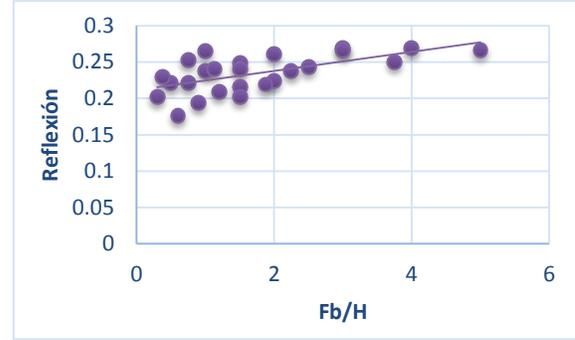


Fig. V-22 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 70 cm

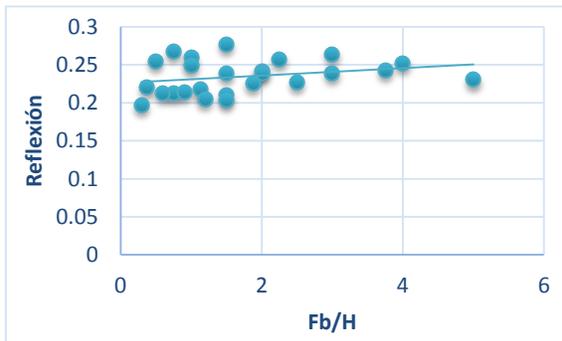


Fig. V-24 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 110 cm

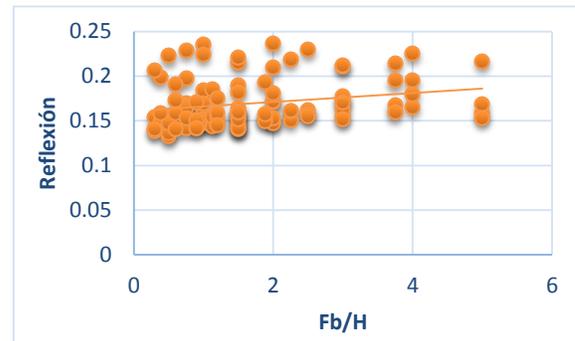


Fig. V-23 Parámetro Fb/H y reflexión con oleaje regular en dique de 60 cm

El comportamiento de los diques con oleaje irregular, tiende a reflejar menor energía cuando se tienen relaciones de Fb/H pequeñas y va aumentando mientras este parámetro se hace mayor, por ser un proceso con oleaje irregular las olas no siempre tienen las mismas alturas de ola o los mismos periodos, por lo tanto al momento de llegar al dique algunas olas rompen y no reflejan la misma energía que las que no lo hacen, entonces la energía que se refleja puede sumarse al oleaje incidente y aumentar en cierto grado la energía con que impacta al dique, posiblemente este fenómeno se pueda presentar en las olas con menor tamaño y por tal motivo tienen mayor reflexión que las olas de mayor tamaño que rompen con el dique.

Transmisión

En la transmisión se presenta la *fig. V-19*, en donde se observan los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm y 60 cm. Se puede observar que los datos están en un rango de 0.1

a 0.80 con excepción de los puntos que sobrepasan este rango los cuales corresponden al dique de 60 cm de ancho con una variación del nivel medio de 0.45 cm y un periodo de 0.88 s.

