



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LA ROMPIENTE
EN MEDIOS DISIPATIVOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

DIEGO PEDROZO ACUÑA

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

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MEXICO, D.F

SEPTIEMBRE 2006

*A mis padres Adrián y Oralia,
por la vida, su amor y su ejemplo.*

*A mis hermanos Adrián y Úrsula
por ser como mis otros padres.*

*A mi vito Carlos Manuel Acuña Caballero (q.e.p.d)
por tu amor, tu ejemplo y tus enseñanzas.*

AGRADECIMIENTOS

Agradable tarea es recordar de una forma u otra a todos aquellos que han sido partícipes de la formación de uno. Sirvan entonces éstas líneas como un homenaje a todos aquellos que has sido cómplices de esta misión.

Gracias a mi muy querida Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi segundo hogar y por brindarme la oportunidad de ser un hombre de bien.

Gracias a la Facultad de Ingeniería y a sus profesores, por su dedicación y preocupación en formar ingenieros comprometidos con su país.

Gracias al Instituto de Ingeniería y al M. en I. Víctor Franco, por el apoyo y su preocupación en formar gente de ciencia, pero sobretodo, seres humanos.

Un especial agradecimiento al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su ayuda, su paciencia, apoyo y consejos a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Mil gracias a mi novia Leticia Ivonne Contreras Mena, por su amor, paciencia, apoyo y por ser mi motor durante todo este camino, pero sobretodo, por amarme de esa forma que sólo tú puedes hacerlo.

A mis compañeros del grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, Alberto, Edgar, Gregorio, Gustavo, José Luís y Noe, por su apoyo, ayuda y amistad.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería, Moguel, Gerardo, Luís Carlos por hacer que este camino sea más placentero de recorrer, por compartir conmigo todos esos momentos inolvidables y sobretodo por demostrarme que la hermandad no solo se lleva en la sangre. Gracias carnales!!

Gracias también a Ana Laura, Alejandro e Islas, por que ser los mejores cómplices que me pude encontrar en mi camino por la facultad y por hacer que esto fuera más fácil de realizar.

Gracias a mis primos Manuel e Isaac, que más bien son como mis hermanos, por estar ahí siempre que los necesité.

ÍNDICE

ÍNDICE	7
LISTA DE SÍMBOLOS	11
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABLAS	17
RESÚMEN	19
Introducción	20
Objetivos	22
Metodología	23
Descripción y Organización del Trabajo	24
I. El oleaje y sus procesos	27
I.1 El oleaje	27
I.1.1 Fuerzas generadora y restauradora	27
I.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas	28
I.1.2.1 Clasificación de las ondas en base a su período	28
I.1.2.2 Clasificación del oleaje de acuerdo a su génesis y transmisión de energía	29
I.1.2.3 Clasificación debido a la profundidad relativa	31
I.2 Procesos del oleaje	32
I.2.1 Refracción	32
I.2.2 Difracción	34
I.2.3 Reflexión	35
I.2.4 Disipación	36
I.3 Teorías del Oleaje	37
I.3.1 Clasificación de las teorías y modelos de oleaje	38
I.3.2 Ecuaciones de gobierno y condiciones de frontera	39
I.3.3 Ecuación de continuidad	40
I.3.4 Ecuación de Laplace	44
I.3.5 Ecuaciones de Navier-Stokes	44
I.3.6 Ecuación de Euler	52
I.3.7 Ecuación de Bernoulli	52
I.3.8 Teorías para fondo horizontal	55
I.3.8.1 Aproximaciones de Stokes	55
I.3.8.2 Teoría Cnoidal	56
I.3.8.3 Teoría de la onda solitaria	57
I.3.9 Teorías para fondo variable	57
I.3.9.1 Teoría del Rayo	57
I.3.9.2 Ecuación de la Pendiente Suave	58
I.3.9.3 Modelos de Refracción-Difracción	60
I.3.9.4 Modelos de Refracción	60
I.3.9.5 Modelos de Difracción	61
I.3.10 Modelos para aguas someras	61
I.3.10.1 Ecuaciones de Aguas Someras	61
I.3.10.2 Modelos tipo Boussinesq	63

II.	Estado del Arte	67
II.1	Clasificación de la rompiente	67
II.1.1	Descartamiento	67
II.1.2	Voluta	68
II.1.3	Oscilación	68
II.1.4	Colapso	69
II.1.5	Determinación de la Rotura	69
II.2	Altura de ola rompiente y profundidad de rompiente	71
II.2.1	Criterio de Rompiente	71
II.2.2	Altura de ola rompiente	74
II.2.3	Profundidad de Rompiente	76
II.2.4	Relación entre la transformación de la ola en aguas someras y el criterio de rompiente	77
II.2.5	Efecto de las corrientes en el criterio de rompiente	77
II.2.6	Criterio de rompiente para oleaje irregular unidireccional	78
II.3	Cinemática de la rotura	78
II.4	Transformación del oleaje en la zona de rompiente	79
II.4.1	Características Generales de la transformación del oleaje en la zona de rompiente. ...	80
II.4.2	Modelado de la transformación del oleaje en la zona de rompiente.	80
II.4.3	Transformación del oleaje irregular en la zona de rompiente.	83
II.5	Perfil de la onda	85
II.5.1	Velocidad Promedio	85
II.5.2	Perfil de la onda	85
II.5.3	Velocidad de la partícula de agua	86
II.5.4	Relación entre el perfil de la onda y la velocidad de partícula de agua	86
II.5.5	Turbulencia en la zona de rompiente	87
II.5.6	Movimiento de largo período en la zona cerca de la costa	89
III.	Estudio Experimental	93
III.1	Descripción del Laboratorio	93
III.1.1	Características del Canal de oleaje	94
III.1.2	Especificaciones del generador de oleaje	95
III.1.3	Equipo de medición	95
III.2	Descripción del Modelo	95
III.3	Ensayos	99
III.3.1	Elección de los ensayos	99
III.3.2	Corrección de los ensayos	102
III.3.3	Realización de los ensayos	107
III.3.4	Procesamiento de los datos	108
III.4	Resultados	114
III.4.1	Tipo de Rotura	114
III.4.2	Coefficiente de reflexión	118
III.4.3	Altura de Ola Rompiente	122
IV.	Caracterización de la Rotura	129
IV.1	Resumen de los resultados	129

IV.2 Comparación para fondo impermeable	130
IV.2.1 Criterio de Munk	131
IV.2.2 Criterio de Komar	132
IV.2.3 Criterio de Horikawa.....	134
IV.2.4 Criterio de Le Méhauté	135
IV.2.5 Criterio de McCowan.....	136
IV.2.6 Criterio de Miche	137
IV.2.7 Criterio de Goda.....	138
IV.2.8 Criterio de Weggel.....	139
IV.3 Comparación para fondo permeable	140
IV.3.1 Fondo permeable de 2 pulgadas de espesor	140
IV.3.1.1 Criterio de Munk.....	140
IV.3.1.2 Criterio de Komar	142
IV.3.1.3 Criterio de Horikawa.....	143
IV.3.1.4 Criterio de Le Méhuaté	144
IV.3.1.5 Criterio de McCowan.....	145
IV.3.1.6 Criterio de Miche	146
IV.3.1.7 Criterio de Goda.....	147
IV.3.1.8 Criterio de Weggel.....	148
IV.3.2 Fondo permeable de 6 pulgadas de espesor	149
IV.3.2.1 Crietrio de Munk.....	149
IV.3.2.2 Criterio de Komar	150
IV.3.2.3 Criterio de Horikawa.....	151
IV.3.2.4 Criterio de Le Méhauté	152
IV.3.2.5 Criterio de MCowan.....	153
IV.3.2.6 Criterio de Miche	154
IV.3.2.7 Criterio de Goda.....	155
IV.3.2.8 Criterio de Weggel.....	156
VI.4 Propuesta.....	157
Conclusiones y Futuras líneas de trabajo	163
ANEXO 1	169
Resumen Teoría Lineal	169
ANEXO 2.....	173
Método de Asunción Baquerizo (Separación de Onda incidente y Reflejada).....	173
Referencias Bibliográficas	181

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parámetro empírico de Weggel
	Espesor de material poroso
a_x	Aceleración en dirección X
a_y	Aceleración en dirección Y
a_z	Aceleración en dirección Z
b	Parámetro empírico de Weggel
d	Profundidad
div	Divergente de una función vectorial
dx	Incremento diferencial en dirección X
dy	Incremento diferencial en dirección Y
dz	Incremento diferencial en dirección Z
e	Espesor
f	Frecuencia
$f(z)$	Función de profundidad
g	Gravedad
h	Tirante de agua
h_b	Profundidad de rompiente
h_p	Profundidad hasta el medio poroso
h^*	Profundidad efectiva
m	Masa
k	Número de onda
kh	Profundidad relativa
k_d	Coefficiente de difracción
k_f	Promedio de la disipación en altura de ola debido a la fricción
k_r	Coefficiente de refracción
p	Probabilidad
	Presión
t	Variable tiempo
u	Componente de la velocidad en X
u_w	Velocidad de onda
u'	Velocidad de turbulencia
v	Componente de la velocidad en Y
	Viscosidad cinemática
w	Componente de la velocidad en Z
x	Componente cartesiana en la dirección X
y	Componente cartesiana en la dirección Y
z	Componente cartesiana en la dirección Z
A	Área
	Constante empírica
C	Celeridad de la onda

C_g	Celeridad de grupo
C_r	Coefficiente de reflexión
E_b	Energía de Rompiente
\overline{F}	Flujo de Energía
F_x	Fuerza externa por unidad de masa en la dirección X
F_y	Fuerza externa por unidad de masa en la dirección Y
F_z	Fuerza externa por unidad de masa en la dirección Z
H	Altura de ola
H_b	Altura de ola rompiente
H_i	Altura de ola incidente
H_0	Altura de ola en aguas profundas
H_0'	Altura de ola corregida
$H_{1/3}$	Altura de ola significativa
$H_{1/3}^*$	Altura de ola significativa esperada
I_r	Número de Iribarren
I_r^*	Número de Iribarren propuesto
L	Longitud de onda
L_b	Longitud de onda en la rompiente
L_0	Longitud de onda en aguas profundas
M	Masa de un cubo diferencial
T	Periodo de la onda
U	Magnitud de la corriente
U_o	Corriente uniforme
U_{sb}	Parámetro de Ursell para aguas someras
V	Volumen
	Velocidad
α_b	Constante de Saeki
β	Ángulo de la playa
ε	Permeabilidad
ϕ	Potencial de velocidades
γ	Peso volumétrico del agua
γ_b	Índice de profundidad de rompiente
η	Superficie libre del agua
μ	Viscosidad dinámica
θ	Ángulo entre la dirección de propagación y la corriente
ρ	Densidad
σ	Frecuencia angular
	Esfuerzo Normal
σ^*	Frecuencia Angular
τ	Esfuerzo cortante
ξ	Componente vertical del desplazamiento orbital
	Parámetro de Similitud

ζ	Componente horizontal del desplazamiento orbital
Δ	Incremento diferencial
ΔA	Incremento diferencial de área
$\Delta\theta$	Incremento diferencial de ángulo
Δz	Incremento diferencial de la profundidad
Φ	Potencial de velocidades en x, y, z, t
Φ_d	Pérdida de energía por unidad de tiempo debido a la rotura
∇	Operador Nabla
∇^2	Laplaciano de una función escalar
Ω_b	Índice de altura de rompiente

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 Clasificación de las ondas referidas al período – energía.....	29
Figura I.2 Oleaje tipo SEA.....	30
Figura I.3 Oleaje tipo SWELL.....	30
Figura I.4 Clasificación del oleaje de acuerdo a la profundidad relativa en que viaja.....	32
Figura I.5 Refracción del Oleaje en la línea de costa.....	33
Figura I.6 Difracción causada por un rompeolas.....	34
Figura I.7 Esquema general de la difracción del oleaje.....	34
Figura I.8 Reflexión debida a la presencia de un rompeolas.....	35
Figura I.9 Rotura de una ola.....	37
Figura I.10 Clasificación de modelos 1D, 2D y 3D.....	39
Figura I.11 Cubo infinitesimal en coordenadas ortonormales.....	40
Figura I.12 Nomenclatura utilizada par los esfuerzos.....	41
Figura I.13 Esfuerzos sobre un volumen de control.....	46
Figura I.14 Distribución de velocidades de un fluido entre dos placas deslizándose.....	48
Figura I.15 Diagrama de deformaciones en el plano x-y.....	49
Figura I.16 Comparación de la superficie libre entre la Teoría Lineal y Stokes 2° orden.....	56
Figura I.17 Comparación entre ondas cnoidales de diferente k, y una onda solitaria.....	57
Figura I.18 Diagrama de refracción para un Tsunami.....	58
Figura I.19 Ejemplos de propagación utilizando la pendiente suave.....	59
Figura I.20 Ejemplo de propagación con el programa OLUCA.....	60
Figura I.21 Corrientes generadas por mareas obtenidas mediante el módulo de ecuaciones de aguas someras del Mike 21.....	62
Figura I.22 Ejemplo de propagación con el programa SimWave.....	63
Figura II.1 Rotura tipo descretamiento.....	67
Figura II.2 Rotura tipo voluta.....	68
Figura II.3 Rotura tipo Oscilación.....	68
Figura II.4 Rotura tipo colapso.....	69
Figura II.5 Clasificación de los modelos de rompiente.....	70
Figura II.6 Comparación de varios criterios de rotura.....	73
Figura II.7 Comparación de la altura de ola rompiente de varios criterios.....	75
Figura II.8 Profundidad de rompiente.....	76
Figura II.9 Profundidad equivalente.....	77
Figura II.10 Cambio en la distribución de la altura de ola debido a la rompiente.....	84
Figura III.1 Canal de Oleaje del Instituto de Ingeniería.....	94
Figura III.2 Rampa de acrílico utilizada.....	96
Figura III.3 Posición final de la rampa para el caso impermeable de talud 1:8.....	97
Figura III.4 Rampa con medio poroso de dos pulgadas.....	97
Figura III.5 Forma y posición de los sacos de grava para las pendientes más inclinadas.....	98
Figura III.6 Esquema del arreglo de la rampa y sensores para el talud 1:8.....	99
Figura III.7 Ejemplo de señales elaboradas con el archivo de serie de tiempo de los sensores, ensayo #3.....	112

Figura III.8 Profundidad de rompiente.....	113
Figura III.9 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud impermeable)	119
Figura III.10 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud poroso $e=2''$).....	120
Figura III.11 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud poroso $e=6''$).....	121
Figura IV.1 Comparación del Coeficiente de Reflexión para los tres tipos de talud utilizados	129
Figura IV.2 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Munk (Talud Impermeable)	132
Figura IV.3 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Komar (Talud Impermeable)	133
Figura IV.4 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	134
Figura IV.5 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	135
Figura IV.6 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	136
Figura IV.7 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	137
Figura IV.8 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	138
Figura IV.9 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con.....	139
Figura IV.10 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Munk (Talud Poroso $e=2''$).....	141
Figura IV.11 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	142
Figura IV.12 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	143
Figura IV.13 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	144
Figura IV.14 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	145
Figura IV.15 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	146
Figura IV.16 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	147
Figura IV.17 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	148
Figura IV.18 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	149
Figura IV.19 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	150
Figura IV.20 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	151
Figura IV.21 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	152
Figura IV.22 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	153
Figura IV.23 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	154
Figura IV.24 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	155
Figura IV.25 Comparación de la Altura de Ola Rompiente.....	156
Figura IV.26 Ajuste del criterio de Komar con los datos de laboratorio en los dos espesores de medio poroso.....	160

LISTA DE TABLAS

Tabla I.1 Clasificación de las ondas referidas al período.....	28
Tabla I.2 Clasificación del oleaje en función de la profundidad relativa en que viaja	31
Tabla II.1 Parámetros para clasificar la rompiente	70
Tabla II.2 Valores del número de Iribarren para los distintos tipos de rotura.....	71
Tabla II.3 Clasificación de los modelos de transformación de la rompiente	80
Tabla II.4 Definición de turbulencia debido a la rompiente	88
Tabla III.1 Ensayos Iniciales.....	101
Tabla III.2 Ensayos definitivos para el talud 1:8	102
Tabla III.3 Ensayos definitivos para el talud 1:5	103
Tabla III.4 Ensayos definitivos para el talud 1:3	104
Tabla III.5 Ensayos definitivos para el talud 1:2	105
Tabla III.6 Ensayos definitivos para el talud 1:1.5	106
Tabla III.7 Ejemplo de tabla para la organización de los ensayos	108
Tabla III.8 Fragmento del archivo con la serie de tiempo de los sensores para el ensayo #1.....	109
Tabla III.9 Fragmento y resumen del archivo estadístico del canal #1 del ensayo #1	110
Tabla III.10 Archivos de salida donde se leen los datos de interés (ensayo #17).....	112
Tabla III.11 Resultados del tipo de rotura del talud 1:8.....	114
Tabla III.12 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:5.....	114
Tabla III.13 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:3.....	115
Tabla III.14 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:2.....	116
Tabla III.15 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:1.5.....	117
Tabla III.16 Coeficientes de Reflexión talud impermeable	119
Tabla III.17 Coeficientes de Reflexión talud poroso	120
Tabla III.18 Coeficientes de Reflexión talud	121
Tabla III.19 Alturas de ola rompiente para el talud 1:8	122
Tabla III.20 Alturas de ola rompiente para el talud 1:5	122
Tabla III.21 Alturas de ola rompiente para el talud 1:3	123
Tabla III.22 Alturas de ola rompiente para el talud 1:2	124
Tabla III.23 Alturas de ola rompiente para el talud 1:1.5	125
Tabla IV.1 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud impermeable).....	131
Tabla IV.2 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud impermeable).....	132
Tabla IV.3 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud impermeable).....	134
Tabla IV.4 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud impermeable).....	135
Tabla IV.5 Altura de Ola Rompiente (Criterio de McCowan Talud impermeable)	136
Tabla IV.6 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud impermeable).....	137
Tabla IV.7 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud impermeable)	138
Tabla IV.8 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud impermeable).....	139
Tabla IV.9 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud poroso $e=2''$).....	140
Tabla IV.10 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud poroso $e=2''$)	142
Tabla IV.11 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Horikawa Talud poroso $e=2''$).....	143

Tabla IV.12 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud poroso $e=2''$)	144
Tabla IV.13 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le McCowan Talud poroso $e=2''$)	145
Tabla IV.14 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud poroso $e=2''$)	146
Tabla IV.15 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud poroso $e=2''$).....	147
Tabla IV.16 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud poroso $e=2''$).....	148
Tabla IV.17 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud poroso $e=6''$).....	149
Tabla IV.18 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud poroso $e=6''$)	150
Tabla IV.19 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Horikawa Talud poroso $e=6''$).....	151
Tabla IV.20 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud poroso $e=6''$)	152
Tabla IV.21 Altura de Ola Rompiente (Criterio de McCowan Talud poroso $e=6''$).....	153
Tabla IV.22 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud poroso $e=6''$)	154
Tabla IV.23 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud poroso $e=6''$).....	155
Tabla IV.24 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud poroso $e=6''$).....	156
Tabla IV.25 Tipo de rotura calculada con la fórmula propuesta (Talud $e=2''$).....	158
Tabla IV.26 Tipo de rotura calculada con la fórmula propuesta (Talud $e=6''$).....	159
Tabla IV.27 Valores propuestos del número de Iribarren para taludes porosos	160

RESÚMEN

Este trabajo se centra en el estudio y caracterización de la rompiente del oleaje, haciendo énfasis en la rotura asociada a medios disipativos, debido a que es un tema muy poco estudiado en la literatura especializada. En la primera sección se realiza una revisión del fenómeno del oleaje, la transformación que sufre durante su propagación desde aguas profundas hacia aguas someras, las fuerzas que intervienen para su generación, su clasificación, etc. En una segunda instancia, se estudian y se revisan las principales teorías que se utilizan para representar analíticamente al oleaje y las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica. Tomando como base aspectos fundamentales teóricos y empíricos, se realiza una revisión detallada del estado del arte de la rotura del oleaje, poniendo especial atención en los tipos de rompiente, los parámetros que definen y la caracterización de este fenómeno, tales como la altura de ola rompiente y la profundidad de rompiente, así como los criterios que se han utilizado para definirla.

Por otro lado, se muestra los aspectos más importantes de la modelación experimental en el laboratorio del Instituto de Ingeniería: diseño de los experimentos, adquisición de datos y su procesamiento. La información recabada y procesada sirvió como base para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo, mismos que incluyen la caracterización de los diferentes tipos de rompiente, dependencia del coeficiente de reflexión y altura de ola rompiente según las características mecánicas y dinámicas de los ensayos. Complementariamente, con los resultados experimentales se realizó una comparación entre las alturas de ola rompiente medidas y las alturas estimadas con los criterios que más se emplean en la ingeniería marítima, tales como el criterio de Munk, el de Komar, el de Horikawa, el de Le Méhauté, el de McCowan, el de Miche, el de Goda y el de Weggel. Esto con el fin de evaluar cual de los criterios es el que se ajusta mejor a los datos medidos en los ensayos. Con base en los resultados experimentales y reconociendo que las formulaciones convencionales no toman el efecto inducido por medios porosos en la rotura, se presenta una propuesta para determinar las condiciones de la rompiente cuando el oleaje se propaga sobre fondos permeables.

Finalmente, se presentan las conclusiones y se plantean las futuras líneas de trabajo que pueden llevarse a cabo para mejorar la caracterización del fenómeno de la rompiente. De forma complementaria, se incluye en este trabajo, a manera de anexo, un resumen de la teoría lineal y de sus propiedades ingenieriles, así como también un resumen del método de Baquerizo (2005) para la separación de la onda incidente y reflejada, temas básicos para la realización de este proyecto.

Introducción

México se encuentra situado entre los primeros lugares en extensión de litorales con alrededor de 11,000 km, tomando en cuenta sólo su parte continental, sin embargo, pese a esta gran extensión, el desarrollo de éstos no ha sido del todo buena. El desarrollo potencial de los litorales del país demanda de manera importante que se realicen estudios sobre las características del oleaje, con tal de poder obtener criterios de diseño que ayuden a minimizar el costo de las obras marítimas tales como conductos submarinos, plataformas petroleras, puertos, diques, etc.

La línea de costa, definida como la división entre la tierra y el mar, son ambientes geológicos únicos en composición y en las fuerzas físicas que los afectan. Muchas de éstas líneas de costa tienen playas compuestas por sedimentos sueltos, tales como grava, arena o lodo, los cuales son constantemente afectados por olas, corrientes y vientos, haciendo que éstos constantemente sufran una reformación. Sin embargo, a pesar de los muy variados climas marítimos que se tienen en el mundo y las diferencias en la composición de una línea de costa, la naturaleza y comportamiento de las playas muchas veces es similar. En esta intersección dinámica activa de tierra y mar, el ser humano ha construido estructuras a través de la historia. Los puertos y astilleros han servido por muchos años como bases de las fuerzas navales y también como salidas al comercio exterior con otros países. Más recientemente, las zonas costeras se han vuelto de mucha importancia económicamente debido al crecimiento del turismo y por esto el desarrollo de la costa ha causado un importante conflicto con los procesos naturales de la costa.

El oleaje generado por el viento en mar abierto está formado por componentes que abarcan un amplio rango de frecuencias. Las componentes con más altas frecuencias se propagan con una menor celeridad que aquellas correspondientes a las bajas frecuencias. A medida que éstas se propagan a lo largo de la plataforma continental hacia la costa, las componentes de onda larga lideran el grupo de ondas viajando, a continuación, las ondas de corto período. En profundidades indefinidas las ondas generadas por el viento no se ven afectadas por la batimetría. A partir de que el tren de ondas comienza a propagarse en aguas más someras, éste empieza a refractarse por efecto de la batimetría o de las corrientes o se difracta alrededor de abruptas variaciones del fondo. Parte de la energía es reflejada hacia mar abierto. A medida que la propagación continúa en dirección hacia la costa, las ondas pierden parte de su energía por efecto de la fricción en el fondo y otra parte eventualmente es disipada por la interacción que el oleaje tiene con medios permeables. A pesar de ello, la amplitud de la onda aumenta y la longitud de onda se va reduciendo dando lugar al peraltamiento de las ondas. Dado que, en profundidades reducidas, la celeridad de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, el frente de la onda se desplaza a una velocidad menor que la cresta de la onda dando lugar a un vuelco de la cresta o rotura de la onda. Esta rotura produce usualmente un chorro de agua que se inyecta cerca de la base de la onda dando lugar a una gran salpicadura.

Antes de la rotura del oleaje, la disipación debida a la fricción en el fondo y a la fricción inducida dentro de medios porosos son los procesos más significativos de atenuación energética. Cuando la ola rompe, el mecanismo dominante es la disipación turbulenta de la energía de la onda. La

turbulencia asociada a la rotura del oleaje es un fenómeno de gran importancia, ya que además de disipar la energía de las olas, es uno de los principales mecanismos generadores de corrientes y, en consecuencia, de transporte de sedimentos. Además, en zonas de aguas someras, la rotura puede ser un factor limitante a la hora de determinar la altura de ola de diseño de estructuras marítimas. En consecuencia, la correcta caracterización del proceso de rotura y disipación de energía del oleaje, es fundamental para muchos aspectos de la Ingeniería Marítima.

Otro aspecto importante en donde la rompiente del oleaje interviene es en la propagación de éste, ya que cuando el oleaje se propaga sobre la costa sufre varias deformaciones debidas principalmente a los siguientes fenómenos: reflexión, someramiento, difracción y rotura. La rotura es de los fenómenos más importantes y de debe principalmente al peraltamiento de la ola causada por la reducción en el fondo marino.

Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene como objetivos centrales los siguientes:

- ✓ Identificar los mecanismos que intervienen en la generación, transformación y disipación del oleaje para identificar a los parámetros que mejor lo describen y así poder clasificarlo de acuerdo a las características locales.

- ✓ Estudiar las diferentes teorías de propagación de oleaje existentes para identificar sus alcances y limitaciones

- ✓ Verificar a través de una comparación entre resultados experimentales y aquellos que arrojan las formulaciones recomendadas en la literatura especializada para determinar las características del proceso de rotura del oleaje sobre taludes impermeables y porosos.

- ✓ Identificar los parámetros físicos y dinámicos asociados con el proceso de rotura del oleaje sobre fondos disipativos no contemplados en las formulaciones convencionales para integrarlos y con ello mejorar el conocimiento y modelación matemática de este fenómeno.

Metodología

La metodología que se siguió para la realización de este trabajo fue la siguiente.

Primeramente se investigó y estudió el estado del arte relacionado con la caracterización del proceso de rompiente del oleaje. Hecho esto, se observó que en cuanto a la caracterización del proceso de rotura no existen investigaciones bien sustentadas que incluyan el efecto generado por fondos porosos.

Debido a lo anterior, se decidió realizar el diseño de los experimentos con talud permeable y talud impermeable y determinar, en primera instancia, las diferencias y coincidencias en el comportamiento del oleaje en ambas condiciones. Los ensayos se condujeron en el canal de oleaje del instituto de ingeniería de la UNAM.

Posteriormente se diseñaron una serie de ensayos complementarios y se decidió que para cumplir cabalmente con los objetivos del presente trabajo se utilizará una serie de arreglos empleando una rampa que permitiera variar su pendiente para simular diferentes taludes con fondo impermeable y permeable y así obtener resultados útiles en un rango de aplicabilidad ingenieril suficiente.

Hecho esto se procedió a realizar el modelado y con esto se recabaron los datos necesarios para la realización del trabajo. Después se llevó a cabo el pre- y post- procesamiento de los datos y se efectuó el análisis correspondiente de la información incluyendo una comparación con las teorías seleccionadas previamente.

Por último, se tomaron en cuenta todos los análisis realizados y se procedió a proponer una propuesta de formulación que caracteriza mejor el proceso de disipación por rotura. Esta formulación es de fácil aplicación y representa mejor las condiciones de rotura del oleaje en taludes de diferente permeabilidad.

Descripción y Organización del Trabajo

Para cumplir con las expectativas planteadas en los objetivos, este trabajo se organizó de la siguiente forma:

CAPÍTULO 1. El Oleaje y sus procesos.

Trata sobre la descripción del oleaje y de los procesos a los que se somete en su propagación desde aguas profundas hasta su disipación por rotura. También se dan las principales clasificaciones del oleaje y las teorías que se tienen para modelarlo. Complementariamente se presentan las bases fundamentales en las cuales se sustentan estos desarrollos analíticos.

CAPÍTULO 2. Estado del Arte.

Se presentan los conceptos y modelos empíricos y analíticos más utilizados para determinar las características de la rompiente del oleaje en aguas someras. Se aborda también los diferentes modelos y criterios de la rotura que se han ido desarrollado en los últimos tiempos con el objetivo de representar la rompiente del oleaje así como la transformación de la energía debida a ella.

CAPÍTULO 3. Estudio Experimental.

Se presenta la descripción del laboratorio donde se realizaron los ensayos, y también se describe la elección, la corrección, la realización y el procesamiento de los ensayos que se realizaron para cubrir los objetivos de este trabajo.

CAPÍTULO 4. Caracterización de la Rotura.

Se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el estudio experimental y se comparan los resultados obtenidos en laboratorio con aquellos obtenidos con los diferentes criterios de rompiente para los casos de talud impermeable y poroso. Complementariamente se presenta una propuesta fundamentada por los ensayos realizados para caracterizar la rompiente del oleaje en medios disipativos.

Capítulo I

El oleaje y sus procesos

*“ Lo que más se necesita para aprender
es un espíritu humilde”
Confucio*

I. El oleaje y sus procesos

I.1 El oleaje

El oleaje es un fenómeno determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre de agua, las cuales disponen el tipo de ola que será inducida. La más obvia de las fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar y la atmósfera.

El famoso filósofo Aristóteles (384-322 A.C.) señaló la importancia del viento en el desarrollo del oleaje. Así, desde el tiempo de la antigua Grecia hasta la etapa del renacimiento en el siglo XV no hubo gran proceso en el estudio de la generación y transformación del oleaje. Durante el periodo definido entre los siglos XVI-XIX, las contribuciones más importantes se dieron en el plano teórico del estudio del oleaje ya que en este tiempo se desarrollaron la mayor parte de las teorías que se emplean para el estudio del oleaje, como la de Stokes de primer orden y la teoría lineal o de la onda solitaria. El primer estudio de predicción de oleaje fue desarrollado por Svedrup y Munbk durante la segunda guerra mundial y sus resultados estuvieron disponibles hasta 1947.

El fenómeno del oleaje es muy complejo y difícil de representar de una manera matemática, sin embargo, existen teorías que pretenden interpretarlo y calcular sus efectos. Es importante cuando menos tener una idea de estas teorías y entender la mecánica del fenómeno, lo cual nos ayudará a resolver problemas relacionados con el mismo. Dependiendo de las condiciones particulares de un problema dado existirá para este una teoría aplicable.

En concreto, podemos decir que el oleaje esta asociado a la acción de un grupo de fuerzas denominadas fuerzas generadoras que trasmiten energía al medio continuo (masa de agua) y este último trata de recuperar su estado inicial de movimiento o reposo por la acción de otro grupo de fuerzas llamadas fuerzas restauradoras.

I.1.1 Fuerzas generadora y restauradora

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

I.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas

La clasificación de las ondas oceánicas se puede realizar desde diferentes puntos de vista, como lo son, la fuerza generadora, la profundidad relativa en la que se propaga la onda y la zona de transmisión de la energía debida al viento.

I.1.2.1 Clasificación de las ondas en base a su período

Un registro de oleaje está constituido por una amplia gama de períodos, asociado a las condiciones del oleaje presentes en la zona de estudio. Se pueden distinguir varios tipos de ondas atendiendo solo al período, sin embargo cada tipo de onda tienen amplitudes y longitudes de ondas asociadas (Tabla I.1).

Por otra parte, como se puede ver en la Figura I.1 se muestra un esquema en el que además del período, las ondas se clasifican tanto en función de la energía que transportan como de las fuerzas que la generan y equilibran.

Tabla I.1 Clasificación de las ondas referidas al período

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

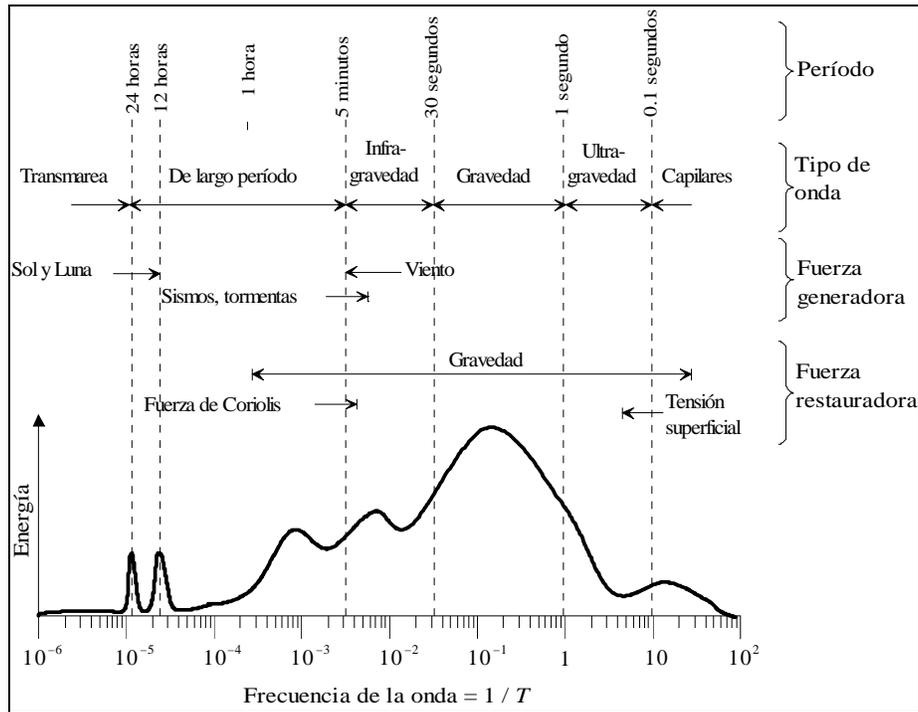


Figura I.1 Clasificación de las ondas referidas al período – energía

I.1.2.2 Clasificación del oleaje de acuerdo a su génesis y transmisión de energía

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

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

I.1.2.2.1 Oleaje 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 período 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
- Gran peralte de las olas



Figura I.2 Oleaje tipo SEA

I.1.2.2.2 Oleaje SWELL

Cuando la ola se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos en las olas.

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

Este tipo de oleaje se puede observar muy acentuado 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 pues el oleaje que se acerca a la costa es más regular, se forman frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre períodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, surgen ciertas direcciones predominantes. Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno.



Figura I.3 Oleaje tipo SWELL

I.1.2.3 Clasificación debido a la profundidad relativa

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

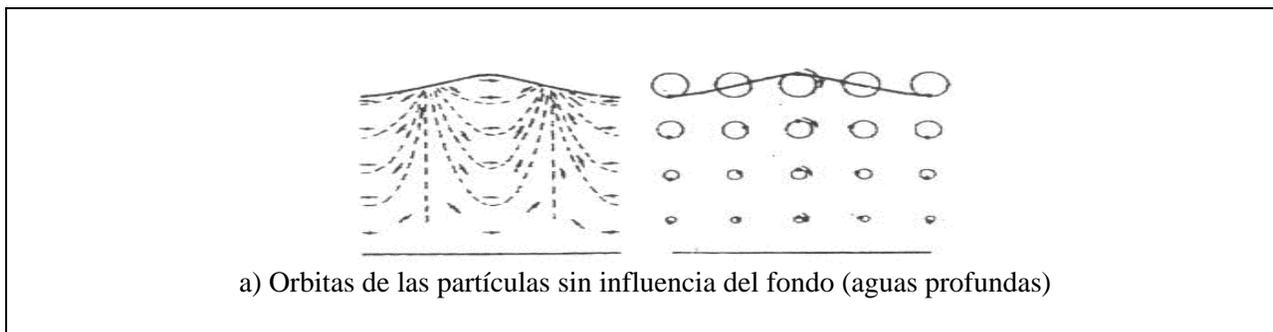
- **Oleaje en aguas profundas**, se caracteriza por que el movimiento de las partículas no experimenta modificaciones debido a la influencia del fondo marino.
- **Oleaje en aguas intermedias**, es aquí cuando inicia la influencia del fondo marino.
- **Oleaje en aguas someras o poco profundas**, se presenta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

Con el fin de determinar en que condición se encuentra la onda, se utiliza como parámetro de referencia a la profundidad relativa $\frac{d}{L}$ y la relación existente con la función $\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$. En la

Tabla I.2 se muestran los diferentes intervalos de clasificación del oleaje de acuerdo a la profundidad en que se propaga.

Tabla I.2 Clasificación del oleaje en función de la profundidad relativa en que viaja

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



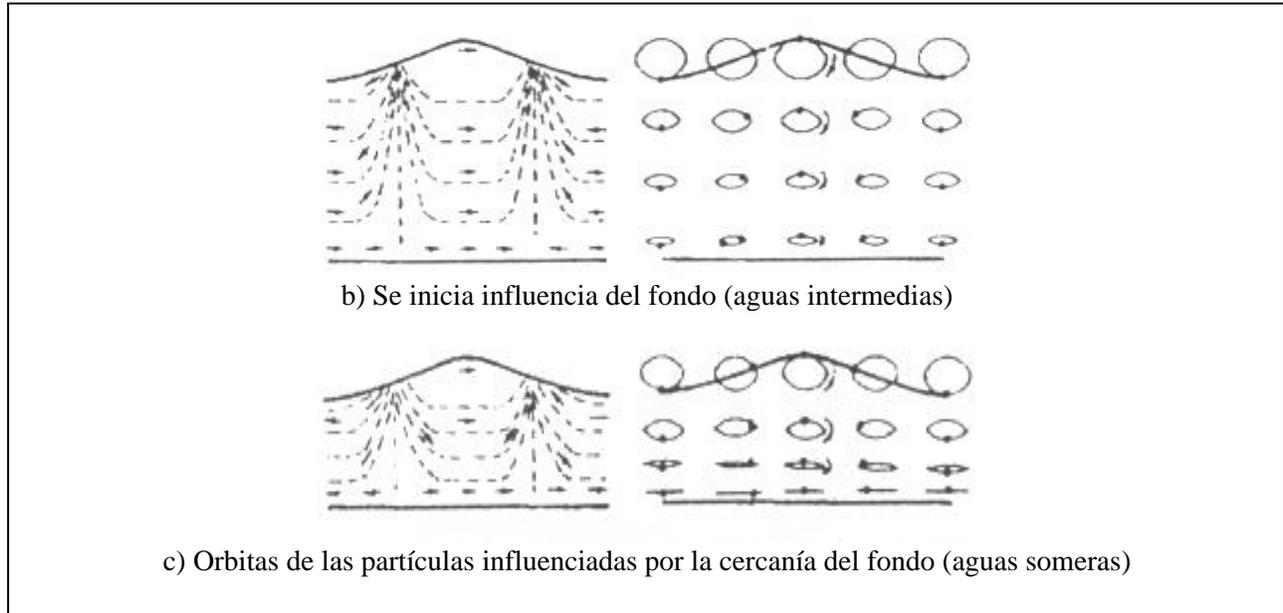


Figura I.4 Clasificación del oleaje de acuerdo a la profundidad relativa en que viaja

I.2 Procesos del oleaje

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

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

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

I.2.1 Refracción

Se puede afirmar que la celeridad varía con la profundidad de la zona en donde se propaga, consecuentemente se producirá una variación en la longitud de onda.

El efecto que el fondo tiene sobre el oleaje es el de un freno y este tiende a deformarse adaptándose a la configuración de las líneas batimétricas. Este fenómeno es similar al de la

refracción de las ondas de sonido o de luz al pasar de un medio de una determinada densidad a otro de diferente.

En general, ya a partir del punto donde este efecto de freno se hace notable, la refracción ocurre cuando la profundidad es igual a la semi-longitud de onda, los frenos de onda sufrirán cambios en su alineación que tienden a hacerlos paralelos con los distintos escalones de profundidad representados por las líneas batimétricas.

En general, algunos puntos importantes a considerar de la refracción son:

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

El estudio del fenómeno de refracción del oleaje es de gran importancia para el proyecto de una obra marítima, ya que permite determinar las características del oleaje y de sus acciones, pues en general, la información del oleaje, medida o inferida a través de los métodos de predicción, corresponde a la zona que hemos denominado aguas profundas, por lo que será necesario trasladarla hasta el sitio mismo de estudio.

Por medio del conocimiento de este fenómeno de refracción podremos conocer la altura de ola, ángulo de incidencia de la ola en la playa, sitios con concentración de energía, etc.



Figura I.5 Refracción del Oleaje en la línea de costa

1.2.2 Difracción

Es el proceso del oleaje, en cual, las características de un tren de de olas (altura de ola y dirección principalmente) se modifican por la presencia de un obstáculo.

Es un proceso que aprovechan las obras marítimas de protección, como lo son los rompeolas y las escolleras, sin embargo, es necesario conocer los efectos posteriores al paso del obstáculo.

Es fácilmente comprensible el interés que tiene el estudio de este fenómeno para el diseño y explotación de un gran número de obras e instalaciones marítimas. La resonancia en las dársenas, las condiciones de entrada a un puerto, los asolvamientos y las variaciones de las playas próximas a unas obras son algunos de los casos comunes en los que la difracción de oleaje juega un papel principal.

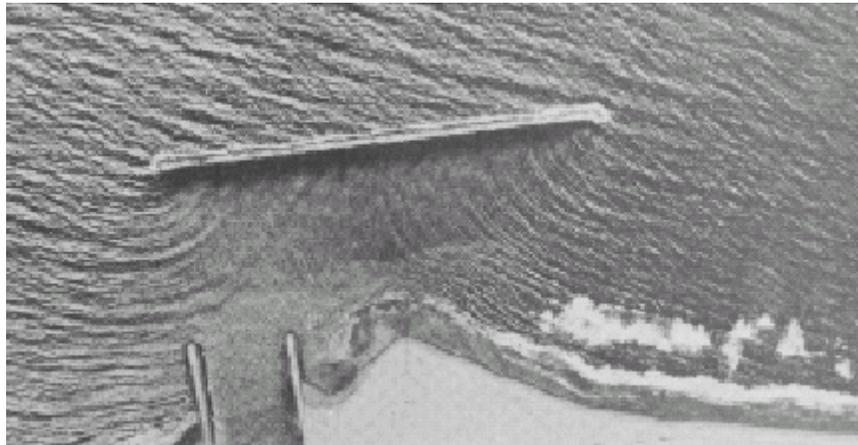


Figura I.6 Difracción causada por un rompeolas

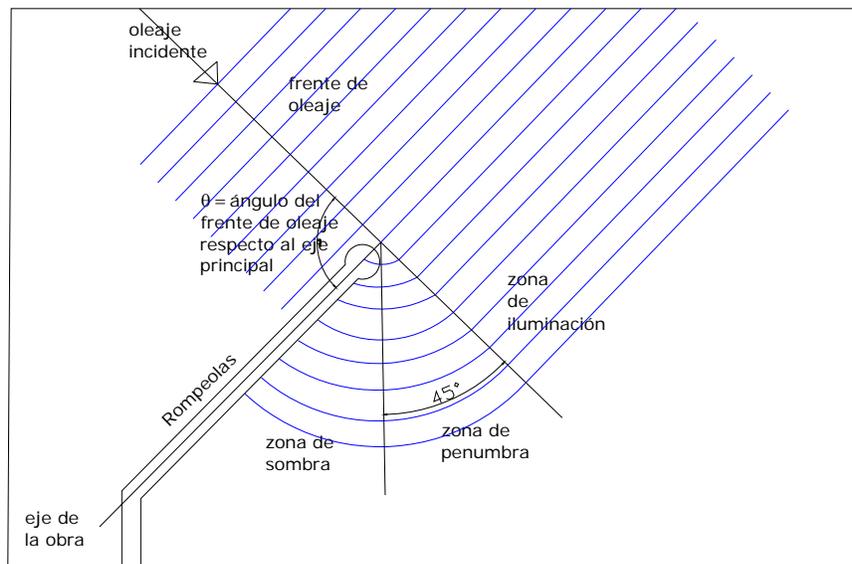


Figura I.7 Esquema general de la difracción del oleaje

1.2.3 Reflexión

Cuando un oleaje no rompiente incide sobre una estructura o acantilado, no existe un impacto, esto se debe a que una parte de la energía es reflejada y a que la otra se transmite al interior de la estructura, si esta es permeable. En otras palabras, la reflexión es la alteración del oleaje que se presenta cuando este incide en un obstáculo impermeable.

De acuerdo a varios autores, la reflexión puede ser nula totalmente donde un coeficiente de reflexión represente al fenómeno. Sin embargo, pueden presentarse los siguientes fenómenos:

- Resonancia
- Ola estacionaria, cuando la reflexión es total y ocurre en dirección contraria

En el caso en el que el frente de onda sea paralelo a la frontera y esta es plana o lisa, se produce una reflexión perfecta que se manifiesta por la presencia de estas ondas estacionarias. Entre más vertical, rígida y lisa sea la frontera, mayor es la reflexión y por el contrario, si la frontera tiene pendiente gradual con pared rugosa, accidentada o permeable, la reflexión es menor.

La reflexión del oleaje es de gran importancia en el diseño del recinto protegido de un puerto, ya que por su entrada pueden penetrar ondas que aunque están difractadas son reflejadas por las paredes verticales de los muelles y muros.

Si por la relación entre la longitud de onda y las dimensiones del puerto se produce resonancia, habrá una posible destrucción de las embarcaciones al chocar con esas paredes. La forma de evitar la reflexión es reduciendo o cambiando en algunas zonas las dimensiones del puerto o de algún muelle o atracadero.



Figura I.8 Reflexión debida a la presencia de un rompeolas

1.2.4 Disipación

A partir de que el oleaje comienza a propagarse en aguas más someras, éste empieza a refractarse por efecto de la batimetría o de las corrientes o se difracta alrededor de variaciones del fondo. Parte de la energía es reflejada hacia mar abierto. A medida que la propagación continúa en dirección hacia la costa, las ondas pierden parte de su energía por efecto de la fricción en el fondo y otra parte eventualmente es disipada por la interacción que el oleaje tiene con medios permeables. Aún así, la amplitud de la onda aumenta y la longitud de onda se ve disminuida dando lugar al peraltamiento de las ondas. Dado que, en profundidades reducidas, la celeridad de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, el frente de la onda se desplaza a una velocidad menor que la cresta de la onda dando lugar a un vuelco de la cresta o rotura de la onda.

La rotura del oleaje, la disipación debida a la fricción en el fondo y la fricción inducida dentro de medios porosos son los procesos más significativos de atenuación energética. Cuando la ola rompe, el mecanismo dominante es la disipación turbulenta de la energía de la onda. La turbulencia asociada a la rotura del oleaje es un fenómeno de gran importancia, ya que además de disipar la energía de las olas, es uno de los principales mecanismos generadores de corrientes y, en consecuencia, de transporte de sedimentos. Además, en zonas de aguas someras, la rotura puede ser un factor limitante a la hora de determinar la altura de ola de diseño de estructuras marítimas. En consecuencia, la correcta caracterización del proceso de rotura y disipación de energía del oleaje, es fundamental para muchos aspectos de la Ingeniería de Costas.

En estos tiempos en la bibliografía existen diversos modelos para reproducir la disipación de energía asociada a la rotura del oleaje (ejemplo Battjes y Janssen, 1978; Battjes y Stive, 1984; Dally *et al.*, 1985). Sin embargo, los resultados obtenidos al emplear cada uno de estos modelos de disipación, o incluso el mismo con distintos parámetros pueden ser muy distintos, dando lugar a predicciones muy diversas de la altura de ola en la zona de rompiente. Como consecuencia de esto, las corrientes, el transporte de sedimentos y la evolución morfodinámica determinados a continuación, pueden diferir sensiblemente y dar lugar a estimaciones erróneas. Un aspecto importante es que todos los modelos se han desarrollado bajo la hipótesis de ondas propagándose sobre fondo impermeable, lo cual en muchos de los casos de interés práctico para los ingenieros no representan adecuadamente al medio físico.

Es muy común que cerca de la costa existan estructuras naturales y artificiales, como arrecifes o rompeolas, con elementos que en su conjunto forman un medio poroso. En los últimos tiempos se han desarrollado varios modelos numéricos para entender la transformación del oleaje debido al cambio repentino del fondo, sin embargo, se ha demostrado que el omitir el efecto del medio permeable subestima notablemente la reducción generada.

Rojanakamthorn *et al.* (1989, 1990), utilizando la teoría desarrollada por Sollit y Cross (1972), y asumiendo válida la suposición que el fondo varía lentamente, derivaron una solución de tipo analítico para modelar la transformación del oleaje al propagarse sobre un fondo permeable. Silva (1995) y Losada *et al.* (1996) desarrollaron un modelo similar y lo utilizaron para realizar

estudios sobre la cinemática y dinámica de la interacción del oleaje con rompeolas permeables. Dichas soluciones desprecian en su desarrollo los términos no lineales y tienen el inconveniente de ser válidas sólo para cuando la variación del fondo es menor a 1:3, lo cual es una limitación importante ya que los dique sumergidos normalmente se construyen con taludes que van de 1:3 a 1:1.5.



Figura I.9 Rotura de una ola

I.3 Teorías del Oleaje

En lo que se refiere a la hidráulica marítima y mecánica de fluidos, la propagación del oleaje debe ser tratada a través de una teoría de oleaje. Aquí se presentan las principales teorías existentes en la literatura para propagar oleaje sobre fondo variable, o bien para representar su comportamiento en la columna de agua. Se incluye dentro de la teoría de ondas sobre fondo horizontal a las aproximaciones de Stokes, la Teoría Lineal, la Teoría Cnoidal y a la Onda Solitaria. Para fondo variable en aguas profundas se presenta la ecuación de la pendiente suave (Mild Slope Equation), y sus simplificaciones: modelos de refracción-difracción, difracción y refracción. Para fondo variable en aguas someras se describen las ecuaciones de aguas someras (shallow water equations) y la familia de modelos tipo Boussinesq.

La modelación matemática del oleaje puede tener tres principales objetivos: predecir cambios en su régimen por modificaciones artificiales o naturales en el entorno, transmitir información conocida en un punto distante a un punto de interés, o distribuir geoméricamente mediciones puntuales. Los datos a conocer, que fungen como variables dependientes son: la elevación de la superficie libre del agua η , el campo de presiones p , y el campo de velocidades, mientras que las variables independientes suelen ser la batimetría y la señal de entrada.

Los procesos físicos que ocurren dentro de la propagación del oleaje son innumerables, sin embargo, dentro de los más importantes para fines ingenieriles se encuentran la refracción, difracción, someramiento y reflexión. Bajo circunstancias específicas cobran importancia otros fenómenos, como la interacción entre las componentes del oleaje, fricción por el fondo, etc.

Cuando se desean conocer los efectos directos de la hidrodinámica del oleaje en alguna playa o estructura es importante representar procesos como la rotura y el ascenso máximo en el talud (run up).

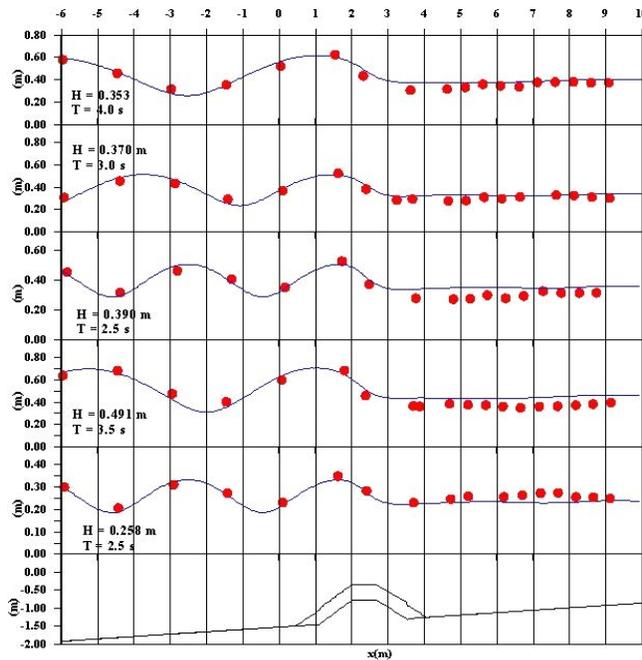
Uno de los caminos mas utilizados para resolver este tipo de problemas es la modelación física, en algunos casos es la única forma, sin embargo tiene desventajas técnicas como los efectos de escala, fronteras cerradas reflejantes y los espacios requeridos, pero principalmente desventajas económicas dado que es sumamente costoso representar fielmente en el laboratorio un escenario real. Por lo anterior, el esfuerzo constante de los investigadores se concentra en desarrollar herramientas matemáticas que permitan representar cualitativamente los fenómenos de propagación del oleaje, de forma que los estudios de ingeniería puedan realizarse con mayor certidumbre. En sus orígenes, estos modelos se basaron en métodos semi-gráficos, pero hoy en día, gracias al acelerado desarrollo de las herramientas de cálculo, se avanza rápidamente en el grado de precisión cuantitativa de las predicciones realizadas.