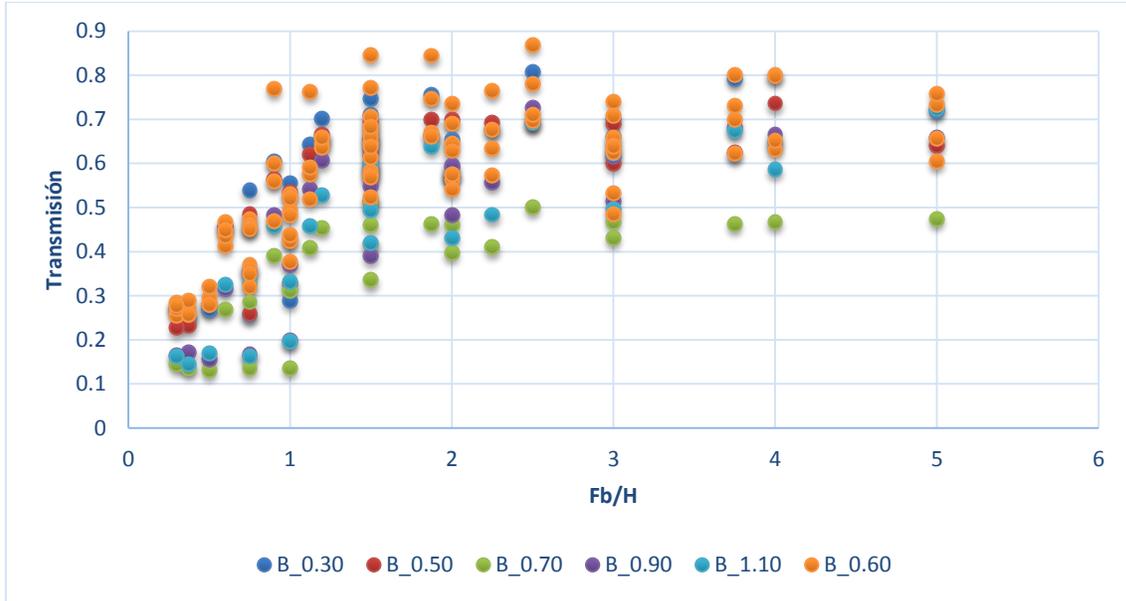


Fig. V-25 Comparación del parámetro Fb/H y transmisión con oleaje regular

En la fig. V-25 se observa que inicialmente la transmisión es muy baja para relaciones de Fb/H pequeñas y se presenta una tendencia a aumentar hasta que se alcanza un valor máximo en el punto dado por la relación $Fb/H = 1.5$, se puede observar que unos puntos se alejan del resto de los datos, estos corresponden al dique con ancho de corona de 60 cm, a partir de este punto la transmisión comienza a disminuir gradualmente mientras la relación Fb/H sea mayor. Se puede ver que la transmisión está en un rango de 0.10 a 0.80 lo cual significa que los parámetros Fb/H pequeños transmiten menor energía y los valores intermedios transmiten mayor energía, igual que en el caso de oleaje regular cuando se tienen valores de Fb/H iguales la transmisión es diferente.

Disipación

La disipación se presenta en la fig. V-26, en donde se muestran los diques con un ancho de corona de 30 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm y 60 cm. Se puede observar que los datos están en un rango de 0.30 a 0.90, lo cual significa que los diques la mayor parte de energía del oleaje.