1.3.1 Clasificación de las teorías y modelos de oleaje

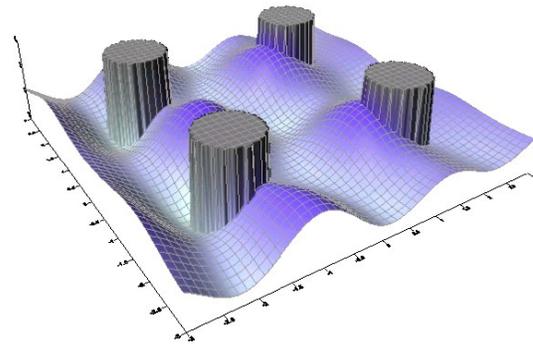
A pesar de que los de los desarrollos científicos y tecnológicos actuales son muy avanzados, por la inmensa variedad de factores que influyen en la propagación del oleaje, sigue siendo prácticamente imposible modelarlo por completo y en forma general. Es por ello que a lo largo de los últimos siglos los esfuerzos se han encaminado al desarrollo de modelos matemáticos y numéricos que representen los fenómenos físicos más relevantes que se presentan bajo circunstancias específicas. Esto significa que cada una de las formulaciones existentes para el estudio de la hidrodinámica y propagación del oleaje, fue desarrollada bajo distintos conjuntos de necesidades y herramientas de cálculo disponibles, de ahí que sus limitantes se deban tanto a la cantidad de fenómenos descritos, como a los recursos y conocimientos para implementarlas.

Una forma de clasificar a las distintas formulaciones existentes para estudiar la propagación del oleaje, es separar a los modelos que resuelven la fase y los que no lo hacen. Los modelos que resuelven la fase son aquellos que resuelven la amplitud máxima del oleaje separando a la variable tiempo, es decir, dan una solución armónica; por otro lado, los modelos que no resuelven la fase son los que describen el movimiento de la superficie libre del agua como un fenómeno transitorio, normalmente empiezan con la suposición del agua en reposo y siguen paso a paso en el tiempo la variación del nivel del agua a partir de una señal de entrada en al menos una frontera.

Por otro lado, la propagación del oleaje es estrictamente un fenómeno tridimensional, y los modelos que así lo resulten son denominados modelos 3D; sin embargo, dado que en muchas ocasiones se puede asumir que las ondas se transportan sobre un plano horizontal, algunas formulaciones separan lo que sucede en la vertical y en el plano horizontal, dando paso a un tipo de modelos llamados 2D. Finalmente, cuando interesa describir la propagación del oleaje considerando que los frentes de onda son rectas paralelas, se puede resolver sobre un plano vertical, utilizando un modelo 1D (Figura I.10).



Problema para modelo 1D



Problema para modelo 3D

Figura I.10 Clasificación de modelos 1D, 2D y 3D

1.3.2 Ecuaciones de gobierno y condiciones de frontera

La mayoría de los problemas en la física se resuelven por medio de una ecuación diferencial, obtenida con el planteamiento matemático de los fenómenos que sucedan dentro de un dominio de análisis, a esta ecuación se le llama, ecuación de gobierno, y para resolverse deben conocerse las características del flujo en los límites del dominio, llamadas también condiciones de frontera. La solución de una ecuación de gobierno puede ser analítica, cuando los conceptos y artificios matemáticos lo permitan, o numérica, utilizando métodos de diferencias finitas, elemento finito o volumen finito, entre otros.

Las dos ecuaciones principales que rigen el movimiento de los fluidos en todos los problemas de hidráulica son: la ecuación de continuidad y la de impulso y cantidad de movimiento. La segunda tiene varias maneras de expresarse, sin embargo la más general es a través de las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, que incluyen satisfactoriamente la mayoría de los factores que intervienen en el comportamiento del agua, sin embargo hasta el momento no existe algunas forma práctica de solucionarlas completamente, por lo que debe hacerse uso de simplificaciones derivadas de asumir diversas hipótesis. La diferencia fundamental entre cada uno de los modelos de oleaje radica principalmente en las hipótesis utilizadas para simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes, es decir, en la forma en que se obtuvieron tanto las ecuaciones de gobierno como las condiciones de frontera.

Casi todos los modelos de oleaje utilizan la teoría del flujo potencial, que considera al agua incompresible, con lo que la ecuación de Laplace queda como la ecuación de gobierno a resolver. Las condiciones de frontera pueden ser de varios tipos, destacan por su importancia:

- Condición cinemática de fondo, que en el caso de fondo impermeable indica que no hay flujo de agua a través del fondo, o bien, en otros casos, describe el flujo a través de él.
- Condición cinemática de superficie libre, que describe el movimiento de las partículas de agua que a lo largo del tiempo permanecen en la superficie libre.
- Condición dinámica de superficie libre, la cual indica que la presión sobre la superficie libre del agua es igual a la presión atmosférica.
- Condiciones laterales de contorno, definen el comportamiento del flujo en los límites laterales del dominio, por ejemplo la línea de costa o estructuras artificiales; o bien describen el comportamiento periódico de las ondas progresivas. Pueden ser absorbentes, reflejantes, parcialmente reflejantes o de radiación.

Muchos modelos coinciden en las tres primeras y aplican la última de diferente forma. La condición dinámica de superficie se define por lo general con la Ecuación de Bernoulli.

1.3.3 Ecuación de continuidad

En los desarrollos siguientes se utilizará un cubo infinitesimal en un sistema de coordenadas ortonormales como el de la Figura I.11.

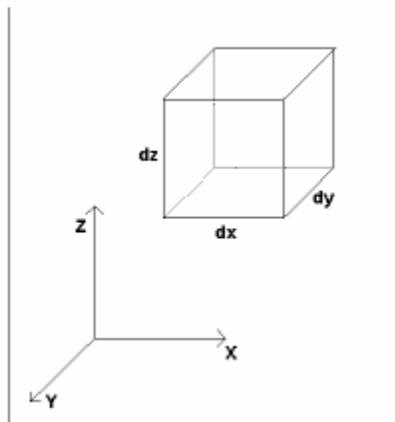


Figura I.11 Cubo infinitesimal en coordenadas ortonormales

Si la densidad del fluido es ρ , la cantidad de masa dentro del cubo en un instante determinado es:

$$M = V \cdot \rho = dx dy dz \cdot \rho \quad (1.1)$$

Ya que la densidad no es constante en el tiempo, la masa dentro del cubo varía con éste mismo, por lo tanto la masa después de un intervalo de tiempo dt es

$$M_{t_1=t_0+dt} = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \right) \cdot dx dy dz \quad (1.2)$$

El incremento de masa durante ese intervalo de tiempo dt se obtiene por la diferencia de ec. (1.1) – ec. (1.2)

$$\Delta M = \rho \cdot dx dy dz - \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \right) \cdot dx dy dz = - \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dx dy dz \cdot dt \quad (2.3)$$

Por otra parte se debe analizar la entrada y salida de masa por cada cara del cubo, para ello se utiliza la Figura I.12, donde se muestra la nomenclatura utilizada para el análisis en la dirección del eje X.

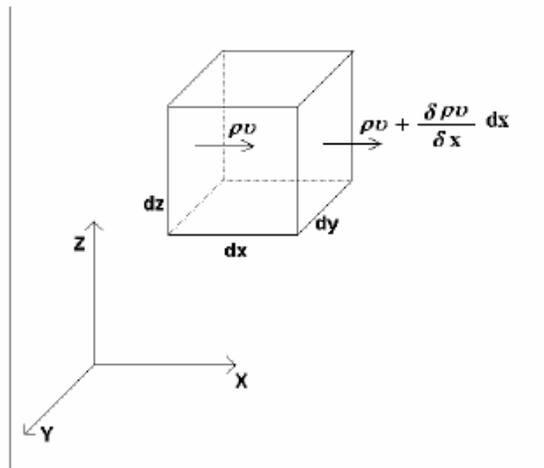


Figura I.12 Nomenclatura utilizada par los esfuerzos

Si el flujo de masa es de izquierda a derecha, la cantidad de materia que entra al cubo por la cara $dy dz$ izquierda, durante un intervalo dt , es:

$$\rho u dy dz dt \quad (1.4)$$

donde u es la velocidad del flujo. De la misma manera, la cantidad de masa que sale por la cara $dx dz$ derecha, durante un intervalo dt , considerando que ρ varía en el espacio, es:

$$\left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) dy dz dt \quad (1.5)$$

Por lo tanto la diferencia de masa a la entrada y a la salida en el eje X se obtiene por la diferencia entre las ecuaciones (1.5) y (1.4):

$$\left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) dy dz dt - \rho u dy dz dt = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz dt \quad (1.6)$$

Este desarrollo es válido también para las direcciones Y y Z, por lo que por analogía con la ecuación (1.6) tenemos

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz dt \quad (1.7)$$

y

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz dt \quad (1.8)$$

donde u , v y w son las componentes de la velocidad de flujo en las direcciones X, Y y Z respectivamente.

El cambio total de masa en un intervalo dt es la suma de los cambios en cada dirección. Por lo tanto, sumando ec. (1.6) + ec. (1.7) + ec. (1.8), donde el término $dx dy dz dt$ es común:

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz dt \quad (1.9)$$

Las ecuaciones (1.3) y (1.9) expresan el cambio de masa en un intervalo de tiempo dt , pero una lo hace en función únicamente del tiempo y otra considera también la variación espacial de ρ , por lo que igualándolas se tiene

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz dt = - \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dx dy dz dt \quad (1.10)$$

Ordenando y agrupando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1.11)$$

Desarrollando las derivadas parciales

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (1.12)$$

se tiene

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \left(\rho \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \left(\rho \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = 0 \quad (1.13)$$

ordenando

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1.14)$$

si

$$V = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k} \quad (1.15)$$

el divergente de V es

$$\text{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.16)$$

y el gradiente de la densidad es

$$\text{grad } \rho = \frac{\partial \rho}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \hat{k} \quad (1.17)$$

Por lo que la ec. (1.14) queda expresada en forma general como sigue, siendo la representación más usual de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div} V + \text{grad } \rho = 0 \quad (1.18)$$

Si el flujo es incompresible, la densidad no varía, es decir $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ y $\text{grad } \rho = 0$, la ecuación de continuidad se reduce a

$$\rho \text{div} V = \text{div} V = 0 \quad (1.19)$$

1.3.4 Ecuación de Laplace

Se considera una función escalar Φ , llamada potencial de velocidades:

$$\Phi = f(x, y, z, t) = \Phi(x, y, z, t) \quad (1.20)$$

tal que

$$u = -\frac{\partial\Phi}{\partial x}; \quad v = -\frac{\partial\Phi}{\partial y}; \quad w = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (1.21)$$

Si el flujo es irrotacional, el laplaciano (∇^2) del potencial de velocidades debe ser igual a cero, esto es, sustituir (1.21) en (1.19). Esta condición es conocida como la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.22)$$

1.3.5 Ecuaciones de Navier-Stokes

Primero que nada debemos recordar la segunda ley de Newton en dirección de eje X:

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (1.23)$$

donde la aceleración de las partículas (a_x) puede expresarse como la derivada de la velocidad (u) respecto del tiempo:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (1.24)$$

Esto permite expresar la ecuación de movimiento en la dirección X de la siguiente manera

$$\sum F_x = m \cdot \frac{Du}{Dt} \quad (1.25)$$

La velocidad en este caso u , es función del tiempo y del espacio, es decir $u = f(x, y, z, t)$ y su derivada total es

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \quad (1.26)$$

también se sabe que

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u; \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v; \quad \frac{\partial z}{\partial t} = w \quad (1.27)$$

Por lo tanto la aceleración total sobre el eje X (ec. 1.26) puede expresarse como

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.28)$$

el primer término de la ecuación anterior representa la aceleración local, es decir la variación de la velocidad con respecto al tiempo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.29)$$

Los siguientes tres términos, en conjunto representan la aceleración convectiva, que es la variación de la aceleración respecto a la posición de la partícula en el espacio.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.30)$$

Por otro lado, se examinarán los esfuerzos actuantes sobre cada una de las caras de un cubo infinitesimal que será utilizado como volumen de control, tal como se muestra en la Figura I.13.

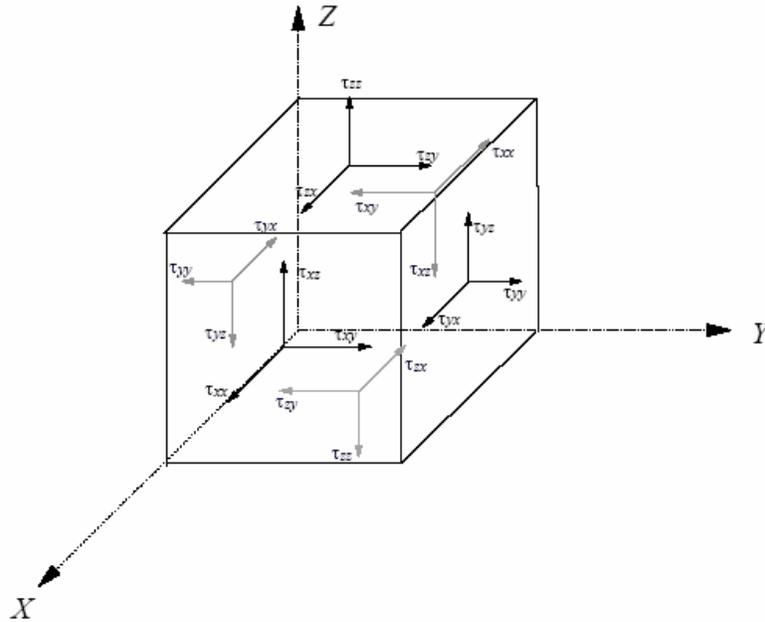


Figura I.13 Esfuerzos sobre un volumen de control

Se observa que sobre cada una de las seis caras del cubo actúan tres esfuerzos, dos tangenciales y uno normal, este último incluye la presión (p), es el caso de $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ donde

$$\sigma_{xx} = -p + \tau_{xx}; \quad \sigma_{yy} = -p + \tau_{yy}; \quad \sigma_{zz} = -p + \tau_{zz}; \quad (1.31)$$

A continuación se obtendrán las fuerzas actuantes en las caras del cubo sobre la dirección X multiplicando el área de acción (de la cara del cubo) por el esfuerzo. Los valores $\sigma_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$, etc., tal cual, son los esfuerzos para el centro del cubo infinitesimal, pero los de interés son los que actúan en las caras, por lo que se obtiene la variación de su magnitud derivando respecto al eje en que sean movidos.

El esfuerzo normal actuando en la dirección X , en la cara derecha es:

$$\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (1.32)$$

el mismo pero sobre la cara izquierda es

$$\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (1.33)$$

ambos actúan sobre un área $\Delta y \Delta z$.

De la misma forma, los esfuerzos tangenciales en la dirección X que se presentan en las caras normales a la dirección Y , que tienen un área $\Delta x \Delta z$, son

$$\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}; \quad y \quad \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}; \quad (1.34)$$

y por último, los esfuerzos tangenciales en la dirección X presentes en las caras normales a la dirección Z , que tienen un área $\Delta y \Delta x$ son

$$\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2}; \quad y \quad \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2}; \quad (1.35)$$

De esta forma, la ec. (1.25), haciendo uso de las ecuaciones (1.32), (1.33), (1.34) y (1.35) pueden expresarse de la siguiente forma

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y \Delta z - \left(\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y \Delta z \\ & + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \Delta z - \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \Delta z \\ & + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right) \Delta x \Delta y - \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right) \Delta x \Delta y \end{aligned} \right\} + \rho \Delta x \Delta y \Delta z Fx = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \frac{Du}{Dt} \quad (1.36)$$

donde $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$ es la masa del cubo, y Fx es una fuerza externa por unidad de masa actuando en la dirección X , que aunque no está representada en la figura... será de utilidad para posteriores desarrollos.

Operando la ecuación (2.36) y dividiéndola por el volumen del cubo ($\Delta x \Delta y \Delta z$), se obtiene

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho Fx \quad (1.37)$$

sustituyendo (1.31) en (1.37)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho Fx \quad (1.38)$$

ordenando y despejando la aceleración (Du/Dt)

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + F_x \quad (1.39)$$

Con desarrollo similar podemos llegar para las direcciones Y y Z a

$$a_y = \frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + F_y \quad (1.40)$$

$$a_z = \frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + F_z \quad (1.41)$$

Las ecuaciones (1.39). (1.40) y (1.41) se conocen como las ecuaciones de Saint Venant.

Para solucionar gran parte de los problemas en hidrodinámica conviene expresar todo en función de las deformaciones que experimenta el fluido, y no en función de los esfuerzos, como los hacen las ecuaciones de Saint Venant. Para expresarlas en función de las deformaciones se puede hacer uso del concepto de viscosidad (μ), que es la propiedad física que caracteriza la resistencia de los fluidos a moverse.

Considerando dos placas paralelas de área muy grande A , separadas una pequeña distancia y , cuyo espacio de separación está ocupado por un fluido. Si hasta un tiempo $t=0$ las placas permanecen estáticas entre ellas (Figura I.14a), pero en ese instante la placa inferior comienza a moverse con una velocidad constante V , el fluido comenzará a moverse también conforme transcurre el tiempo, presentando inicialmente un perfil de velocidades no lineal (Figura I.14b), hasta que dicho perfil alcanza una distribución uniforme (Figura I.14c). Para mantener constante la velocidad de la placa inferior, es necesario aplicar permanentemente una fuerza F que contrarreste la resistencia impuesta por el líquido, que será directamente proporcional al área de la placa A y a la velocidad V , e inversamente proporcional a la distancia entre las placas y . La constante de proporcionalidad de dichas relaciones es la viscosidad.

$$F = \mu \frac{AV}{y} \quad (1.42)$$

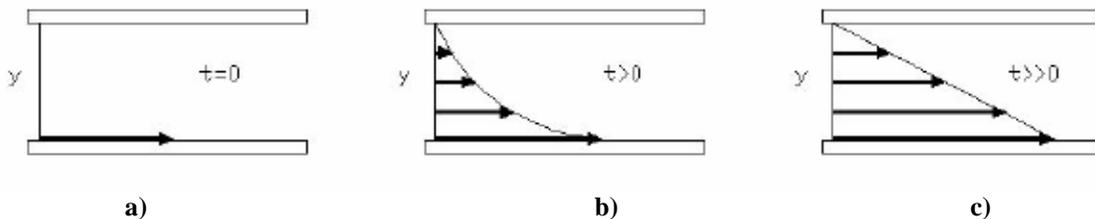


Figura I.14 Distribución de velocidades de un fluido entre dos placas deslizándose

Por definición, el esfuerzo cortante es la fuerza entre el área de las placas, $\tau = F / A$, y la velocidad angular es V / y , que se puede expresar como $\partial u / \partial y$, Por lo tanto, el esfuerzo cortante de acuerdo a la Figura I.13, expresado como τ_{xy} (donde x es la dirección en la que actúa y la letra y denota que se encuentra en una superficie normal a la dirección Y), queda de la siguiente forma

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.43)$$

Para que el cubo infinitesimal esté en equilibrio de fuerzas y de momentos, es decir, que no presente aceleraciones que induzcan rotación, el esfuerzo τ_{xy} debe estar complementado con un esfuerzo τ_{yx} de la misma magnitud sobre la cara vertical del elemento (Figura I.15). Es decir,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{zy} = \tau_{yz}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (1.44)$$

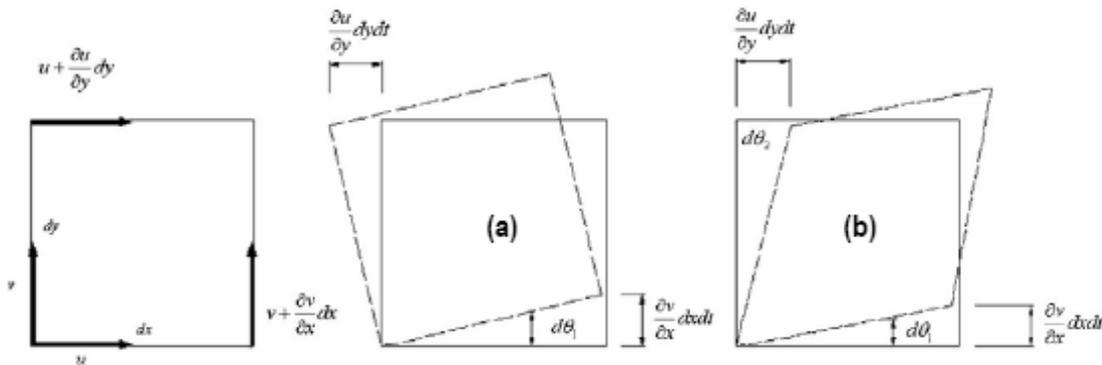


Figura I.15 Diagrama de deformaciones en el plano x-y

Con un razonamiento similar al utilizado para obtener la ecuación (1.43) pero con un flujo en el eje Y (Figura I.13) el esfuerzo τ_{yx} es

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.45)$$

De esta manera, para cualquier combinación de flujo, los esfuerzos viscosos que se generan son simplemente la suma de las contribuciones independientes:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (1.46)$$

y haciendo una analogía para los planos (x,y) y (y,z) :

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 V + \frac{\mu}{\rho} \nabla (\text{div} V) + \bar{F} \quad (1.47)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (1.48)$$

Si se sigue el mismo procedimiento utilizado anteriormente para los esfuerzos tangenciales, con los esfuerzos normales a los planos X , Y , y Z se tiene

$$\tau_{xx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.49)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1.50)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.51)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.49), (1.50) y (1.51) en las ecuaciones de Saint Venant se tiene

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + F_x \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (1.52)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + F_y \quad (1.53)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + F_z \quad (1.54)$$

Si se asume que la viscosidad μ es constante en todo el dominio, las ecuaciones anteriores se pueden simplificar de la siguiente manera

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_x \quad (1.55)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_y \quad (1.56)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_z \quad (1.57)$$

O bien, en forma vectorial como

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 V + \frac{\mu}{\rho} \nabla (\text{div} V) + \bar{F} \quad (1.58)$$

Si se trata de un fluido Newtoniano, en el que el esfuerzo cortante generado entre el fluido y la pared es mayor al que hay entre las capas adyacentes del mismo, como el agua, la viscosidad cinemática ν esta definida como la relación dinámica entre la viscosidad μ , y la densidad ρ por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.59)$$

Haciendo uso del concepto de viscosidad cinemática (1.59), y de la ecuación de continuidad para flujos incompresibles (1.19), las ecuaciones (1.55), (1.56) y (1.57) se pueden expresar como

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (1.60)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \quad (1.61)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (1.62)$$

Las ecuaciones anteriores son conocidas como Ecuaciones de Navier-Stokes, y tambien se pueden expresar en forma vectorial de la siguiente manera:

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 V + \frac{\mu}{\rho} \nabla (\text{div} V) + \bar{F} \quad (1.63)$$

1.3.6 Ecuación de Euler

Para aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes es necesario conocer los valores de las tensiones en un fluido, lo cual resulta sumamente impráctico, además de que sus efectos son mínimos, por lo tanto, se opta por tomar la misma consideración que se hace en muchos otros problemas en hidráulica, que consiste en suponer que las tensiones tangenciales son iguales a cero, es decir, que los efectos de la fricción son despreciables, o que el fluido es no viscoso. Además se dará un sentido físico real a las fuerzas externas del volumen de control por unidad de masa (aceleraciones) que se introdujeron desde la ecuación (1.36), dando valor cero a F_x y F_y ; mientras que F_z se utilizará para considerar el efecto de la gravedad, por lo que se sustituirá por g .

Esto da lugar a las Ecuaciones de Euler:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}; \quad \frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (1.64)$$

1.3.7 Ecuación de Bernoulli

La Ecuación de Bernoulli es una forma integrada de la ecuación de movimiento o de Euler y relaciona al campo de presiones con el cinemático.

El siguiente desarrollo se hará para el plano x - z , sin perder de vista que el flujo se considera incompresible. Si se desarrolla el término de la izquierda de la ecuación (1.64), considerando que $u = f(x, z)$ y que $x, z = f(t)$:

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (1.65)$$

donde

$$\frac{dx}{dt} = u; \quad y \quad \frac{dz}{dt} = w \quad (1.66)$$

entonces

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.67)$$

y siguiendo el mismo procedimiento con la ecuación (1.64)_c:

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.68)$$

Igualando (1.67) y (1.68) con (1.64)_a y (1.64)_c respectivamente:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.69)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.70)$$

Considerando le condición de flujo irrotacional en dos direcciones:

$$\left| \begin{array}{cc} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & w \end{array} \right| = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (1.71)$$

entonces

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.72)$$

Utilizando la expresión (1.72), las ecuaciones (1.69) y (1.70) pueden expresarse

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.73)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.74)$$

mediante la siguiente relación

$$\frac{\partial(u^2/2)}{\partial x} = \frac{1}{2} 2u \frac{\partial u}{\partial x} = u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.75)$$

Las ecuaciones (1.73) y (1.74) pueden expresarse

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial x} \quad (1.76)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial z} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial z} \quad (1.77)$$

Además si se recuerda la ecuación (1.21)

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (1.78)$$

entonces

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial x}; \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial z} \quad (1.79)$$

Y sustituyendo (1.79) en (1.76) y (1.77)

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial x} \quad (1.80)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial z} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial z} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial z} \quad (1.81)$$

ordenando

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} \right] = 0 \quad (1.82)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} \right] = -g \quad (1.83)$$

En estas ecuaciones se ha asumido que la densidad es uniforme a través del fluido.

Integrando respecto de x la ecuación (1.82), y respecto a z la ecuación (1.83) se tiene, respectivamente

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} = C_1(z, t) \quad (1.84)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} = -gz + C_2(x, t) \quad (1.85)$$

donde $C_1(z,t)$ y $C_2(x,t)$ son variables propias de cada integración. Se observa que los términos del lado izquierdo de ambas ecuaciones son idénticos, por lo que los términos del lado derecho se pueden igualar

$$C_1(z,t) = -gz + C_2(x,t) \quad (1.86)$$

Si se comparan las variables que comprenden la expansión a cada lado de la igualdad, se observa que C_2 no puede depender de x , sino que en su lugar debe haber una función que sólo dependa del tiempo: $C(t)$, es decir:

$$C_1(z,t) = -gz + C_2(t) \quad (1.87)$$

Sustituyendo (1.87) en (1.84) y ordenando se tiene

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (1.88)$$

Que se conoce como Ecuación de Bernoulli, la cual define la condición dinámica de superficie libre. Recordando la ec. (1.21), se puede expresar de la siguiente manera

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2\right] + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (1.89)$$

1.3.8 Teorías para fondo horizontal

El motivo por el que se desarrollaron estas teorías fue la necesidad de representar el comportamiento de la superficie libre, o los perfiles de velocidad y presión en una columna de agua donde se conocen características como el período y la amplitud de onda. En el caso en el que la profundidad es constante, fenómenos como la rotura, refracción y someramiento no intervienen en la propagación del oleaje, por esto este grupo de teorías en su origen no pretende representarlos, sin embargo es muy importante conocerlas por que son la base del desarrollo de las teorías de propagación en fondo variable.

1.3.8.1 Aproximaciones de Stokes

La solución a la ecuación de Laplace (continuidad), utilizando las condiciones de frontera antes mencionadas, con condición lateral de periodicidad en tiempo y espacio, para oleaje monocromático y fondo horizontal impermeable, deriva en la llamada ***Teoría de ondas de Stokes***, de la cual hay aproximaciones de varios órdenes, dependiendo el grado de exactitud conservado

en el desarrollo algebraico (aproximaciones de Stokes de 1°, 2°, 3°... orden). La aproximación de primer orden, en la cual se desprecian todos los términos no lineales, es llamada **Teoría Lineal**, **Teoría de Airy**, o **Teoría de ondas de pequeña amplitud**, que llega a una solución analítica y explícita del potencial de velocidades, y a una ecuación analítica implícita que relaciona al período, profundidad y longitud de onda de una ola monocromática propagándose en fondo plano, conocida como ecuación de la dispersión lineal ($\sigma^2 = kg \tanh kh$, $\sigma = 2\pi/T$, T es el período). Conforme se avanza en el orden de aproximación, los resultados de superficie libre van perdiendo simetría con respecto al nivel de agua en reposo, es decir, el primer orden o Teoría Lineal arroja una variación sinusoidal de la superficie libre del agua, mientras que órdenes superiores generan crestas más acusadas y valles más extendidos, como se ve en la Figura I.16.

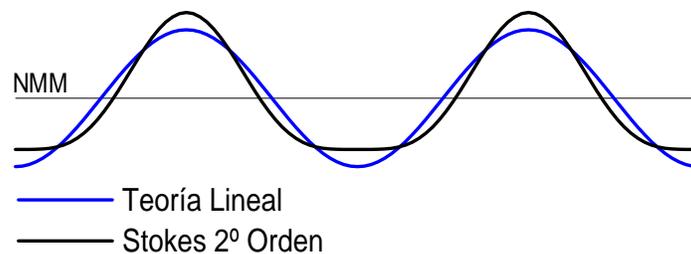


Figura I.16 Comparación de la superficie libre entre la Teoría Lineal y Stokes 2º orden

Estrictamente, este grupo de teorías sólo es válido en aguas profundas e intermedias, ya que durante su desarrollo, en el que la variable z es separada, se desprecian términos de orden superior, que son producto de la interacción de la propagación horizontal de las ondas con el campo de velocidades verticales. Sin embargo, para fines de ingeniería es la herramienta más utilizada, principalmente, por su sencillez de implementación.

I.3.8.2 Teoría Cnoidal

Fue diseñada para describir el campo de velocidades y de presiones de una onda periódica propagándose en fondo plano y somero. Su desarrollo fue motivado por la limitación de las aproximaciones de Stokes. Se basa en el trabajo hecho por Korteweg y de Vries en 1895 (KdV). A diferencia de la teoría de Stokes, que resulta en una serie de funciones trigonométricas, la teoría Cnoidal expresa su solución utilizando funciones Jacobianas elípticas, abreviadas como **cn**, de ahí el nombre de Cnoidal. Existen aproximaciones de varios órdenes, la más utilizada es la de primer orden, ya que es suficientemente capaz de describir ondas de amplitud finita en aguas someras.

El rango de correcta aplicabilidad de ésta teoría comienza cuando acaba el rango de validez de la teoría lineal, y tiene como límite la teoría de la onda solitaria, cuando la longitud tiende a infinito, es decir, que la teoría cnoidal converge hacia aguas profundas a la teoría lineal, y hacia aguas someras a la onda solitaria.

Diversos autores han presentado soluciones analíticas y semi-gráficas, pero todas son muy complicadas o tediosas en su aplicación, al extremo que algunos de esos autores han recomendado como más aplicable en aguas someras a las aproximaciones de Stokes que a la teoría Cnoidal.

I.3.8.3 Teoría de la onda solitaria

Una onda solitaria solo tiene cresta, no tiene valle, es decir, que el desplazamiento de la superficie libre se presenta únicamente sobre el nivel de aguas tranquilas. Es aplicable en fondo plano. Las teorías anteriores se referían a ondas periódicas, una onda solitaria es transitoria.

Ha sido ampliamente utilizada para el análisis de tsunamis, las desventajas de hacerlo radica en limitar su forma a una onda única, y aunque suelen tener una componente mayor, la interacción entre todas ellas es importante

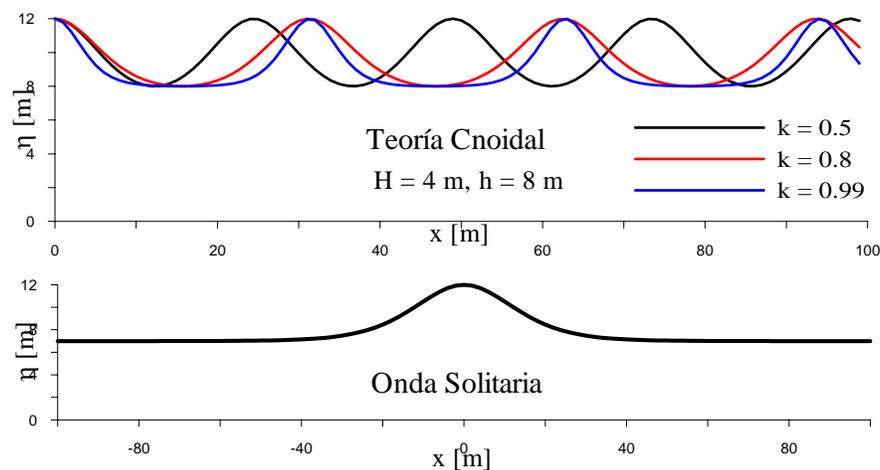


Figura I.17 Comparación entre ondas cnoidales de diferente k , y una onda solitaria

I.3.9 Teorías para fondo variable

I.3.9.1 Teoría del Rayo

La teoría del rayo es un método semi-gráfico basado en conceptos óptico-geométricos, principalmente en la ley de Snell de refracción óptica. Fue utilizado por los ingenieros en décadas pasadas y sirve para calcular únicamente refracción y someramiento de una onda sinusoidal simple propagándose sobre fondo uniforme (pendiente constante y líneas batimétricas paralelas). Existen versiones modificadas de este método que permiten utilizarlo en batimetría ligeramente irregulares, pero con muchas limitaciones.

Los rayos son líneas que representan las trayectorias de varios puntos equidistantes sobre la cresta de una onda, desde aguas profundas hasta la línea de costa. El espacio comprendido entre los rayos se llama canal de energía, ya que se considera que la energía contenida en una sección transversal se mantiene constante durante toda la propagación de la onda. Con base en lo anterior y en algunos otros conceptos tomados de la teoría lineal, se calcula la desviación del frente de onda mientras se va refractando, y el someramiento producto de la reducción del ancho de los canales de energía.

Aunque un diagrama de rayos ilustra de manera sencilla la desviación que sufre la dirección del oleaje debido a la refracción, este método ha quedado prácticamente obsoleto, ya que sus limitaciones son muchas, por ejemplo: no sirve para fondos irregulares (reales), considera que no hay transferencia de energía entre los rayos, no incluye difracción, etc., además que su aplicación es sumamente laboriosa. No obstante, tiene el mérito de haber sido, después del método de Iribarren de los planos de oleaje, uno de los primeros esfuerzos por modelar matemáticamente la propagación del oleaje en fondo variable.

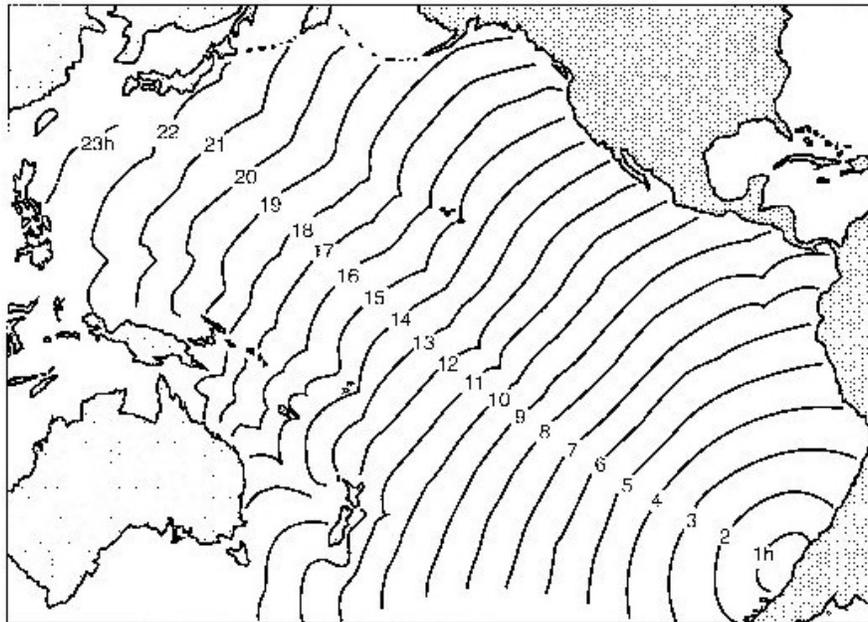


Figura I.18 Diagrama de refracción para un Tsunami

I.3.9.2 Ecuación de la Pendiente Suave

Existen muy diversas aproximaciones de cómo abordar matemáticamente y numéricamente el problema de la transformación del oleaje en fondo variable desde aguas profundas hasta la rotura (Dingemans, 1997), siendo las basadas en la teoría lineal las que hasta hoy en día han demostrado ser las más prácticas para hacerlo, en particular la solución elíptica que incluye todos los procesos que están involucrados en la transformación: reflexión, someramiento, transmisión, difracción y

disipación, tanto por rotura como por fricción, sin embargo en aguas someras, donde los fenómenos no lineales y la interacción entre componentes son importantes, deja de tener validez.

La ecuación básica de la pendiente suave (Mild Slope Equation, MSE) como recurso para estimar la transformación de un oleaje monocromático lineal sobre un fondo impermeable variado gradualmente fue originalmente desarrollada por Berkhoff (1972), y descrita más concisamente por Smith & Sprinks (1975). Desde entonces diversos estudios han sido llevados a cabo para estudiar la propagación del oleaje sobre un fondo impermeable con cualquier configuración. La solución clásica de la MSE es solo válida para pendientes de 1:3 o menores, tal y como fue comprobado por Booij (1983). Posteriormente, trabajos como los de Kirby et al (1986), Massel (1983), Chamberlain & Porter (1995), Potter & Staziker (1995), Panchang (1991), Li y Anastasiou (1992), Zhao y Anastasiou (1996), Borthwick et al. (1997), Panchang et al. (1991), Silva et al (2003), etc., han eliminado casi la totalidad de sus restricciones,

A pesar de su versatilidad, confiabilidad, y falta de restricciones en las últimas versiones, la ecuación de la pendiente suave tiene como principal desventaja que su solución requiere de grandes esfuerzos computacionales, y que la inclusión de las condiciones de frontera suele ser complicada, por ello se han hecho aproximaciones parabólicas e hiperbólicas, enfocadas a estudiar condiciones en las que el efecto de alguno de los fenómenos es débil.

En la Figura I.19 se presentan ejemplos resueltos con el módulo elíptico del software Mike 21 y el programa WAPO respectivamente.

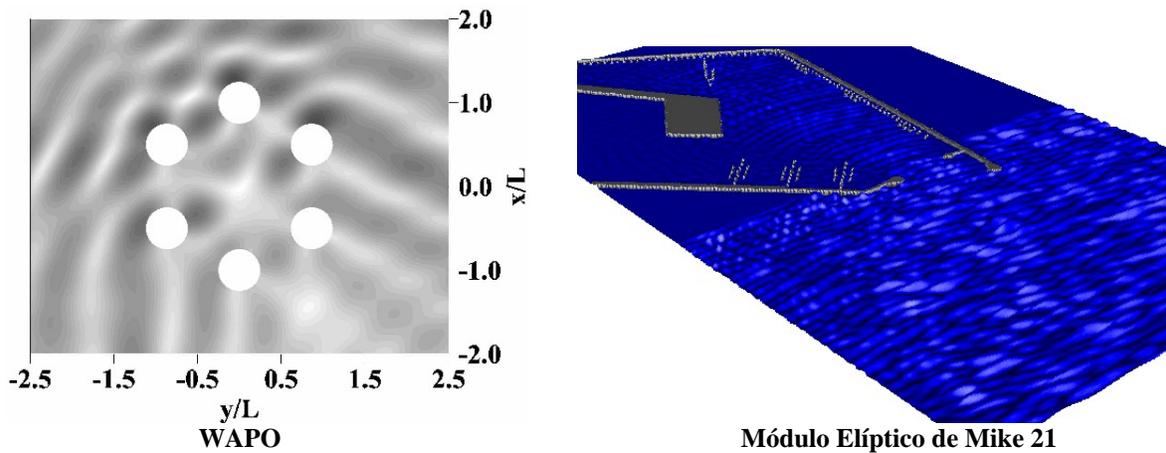


Figura I.19 Ejemplos de propagación utilizando la pendiente suave

Aunque existen soluciones transitorias de la ecuación de la pendiente suave, la mayoría son armónicas, y aunado a que se basa en la teoría lineal, no apta en aguas someras, no es aplicable en el estudio de ondas largas.

I.3.9.3 Modelos de Refracción-Difracción

Partiendo de la ecuación de la pendiente suave, suponiendo que los efectos de la difracción son débiles, y despreciando la reflexión, a través de un desarrollo en series de Padé se llega a la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave, que es la ecuación de gobierno de los llamados modelos de Refracción-Difracción. Este conjunto de modelos son los más utilizados hoy en día en los proyectos de ingeniería, debido principalmente a que su implementación es mucho más sencilla que la ecuación de la pendiente suave completa, Entre las versiones programadas pueden mencionarse el *Red-Dif*, de la Universidad de Delaware, y *OLUCA*, de la Universidad de Cantabria; de este último se muestra un ejemplo en la Figura I.20.

Son muy útiles y precisos cuando se analizan problemas en donde dominan la refracción y el someramiento, y los efectos de difracción no son importantes, como irregularidades del fondo, o líneas batimétricas no paralelas, pero no deben usarse cuando se tengan obstáculos bruscos que provoquen difracción fuerte, como islas, ensenadas, escolleras, etc., ya que las ecuaciones se vuelven inestables y arrojan resultados ilógicos, además que tienen la limitación intrínseca de no considerar los efectos de reflexión, por tanto no son válidos para estudios de resonancia en áreas cerradas.

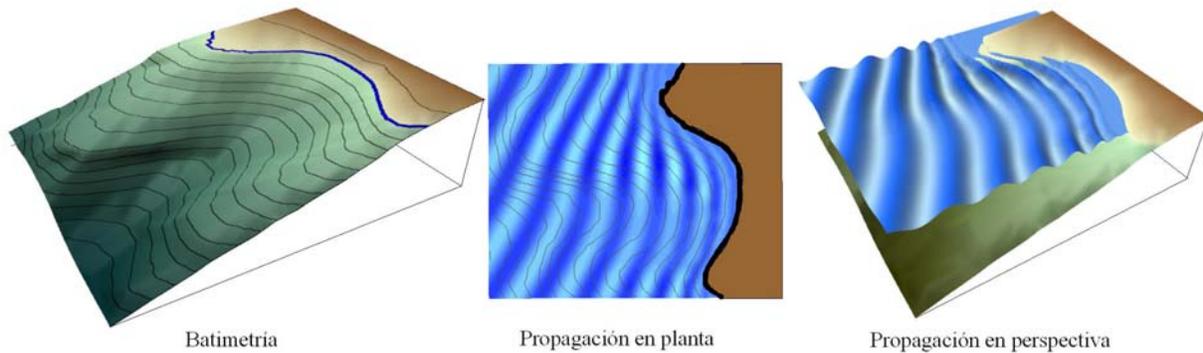


Figura I.20 Ejemplo de propagación con el programa OLUCA

I.3.9.4 Modelos de Refracción

Una forma alternativa a la teoría del rayo para estudiar casos donde influyan únicamente refracción y someramiento, es derivar de la ecuación de gobierno de los modelos anteriores, otra ecuación que desprecie por completo a la difracción y reflexión, cuya resolución será mucho más fácil, y podrá implementarse de manera relativamente sencilla en cualquier computadora personal, lográndose resultados mucho más confiables, mayor rango de aplicación y cálculos menos tediosos que la teoría del rayo.

Aunque su aplicabilidad se limita a problemas donde sólo intervengan refracción y someramiento, es útil por que su solución es sencilla y económica en cuanto a requerimientos de

cómputo. Como ejemplo de un modelo de este tipo puede mencionarse al *Refract*, de Robert Dean, Universidad de Florida.

I.3.9.5 Modelos de Difracción

Si de la ecuación de la pendiente suave se desprecian las variaciones del fondo, se omitirán los efectos de someramiento y refracción, y se llega a los llamados modelos de difracción, que son útiles cuando se desea analizar únicamente el proceso de difracción totalmente aislado, en fondo plano, y provocado por obstáculos rectos verticales e impermeables. Como solución a esta ecuación de gobierno con sus respectivas condiciones de frontera, puede llegarse a expresiones analíticas explícitas para obtener el coeficiente de difracción, sin embargo, como dicha solución normalmente se expresa en coordenadas cilíndricas y por tanto es necesario el uso de los números de Bessel, en ocasiones es más común utilizar diagramas adimensionalizados para presentar resultados, como los encontrados en el Shore Protection Manual (1984).

Es obvio que son muy pocos los casos reales en los que intervenga únicamente la difracción, la práctica común ha sido analizar a la difracción aislada mediante un modelo de este tipo y por otro lado a la refracción y someramiento con un modelo de refracción, empalmado posteriormente los resultados, como es el caso de la teoría de una sola línea (one line model). Para los casos cuando se presenten fenómenos no lineales, como la interacción entre componentes, este tipo de modelos no es válido.

I.3.10 Modelos para aguas someras

Como ya se ha mencionado, se considera aguas someras cuando la longitud y la amplitud de la onda son comparables en magnitud con la profundidad. Esto se puede presentar en dos casos: el primero, cuando se trata de ondas largas, como mareas y tsunamis, cuyo período y longitud de onda son tan grandes que casi cualquier fondo es somero; y el segundo, cuando ondas generadas por viento, como las que se analizan en los modelos anteriores, se encuentran en profundidades muy reducidas.

I.3.10.1 Ecuaciones de Aguas Someras

Cuando se estudian escenarios en los que la hidrodinámica está dominada por ondas de marea, cuyos períodos son grandes y sus efectos actúan a gran escala, no pueden utilizarse los planteamientos anteriores. Para ello existen las llamadas ecuaciones de aguas someras (shallow water equations), una de continuidad y la otra de cantidad de movimiento, formuladas especialmente para estos casos, y cuya solución es transitoria.

Las ecuaciones de aguas someras desprecian aspectos que en los casos anteriores son importantes, e incorporan otros que dada la escala del problema se hacen trascendentes. Pueden obtenerse de muchas formas, la más común es a partir de la integración en la vertical de las ecuaciones de Euler. Dentro de los efectos que incorporan destacan: la fuerza de Coriolis, fuerzas turbulentas mediante el concepto de viscosidad turbulenta, transmisión de energía del viento al agua, y fricción de fondo. Dado que los períodos son muy grandes pueden despreciarse las componentes verticales de la velocidad y la aceleración.

En la literatura hay gran variedad de versiones de las ecuaciones de aguas someras, que se diferencian por número de fenómenos que se consideren, la forma en que son introducidos, y el grado de precisión conservado en la derivación de las ecuaciones. Las hay lineales (LSWE, linear shallow water equations), ligeramente no lineales (WNSWE, weakly nonlinear shallow water equations) y completamente no lineales (FNSWE, fully nonlinear shallow water equations).

Como ejemplos de programas para resolver problemas de hidrodinámica de esta naturaleza pueden mencionarse: los modelos RMA, desarrollados por la empresa Resource Management Associates, y el H2D programado en la Universidad de Cantabria.

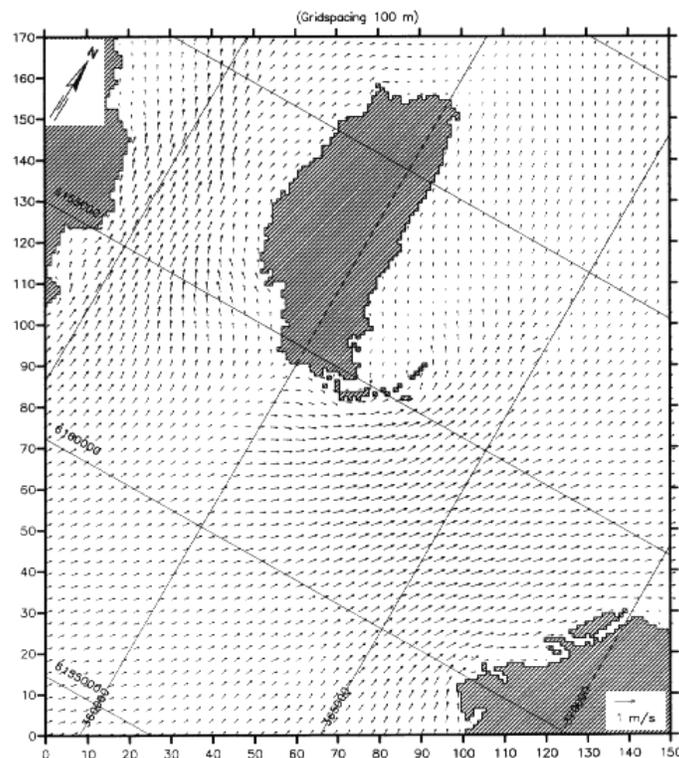


Figura I.21 Corrientes generadas por mareas obtenidas mediante el módulo de ecuaciones de aguas someras del Mike 21

I.3.10.2 Modelos tipo Boussinesq

Los modelos tipo Boussinesq fueron desarrollados originalmente con el objetivo de representar al mismo tipo de ondas que los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave representan en aguas profundas (ondas generadas por viento y restauradas por gravedad), pero con la diferencia de estar diseñados expresamente para profundidades someras, cercanas a la zona de rompiente, o para ondas restituidas después de la rotura. Son sumamente importantes, ya que es justo en esta zona donde se encuentra la inmensa mayoría de las obras de interés de la ingeniería marítima, portuaria y costera. Su capacidad para representar refracción, someramiento, difracción y reflexión, los hace muy potentes.

Su nombre se debe a que están basados en las ecuaciones tipo Boussinesq, una de continuidad y otra de cantidad de movimiento, cuya solución es transitoria. La primera versión fue presentada por M.J. Boussinesq en 1872 derivada a través de la integración de la ecuación de Laplace, válida para fondo horizontal. Peregrine en 1967 presentó una versión modificada capaz de modelar la propagación del oleaje en aguas someras con fondo variable. Estos dos ecuaciones tenían como principal defecto el ser válidas únicamente en aguas someras, dificultándose su aplicación práctica, sin embargo, posteriormente varios investigadores han presentado versiones modificadas para ampliar su rango de validez hasta aguas en transición y para modelar de forma completa la interacción no lineal entre componentes.

La precisión de estos modelos en aguas someras ha impulsado el estudio del ascenso máximo (runup) y de la hidrodinámica de la rotura, lo cual ha servido para mejorar otros modelos, como los de dinámica de sedimentos en la zona de rompiente y en la zona de lavado.

A pesar de ser mucho más adecuados para casi cualquier problema de ingeniería costera, son muy difíciles de implementar, por lo que hasta ahora su uso se ha restringido a la investigación aplicada, sin embargo, en pocos años serán llevados a su aplicación práctica. Entre algunas versiones programadas pueden mencionarse al *Funwave*, de la Universidad de Delaware, al *Coulwave* de la Universidad de Cornell, al *Módulo de Boussinesq* del paquete Mike 21, y al programa *SimWave* de la Universidad de Rhode Island, del cual se presenta un ejemplo en la Figura I.22

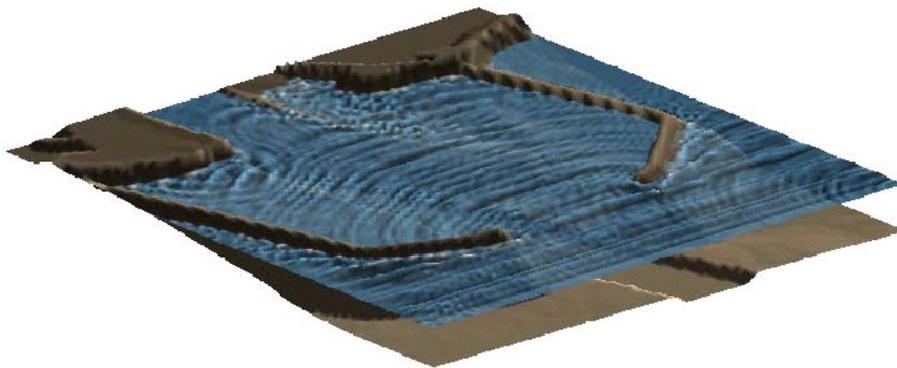


Figura I.22 Ejemplo de propagación con el programa SimWave

Capítulo II

Estado del Arte

“El que quiere nacer tiene que destruir un mundo”

H. Hesse

II. Estado del Arte

Las olas rompen cuando su altura alcanza un cierto valor límite relativo a su longitud o a la profundidad. En aguas profundas las olas originadas por viento rompen cuando su peralte excede un cierto valor. El área entre el punto de rompiente y la línea de costa se denomina la Zona de Rompiente. En la zona de rompiente la energía transportada desde aguas profundas se disipa en el proceso de rotura y en su mayoría esta se transforma en turbulencia. En este capítulo solo se abordará el caso cuando las olas rompen sobre una pendiente como resultado del decremento en la profundidad.

II.1 Clasificación de la rompiente

La rompiente del oleaje exhibe diferentes formas, principalmente dependiendo de relación que existe entre la altura y el periodo de la ola incidente y de la pendiente de la playa. Las formas de la rotura se han clasificado en tres o cuatro categorías dependiendo la literatura citada.

II.1.1 Descrestamiento

El tipo descrestamiento se observa cuando olas con gran peralte inciden en playas con pendientes muy suaves. En este caso el agua cerca de la cresta vuelca mientras que la cresta de la ola toma una forma afilada con el decremento de la profundidad, y mantiene una forma casi simétrica de una ola permanente, como se muestra en Figura II.1.



Figura II.1 Rotura tipo descrestamiento

II.1.2 Voluta

La rotura tipo voluta se presenta en playas con una pendiente relativamente pronunciada. Las olas se vuelven asimétricas con respecto a la cresta y esto hace que se vea que la ola toma una forma afilada en la cresta con la cara frontal casi vertical. Después la ola vuelca, y la cresta volcada se hunde en el agua. La deformación de una ola del tipo voluta antes de romper es más rápida que las del tipo descretamiento. El movimiento de la partícula en el tipo voluta es más violento, y es típico que aparezcan nubes de arena en el punto donde la ola vuelca y se hunde sobre el agua. Como se aprecia en la Figura II.2.