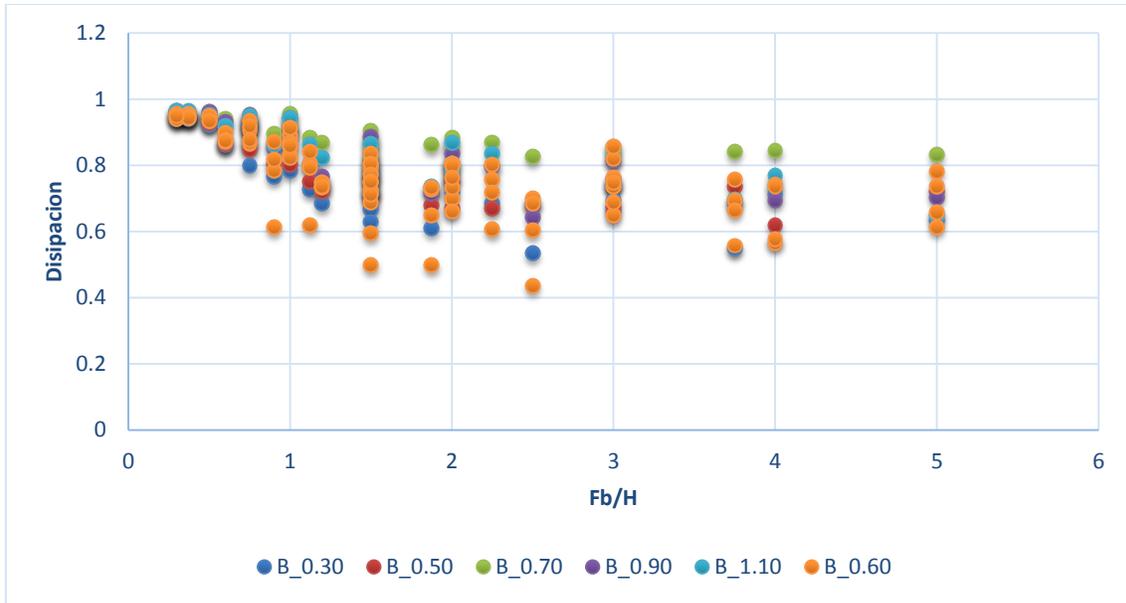


Fig. V-26 Comparación del parámetro Fb/H y disipación con oleaje regular

En la figura anterior se puede observar disipación de 0.95 para todos los diques, después estos valores comienzan a disminuir mientras el parámetro Fb/H va aumentando hasta llegar a un mínimo prácticamente dado en $Fb/H = 1.5$, después de este punto empieza a aumentar la disipación mientras va aumentando el parámetro Fb/H . Su comportamiento es similar al oleaje regular.

5.3 Rotura

En esta sección se revisa el tipo de rotura que se presentó en cada dique dependiendo de las condiciones hidrodinámicas elegidas. Se utilizarán los valores descritos en el capítulo 3 y en la tabla III-1 tipos de rotura según Battjes (1974).

Como sabemos para conocer el tipo de rotura primero obtenemos el número de Iribarren con la ecuación 3.3.

Tabla V-3 Tipo de rotura para diques con ancho de corona 30, 50, 70, 90 y 110 cm

Diques (ancho de corona) m	H (m)	Rotura
0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 1.10	0.03	Oscilación
	0.04	Oscilación
	0.06	Colapso
	0.08	Voluta
	0.10	Voluta

Lo que encontramos fue que sin importar la variación del nivel medio, pero dependiendo de la altura de ola se identificó 3 tipos de rotura, los cuales solo fueron para los diques en los que se utilizó un periodo de 0.8s. Para el dique de ancho de 60 cm el cual se utilizaron 4 periodos obtuvimos los siguientes tipos de rotura.

Tabla V-4 Tipo de rotura para dique con ancho de corona de 60 cm

Dique ancho (m)	T (s)	H(m)	Rotura
0.60	0.65	0.03	Oscilación
		0.04	Colapso
		0.06	Voluta
		0.08	Voluta
		0.10	Voluta
	0.74	0.03	Oscilación
		0.04	Colapso
		0.06	Voluta
		0.08	Voluta
		0.10	Voluta
	0.88	0.03	No hay rotura
		0.04	Oscilación
		0.06	Colapso
		0.08	Voluta
		0.10	Voluta
	1.13	0.03	No hay rotura
		0.04	No hay rotura
		0.06	Oscilación
		0.08	Oscilación
		0.10	Colapso

VI. Conclusiones

En este trabajo se trató de conocer la interacción entre un arrecife artificial tipo dique sumergido y el oleaje, dicho dique construido con un solo material, pero utilizando diferentes dimensiones, en el oleaje se simuló varias condiciones hidrodinámicas.

Actualmente los problemas costeros en el caso de erosión de playas son muy notorios, por lo que este es un problema que enfrenta la ingeniería costera, y más aún porque se deben poner soluciones que estén de acuerdo con diferentes puntos de vista ya sea social, económico y ambiental. Por lo que los arrecifes artificiales son una buena opción.

Encontrar una relación que nos permita caracterizar la relación de un dique con el oleaje es muy pertinente en lo económico. Por lo que nuestro objetivo era ese, cuya evaluación se realizó determinando la transmisión, reflexión y disipación.

Parámetro B/L :

Este parámetro en el cual interviene por parte de la estructura el ancho de corona y por parte del oleaje la longitud de onda y por consiguiente el periodo. Analizando este parámetro encontramos que:

- Para caracterizar la reflexión con dicho parámetro no es posible lograrlo, puesto que no encontramos un rango en el cual si deseamos un porcentaje de energía reflejado, podamos tener una relación B/L y poder elegir conociendo el periodo del oleaje, un ancho de dique.
- En relación con la transmisión podemos concluir que el parámetro B/L es adecuado para caracterizar la energía que deseamos conocer la energía transmitida, puesto que si existe un rango que va del 0.10 al 0.8 de energía transmitida siempre y cuando el dique este completamente sumergido, y más aún el parámetro B/L obtenido de los 6 diques se sitúa en el mismo rango.
- Para conocer la energía disipada podemos concluir que posiblemente B/L sí sea un parámetro adecuado para poder conocer bien la disipación alcanzada con un ancho de dique determinado.