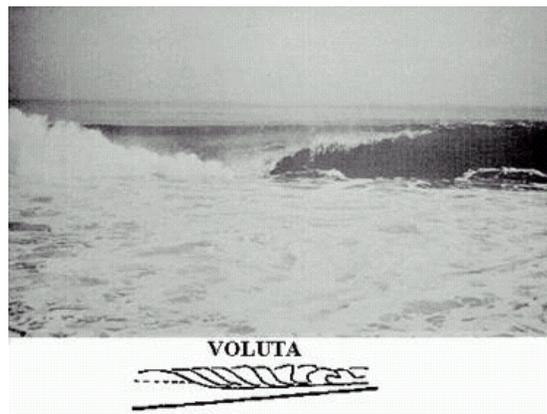


Figura II.2 Rotura tipo voluta

II.1.3 Oscilación

Este tipo de rotura se observa cuando olas de pequeño peralte se propagan sobre una playa con una gran pendiente. En la oscilación también se exhibe una asimetría vertical similar a la de la voluta. Las olas rompen como si viajaran sobre el flujo de retorno de la ola predecesora. Un ejemplo se presenta en la Figura II.3.



Figura II.3 Rotura tipo Oscilación

II.1.4 Colapso

Galvin propuso en el año de 1972 el tipo de rotura colapso. El tipo colapso es un tipo de rotura que se clasifica entre voluta y oscilación. El frente de la onda y la cresta que se presentan permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno. En la Figura II.4 se ejemplifica este tipo de rotura.

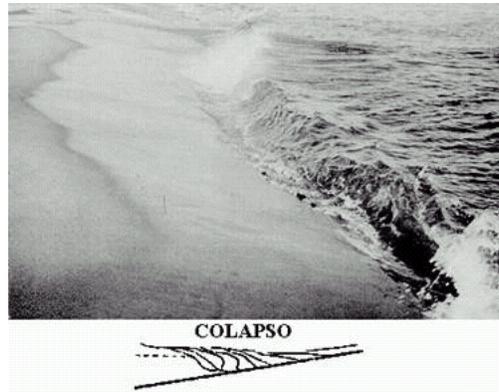


Figura II.4 Rotura tipo colapso

II.1.5 Determinación de la Rotura

Miller en el año de 1976 concluyó de sus mediciones fotográficas detalladas de la rotura de las olas, que la rotura tipo descretamiento y voluta siguen el mismo proceso, pero difieren en la magnitud del vuelco. La clasificación de la rotura es un poco subjetiva. También se ve que las olas que no rompen pero se reflejan perfectamente forman olas estacionarias cuando olas de pequeño peralte inciden sobre una playa con pendiente acusada. En la Figura II.5 se muestra una clasificación de los tipos de rompiente en términos de dos parámetros, el peralte de la ola en aguas profundas, H_o/L_o , y la pendiente de la playa, $\tan \beta$.

En la Tabla II.1 y Tabla II.2 se presentan rangos indicativos de varios parámetros propuestos para clasificar la transición entre los tipos de rompiente. Entre ellos, el parámetro de rompiente $\xi = \tan \beta / \sqrt{H/L}$, también llamado número de Iribarren (ya que fue propuesto por Iribarren y Nogales en 1949) es el que mejor define los límites de cada una de las categorías en que ha sido clasificado.

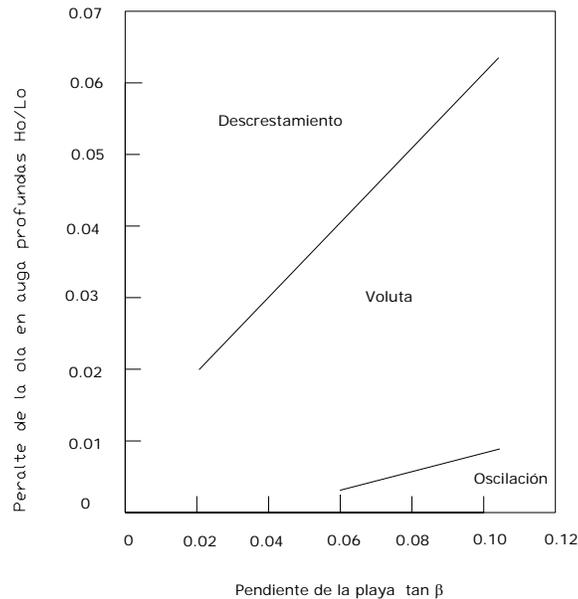


Figura II.5 Clasificación de los modelos de rompiente

Comparando las curvas dadas en la figura y los valores que da la tabla anterior, estos dan una curva un poco desviada para definir la frontera entre el tipo descrestamiento y voluta, pero para el caso de la frontera entre voluta y oscilación dan casi la misma curva. No se puede concluir cual de las dos opciones, si las curvas o los valores de la tabla, son los correctos debido a que la clasificación de la rotura es de tipo subjetivo.

Tabla II.1 Parámetros para clasificar la rompiente

Parámetro	Oscilación	Voluta	Descrestamiento
$B_0 = \frac{H_0 / L_0}{(\tan \beta)^2}$		0.09	4.8
$B_B = \frac{H_b / L_0}{(\tan \beta)^2}$	0.00048		0.011
$B'_B = \frac{a_s / L_0}{(\tan \beta)^2}$	0.0048		0.14
$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0 / L_0}} \quad (= 1/\sqrt{B_0})$		3.3	0.46
$\xi_B = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_b / L_0}}$		2.0	0.4

H_0 : Altura de ola en aguas profundas

a_s : Amplitud de la oscilación del swash

H_b : Altura de ola rompiente

$\tan \beta$: pendiente de la playa

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} : \text{Longitud de la ola en aguas profundas}$$

Tabla II.2 Valores del número de Iribarren para los distintos tipos de rotura

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

II.2 Altura de ola rompiente y profundidad de rompiente

Hay dos tipos de criterios para predecir la rotura. Uno se expresa en términos de las condiciones locales, tomando en cuenta parámetros como la altura y el periodo de la ola y la profundidad en la rompiente. El otro da relaciones entre las condiciones en aguas profundas y en el punto de rompiente.

II.2.1 Criterio de Rompiente

Desde finales del Siglo XIX se han venido realizado muchos estudios con la intención de formular ecuaciones que permitan calcular la altura de ola rompiente H_b . Los dos índices más comunes son, el *índice de profundidad de rompiente*

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} \quad (2.1)$$

donde h_b es la profundidad de rompiente, y el *índice de altura de ola rompiente*

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} \quad (2.2)$$

McCowan (1981) determinó de manera teórica el índice de profundidad de rompiente para ondas solitarias viajando sobre fondo horizontal como

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78 \quad (2.3)$$

Este valor es comúnmente usado en la práctica de la ingeniería como una primera estimación de la altura de ola rompiente.

Munk (1949) formuló la siguiente ecuación para el índice de altura de ola rompiente para una onda solitaria.

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} = 0.3 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/3} \quad (2.4)$$

Miche (1951) y Hamada (1951) llegaron de forma independiente a la siguiente ecuación para la rotura, basados en análisis teóricos. Esta ecuación no toma en cuenta la pendiente de la playa

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh \left(2 \pi \frac{h_b}{L_b} \right) \quad (2.5)$$

donde: h_b : Profundidad de rompiente
 L_b : Longitud de onda en el punto de rompiente
 H_b : Altura de ola rompiente

Los índices de profundidad de rompiente y altura de ola de rompiente no toman en cuenta el efecto de la variación del fondo, por esta razón a partir de los años 50s se realizaron muy diversos estudios experimentales para determinar la dependencia de la rotura del oleaje en función de la pendiente de la playa. Goda (1970) recolectó y analizó datos obtenidos por otros investigadores. Propuso un criterio de rompiente que combina las propiedades del oleaje en la rompiente, y también propuso otro criterio que relaciona las propiedades del oleaje en aguas profundas y aquellas en la rompiente. Su criterio de rompiente se expresa gráficamente como se muestra en la Figura II.6 por medio de las líneas continuas, para diferentes taludes de playa.

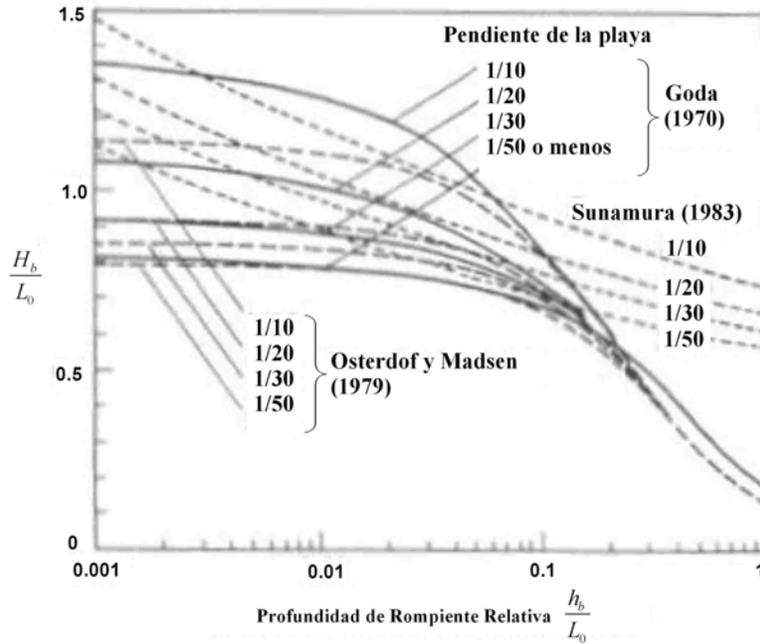


Figura II.6 Comparación de varios criterios de rotura

Goda (1975) dio también una expresión aproximada de sus curvas.

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - e^{\left\{ -1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\}} \right] \quad (2.6)$$

donde: $A = 0.17$ y es una constante empírica
 $\tan \beta$: pendiente de la playa

Ostendorf y Madsen (1979) desarrollaron ecuaciones incluyendo la pendiente de la playa.

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left[(0.8 + 5 \tan \beta) 2 \pi \frac{h_b}{L_b} \right] \quad \tan \beta < 0.1 \quad (2.7)$$

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left[1.3 (2\pi) \frac{h_b}{L_b} \right] \quad \tan \beta > 0.1 \quad (2.8)$$

donde: L_b es la longitud de onda en el punto de rompiente y se calcula con la relación de dispersión de la teoría lineal usando el período de la onda y la profundidad de rompiente.

Sunamura (1983) propuso un criterio empírico para la rotura tomando en cuenta resultados obtenidos en canales largos.

$$\frac{H_b}{h_b} = 1.09 (\tan \beta)^{0.19} \left(\frac{h_b}{L_0} \right)^{-0.1} \quad (2.9)$$

Para datos de laboratorio con olas monocromáticas rompiendo sobre playas con pendientes suaves, Weggel (1972) desarrolló la siguiente expresión

$$\frac{H_b}{h_b} = b - a \frac{H_b}{g T^2} \quad (2.10)$$

para $\tan \beta \leq 0.1$ y $H_0 / L_0 \leq 0.06$, donde T es el período, g la aceleración de la gravedad y H_0 es la altura de ola sin refracción en aguas profundas equivalente. Los parámetros a y b son función de la pendiente de playa y se determinan empíricamente por

$$a = 43.8(1 - e^{-19 \tan \beta}) \quad (2.10a)$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5 \tan \beta})} \quad (2.10b)$$

II.2.2 Altura de ola rompiente

Es muy común que sea necesario estimar la altura de ola rompiente dada una condición de ola en aguas profundas.

Komar y Gaughan (1973) obtuvieron la siguiente relación empleando la teoría lineal.

$$\frac{H_b}{H_0} = \frac{0.563}{\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/5}} \quad (2.11)$$

El coeficiente 0.563 se usó para ajustar los datos experimentales y esta expresión no toma en cuenta la pendiente de la playa.

Goda (1970) obtuvo resultados experimentales (ver Figura II.7) y para ello utiliza la altura de ola en aguas profundas corregida, la cual está dada por la siguiente ecuación

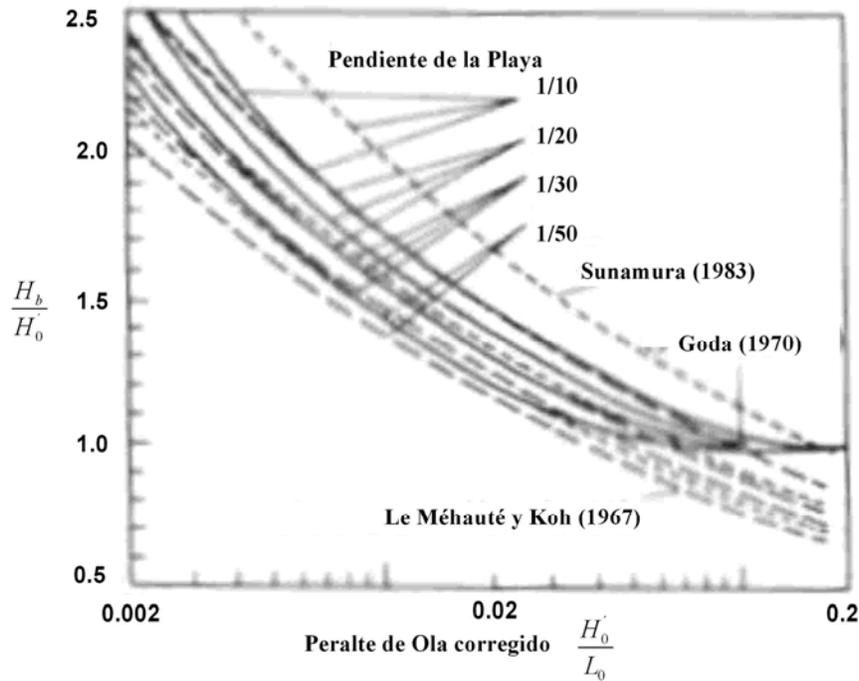


Figura II.7 Comparación de la altura de ola rompiente de varios criterios

$$H'_0 = K_r K_d K_f H_0 \quad (2.12)$$

donde: H_0 : Altura de ola en aguas profundas
 K_r y K_d coeficientes de refracción y de difracción respectivamente
 K_f es el promedio de la disipación en altura de ola debido a la fricción

Hay algunas otras fórmulas similares.

Le Méhauté y Koh (1967) propusieron

$$\frac{H_b}{H'_0} = 0.76 (\tan \beta)^{1/7} \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (2.13)$$

Sunamura y Horikawa (1983) obtuvieron

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad (2.14)$$

II.2.3 Profundidad de Rompiente

El cálculo de la profundidad de rompiente, h_b , es directo del criterio de rompiente que se discutió en el apartado II.2.1 si la altura de rompiente, H_b , se evalúa de los resultados obtenidos por medio de las ecuaciones vistas en la parte III.2.2.

Las curvas obtenidas por Goda (1970) son las siguientes:

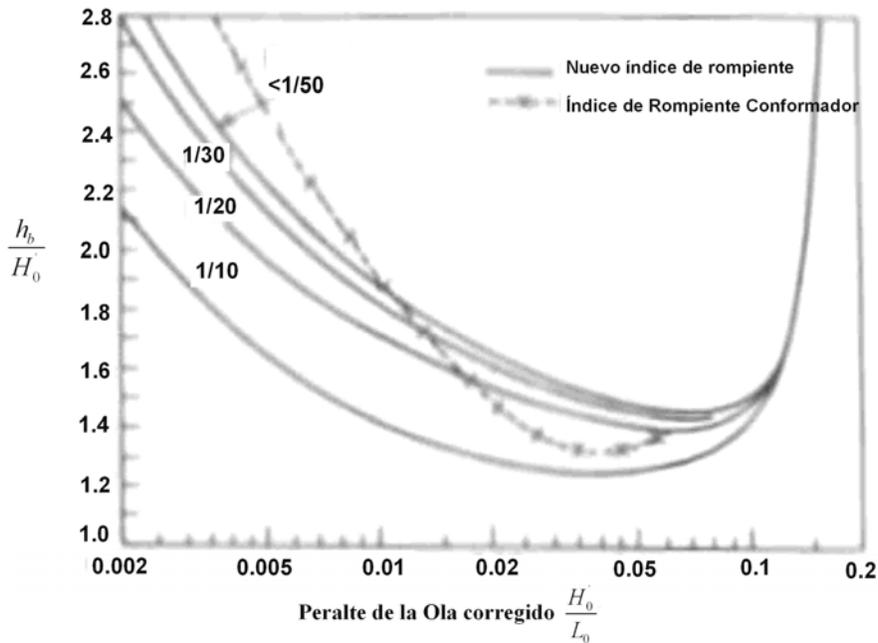


Figura II.8 Profundidad de rompiente

Para medios porosos Rojanakamthorn propone una profundidad efectiva, la cual pretende tomar en cuenta la permeabilidad del material poroso para la transmisión de la energía y para la reflexión de la onda.

$$h^* = h - a(1 - \varepsilon) \quad (2.14 a)$$

donde h^* es la profundidad efectiva, h es la profundidad total, a es el espesor de material poroso y ε es la permeabilidad del material (grava $\varepsilon = 0.32$).

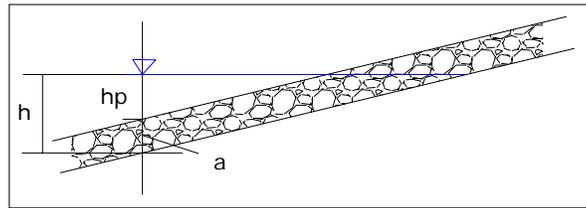


Figura II.9 Profundidad equivalente

De la figura anterior podemos ver que $h = h_p + a$, y sustituyendo esto en la ecuación (2.14 a) nos queda:

$$h^* = h_p + \varepsilon a \quad (2.14 \text{ b})$$

II.2.4 Relación entre la transformación de la ola en aguas someras y el criterio de rompiente

Los resultados que se describen a continuación solo tratan sobre la relación entre las olas en aguas profundas y las olas que rompen. Por otro lado es posible calcular la altura de ola en cualquier profundidad aplicando el método para aguas someras. Por ejemplo se puede calcular la altura de ola desde aguas profundas hasta el punto de rompiente, donde alguna de las relaciones descritas en el apartado II.2.1 se satisface. Sin embargo, las alturas de ola rompiente obtenidas generalmente no se ajustan con el resultado de alguna de las formulas del apartado II.2.2. Otra discrepancia ocurre cuando se calcula la profundidad de rompiente, debido a un error en el modelado de la altura de ola en aguas someras ya que este valor va cambiando mientras se acerca a la rotura.

II.2.5 Efecto de las corrientes en el criterio de rompiente

Cunado la corriente es significativa, este efecto de las corrientes se debe tomar en cuenta para la determinación del punto de rompiente, por ejemplo cuando el oleaje se propaga en la zona de influencia de bocas estuarinas o descargas de ríos. Al respecto, son poco los estudios que se han realizado en cuanto a la condición de rompiente para olas bajo la influencia de corrientes. Yu (1952) estudió las olas en aguas profundas; Iwagaki y Asano (1980) estudiaron el caso de la profundidad finita y Sakai, Saeki y Ozaki (1983) estudiaron las olas sobre una pendiente. Estos estudios fueron empíricos y solo tratan casos en los que el oleaje se propaga contra la corriente.

$$\sigma = \sigma_* + kU \cos \theta \quad (2.15)$$

donde σ_* es la frecuencia angular para un observador moviéndose con la corriente, U es la magnitud de la corriente, y θ es el ángulo entre la dirección de propagación del oleaje y el de la corriente. La frecuencia intrínseca σ_* se puede calcular de la relación de dispersión para olas de pequeña amplitud:

$$\sigma_*^2 = g k \tanh(k h) \quad (2.16)$$

Utilizando el criterio de rompiente de Miche y las ecuaciones de la frecuencia angular antes mencionadas, se puede calcular el peralte de la ola en el punto de rompiente. Sin embargo, Sakai, Saeki y Ozaki (1983) encontraron una constante α_b definida en la siguiente ecuación y que es más pequeño que el valor de 0.142 que aparece en la ecuación de Miche.

$$\frac{H_b}{L_b} = \alpha_b \tanh\left(2 \pi \frac{h_b}{L_b}\right) \quad (2.17)$$

II.2.6 Criterio de rompiente para oleaje irregular unidireccional

Es evidente que se debe desarrollar un criterio de rompiente para olas irregulares, ya que las olas en el océano son irregulares. Las olas rompientes son, en definitiva, no lineales, por esto el método del análisis espectral, que es la descomposición de Fourier en el dominio de la frecuencia, no se puede aplicar. Como una alternativa, es razonable definir una ola individual aplicando el método de pasos ascendentes (o descendentes) por cero y considerar y considerar la condición de rompiente de la ola. Goda (1975) introdujo un concepto probabilístico al coeficiente A de su criterio de rompiente, como una variable de 0.12 a 0.18.

Kimura e Iwagaki (1978); Isobe, Nichimura y Isuka (1980); y Sawaragi y Iwata (1981) estudiaron a condición de rompiente para las olas irregulares de manera experimental. Todos estos autores concluyeron que las olas irregulares tienden a romper con peraltes de ola más pequeños que las olas regulares.

II.3 Cinemática de la rotura

En la actualidad no existe una teoría que permita estimar razonablemente estas cantidades. Watanabe, Hara y Horikawa (1983) estudiaron un criterio de rompiente para un campo de olas compuesto, es decir, donde se pudiera presentar la superposición de ondas debido a la refracción, reflexión y difracción. Ellos reanalizaron los datos recolectados por Goda (1970), usando una relación de la magnitud de la velocidad horizontal de la partícula de agua con la velocidad de la

onda. Para un tren de oleaje unidireccional simple, la relación de la velocidad horizontal de la partícula de agua con al celeridad de la onda ala profundidad de rompiente, h_b , esta dada por:

$$\frac{u_{b0}}{c_b} = \pi k_s \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{\cosh(k_b h_b)}{\sinh(k_b h_b)} \right)^2 \quad (2.18)$$

La energía de la ola puede ser estimada aplicando el concepto de conservación del flujo de energía. Por esto, es muy útil contar con una expresión del criterio de rompiente en términos de la energía de la ola.

Izumiya y Horikawa (1983) propusieron la siguiente relación para este propósito. Primero se evalúa la altura de ola rompiente con la expresión

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - e^{\left\{ -1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\}} \right] \quad (2.19)$$

dada una profundidad relativa h/L_0 y la pendiente de la playa $\tan \beta$. Luego la altura de ola se convierte en energía de rompiente con:

$$\frac{E_b}{\rho g h^2} = \frac{1}{1 + a \left(\frac{H_b}{h} \right)} \left(\frac{H_b}{h} \right)^2 (U_{sb})^{-1/2} \left\{ 1 - \frac{2}{1 + a \left(\frac{H_b}{h} \right)} (U_{sb})^{-1/2} \right\} \quad (2.20)$$

donde: $U_{sb} = g H_b \frac{T^2}{h^2}$ es el parámetro de Ursell para aguas someras

a es una constante empírica ($a=0.33$)

Las olas que excedan la energía dada por esta ecuación se asumen como que rompen. Esta ecuación se dedujo considerando teoría lineal y asumiendo que la energía total es dos veces el potencial de energía.

II.4 Transformación del oleaje en la zona de rompiente

II.4.1 Características Generales de la transformación del oleaje en la zona de rompiente.

En una playa con pendiente uniforme cuando la ola empieza a romper su altura decrece rápidamente mientras mantiene una relación entre su altura y la profundidad. El valor de esa relación anda por 0.8 y 1.0 y aumenta con el aumento en la pendiente de la playa. El perfil de la onda es más afilado cuando la ola empieza a romper, pero se vuelve menos afilado después de romper.

Ahora consideremos la rompiente se presenta en una playa con una barra de arena, donde la profundidad puede incrementarse o permanecer constante después de romper. En este caso la altura de ola también muestra un rápido decremento después de romper. Sin embargo la disipación de la energía cesa a una cierta distancia desde el punto de rompiente, y las olas se reforman. El perfil de las olas reformadas es similar al de las olas de amplitud finita de forma permanente, aunque se pueden producir olas secundarias en el proceso de rotura.

II.4.2 Modelado de la transformación del oleaje en la zona de rompiente.

El proceso de rompiente no ha sido del todo aclarado. En particular, la turbulencia inducida por la rompiente se mantiene bastante desconocida. Algunos modelos de transformación del oleaje en la zona de rompiente se han propuesto y se resumen en la siguiente tabla Tabla II.3.

Tabla II.3 Clasificación de los modelos de transformación de la rompiente

Rotura limitada por la profundidad	Aplicación numérica de las ecuaciones de la onda larga de amplitud finita	Método de Flujo de Energía			
		Modelo de Viscosidad del Remolino	Bore Model	Modelo de Turbulencia	Otros
Longuet-Higgins y Stewart (1963)	Keller, Levine y Witham (1960); Ho y Meyer (1962) Shen y Meyer (1963);	Ijima, Takahashi y Nakamura (1956); Mizuguchi (1980)	Le Méhauté (1962); Divoky, Le Méhauté y Lin (1970)	Horikawa y Kuo (1966); Izumiya y Horikawa (1984)	Führböter (1970); □ally, Dean y Dalrymple (1984)
Bowen (1969) Noda (1974)	Freeman y Le Méhauté (1964); Sawaragi e Iwata (1974); Johns (1980)				

La fórmula mas común y simple que se usa es:

$$H = \gamma_b h \quad (2.21)$$

y es el caso límite de aguas poco profundas y estados en donde la altura de ola es proporcional a la profundidad. El valor de γ_b normalmente se toma de 0.78. Algunos ejemplos del éxito de esta fórmula, Longuet – Higgins y Stewart (1963) quienes calcularon la variación el nivel medio del debido a la rotura del oleaje “wave set-up”, Bowen (1969) calculó patrones de circulación de corrientes en la zona cerca de la costa; y Noda (1974) calculó las corrientes cerca de la costa.

Hay otro método que se puede usar para predecir la transformación de la ola y el cual consiste en resolver la ecuación de continuidad y la ecuación de movimiento para ondas largas de amplitud finita, incluyendo el efecto de rotura.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta) u] = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2.23)$$

Keller, Levine y Whitham (1960), Ho y Meyer (1962), Shen y Meyer (1963), y freeman y Le Méhauté (1964) entre otros aplicaron estas ecuaciones para calcular las características de la ola en la zona de rompiente, asumiendo que la condición de remolino se satisface en el frente de las olas rompientes.

Para estimar solo la altura de la ola es más conveniente emplear la ecuación de la energía de la ola. El flujo de energía se conserva hasta que las olas rompen, si las olas rompen tenemos,

$$\frac{d}{dx} (Ec_g) = -\Phi_d \quad (2.24)$$

donde Φ_d es la pérdida de energía de la ola por unidad de área por unidad de tiempo debida a la rotura.

Mizuguchi (1980) introdujo la siguiente expresión para Φ_d que satisface los dos requerimientos para una altura de ola estable en una profundidad de agua uniforme y para relaciones aproximadamente constantes de altura de ola con la profundidad de agua en playas con pendiente uniforme:

$$\Phi_d = \left(\frac{\rho}{8} \frac{g}{H^2} \right) 4 k^2 v_{eb} \left\{ \frac{\left(\frac{H}{D} - \gamma_r \right)}{\gamma_r} \right\}^{1/2} \quad (2.25)$$

$$v_{eb} = \frac{5 g \tan \beta_b}{\left[8 k_b \sigma \left(1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_b} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\gamma_b^2}{\gamma_r^2} \right) \right]} \quad (2.26)$$

donde v_{eb} es la viscosidad cinemática del remolino y los subíndices b y r denotan valores valuados en el punto de rompiente y en la zona de reformación de la ola respectivamente. Los parámetros a determinar para usar este método son los dos coeficientes γ_r y γ_b . Sin embargo, γ_r normalmente está dado por el criterio de rompiente.

Isumiya y Horikawa (1984) dieron la siguiente ecuación asumiendo una ley de similitud para la estructura de la turbulencia inducida en la rompiente.

$$\Phi_d = \beta_0 (M_*^2 - M_{*s}^2)^{1/2} \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2}} D^{3/2} \left(\frac{2c_g}{c} - 1 \right)^{1/2} \quad (2.27)$$

$$M_*^2 = \frac{E c_g}{c \rho g D^2} \quad (2.28)$$

donde β_0 es una constante y M_{*s} es el valor del flujo de energía adimensional en la zona de reformación de la ola y se toma de 0.009 basado en datos de laboratorio. Usando relaciones para olas de pequeña amplitud para compararse tiene,

$$\Phi_d \sim E \tan \beta_b \frac{\sqrt{g D_b}}{D} \left(\frac{H}{D} - \gamma_r \right)^{1/2} \quad (2.29)$$

$$\Phi_d \sim E \sqrt{g D} \left(\frac{H}{D} \right) \left[\left(\frac{H}{D} \right)^2 - \gamma_r^2 \right]^{1/2} \quad (2.30)$$

Recientemente Daly, Dean y Dalrymple (1984) presentaron un modelo que toma en cuenta la reformación de la ola. Ellos asumen que la disipación es simplemente proporcional a la diferencia entre el flujo de energía local y aquel en la zona de reformación, dividido entre la profundidad de agua local. El modelo incluye dos parámetros obtenidos empíricamente. Obtuvieron buen ajuste entre los valores estimados y los valores medidos de la transformación de la altura de ola.

II.4.3 Transformación del oleaje irregular en la zona de rompiente.

Se tienen dos técnicas para describir las olas irregulares: el análisis espectral y el análisis individual del oleaje. El análisis individual del oleaje es más conveniente para analizar olas no lineales.

Battjes (1972) calculó el set-up de una ola debido a oleaje irregular asumiendo cada altura de ola esta limitada por el criterio de rompiente. Sin embargo, la distribución de alturas de ola resultante exhibe grandes ocurrencias en la altura de rompiente, mientras que la distribución medida es suave.

Goda (1975) propuso un modelo probalístico de la transformación de la altura de ola. En este modelo la altura de ola significativa esperada, $H_{1/3}^*$, se evalúa primero de su correspondiente altura de ola significativa en aguas profundas, $(H'_{1/3})_0$, usando la ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} H h^{2/7} = const. \quad 30 \leq \frac{g H T^2}{h^2} \leq 50 \\ \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2n} \frac{1}{\tanh kh}} \quad \frac{g H T^2}{h^2} \leq 30 \\ H h^{5/2} \left(\sqrt{\frac{g H T^2}{h^2}} - 2\sqrt{3} \right) = const. \quad 50 \leq \frac{g H T^2}{h^2} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Después, suponiendo que la distribución de la altura de ola se obtiene asumiendo una distribución tipo Rayleigh.

$$P\left(\frac{H}{H_{1/3}^*}\right) = 2 a^2 \left(\frac{H}{H_{1/3}^*}\right) e^{-a^2 \left(\frac{H}{H_{1/3}^*}\right)^2} \quad (2.32)$$

Tercero, el criterio de rompiente (eq. 2.6) se aplica de la siguiente manera. Todas las olas para las cuales la constante A es mayor a 0.18 rompen, y las olas para las cuales $A < 0.12$ no rompen.

Para las olas en los valores intermedios de A , la relación entre el número de olas que rompen y el número total de ola se asume que varía linealmente de 0 a 1.

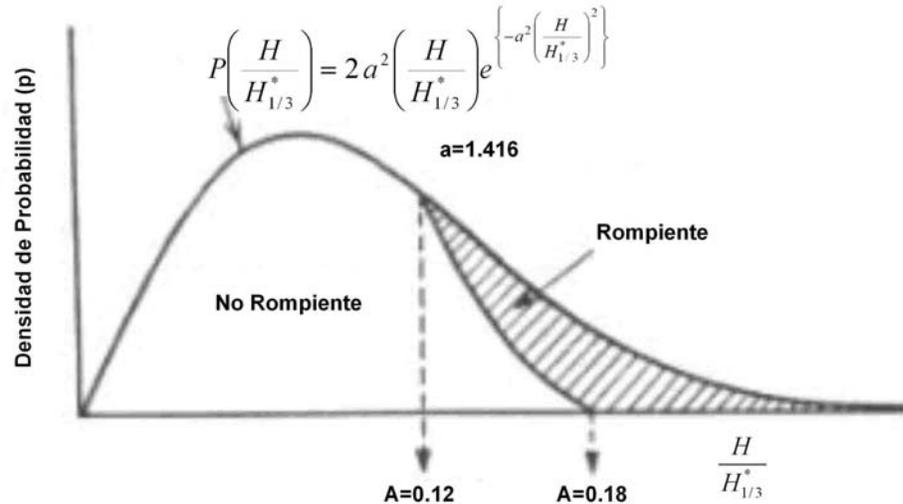


Figura II.10 Cambio en la distribución de la altura de ola debido a la rompiente

Cuarto, aquellas olas rompientes que corresponden a las olas en la zona sombreada de la Figura II.10, se excluyen y la escala vertical se cambia, por lo tanto, la probabilidad total se vuelve 1 otra vez. Este proceso de redistribución implica que las olas rompientes van a tener una distribución proporcional a la distribución de las olas no rompientes después de romper. Este modelo, incluye el “set-up” y el “surf beat” en la profundidad de agua. El modelo de Goda no es aplicable si la topografía del fondo se desvía mucho de la uniformidad, ni tampoco si la estabilización de las olas individuales no se toma en cuenta.

Mizuguchi (1882^a) trató la transformación del oleaje irregular en la zona cerca de la costa, asumiendo que las olas individuales, definidas por el método de pasos descendentes por cero con el nivel cero de una ancho de banda finito, E_R , se comportan como olas regulares con el misma altura de ola y período. Las fluctuaciones de largo período son removidas numéricamente antes de que se aplique el método de pasos descendentes por cero. El número de olas determinadas es casi constante en toda la zona de rompiente excepto muy cerca de la línea de costa.

Mase e Iñaki (1982) propusieron un modelo de transformación del oleaje en la zona de rompiente para oleaje irregular basados en un modelo de onda de bore para oleaje regular.

Thornton y y Guza (1983) presentó un modelo en el cual se asume un distribución tipo Rayleigh de la altura de ola, aun en la zona de rompiente y compararon exitosamente las predicciones de modelo de ciertas cantidades estadísticas como la altura de ola significativa, $H_{1/3}$, con medidas de campo. Ellos aplicaron un filtro de paso de banda para los datos brutos de elevación de la

superficie medidos en campo antes de aplicar el método de pasos ascendentes por cero, para definir las olas individuales.

II.5 Perfil de la onda

II.5.1 Velocidad Promedio

En la naturaleza normalmente se observan fuertes corrientes estacionarias en la zona cerca de la costa. El promedio más alto de velocidad de corriente ocurre cuando el punto medio se localiza dentro de la zona de rompiente en marea baja. La magnitud de la velocidad de la corriente es casi cero fuera de la zona de rompiente, el transporte de masa, como lo predijo Longuet-Higgins (1953) para flujo en dos dimensiones no existe. Dentro de la zona de rompiente existe una velocidad promedio de la corriente localizada, en el caso de aguas cercanas a la costa, cerca de la superficie libre del agua; y en el caso de mar adentro cerca del fondo. La distribución vertical dentro de la zona de rompientes muy probable que se produzca por un gran flujo de masa de agua liberada por las olas que rompen cerca de la superficie. La distribución vertical de la velocidad horizontal de la corriente casi siempre tiene el mismo gradiente y este se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\frac{\bar{u}}{\sqrt{g h}} = 0.1 \frac{z}{h} + const. \quad (2.33)$$

La constante se espera que variara dependiendo de la localización en la zona cerca de la costa.

II.5.2 Perfil de la onda

Ya en la zona de transformación, perfil de la onda se hace puntiagudo y se inclina hacia delante cerca del punto de rompiente. El perfil exhibe una forma como de dientes de sierra mientras las olas se acercan a la línea de costa. Las distribuciones de altura de ola definida por el método de pasos descendentes por cero son diferentes a las obtenidas por medio del método de pasos ascendentes por cero. Las distribuciones de altura de ola obtenidas por el método de pasos descendentes por cero muestran picos dobles porque el método define pequeñas olas secundarias que aparecen detrás de la cresta de la ola principal. En contraste, el método de pasos ascendentes por cero define dos ondas con casi la misma altura de ola, produciendo un solo pico en la distribución de la altura de ola.

En cuanto al proceso de rompiente, es evidente que la altura de ola definida por el método de pasos descendentes por cero es más apropiada. Aquí también notamos que la altura de ola significativa observada visiblemente en la zona cerca de la costa, corresponde a la altura de ola definida por el método de pasos descendentes por cero, y también, a aquella que normalmente determinamos como la diferencia entre la cresta de la ola y su valle predecesor.

Para la descripción de las olas en la zona de rompiente, las olas individuales se definen mejor aplicando el método de pasos descendentes por cero, sin tomar en cuenta las pequeñas olas secundarias. Si se encuentran fluctuaciones importantes en el período, estas fluctuaciones deben eliminarse antes de aplicar el método de pasos descendentes por cero y se deberán tratar por separado. La relación entre la altura de ola un décimo, $H_{1/10}$, y la altura de ola significativa, $H_{1/3}$, se espera que sea pequeña en la zona de rompiente, mientras que las olas largas rompen y desaparecen.

II.5.3 Velocidad de la partícula de agua

Es conveniente definir el valor significativo de la velocidad de la partícula de agua, $(\hat{u})_{1/3}$, de manera similar a la altura de ola significativa, de manera que se pueda discutir sobre la velocidad de la partícula de agua en olas irregulares. Para valores medidos no normalizados por la celeridad $C = \sqrt{g h}$ los valores son casi constantes en un dominio entre 0.4 a 0.5. La relación entre el valor cuadrático medio de la velocidad de la partícula de agua contra el valor de la celeridad es alrededor de 0.3. Esta relación debe ser del orden de $\gamma_b (\sim 0.8)$, si la teoría de la pequeña amplitud es aplicable, con la consideración de que la altura de ola es γ_b veces la profundidad. Por esto los valores medidos son más pequeños que los valores que se predicen. Esto se atribuye a dos factores: uno es el hecho de que el perfil de la onda es más puntiagudo en la cresta que el perfil de la velocidad de la partícula de agua, y por lo tanto, la relación del valor cuadrático medio con la “amplitud total” para el perfil de la onda es más pequeña que para la velocidad de la partícula de agua; el segundo y principal factor es que la función de transferencia del perfil de la onda medido a perfil de velocidades es más pequeña que la teórica, por esto la elevación de la superficie libre del agua medido está afectada por el aire atrapado.

En la caracterización del perfil de velocidades de partícula de agua en la zona de rompiente, Isobe (1981) indicó que los perfiles individuales de la velocidad de partícula de agua en la costa y mar adentro, pueden ser expresados por dos curvas sinusoidales sin caer en un error significativo.

II.5.4 Relación entre el perfil de la onda y la velocidad de partícula de agua

Se puede emplear el análisis espectral para analizar las olas en la zona de rompiente, entendiendo que el análisis es una mera técnica para tratar el fenómeno en el espacio de Fourier. Más aun, es posible, en algunos aspectos, aplicar la teoría de la pequeña amplitud como una primera aproximación para las olas en la zona de rompiente.

Uno puede obtener una buena estimación del perfil de velocidades de la partícula de agua cerca del punto de rompiente aplicando el método lineal de filtro al perfil de la onda, con una función de transferencia modificada por la siguiente ecuación, para todas las frecuencias.

$$\gamma_H = 1 - 0.5 \left(\frac{H_{1/3}}{h} \right)^2 \quad (2.34)$$

Sin embargo, cerca de la costa, la existencia de estancamientos parciales no podemos omitir las olas de largo período como se había mencionado anteriormente. Isobe Ohnaka (1984) aplicaron la siguiente función de transferencia

$$H(\sigma) = \begin{cases} i \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{\{(1 + K_R)J_1(\xi) - i(1 - K_R)Y_1(\xi)\}}{\{(1 + K_R)J_0(\xi) - i(1 - K_R)Y_0(\xi)\}} & \sigma < \sigma_0 \\ -\gamma_H \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} & \sigma \geq \sigma_0 \end{cases} \quad (2.35)$$

la cual combina la función de transferencia de ondas largas de pequeña amplitud parcialmente reflejadas con la función de transferencia de las olas progresivas de pequeña amplitud modificadas por γ_H . Aquí K_R es el coeficiente de reflexión y $\xi = 2\sigma \sqrt{\frac{x}{\tan \beta}}$ es la distancia unitaria hacia la línea de costa.

El método lineal de filtro que incluye el efecto de las olas parcialmente estacionarias de largo período, se aplica poniendo $\sigma_0 = \frac{2\pi}{20} s^{-1}$ y asumiendo que el coeficiente de reflexión decrece linealmente de 1 a 0 mientras σ_0 tiende a 0. Los resultados obtenidos se ajustan mejor con las mediciones que los calculados con el método lineal de filtro directo.

II.5.5 Turbulencia en la zona de rompiente.

Para entender la cinemática de la rompiente, es de suma importancia entender el mecanismo de turbulencia debido a la rotura del oleaje para estimar la reducción de la energía de la ola en la zona de rompiente. Recientemente se tienen ya aparatos como los anemómetros y los velocímetros de láser DOPPLER, que hacen posible medir la velocidad de la turbulencia en la

zona de rompiente. Sin embargo, una definición de turbulencia en la zona de rompiente, donde el flujo por sí mismo es inestable e irregular, no ha sido establecida. Muchos métodos han sido propuestos para definir la turbulencia en la zona de rompiente, tales como:

Tabla II.4 Definición de turbulencia debido a la rompiente

Fase Media	Stive (1980) Izumiya y Horikawa (1982) Aono, Ahashi y Hattori (1982)
Métodos de Filtro	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div style="text-align: center;"> <p>Movimiento Medio</p> <p>Filtro band-pass</p> </div> <div style="margin-left: 20px;"> <p>Sakai, Inada y Sandanbata (1982) Nadaoka y Codo (1982)</p> </div> </div>
Método de Coherencia	Thornton (1979) Mizuguchi (1982c) Aono y Hattori (1983)

El método de fase media define la componente de la turbulencia como una desviación del promedio de muchos ciclos de olas en una determinada fase del movimiento del oleaje. Esta definición no se puede aplicar para campos de flujo de ondas irregulares. Además la turbulencia definida de esta forma debe incluir la fluctuación del movimiento de la ola cerca del punto de rompiente, lo cual es muy difícil de evitar incluso en ensayos de laboratorio.

En el método de filtro las componentes de Fourier con frecuencias más grandes que el valor crítico se consideran turbulencia. El método del movimiento medio, corresponde esencialmente a un tipo de filtro de baja frecuencia y puede ser incluido en esa categoría. En el método de filtro no está claro que valor se debe tomar como frecuencia crítica.

En el método de coherencia, la velocidad de la turbulencia se define como aquel movimiento que no tiene coherencia con la fluctuación de la superficie libre del agua ξ . La velocidad de total u , se describe como la suma de las velocidades de onda u_w , y la velocidad de turbulencia u' .

$$u = u_w + u' \quad (2.36)$$

Por lo tanto se tienen que asumir algunas relaciones, entre ellas, sus correspondientes espectros de densidad S_ξ, S_u, S_{uw} y $S_{u'}$, y los espectros cruzados $S_{\xi u}, S_{\xi u_w}$, y $S_{\xi u'}$,

$$S_u = S_{uw} + S_{u'} \quad (2.37)$$

$$|S_{\xi u}|^2 = |S_{\xi u_w}|^2 = S_\xi S_{u_w} \quad (2.38)$$

Por lo tanto

$$S'_u = (1 - \gamma_c^2) S_u \quad (2.39)$$

donde γ_c es la coherencia definida por

$$\gamma_c^2 = \frac{|S_{\xi u}|^2}{S_\xi S_u} \quad (2.40)$$

Este método tiene algunos defectos. Las olas no lineales dan una coherencia menor a la unidad sin turbulencia debido a que se excluyen las fases de orden mayor. El método también descuida la posible turbulencia en la fluctuación de la superficie.

II.5.6 Movimiento de largo período en la zona cerca de la costa.

Munk (1948) y Tucker (1950) demostraron cualitativamente la existencia de fluctuaciones de la superficie del agua de largo período (desde segundos a minutos) en la zona cercana a la costa, llamando a este fenómeno “surf beat”. El oleaje de largo período usualmente forma olas estacionarias en una playa con pendiente, mientras que el peralte de la ola sea muy pequeño. Ondas largas oblicuas forman ondas de orilla. Huntley, Guza y Thornton (1981) reportaron la existencia de las olas de orilla progresivas calculando el espectro de número de onda-frecuencia de datos obtenidos en campo.

Si el movimiento de largo período se presenta en la forma de olas de orilla, su magnitud debe ser determinada en un balance entre la amplificación debida a interacciones no lineales, disipación debida a la fricción, y otros (Bowen y Guza, 1978). Por otro lado, si el movimiento de largo período se presenta en forma de olas estacionarias, su energía viene de costa fuera (Mizuguchi, 1982b). Cualquiera que sea el tipo de movimiento, aun no ha sido posible predecir la energía teórica en movimientos con baja frecuencia. Goda (1975) propuso una fórmula empírica para el valor cuadrático medio de la fluctuación de largo período de la superficie, ζ_{rms} , basado en datos recolectados en experimentos de campo:

$$\frac{\bar{\zeta}_{rms}}{H'_{0.1/3}} = \frac{0.01}{\sqrt{\frac{H'_{0.1/3}}{L'_{0.1/3}} \left(1 + \frac{h}{H'_{0.1/3}} \right)}} \quad (2.41)$$

Capítulo III

Estudio Experimental

“Lo contrario de cada verdad es igualmente cierto”
H.Hesse

III. Estudio Experimental

En lo referente a los laboratorios de hidráulica marítima, estos pueden clasificarse de diferentes formas. Se pueden dividir atendiendo al fenómeno que se simule, los de oleaje y los de oleaje-corriente. Otra clasificación se puede dar en base al tipo de oleaje que se genera, clasificándose en canales de generación de oleaje bidimensional, en el cual se generan ondas que se propagan en una sola dirección; o en multidireccionales o en tres dimensiones. Una tercera clasificación se da con base a las dimensiones donde se simula el fenómeno, en tanques, los cuales generalmente son construidos para la simulación de oleaje tridimensional y de corrientes, y en canales, los cuales son utilizados para la generación de oleaje en dos dimensiones. En investigación marítima los modelos que se emplean se clasifican en dos grandes grupos, los modelos de demostración, los cuales generalmente son empleados para la explicación de conceptos, y los modelos ingenieriles, que son empleados en la colección de datos para el diseño.

En este trabajo lo que se pretende hacer es caracterizar la rotura del oleaje en medios disipativos, por lo que es parte fundamental y necesaria el realizar una serie de ensayos en laboratorio para sustentar el trabajo. Lo que se decidió hacer para lograr dicha caracterización fue realizar ensayos en los que se utilizaran diferentes pendientes y alturas de ola, así como manejar el caso de talud impermeable y el caso de taludes porosos.

Para el caso de talud impermeable se utilizó una rampa de acrílico, y para el caso de medios porosos se usó grava de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro promedio. A continuación se describen dichos ensayos.

III.1 Descripción del Laboratorio

Los ensayos realizados para este trabajo se hicieron en el recientemente construido canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este laboratorio forma parte del grupo de generadores de oleaje bidimensional, ocupa una superficie total de 290 m^2 , de los cuales, 28.8 m^2 están ocupados por el canal de oleaje, 25.30 m^2 son ocupados por el depósito de agua que se utiliza para llenar dicho canal con capacidad de 25.30 m^3 aproximadamente. Además en el laboratorio también se cuenta con una cabina de monitoreo donde se controla la generación de oleaje y la recolección de los datos.



Figura III.1 Canal de Oleaje del Instituto de Ingeniería

III.1.1 Características del Canal de oleaje

➤ **Dimensiones:**

- ✓ Longitud: 37 m.
- ✓ Ancho: 0.80m.
- ✓ Altura: 1.20m

➤ **Materiales de construcción:**

- Fondo: lámina de acero inoxidable.
- Pared frontal: es de vidrio templado de 2 cm de espesor, lo que permite una completa visualización del fenómeno.
- Pared opuesta: es de lámina de acero inoxidable, excepto una parte que es de vidrio cerca de la parte final del canal.
- Sistema de absorción: el generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción dinámica, único en su tipo en Latino América.
- Soporte: el canal es soportado por una estructura de acero, a una altura de 0.80m sobre el nivel del piso.

III.1.2. Especificaciones del generador de oleaje

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

III.1.3. Equipo de medición

- 12 sensores de nivel
- 8 sensores de presión
- 4 micromolinetes con sus respectivas interfaces.
- Velocímetro Acústico Doppler (ADV)
- Se cuenta con dos equipos de cómputo, para la generación de la señal (oleaje) y adquisición de datos.

III.2 Descripción del Modelo

Para poder realizar las pendientes del talud ya mencionadas anteriormente, se dispuso de una rampa hecha de una placa de acrílico de $\frac{1}{4}$ de pulgada de espesor atornillada a una estructura de aluminio que servía de soporte. Esta rampa estaba articulada en su apoyo con la base por medio de tonillos y tuercas para así poder darle la pendiente que se necesitara, la base estaba hecha también de aluminio.

En la parte de la rampa en donde se tiene la articulación de la base y la placa de acrílico existía un pequeño escalón que podría causar problemas en la forma de las olas generadas. Para evitar ese problema y poder darle continuidad a las pendientes propuestas, se decidió elaborar varios juegos de pequeñas patas de acrílico, que le dieran la pendiente deseada a una placa de acrílico independiente a la rampa. También, se fijó con tornillos y tuercas una cadena de acero a la placa independiente para que ésta le diera peso a la placa y las olas no la movieran del lugar donde iba a ser colocada. Obviamente ésta rampa independiente debía ser cortada y modificada para cada pendiente que se ensayaba. Adicionalmente, para algunas pendientes, se tuvo que agregar una pequeña porción de grava muy fina para que la pendiente de la rampa llegara hasta el suelo. En la Figura III.2 se muestra dicha rampa.



Figura III.2 Rampa de acrílico utilizada

Ya estando la rampa armada y dentro del canal, con la ayuda de una grúa mecánica se detenía la rampa a la pendiente que se deseaba y se ponían por debajo de la placa de acrílico costales de arena, plomos y rocas, de tal manera que sirvieran de soporte para la rampa. También se tuvo que colocar tensores, los cuales se amarraban de la estructura que soportaba la placa de acrílico a la base, esto con el fin de evitar que el movimiento de las olas hiciera un efecto de succión en la placa de acrílico. Para los casos de taludes impermeables se utilizó la rampa descrita en los párrafos anteriores. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura III.3.



Figura III.3 Posición final de la rampa para el caso impermeable de talud 1:8

En el caso de taludes con diferente espesor de medio poroso se utilizó como base la rampa que se usaba para el caso impermeable. Lo único que se hacía era colocar los sacos de grava encima de la rampa, dándole el espesor requerido por el experimento. En la Figura III.4 se muestra un ejemplo de lo dicho.



Figura III.4 Rampa con medio poroso de dos pulgadas

Cabe mencionar que la grava utilizada para llenar los sacos con los que se simulaba el medio poroso, paso por un proceso de cribado. Se cribó la grava con una mesa cribadora que nos fue

prestada por le laboratorio de mecánica de rocas del Instituto de Ingeniería. Se hizo pasar la grava por la malla de $\frac{3}{4}$ de pulgada, con lo que se obtuvo un diámetro promedio de 1 pulgada.

En las dos pendientes más inclinadas (1:2 y 1:1.5) se tuvo problemas con las estabilidad de los sacos de grava, las olas ya de una altura considerable empezaban a mover los sacos de grava, a tal grado que el modelo se desarmaba completamente. Para evitar este problema se decidió amarrar en forma similar a la de paquete los sacos de grava, de tal manera que estuvieran lo mas compacto posible. Además, se sujetaron a una cadena que pasaba por debajo de ellos y que estaba asegurada a la grúa que sostenía a la rampa.



Figura III.5 Forma y posición de los sacos de grava para las pendientes más inclinadas

Con la intención de tener el perfil de la onda bien definido, se decidió colocar un arreglo de 11 sensores de nivel y 8 de presión a largo del modelo. Un sensor fue colocado a unos 10 metros de la pala para que funcionara como testigo, tres más fueron dispuestos al pie de la rampa con la intención de que se utilizarán después para la separación de la onda incidente y reflejada, y por último los 7 restantes se distribuían de manera equitativa a lo largo de la rampa para así lograr una buena definición del perfil de la onda en la rompiente. Obviamente el arreglo de los sensores dependía del acomodo de la rampa, pero siempre se llevó un registro de sus diferentes posiciones, tanto de la rampa como de los sensores.