Parámetro Fb/H

En este parámetro interviene por parte de la estructura el francobordo (Fb), y por parte del oleaje la altura de ola. Con este parámetro encontramos:

- En el caso de la reflexión del oleaje, observamos que hay la tendencia de que la reflexión disminuya si el parámetro aumenta, sin embargo, para poder caracterizarlo tampoco es un

parámetro adecuado para conocer la reflexión puesto que existe mucha dispersión entre profundidad y altura de ola.

- Sobre la transmisión del oleaje podemos considerar al parámetro adecuado para comenzar el diseño de un dique, se observó una tendencia clara en la transmisión puesto que esta aumenta cuando la estructura se encuentra más sumergida.
- Por otra parte la disipación se observó que tiene una tendencia proporcional a la de la transmisión por lo que si deseamos caracterizar la estructura-oleaje estaría bien considerar este parámetro.

Recomendaciones de diseño

- Se recomienda utilizar el parámetro Fb/H con valores pequeños, preferentemente menores a 1.5 que es donde se puede observar en las gráficas se tiene un mejor comportamiento tanto en disipación como transmisión.
- Una opción para construir los diques es tomar en cuenta que tengan anchos de corona cercanos a 70 cm que es la medida con la cual se obtuvieron mejores resultados, hay que descartar los diques con ancho de corona grandes ya que implica mayor cantidad de material y su funcionamiento se ve superado por diques más pequeños.
- Hacer estudios más detallados con el fin de ampliar el conocimiento del funcionamiento de los diques sumergidos, siendo necesario conocer otro tipo de parámetros entre la estructura y el oleaje.

Bibliografía

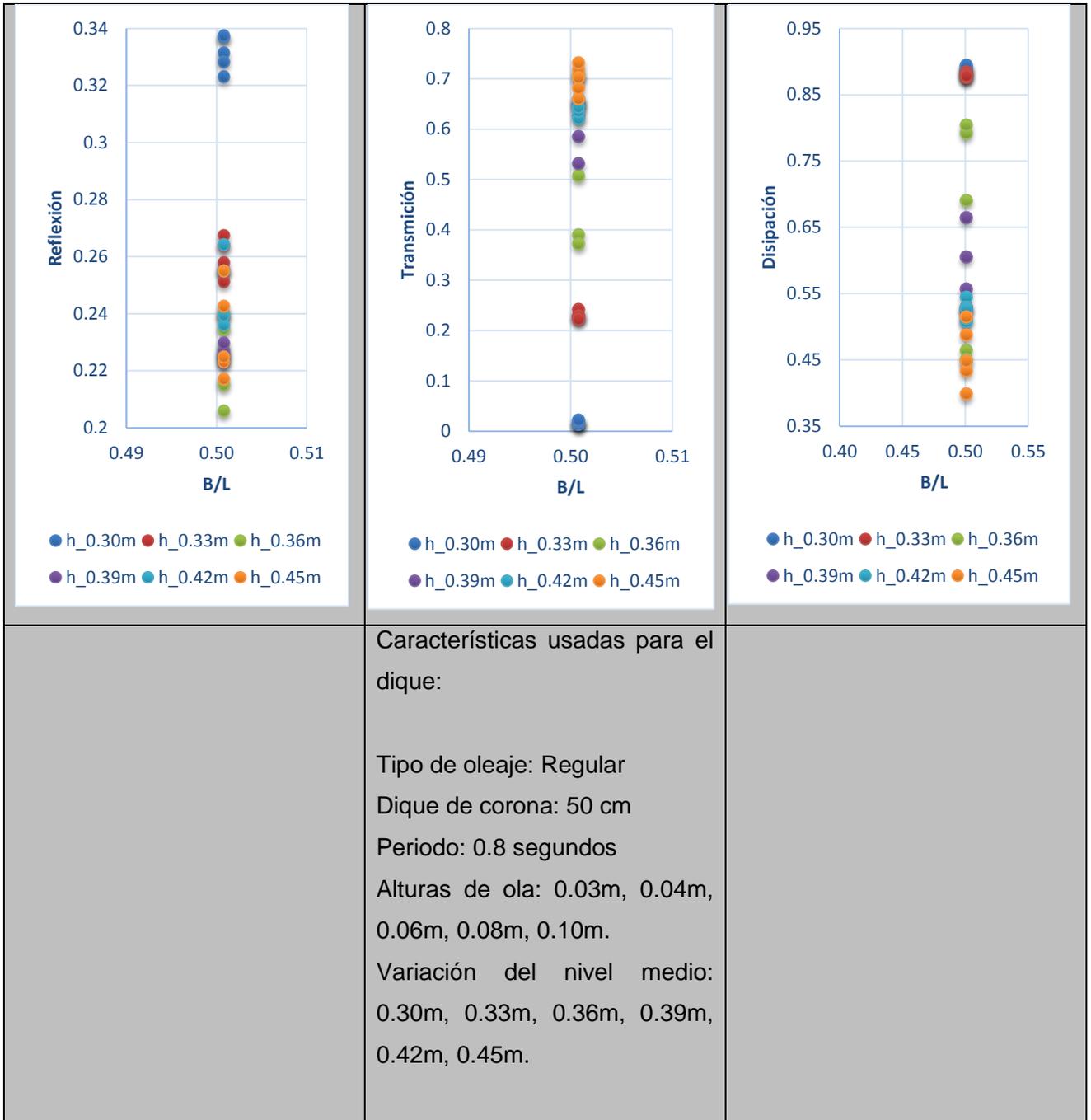
- Airy, G B 1845, Tides and waves, Encycl Metrop, Art 192, 241-396.
- Apuntes del curso de diseño de estructuras marítimas, semestre 2015-1; UNAM
- Bendat, J S P, y Piersol, A G 1986, Random data, John Wiley & Sons, Nueva York, 556 pp.
- Biesel, F., and Suquet, F. 1954. "Laboratory Wave-Generating Apparatus," (Translation of French Articles from La Houille Blanche), Project Report No. 39, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota.
- Bouws, E, Günther, H, Rosenthal, W, y Vincent, C L 1985, Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water 1 spectral form, Jour Geoph Res, 90(C1), 975-986.
- Bretschneider, C L 1959, Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves, Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Flick, R. E., and Guza, R. T. 1980. "Paddle Generated Waves in Laboratory Channels," Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, American Society of Civil Engineers, Vol 106, No. WW1, pp 79-97.
- Funke, E. R., and Mansard, E. P. 1987. "A Rationale for the Use of the Deterministic Approach to Laboratory Wave Generation," Proceedings of Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins, 22nd Congress International Association for Hydraulic Research, pp 153-195.
- Funke, ERM, y Mansard, E P D 1979, Synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, National Research Council of Canada, Ottawa, 54 pp.
- García Palacios, Jaime, 2004. Análisis Tensional del Proceso Constructivo de Emisarios flotados y fondeados. Universidad Politécnica de Madrid
- García Santiago, Erick Iván, 2014. Optimización de un Dispositivo Undimotriz de Tipo Boya Flotante. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ciencias. UNAM, posgrado ciencias de mar y limnología.
- Goda, Y 2000, Random seas and design of maritime structures, 2nd ed, Advances Series on Ocean Engineering, Singapur, World Scientific, 15, 443 pp.
- González Vásquez, José Antonio, 2010. Evaluación de la Eficiencia Hidrodinámica y Morfológica de Diques Arrecife. Tesis para obtener el grado de maestro de ingeniería. UNAM instituto de ingeniería.

- Gutiérrez García, Francisco, 2014. Análisis Experimental de la interacción oleaje – suelos finos. Tesis para obtener título de ingeniero civil. UNAM instituto de ingeniería.
- Hasselmann, K, Barnett, T P, Bonws, E, Carlson, H, Cartwright, D C, Enke, K, Ewing, J, Gienapp, H, Hasselmann, D E, Kruseman, P, Meerburg, A, Muller, P, Olbers, D J, Richter, K, Sell, W, y Walden, H 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP), Deutches Hydrographisches Institut, Hamburgo, 95 pp.
- Havelock, T. H. 1929. "Forced Surface Wave on Water," Philosophical Magazine, Series 7, Vol 8, pp 569-576.
- Hudspeth, Robert T. Waves and Wave Forces on Coastal and Ocean Structures. USA.
- Hughes, Steven A., 1995. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, USA.
- IAHR, W G 1989, List of sea-state parameters, Jour Wat, Port, Coast and Oce Eng, 115(6), 793-808.
- ISSC 1964, Proceeding of the Second International Ship Structures Congress, Delf, Holanda
- ITTC 1966, Recommendations of the 11th International Towing Tank Conference, Proccedings 11th ITTC, Tokio.
- ITTC 1972, Technical decisions and recommendations of the sea keeping committee, Proceedings 12th and 13th ITTC, Rome 1969 and Berlin 1972.
- Johnson, R, Mansard, E y Ploeg, J 1978, Effects of wave grouping on breakwater stability, Int Conference on Coastal Engineering, ASCE, Hamburgo.
- Kitaigorodskii, S A 1961, Application of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process (traducido del ruso 73-80), Bull Akad, Nauk SSSR, Ser, Geophys, 105-117.
- Krylov, Y M 1966, Spektralnyye Metody Issledovaniya i Razcheta Vetrovykh Voln (Sepectral methods of studying and predicting of wind waves, Consultado en Massel, 1996), Leningrad, Gidrometeoizdat, 256 pp.
- Manual de Diseño de Obras Civiles.2012 CFE/ Instituto de Ingeniería UNAM
- Ochi, M K, y Hubble, E N 1976, Six parameter wave spectra, Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Honolulu, Hawaii.
- Palomino Monzón Ma. Del Carmen/ Almazan Garate José. 2000, Descripción, Medida y Análisis Del Oleaje.