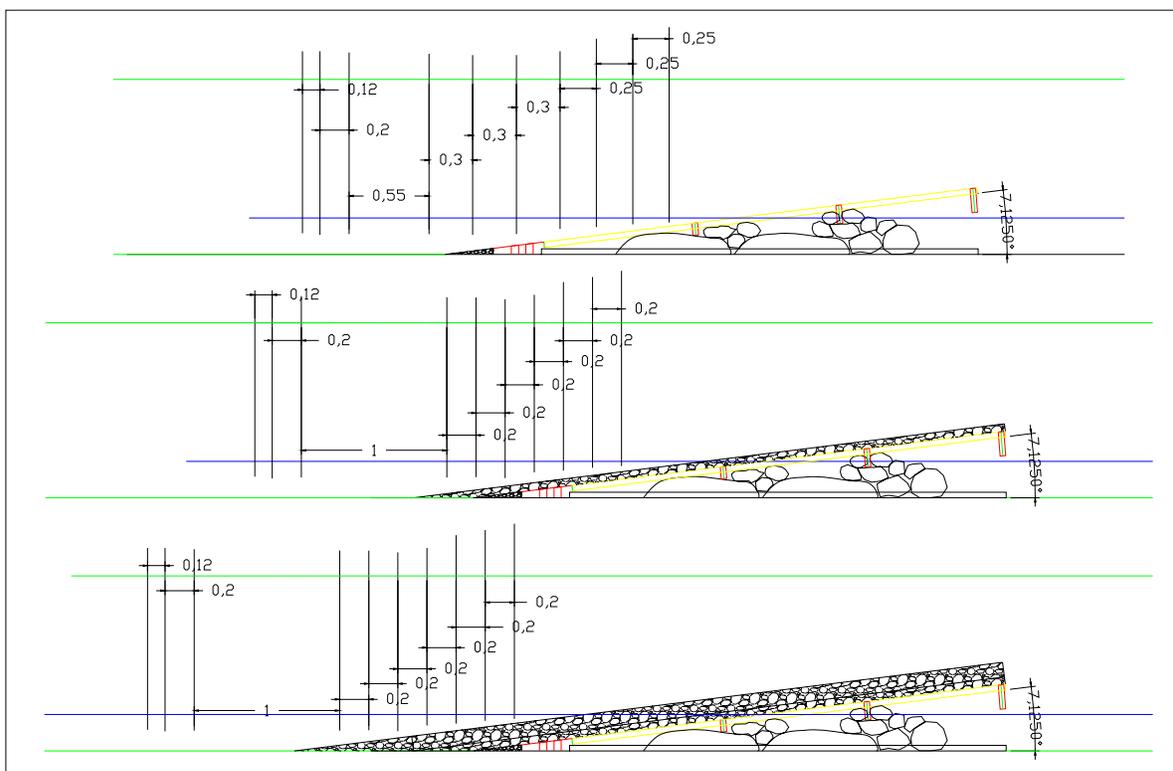


Figura III.6 Esquema del arreglo de la rampa y sensores para el talud 1:8

III.3 Ensayos

III.3.1 Elección de los ensayos

Para la elección de los ensayos que se decido realizar, primeramente definimos que lo que se quería realizar era abarcar los diferentes rangos que se dan del número de Iribarren para los cuatro tipos de rompiente que se tienen es decir:

Descrestamiento	$Ir < 1.0$
Voluta	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilación	$3.1 < Ir < 4.0$
No existe rotura	$Ir > 4.0$

Definiendo el número de Iribarren como:

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

donde: $\tan \beta$: pendiente del fondo
 H_0 : Altura de la ola
 L_0 : Longitud de la onda en aguas profundas

También se tuvo que definir que pendientes se iban a utilizar, para lo cual se decidió tomar las que ingenierilmente se usan con más frecuencia las cuales son: 1:8, 1:5, 1:3, 1:2 y 1:1.5. Igualmente se acotó el rango de periodos de ola que íbamos a utilizar, y lo que determinó dicho rango fue la capacidad del generador de oleaje del canal de olas del instituto de ingeniería, el cual es $0.7 < T < 3$. Teniendo estos parámetros definidos, ahora lo que se tenía que definir eran las profundidades de agua que se iban utilizar para cada ensayo. Para este caso lo que se restringió fue la pendiente de la rampa y obviamente la profundidad máxima que es factible de usarse en el canal de oleaje (prof. = 0.9 m.), por lo cual y atendiendo a la fórmula del número de Iribarren se observa que la profundidad no influye en el valor de este, por lo tanto sólo se centró la atención en la profundidad de agua que era adecuada según la pendiente de la rampa a utilizar. Sabiendo que la profundidad de agua debía ir de los 0.20 m a 0.70 m, se llegó a que las profundidades eran de: 0.25 m para la pendiente de 1:8, 0.45 m para la de 1:5 y para el resto de las pendientes 0.60m.

Una vez definida la profundidad para cada experimento se delimitaron las alturas de ola, para lo cual, justamente, la misma profundidad en cada pendiente era la que restringía a la altura de ola, ya que no se pueden generar olas que sean mayores a la mitad de la profundidad (éstas rompen en el batidor de oleaje). Por lo tanto para la pendiente de 1:8 (prof. = 0.25 m) dimos alturas de ola de 0.05 m a 0.12 m, para la pendiente de 1:5 (prof. = 0.45 m) de 0.05 m a 0.22 m y finalmente para el resto de las pendientes (prof. = 0.60 m) de 0.05 a 0.30 m.

Teniendo ya todo lo anterior definido se pudo entonces hacer el calculo del número de Iribarren. Hecho esto se seleccionaron los ensayos por pendiente que finalmente se realizarían teniendo

como base el cubrir los rangos del número de Iribarren antes mencionado y cuidando que estos no se repitieran o quedaran demasiado juntos.

En la Tabla III.1 se muestran los ensayos a los que se llegó después de haber realizado el proceso de selección, los cuales, evidentemente se realizarían para el talud impermeable y para los taludes porosos de 2 y 6 pulgadas de espesor.

Tabla III.1 Ensayos Iniciales

Talud 1:8 h=0.25 m	T (s)	FREC. (1/s)	h (m)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
	0.7	1.42857143	0.25	0.125	7.125016349	0.05	0.765041896	0.488953569
	0.7	1.42857143	0.25	0.125	7.125016349	0.1	0.765041896	0.345742384
	1	1	0.25	0.125	7.125016349	0.05	1.561309992	0.698505098
	1.2	0.83333333	0.25	0.125	7.125016349	0.1	2.248286388	0.59270123
	1.5	0.66666667	0.25	0.125	7.125016349	0.05	3.512947481	1.047757648
	1.5	0.66666667	0.25	0.125	7.125016349	0.1	3.512947481	0.740876538
	1.7	0.58823529	0.25	0.125	7.125016349	0.05	4.512185876	1.187458667
	1.7	0.58823529	0.25	0.125	7.125016349	0.1	4.512185876	0.839660076
	2	0.5	0.25	0.125	7.125016349	0.05	6.245239967	1.397010197
Talud 1:5 h=0.45 m	T (s)	FREC. (1/s)	h (m)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
	0.5	2	0.45	0.2	11.30993247	0.09	0.390327498	0.416507969
	1	1	0.45	0.2	11.30993247	0.15	1.561309992	0.64525137
	1.5	0.66666667	0.45	0.2	11.30993247	0.05	3.512947481	1.676412236
	1.7	0.58823529	0.45	0.2	11.30993247	0.05	4.512185876	1.899933868
	1.7	0.58823529	0.45	0.2	11.30993247	0.08	4.512185876	1.502029606
	2	0.5	0.45	0.2	11.30993247	0.05	6.245239967	2.235216315
	2	0.5	0.45	0.2	11.30993247	0.08	6.245239967	1.767093654
	3	0.33333333	0.45	0.2	11.30993247	0.05	14.05178993	3.352824472
	3	0.33333333	0.45	0.2	11.30993247	0.1	14.05178993	2.37080492
Talud 1:3 h=0.60 m	T (s)	FREC. (1/s)	h (m)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
	0.9	1.11111111	0.6	0.33333	18.43477694	0.15	1.264661093	0.967867377
	0.9	1.11111111	0.6	0.33333	18.43477694	0.16	1.264661093	0.937133558
	1	1	0.6	0.33333	18.43477694	0.1	1.561309992	1.317100673
	1	1	0.6	0.33333	18.43477694	0.14	1.561309992	1.113153238
	1	1	0.6	0.33333	18.43477694	0.2	1.561309992	0.931330818
	1.2	0.83333333	0.6	0.33333	18.43477694	0.15	2.248286388	1.290489836
	1.5	0.66666667	0.6	0.33333	18.43477694	0.05	3.512947481	2.793992453
	1.5	0.66666667	0.6	0.33333	18.43477694	0.1	3.512947481	1.97565101
	1.7	0.58823529	0.6	0.33333	18.43477694	0.05	4.512185876	3.16652478
	1.7	0.58823529	0.6	0.33333	18.43477694	0.08	4.512185876	2.503357643
	2	0.5	0.6	0.33333	18.43477694	0.05	6.245239967	3.725323271
	2	0.5	0.6	0.33333	18.43477694	0.08	6.245239967	2.945126639
	2	0.5	0.6	0.33333	18.43477694	0.1	6.245239967	2.634201347
Talud 1:2 h=0.60 m	T (s)	FREC. (1/s)	h (m)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
	1.2	0.83333333	0.6	0.5	26.56505118	0.14	2.248286388	2.003695866
	1.5	0.66666667	0.6	0.5	26.56505118	0.05	3.512947481	4.19103059
	1.7	0.58823529	0.6	0.5	26.56505118	0.05	4.512185876	4.749834669
	1.7	0.58823529	0.6	0.5	26.56505118	0.12	4.512185876	3.066005095
	2	0.5	0.6	0.5	26.56505118	0.05	6.245239967	5.588040787

	2	0.5	0.6	0.5	26.56505118	0.08	6.245239967	4.417734136
	2	0.5	0.6	0.5	26.56505118	0.1	6.245239967	3.951341534
	2	0.5	0.6	0.5	26.56505118	0.12	6.245239967	3.607064818
	3	0.33333333	0.6	0.5	26.56505118	0.1	14.05178993	5.927012301
	3	0.33333333	0.6	0.5	26.56505118	0.14	14.05178993	5.009239664
Talud 1:1.5	T (s)	FREC. (1/s)	h (m)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
h=0.60 m	1.2	0.83333333	0.6	0.66667	33.69019975	0.06	2.248286388	4.080948393
	1.2	0.83333333	0.6	0.66667	33.69019975	0.08	2.248286388	3.53420498
	1.5	0.66666667	0.6	0.66667	33.69019975	0.06	3.512947481	5.101185491
	1.7	0.58823529	0.6	0.66667	33.69019975	0.06	4.512185876	5.781343557
	2	0.5	0.6	0.66667	33.69019975	0.05	6.245239967	7.450758303
	2	0.5	0.6	0.66667	33.69019975	0.07	6.245239967	6.29704008
	2	0.5	0.6	0.66667	33.69019975	0.1	6.245239967	5.268481721
	3	0.33333333	0.6	0.66667	33.69019975	0.1	14.05178993	7.902722581
	3	0.33333333	0.6	0.66667	33.69019975	0.15	14.05178993	6.452545968

III.3.2 Corrección de los ensayos

Como en todo trabajo de laboratorio, lo planeado en el escritorio no siempre es realizable. Este caso no fue la excepción, ya que en algunos momentos las alturas de ola y períodos propuestos no eran realizables. En algunos casos se presentaban olas transversales que deformaban toda la ola, en otros casos se presentó una onda estacionaria, y en otros el hecho de que las olas rompían cerca de la pala que las generaba eran motivo suficiente para tratar de sustituir dichos ensayos con otros que tuvieran un mejor comportamiento.

El procedimiento para hacer esta corrección cuando era requerida era: proponer otra altura de ola y período, tratando de respetar en lo más posible, el número de Iribarren que se tenía para no afectar todo el experimento. Incluso en la pendiente 1:2 se trató de utilizar una profundidad de 70 cm para ver si eso ayudaba a eliminar los problemas de ondas estacionarias, pero no fue así, por lo que solo para el caso de talud impermeable de la pendiente 1:2 se utilizó dicha profundidad. Por este hecho, la tabla inicial se modificó y los ensayos finales, para cada talud y espesor de medio poroso, quedaron de la siguiente forma:

Tabla III.2 Ensayos definitivos para el talud 1:8

talud 1:8	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	Ir
h=0.25	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.05	0.765041896	0.488953569
e=0	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.08	0.765041896	0.386551737
	1	1	0.125	7.125016349	0.05	1.561309992	0.698505098
	1.2	0.83333333	0.125	7.125016349	0.05	2.248286388	0.838206118
	1	1	0.125	7.125016349	0.08	1.561309992	0.552216767
	1.5	0.66666667	0.125	7.125016349	0.05	3.512947481	1.047757648
	1.2	0.83333333	0.125	7.125016349	0.06	2.248286388	0.765173998

h=0.25	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=2	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.05	0.765041896	0.488953569
	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.08	0.765041896	0.386551737
	1	1	0.125	7.125016349	0.05	1.561309992	0.698505098
	1.2	0.833333333	0.125	7.125016349	0.05	2.248286388	0.838206118
	1	1	0.125	7.125016349	0.08	1.561309992	0.552216767
	1.5	0.666666667	0.125	7.125016349	0.05	3.512947481	1.047757648
	1.2	0.833333333	0.125	7.125016349	0.06	2.248286388	0.765173998

h=0.25	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=6	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.05	0.765041896	0.488953569
	0.7	1.42857143	0.125	7.125016349	0.08	0.765041896	0.386551737
	1	1	0.125	7.125016349	0.05	1.561309992	0.698505098
	1.2	0.833333333	0.125	7.125016349	0.05	2.248286388	0.838206118
	1	1	0.125	7.125016349	0.08	1.561309992	0.552216767
	1.5	0.666666667	0.125	7.125016349	0.05	3.512947481	1.047757648
	1.2	0.833333333	0.125	7.125016349	0.06	2.248286388	0.765173998

Tabla III.3 Ensayos definitivos para el talud 1:5

talud 1:5	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
h=0.40	1	1	0.2	11.30993247	0.15	1.561309992	0.64525137
e=0	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.05	3.512947481	1.676412236
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.07	3.512947481	1.416826934
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.1	3.512947481	1.18540246
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.05	4.512185876	1.899933868
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.06	4.512185876	1.734394395
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.08	4.512185876	1.502029606

h=0.40	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=2	1	1	0.2	11.30993247	0.15	1.561309992	0.64525137
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.05	3.512947481	1.676412236
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.07	3.512947481	1.416826934
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.1	3.512947481	1.18540246
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.05	4.512185876	1.899933868
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.06	4.512185876	1.734394395
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.08	4.512185876	1.502029606

h=0.40	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=6	1	1	0.2	11.30993247	0.15	1.561309992	0.64525137
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.05	3.512947481	1.676412236
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.07	3.512947481	1.416826934
	1.5	0.666666667	0.2	11.30993247	0.1	3.512947481	1.18540246
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.05	4.512185876	1.899933868
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.06	4.512185876	1.734394395
	1.7	0.58823529	0.2	11.30993247	0.08	4.512185876	1.502029606

Tabla III.4 Ensayos definitivos para el talud 1:3

talud 1:3	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
h=0.60	0.6	1.66666667	0.33333	18.43477694	0.07	0.562071597	0.944541844
e=0	1.05	0.95238095	0.33333	18.43477694	0.14	1.721344266	1.1688109
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.14	2.248286388	1.335783886
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.15	2.248286388	1.290489836
	1.5	0.66666667	0.33333	18.43477694	0.05	3.512947481	2.793992453
	1.69	0.59171598	0.33333	18.43477694	0.13	4.459257467	1.952243566
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.05	4.512185876	3.16652478
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.08	4.512185876	2.503357643
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.05	6.245239967	3.725323271
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.08	6.245239967	2.945126639
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.1	6.245239967	2.634201347
	1	1	0.33333	18.43477694	0.1	1.561309992	1.317100673
	1	1	0.33333	18.43477694	0.14	1.561309992	1.113153238
	1.5	0.66666667	0.33333	18.43477694	0.1	3.512947481	1.97565101
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.08	6.245239967	2.945126639
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.1	6.245239967	2.634201347
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=2	0.6	1.66666667	0.33333	18.43477694	0.07	0.562071597	0.944541844
	1.05	0.95238095	0.33333	18.43477694	0.14	1.721344266	1.1688109
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.14	2.248286388	1.335783886
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.15	2.248286388	1.290489836
	1.5	0.66666667	0.33333	18.43477694	0.05	3.512947481	2.793992453
	1.69	0.59171598	0.33333	18.43477694	0.13	4.459257467	1.952243566
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.05	4.512185876	3.16652478
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.08	4.512185876	2.503357643
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.05	6.245239967	3.725323271
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.08	6.245239967	2.945126639
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.1	6.245239967	2.634201347
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=6	0.6	1.66666667	0.33333	18.43477694	0.07	0.562071597	0.944541844
	1.05	0.95238095	0.33333	18.43477694	0.14	1.721344266	1.1688109
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.14	2.248286388	1.335783886
	1.2	0.83333333	0.33333	18.43477694	0.15	2.248286388	1.290489836
	1.5	0.66666667	0.33333	18.43477694	0.05	3.512947481	2.793992453
	1.69	0.59171598	0.33333	18.43477694	0.13	4.459257467	1.952243566
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.05	4.512185876	3.16652478
	1.7	0.58823529	0.33333	18.43477694	0.08	4.512185876	2.503357643
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.05	6.245239967	3.725323271
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.08	6.245239967	2.945126639
	2	0.5	0.33333	18.43477694	0.1	6.245239967	2.634201347

Tabla III.5 Ensayos definitivos para el talud 1:2

talud 1:2	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
h=0.60	1.1	0.90909091	0.5	26.56505118	0.075	1.88918509	2.509438908
e=0	1.2	0.83333333	0.5	26.56505118	0.14	2.248286388	2.003695866
h=0.70	1.14	0.87719298	0.5	26.56505118	0.11	2.029078465	2.147450108
e=0	1.23	0.81300813	0.5	26.56505118	0.12	2.362105886	2.218344863
	1.5	0.66666667	0.5	26.56505118	0.05	3.512947481	4.19103059
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.05	4.512185876	4.749834669
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.08	4.512185876	3.755074016
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.12	4.512185876	3.066005095
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.05	6.245239967	5.588040787
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.08	6.245239967	4.417734136
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.1	6.245239967	3.951341534
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.12	6.245239967	3.607064818
	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.1	14.05178993	5.927012301
	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.12	14.05178993	5.410597226
	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.14	14.05178993	5.009239664
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=2	1.5	0.66666667	0.5	26.56505118	0.05	3.512947481	4.19103059
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.05	4.512185876	4.749834669
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.08	4.512185876	3.755074016
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.05	6.245239967	5.588040787
	1.5	0.66666667	0.5	26.56505118	0.09	3.512947481	3.123809765
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.08	6.245239967	4.417734136
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.1	6.245239967	3.951341534
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.12	4.512185876	3.066005095
	1.2	0.83333333	0.5	26.56505118	0.14	2.248286388	2.003695866
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.18	4.512185876	2.503382677
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.12	6.245239967	3.607064818
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=6	1.5	0.66666667	0.5	26.56505118	0.05	3.512947481	4.19103059
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.05	4.512185876	4.749834669
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.08	4.512185876	3.755074016
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.05	6.245239967	5.588040787
	1.5	0.66666667	0.5	26.56505118	0.09	3.512947481	3.123809765
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.08	6.245239967	4.417734136
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.1	6.245239967	3.951341534
	1.7	0.58823529	0.5	26.56505118	0.12	4.512185876	3.066005095
	1.2	0.83333333	0.5	26.56505118	0.14	2.248286388	2.003695866
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.12	6.245239967	3.607064818
	2	0.5	0.5	26.56505118	0.18	6.245239967	2.945156091
	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.1	14.05178993	5.927012301

	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.12	14.05178993	5.410597226
	3	0.33333333	0.5	26.56505118	0.14	14.05178993	5.009239664

Tabla III.6 Ensayos definitivos para el talud 1:1.5

talud 1:1.5	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
h=0.60	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.05	6.245239967	7.450758303
e=0	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.06	2.248286388	4.080948393
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.06	3.512947481	5.101185491
	1.7	0.58823529	0.66667	33.69019975	0.06	4.512185876	5.781343557
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.07	6.245239967	6.29704008
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.08	2.248286388	3.53420498
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.1	2.248286388	3.161089032
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.1	3.512947481	3.951361291
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.1	6.245239967	5.268481721
	3	0.33333333	0.66667	33.69019975	0.1	14.05178993	7.902722581
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.11	2.248286388	3.013980134
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.125	6.245239967	4.712273306
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.13	2.248286388	2.772458486
	3	0.33333333	0.66667	33.69019975	0.15	14.05178993	6.452545968
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.16	3.512947481	3.123825384
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=2	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.05	6.245239967	7.450758303
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.06	2.248286388	4.080948393
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.06	3.512947481	5.101185491
	1.7	0.58823529	0.66667	33.69019975	0.06	4.512185876	5.781343557
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.07	6.245239967	6.29704008
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.08	2.248286388	3.53420498
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.1	3.512947481	3.951361291
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.1	6.245239967	5.268481721
	3	0.33333333	0.66667	33.69019975	0.1	14.05178993	7.902722581
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.11	2.248286388	3.013980134
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.125	6.245239967	4.712273306
h=0.60	T (s)	frec (1/s)	tan β	β (°)	H (m)	Lo (m)	lr
e=6	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.05	6.245239967	7.450758303
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.06	2.248286388	4.080948393
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.06	3.512947481	5.101185491
	1.7	0.58823529	0.66667	33.69019975	0.06	4.512185876	5.781343557
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.07	6.245239967	6.29704008
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.08	2.248286388	3.53420498
	1.5	0.66666667	0.66667	33.69019975	0.1	3.512947481	3.951361291
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.1	6.245239967	5.268481721
	3	0.33333333	0.66667	33.69019975	0.1	14.05178993	7.902722581
	1.2	0.83333333	0.66667	33.69019975	0.11	2.248286388	3.013980134
	2	0.5	0.66667	33.69019975	0.125	6.245239967	4.712273306

III.3.3 Realización de los ensayos

Se decidió empezar los ensayos con el talud 1:8 impermeable, después se realizó los casos de medios porosos para la misma pendiente y así sucesivamente para las pendientes restantes.

A manera de resumen el procedimiento al realizar los ensayos era el siguiente:

1. Se armaba el modelo impermeable de la pendiente a ensayar, es decir se colocaba la rampa y los sensores de la manera que se había establecido previamente para el ensayo y se llenaba el canal a la profundidad requerida.
2. Se encendían las computadoras de generación de oleaje y adquisición de datos y se pasaba a calibrar los sensores de nivel y de presión.
3. Hecho esto se mandaba el ensayo correspondiente y se dejaba pasar un tiempo considerable en el que el flujo se estabilizara.
4. Entonces se procedía a poner a tomar datos a la computadora de adquisición, y ésta se dejaba medir un tiempo tal que se midieran 300 olas.
5. Mientras la computadora de adquisición de datos trabajaba, se tomaba el video digital del perfil de la onda en la zona de rompiente.
6. Terminado de grabar, se paraban los programas de generación de oleaje y de adquisición de datos.
7. Entonces se mandaba el siguiente ensayo y se repetían los pasos del 2 al 6 hasta acabar con los ensayos propuestos.
8. Al acabar de hacer los ensayos de talud impermeable, se pasaba a hacer los respectivos ensayos de ese mismo talud pero con los espesores de grava mencionados.
9. Se vaciaba el canal.
10. Se colocaban los sacos de grava y los sensores de presión faltantes sobre la rampa y se seguía el procedimiento desde el paso 2 al 7.
11. Al terminar con las 2 pulgadas de espesor se volvía a vaciar el canal, se colocaban mas sacos de grava para dar el espesor de 6 pulgadas y se seguía el mismo procedimiento que con los dos tipos de talud anteriores.

12. Cuando se terminaba una pendiente de un talud, se pasaba con la siguiente pendiente y se repetía el procedimiento desde el punto 1

Para tener una mejor organización de los experimentos para cada talud se realizó el llenado de una tabla (Tabla III.7).

Tabla III.7 Ejemplo de tabla para la organización de los ensayos

talud 1:8 h=0.25 e=0													
N. exp	FECHA	T	frec	H	lr	ROTURA	DATOS MEDIDOS	FREC DE ADO	ARCH CALIB	TEST	VIDEO	OBSERVACIONES	video perfil
1	13-Mar	0.7	1.42857	0.05	0.4889536	voluta	4608	30	3	6	en cam dig	SENSOR EN RAMPA PA	
2	13-Mar	0.7	1.42857	0.08	0.3865517	voluta	4608	30	3	7	201921	COMNTAR	
3	13-Mar	1	1	0.05	0.6985051	voluta	4608	20	3	8	203242	RESPIRA RAMPA	
4	13-Mar	1.2	0.83333	0.05	0.8382061	voluta	4608	20	3	9	205508		
5	13-Mar	1	1	0.08	0.5522168	voluta	4608	20	3	10	211058		
6	13-Mar	1.5	0.66667	0.05	1.0477576	voluta	4608	20	3	11	212411		
7	13-Mar	1.2	0.83333	0.06	0.765174	voluta	4608	20	3	12	214450		
NO SE CONTINUO CON LOS SIGUIENTES ENSAYOS PORQUE PARA PERIODOS MAYORES, LAS OLAS NO SON LINEALES, ESTOS SERAN SUSTITUIDOS POR ENSAYOS CON lr SEMEJANTE DE SIGUIENTE TALUD													
talud 1:8 h=0.25 e=2"													
N. exp	FECHA	T	frec	H	lr	ROTURA	DATOS MEDIDOS	FREC DE ADO	ARCH CALIB	TEST	VIDEO	OBSERVACIONES	video perfil
8	14-Mar	0.7	1.42857	0.05	0.4889536	descresciamie	4608	30	5	13	192343		no
9	14-Mar	0.7	1.42857	0.08	0.3865517	descresciamie	4608	30	5	14	193227	el video tiene el cero	no
10	14-Mar	1	1	0.05	0.6985051	voluta/colaps	4608	20	5	15	195238		si
11	14-Mar	1	1	0.08	0.5522168	voluta	4608	20	5	17	201347		no
12	14-Mar	1.2	0.83333	0.05	0.8382061	voluta	4608	20	5	18	203208		no
13	14-Mar	1.2	0.83333	0.06	0.765174	voluta	4608	20	5	19	204555		si
14	14-Mar	1.5	0.66667	0.05	1.0477576	voluta	9216	20	5	20	210102	se tomaron datos antes de generar olas para verificar cero en sensores de presión	no
Se tomaron 8 sensores de presion													
talud 1:8 h=0.25 e=6"													
N. exp	FECHA	T	frec	H	lr	ROTURA	DATOS MEDIDOS	FREC DE ADO	ARCH CALIB	TEST	VIDEO	OBSERVACIONES	video perfil
15	15-Mar	0.7	1.42857	0.05	0.4889536	oscilacion	4608	30	6	21	182810	el video tiene el cero	si
16	15-Mar	0.7	1.42857	0.08	0.3865517	oscilacion	4608	30	6	22	184506	oleaje no paralelo, revisar señal	no
17	15-Mar	1	1	0.05	0.6985051	oscilacion	4608	20	6	23	190205		no
18	15-Mar	1	1	0.08	0.5522168	descresciamien	4608	20	6	24	191426	chechar tipo rotura en video	si
19	15-Mar	1.2	0.83333	0.05	0.8382061	descresciamien	4608	20	6	25	192908	chechar tipo rotura en video	si
20	15-Mar	1.2	0.83333	0.06	0.765174	voluta / colaps	4608	20	6	26	194551	chechar tipo rotura en video	si
21	15-Mar	1.5	0.66667	0.05	1.0477576	voluta / colaps	9216	20	6	28	201651	se tomaron datos antes de generar olas para verificar cero en sensores de presión, y chechar tipo rotura	

III.3.4 Procesamiento de los datos

Una vez concluidos los ensayos en el laboratorio y ya con los datos recabados se pasó al procesamiento de los datos adquiridos. Lo primero que se hizo fue introducir los datos de los sensores de nivel y de presión a un programa llamado LEEHRWD21 del grupo de ingeniería de costas y puertos del instituto de ingeniería, el cual arroja dos archivos, uno con las series de

tiempo de cada sensor de nivel, y otro con el análisis estadístico de los datos de cada uno de los canales utilizados, es decir, la H_{med} , $H_{1/2}$, $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $H_{1/100}$ y T_{med} , $T_{1/2}$, $T_{1/3}$, $T_{1/10}$ y $T_{1/100}$. Ejemplos de estos archivos se muestran en la Tabla III.8 y en la Tabla III.9.