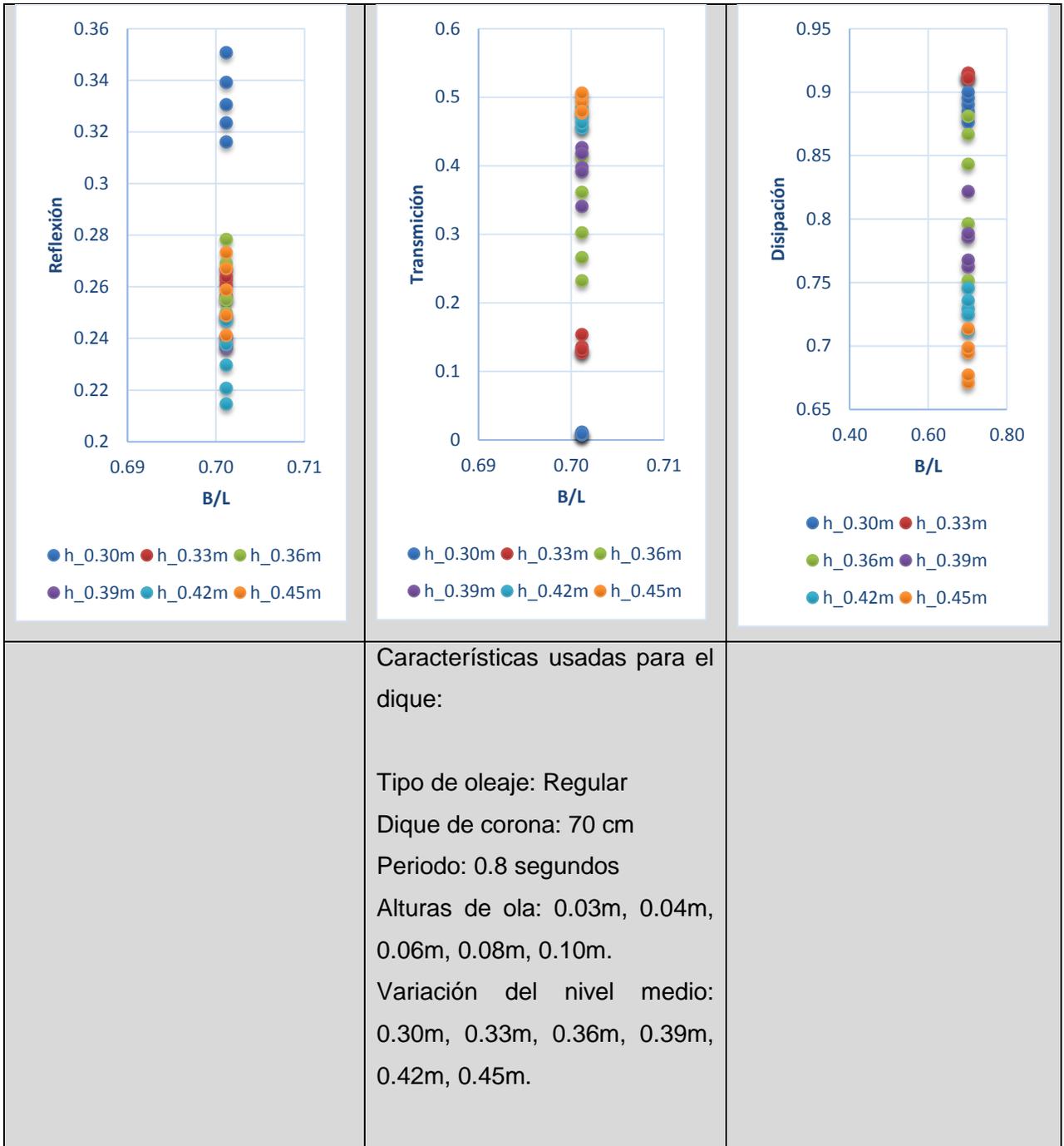
- Phillips, O M 1958, The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, Journal of Fluid Mechanics, 4, 426-434.
- Phillips, O M 1977, The dynamics of the upper ocean, Cambridge Univ Press, 336 pp.
- Pierson, W J, y Moskowitz, L A 1964, A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S A Kitaigorodskii, J Geoph Res, 69(24), 5181-5203.
- Robert G. Dean/ Robert A. Dalrymple, 1984. Water wave Mechanics for Engineers and Scientists, USA.
- Silva Casarín, Rodolfo, 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*, Serie Docencia-UNAM, México.
- Toba, Y 1973, Local balance in the air-sea boundary process III; On the spectrum of wind waves, J Oceanogr Soc, 29, 209-220.

Anexos

<p>Reflexión</p> <p>B/L</p> <p>● h_0.30 ● h_0.33 ● h_0.36 ● h_0.39 ● h_0.42 ● h_0.45</p>	<p>Transmisión</p> <p>B/L</p> <p>● h_0.30m ● h_0.33m ● h_0.36m ● h_0.39m ● h_0.42m ● h_0.45m</p>	<p>Disipación</p> <p>B/L</p> <p>● h_0.30m ● h_0.33m ● h_0.36m ● h_0.39m ● h_0.42m ● h_0.45m</p>
<p>Características usadas para el dique:</p> <p>Tipo de oleaje: Irregular</p> <p>Dique de corona: 30 cm</p> <p>Periodo: 0.8 segundos</p> <p>Alturas de ola: 0.03m, 0.04m, 0.06m, 0.08m, 0.10m.</p> <p>Variación del nivel medio: 0.30m, 0.33m, 0.36m, 0.39m, 0.42m, 0.45m.</p>		



<p>Reflexión</p> <p>B/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● h_0.30m ● h_0.33m ● h_0.36m ● h_0.39m ● h_0.42m ● h_0.45m 	<p>Transmisión</p> <p>B/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● h_0.30m ● h_0.33m ● h_0.36m ● h_0.39m ● h_0.42m ● h_0.45m 	<p>Disipación</p> <p>B/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● h_0.30m ● h_0.33m ● h_0.36m ● h_0.39m ● h_0.42m ● h_0.45m
<p>Características usadas para el dique:</p> <p>Tipo de oleaje: Irregular</p> <p>Dique de corona: 50 cm</p> <p>Periodo: 0.8 segundos</p> <p>Alturas de ola: 0.03m, 0.04m, 0.06m, 0.08m, 0.10m.</p> <p>Variación del nivel medio: 0.30m, 0.33m, 0.36m, 0.39m, 0.42m, 0.45m.</p>		



<p>Reflexión</p> <p>Título del eje</p> <ul style="list-style-type: none"> h_0.30m h_0.33m h_0.36m h_0.39m h_0.42m h_0.45m 	<p>Transmisión</p> <p>Título del eje</p> <ul style="list-style-type: none"> h_0.30m h_0.33m h_0.36m h_0.39m h_0.42m h_0.45m 	<p>Disipación</p> <p>B/L</p> <ul style="list-style-type: none"> h_0.30m h_0.33m h_0.36m h_0.39m h_0.42m h_0.45m
<p>Características usadas para el dique:</p> <p>Tipo de oleaje: Irregular</p> <p>Dique de corona: 90 cm</p> <p>Periodo: 0.8 segundos</p> <p>Alturas de ola: 0.03m, 0.04m, 0.06m, 0.08m, 0.10m.</p> <p>Variación del nivel medio: 0.30m, 0.33m, 0.36m, 0.39m, 0.42m, 0.45m.</p>		