Tabla III.8 Fragmento del archivo con la serie de tiempo de los sensores para el ensayo #1

t (s)	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5	canal 6	canal 7	canal 8	canal 9	canal 10	canal 11	P 1	P2	P3	P4
0.033	-	0.0087	0.012	0.013	0.0097	-0.001	0.0172	0.0308	-0.0179	0.0091	0.0128	0.0018	0.013	0.009	0.0018
0.067	0.0158	-0.013	0.0053	0.0192	0.002	0.0069	0.0202	0.0319	-0.0183	0.0009	0.0095	0.0083	0.0135	0.0052	-0.003
0.1	0.0199	0.0163	0.0012	0.0228	-0.005	0.0154	0.0219	0.028	-0.0161	-0.005	0.0043	0.0045	0.0079	0.007	0.0002
0.133	0.0224	0.0186	0.0065	0.0241	0.0108	0.023	0.0226	0.0203	-0.0125	-0.009	0.0046	0.0017	0.0101	0.0078	0.0053
0.167	0.0234	0.0197	0.0115	0.0225	0.0161	0.0284	0.0217	0.0113	-0.0068	-0.012	0.0171	0.0079	0.0079	0.007	0.0052
0.2	0.0231	0.0185	0.0153	0.0182	0.0199	0.0302	0.0198	0.0017	0.0008	-0.014	0.0291	0.0123	0.0088	0.0075	0.0024
0.233	0.0211	-0.016	0.0179	0.0121	-0.022	0.0281	0.0164	0.0058	0.01	-0.016	0.0309	0.015	0.01	0.0043	0.0011
0.267	0.0181	0.0122	0.0188	0.0056	0.0224	0.0226	0.0116	0.0116	0.0197	-0.018	0.0246	0.0185	0.0106	0.0032	0.0003
0.3	0.0132	0.0071	0.0189	0.0006	0.0214	0.015	0.0054	-0.016	0.0286	-0.02	0.0157	0.0139	0.0041	0.0018	0.0061
0.333	0.0074	0.0012	0.0172	0.0058	0.0187	0.0068	0.0025	0.0194	0.0315	-0.021	0.0069	0.0208	0.0126	0.0029	-0.007
0.367	0.0004	0.0058	0.0144	0.0107	0.0149	0.0009	0.0113	0.0215	0.028	-0.021	0.0001	0.0118	0.0136	0.0055	-0.003
0.4	0.009	0.0126	0.0098	0.0144	0.0098	0.0073	0.0197	0.0228	0.0203	-0.016	0.0045	0.0146	0.0216	0.0137	0.0015
0.433	0.0176	0.0187	0.0044	0.0174	0.0041	0.0131	0.0266	0.0223	0.0109	-0.013	-0.008	0.0096	0.0194	0.0094	0.0043
0.467	0.0246	0.0234	0.0021	0.0188	0.0027	0.0173	0.0294	0.0211	0.0018	-0.007	0.0107	0.0082	0.0207	0.0072	0.0032
0.5	0.0287	0.0252	0.0082	-0.019	0.0092	0.0204	0.0278	0.0181	-0.0056	0.0015	0.0129	0.0027	0.017	0.0032	0.0017
0.533	0.0276	0.024	0.0145	0.0176	0.0154	0.0221	0.0222	0.0145	-0.0113	0.0121	0.0144	0.007	0.0142	0.0009	0.0008
0.567	0.0234	0.0199	0.0203	0.0147	0.0204	0.0223	0.0148	0.0086	-0.0154	0.0243	0.0174	0.0026	0.0109	-0.003	0.0035
0.6	0.0169	0.0139	0.0239	0.0101	0.0235	0.0207	0.0069	0.0013	-0.0184	0.0343	0.0144	0.0067	0.013	0.0052	0.0027
0.633	0.0095	0.0068	0.0252	0.0052	0.0234	0.0179	0.0003	0.0072	-0.0203	0.0332	0.0153	0.0017	0.0085	0.0015	0.0026
0.667	0.0016	0.0003	0.0225	0.001	0.0212	0.0139	0.0063	0.016	-0.022	0.0244	0.0165	0.0053	0.0147	0.0104	-0.002
0.7	0.0056	0.0059	0.0181	0.0072	0.0157	0.0089	0.0109	0.0244	-0.0214	0.014	0.0171	0.0064	0.0124	0.0046	0.0006
0.733	0.0116	-0.011	0.0112	0.0134	0.0091	0.0024	0.0147	0.029	-0.023	0.0042	0.0134	0.0096	0.0112	0.0151	0.004
0.767	0.0163	0.0149	0.004	0.0185	0.0017	0.0045	0.0175	0.0292	-0.0208	-0.003	0.0097	0.0073	0.0054	0.0108	0.0006
0.8	0.0204	0.0177	0.0025	0.0221	0.0046	0.0117	0.0191	0.0249	-0.0177	-0.009	0.0022	0.0206	0.0042	0.0093	0.0058
0.833	0.0227	0.0193	-0.008	0.0229	0.0097	0.0183	0.0198	0.0176	-0.0128	-0.013	0.0127	0.0199	0.0044	0.0102	0.004
0.867	0.0239	0.0203	0.0132	0.0213	0.0141	0.0232	0.0192	0.0089	-0.0062	-0.016	0.0331	0.0194	0.0058	0.0085	0.004
0.9	0.0231	0.0187	0.0169	0.0165	0.0174	0.0257	0.0173	0.0008	0.0026	-0.018	0.0343	0.0158	0.0035	0.0035	0.0008
0.933	0.0212	0.0163	0.0189	0.0106	0.0188	0.0255	0.0144	0.0061	0.0128	-0.02	0.0259	0.0186	0.0141	0.0107	0.0035
0.967	0.0178	0.0125	0.0195	0.0038	0.0194	0.0217	0.0106	0.0109	0.0231	-0.021	0.016	0.0193	0.0165	0.0046	0.0073
1	0.0133	0.0069	0.0198	0.0025	0.0186	0.0161	0.0054	0.0147	0.0306	-0.023	0.0068	0.0088	0.0195	0.0116	0.0056
1.033	0.0068	0.0004	0.0175	0.0077	0.0168	0.0093	0.0006	0.0171	0.0317	-0.022	0.0002	0.0141	0.0245	0.0041	0.0032
1.067	0	0.0082	0.0148	0.0122	0.0139	0.0025	0.0079	0.0193	0.0264	-0.019	0.0049	0.0129	0.0251	0.003	0.0006

1.1	0.0085	0.016	-	-	-	-	0.0146	-	0.0179	-0.017	-	0.0017	0.0173	0.0038	0.0035
1.133	0.0171	0.0229	0.0045	0.0184	0.0054	0.0092	0.0205	0.0201	0.009	-0.013	0.0106	0.0015	0.0186	0.0062	0.0049
1.167	0.0246	0.028	0.003	0.0195	0.0002	0.0138	0.0238	-0.019	0.0007	-0.006	0.0125	0.0062	0.0168	0.003	0.0061
1.2	0.0283	0.0289	0.0099	0.0194	0.0066	0.0168	0.0237	0.0168	-0.0059	0.0031	0.0143	0.005	0.0142	0.0107	0.002
1.233	0.0284	0.0265	0.0174	0.0176	0.0127	0.0191	0.0205	0.0135	-0.0106	0.0154	0.0156	0.013	0.0077	0.0116	-0.007
1.267	0.024	0.0201	0.0237	0.0149	0.0182	0.0195	0.0152	0.0087	-0.0144	0.0286	0.0181	0.007	0.0091	0.0139	0.0005
1.3	0.0174	0.0118	0.0276	0.0103	0.0221	0.0192	0.0083	0.0027	-0.0174	0.0361	0.0152	0.0105	0.0139	0.0078	0.0065
1.333	0.0093	0.0027	0.0277	0.0049	0.023	0.0169	0.0019	0.0049	-0.0193	0.0313	0.0196	0.0008	0.0092	0.0105	0.0014
1.367	0.0017	0.0047	0.024	0.0019	0.0214	0.0143	0.0039	0.0124	-0.0203	0.0215	0.0186	0.0071	0.0101	0.0152	0.0009
1.4	0.0056	0.0111	0.0175	0.0089	0.0171	0.0103	0.0083	0.0198	-0.0207	0.0108	0.0181	0.013	0.0129	0.0132	0.0026
1.433	0.0117	0.0158	0.0095	0.0158	0.0109	0.0047	0.0122	0.0248	-0.0201	0.0016	-0.016	0.0177	0.0097	0.0126	0.0003
1.467	0.0164	0.0199	0.001	0.0213	0.004	0.0019	0.0145	0.027	-0.0182	-0.005	0.0118	0.0161	0.0139	0.0122	0.0038
1.5	0.0203	-0.022	-0.006	0.0247	-0.003	0.0085	0.0165	0.0249	-0.0154	-0.01	0.0026	0.0174	0.0117	0.0061	0.0003
1.533	0.0229	0.0232	0.0124	0.0246	0.0089	0.0148	0.0174	0.0197	-0.0115	-0.014	0.0192	0.0133	0.0073	0.0015	0.0052
1.567	0.0239	0.0226	0.0172	0.0217	-0.014	0.0199	0.0174	0.0125	-0.006	-0.016	0.035	0.0179	0.0191	0.0026	0.0015
1.6	0.0235	0.0208	0.0213	0.0157	0.0177	0.0231	0.0158	0.0054	0.0009	-0.018	0.0314	0.0171	0.0213	0.0023	0.0067
1.633	0.0215	0.0169	0.0238	0.0084	0.0202	0.0234	0.0139	0.0017	0.0091	-0.019	0.0225	0.0156	0.0197	0.0091	0.0038
1.667	0.0183	0.0127	0.0244	0.0008	-0.021	0.0207	0.0108	0.0066	0.0173	-0.02	0.0131	0.0171	0.0224	0.0043	0.0012

Tabla III.9 Fragmento y resumen del archivo estadístico del canal #1 del ensayo #1

CANAL 1		
No.	H (m)	T (s)
1	0.0627	0.7
2	0.0608	0.7
3	0.0603	0.7
4	0.0603	0.733
5	0.0599	0.7
6	0.0587	0.7
7	0.0586	0.7
8	0.0583	0.7
9	0.0581	0.733
10	0.0581	0.667
11	0.058	0.733
12	0.0578	0.7
13	0.0578	0.7
14	0.0578	0.7
15	0.0575	0.7
16	0.0571	0.733
17	0.057	0.7
18	0.0567	0.7
19	0.0567	0.7

20	0.0566	0.7
21	0.0564	0.7
22	0.0561	0.7
23	0.056	0.7
24	0.056	0.7
25	0.056	0.7
26	0.0559	0.7
27	0.0559	0.7
28	0.0559	0.7
29	0.0558	0.7
30	0.0558	0.7
31	0.0558	0.733
32	0.0557	0.7
33	0.0556	0.7
34	0.0556	0.7
35	0.0556	0.7
36	0.0554	0.7
37	0.0553	0.733
38	0.0551	0.7
39	0.0551	0.7
40	0.055	0.733
41	0.0549	0.733
42	0.0548	0.7
43	0.0547	0.667
44	0.0547	0.7
45	0.0547	0.7
46	0.0546	0.667
47	0.0546	0.667
48	0.0545	0.7
49	0.0545	0.7
50	0.0544	0.7

HMED	H1/2	H1/3	H1/10	H1/100
0.0508	0.0548	0.0558	0.0583	0.0617

TMED	T1/2	T1/3	T1/10	T1/100
0.7002	0.7018	0.7023	0.7047	0.7

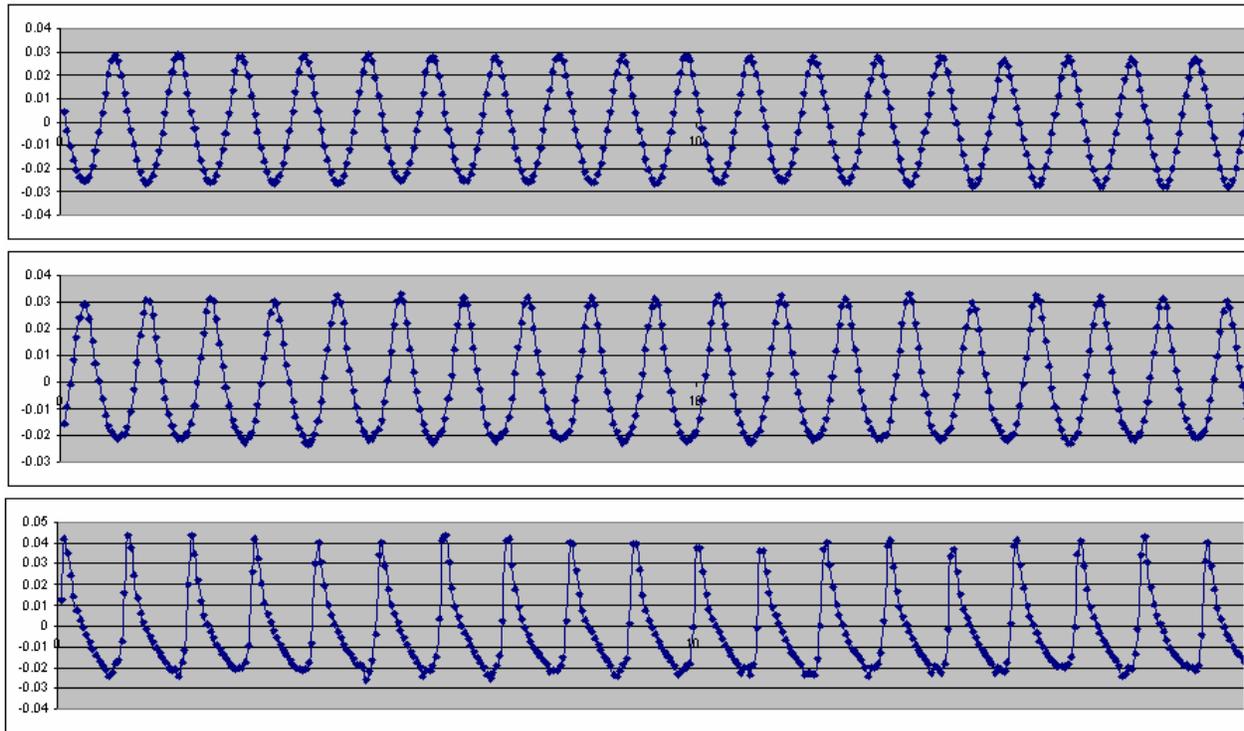


Figura III.7 Ejemplo de señales elaboradas con el archivo de serie de tiempo de los sensores, ensayo #3

Con el archivo de serie de tiempo de cada sensor (Tabla III.8), se pudo realizar la graficación de las señales adquiridas para cada sensor y para cada experimento, lo cual fue de mucha ayuda para la determinación de si los ensayos realizados estaban en condiciones de ser utilizados (Figura III.7). Hecho esto se procedió a la separación de la ola incidente y la reflejada, para lo cual también se recurrió a un programa elaborado por el grupo de ingeniería de costas y puertos, llamado REFMA. Para esto, de cada archivo con la serie de tiempo de los sensores (Tabla III.8) se necesitaba solo tomar las columnas correspondientes a el tiempo y a los canales 2, 3 y 4, que eran los que se habían dispuesto en el arreglo de sensores para la separación de la onda incidente y reflejada. El programa arroja 4 archivos de salida de los cuales 2 son los que se utilizaban para de uno leer el valor de la altura de ola incidente, y del otro tomar el valor del coeficiente de reflexión.

Tabla III.10 Archivos de salida donde se leen los datos de interés (ensayo #17)

H_RMSi=	0.03391757
H_RMSr=	0.00923058
CRF=	0.07044256
CRC=	0.2721473
CRT=	0.2721473
CRBF=	0.9669618
CRAF=	0.8962783

en metros

Mo_inc	cm2	Mo_ref	cm2	Mo_tot	cm2		
0.0001438		1.06504E-05		0.000154451			
Cr	EN	EL	PICO	%	Mo_ref	%	Mo_inc
0.07044256					0.000231741		0.04670174
Cr	c/COHE	>		0.75 %	Mo_ref	%	Mo_inc
0.2721473					6.895694		93.1043
Cr	TOTAL	%	Mo_ref	%	Mo_inc		
0.2721473			6.895694		93.1043		
Cr	EN	f<0.2	Hertz	%	Mo_ref	%	Mo_inc
0.9669618					13.60665		14.55233
Cr	EN	f>0.2	Hertz	%	Mo_ref	%	Mo_inc
0.8962783					1703.47		2120.551

Teniendo ya las alturas de ola incidentes se procedió al cálculo de los nuevos números de Iribarren. Después se realizó la estimación de las alturas de ola rompientes y de sus respectivas profundidades. Para esto se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se observaba en el video digital correspondiente en que sensor estaba rompiendo la ola
2. Sabiendo en que sensor rompía, se abría el archivo estadístico (Tabla III.9) correspondiente para leer el dato de $H_{1/100}$, el cual corresponde a la altura máxima de rompiente, del canal en el que se había conectado dicho sensor.
3. Conocida la altura de ola rompiente, también podíamos conocer de una manera muy fácil la profundidad a la cuál se presentaba dicha ola (ver Figura III.8). Cabe mencionar que para la profundidad de rompiente en los taludes porosos se utilizó la profundidad de rompiente significativa (ver apartado II.2.3)

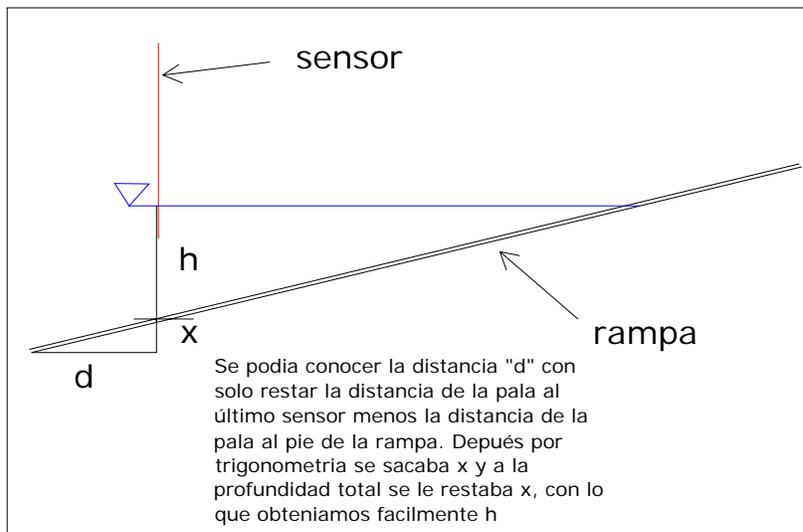


Figura III.8 Profundidad de rompiente

Luego de hacer esto, se calcularon las alturas de ola rompiente con los criterios de McCowan (eq. 2.3), Munk (eq. 2.4), Miche (eq. 2.5), Goda (eq. 2.6), Weggel (eq. 2.10), Komar (eq. 2.11), Le Méhauté (eq. 2.13) y Horikawa (eq. 2.14).

III.4 Resultados

III.4.1 Tipo de Rotura

Para clasificar el tipo de rotura teórica se utilizó el ya mencionado número de Iribarren con los rangos de valores dados en la Tabla II.2, y para la rotura real se realizó la clasificación a simple vista. Cabe mencionar aquí que el valor del número de Iribarren que se tomó fue el que se calculó con la altura de ola incidente, es decir, H_i .

Tabla III.11 Resultados del tipo de rotura del talud 1;8

Talud 1:8	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	H_i (m)	L_o (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
h=0.25	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.05	0.0346	0.765	0.489	0.58788	descretamiento	voluta
e=0	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.08	0.03	0.765	0.3866	0.63113	descretamiento	voluta
	1	1	0.125	7.125	0.05	0.0415	1.5613	0.6985	0.76691	descretamiento	voluta
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.05	0.0461	2.2483	0.8382	0.87315	descretamiento	voluta
	1	1	0.125	7.125	0.08	0.0645	1.5613	0.5522	0.61494	descretamiento	voluta
	1.5	0.66667	0.125	7.125	0.05	0.0583	3.5129	1.0478	0.97064	descretamiento	voluta
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.06	0.0542	2.2483	0.7652	0.80476	descretamiento	voluta
h=0.25	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	H_i (m)	L_o (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=2	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.05	0.0368	0.765	0.489	0.57016	descretamiento	descretamiento
	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.08	0.0406	0.765	0.3866	0.54279	descretamiento	descretamiento
	1	1	0.125	7.125	0.05	0.041	1.5613	0.6985	0.77144	descretamiento	descretamiento
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.05	0.0664	2.2483	0.8382	0.7271	descretamiento	voluta
	1	1	0.125	7.125	0.08	0.0469	1.5613	0.5522	0.72109	descretamiento	voluta
	1.5	0.66667	0.125	7.125	0.05	0.0567	3.5129	1.0478	0.98365	descretamiento	voluta
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.06	0.0461	2.2483	0.7652	0.87272	descretamiento	voluta
h=0.25	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	H_i (m)	L_o (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=6	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.05	0.0345	0.765	0.489	0.58879	descretamiento	oscilación
	0.7	1.42857	0.125	7.125	0.08	0.0339	0.765	0.3866	0.59366	descretamiento	oscilación
	1	1	0.125	7.125	0.05	0.0407	1.5613	0.6985	0.77395	descretamiento	oscilación
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.05	0.0665	2.2483	0.8382	0.72702	descretamiento	descretamiento
	1	1	0.125	7.125	0.08	0.0468	1.5613	0.5522	0.72199	descretamiento	oscilación
	1.5	0.66667	0.125	7.125	0.05	0.0562	3.5129	1.0478	0.9879	descretamiento	voluta
	1.2	0.83333	0.125	7.125	0.06	0.042	2.2483	0.7652	0.91404	descretamiento	voluta

Tabla III.12 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:5

Talud 1:5	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
h=0.40	1	1	0.2	11.31	0.15	0.0879	1.5613	0.6453	0.84267	descretamiento	voluta
e=0	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.05	0.0429	3.5129	1.6764	1.81064	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.07	0.0585	3.5129	1.4168	1.54965	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.1	0.0813	3.5129	1.1854	1.31469	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.05	0.0421	4.5122	1.8999	2.07112	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.06	0.0528	4.5122	1.7344	1.84968	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.08	0.0746	4.5122	1.502	1.55578	voluta	voluta

h=0.40	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
e=2	1	1	0.2	11.31	0.15	0.0818	1.5613	0.6453	0.87366	descretamiento	voluta
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.05	0.0417	3.5129	1.6764	1.83488	voluta	oscilación
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.07	0.059	3.5129	1.4168	1.54293	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.1	0.0856	3.5129	1.1854	1.28098	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.05	0.0443	4.5122	1.8999	2.01802	voluta	oscilación
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.06	0.0535	4.5122	1.7344	1.83688	voluta	oscilación
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.08	0.0602	4.5122	1.502	1.73102	voluta	voluta

h=0.40	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	Rotura real
e=6	1	1	0.2	11.31	0.15	0.1037	1.5613	0.6453	0.77587	descretamiento	descretamiento
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.05	0.0416	3.5129	1.6764	1.83685	voluta	oscilación
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.07	0.0588	3.5129	1.4168	1.5462	voluta	oscilación
	1.5	0.66667	0.2	11.31	0.1	0.0862	3.5129	1.1854	1.27656	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.05	0.0433	4.5122	1.8999	2.0419	voluta	oscilación
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.06	0.0525	4.5122	1.7344	1.85449	voluta	oscilación
	1.7	0.58824	0.2	11.31	0.08	0.0709	4.5122	1.502	1.59586	voluta	voluta

Tabla III.13 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:3

Talud 1:3	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
h=0.60	0.6	1.66667	0.3333	18.43	0.07	0.0259	0.5621	0.9445	1.55335	voluta	oscilación
e=0	1.05	0.95238	0.3333	18.43	0.14	0.1054	1.7213	1.1688	1.34708	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.14	0.1017	2.2483	1.3358	1.56704	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.15	0.0994	2.2483	1.2905	1.58496	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.3333	18.43	0.05	0.0291	3.5129	2.794	3.66107	oscilación	oscilación
	1.69	0.59172	0.3333	18.43	0.13	0.0969	4.4593	1.9522	2.26181	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.05	0.0372	4.5122	3.1665	3.67344	oscilación	oscilación
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.08	0.058	4.5122	2.5034	2.93968	colapso	colapso
	2	0.5	0.3333	18.43	0.05	0.0433	6.2452	3.7253	4.00251	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.3333	18.43	0.08	0.0719	6.2452	2.9451	3.10704	oscilación	colapso
	2	0.5	0.3333	18.43	0.1	0.0843	6.2452	2.6342	2.86897	colapso	colapso

1	1	0.3333	18.43	0.1	0.0654	1.5613	1.3171	1.62904	voluta	voluta
1	1	0.3333	18.43	0.14	0.0904	1.5613	1.1132	1.38563	voluta	voluta
1.5	0.66667	0.3333	18.43	0.1	0.0994	3.5129	1.9757	1.9812	voluta	colapso
2	0.5	0.3333	18.43	0.08	0.072	6.2452	2.9451	3.10472	oscilación	colapso

	2	0.5	0.3333	18.43	0.1	0.0903	6.2452	2.6342	2.77133	colapso	colapso
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=2	0.6	1.66667	0.3333	18.43	0.07	0.0271	0.5621	0.9445	1.51824	voluta	no rompe
	1.05	0.95238	0.3333	18.43	0.14	0.1079	1.7213	1.1688	1.33147	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.14	0.1099	2.2483	1.3358	1.50778	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.15	0.1167	2.2483	1.2905	1.46333	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.3333	18.43	0.05	0.0369	3.5129	2.794	3.25199	oscilación	no rompe
	1.69	0.59172	0.3333	18.43	0.13	0.1112	4.4593	1.9522	2.11127	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.05	0.0403	4.5122	3.1665	3.52538	oscilación	no rompe
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.08	0.0657	4.5122	2.5034	2.76173	colapso	oscilación
	2	0.5	0.3333	18.43	0.05	0.0385	6.2452	3.7253	4.24379	no existe	no rompe
	2	0.5	0.3333	18.43	0.08	0.0631	6.2452	2.9451	3.31513	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.3333	18.43	0.1	0.0617	6.2452	2.6342	3.35392	oscilación	oscilación
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=6	0.6	1.66667	0.3333	18.43	0.07	0.0268	0.5621	0.9445	1.52523	voluta	no rompe
	1.05	0.95238	0.3333	18.43	0.14	0.1073	1.7213	1.1688	1.33511	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.14	0.1099	2.2483	1.3358	1.50737	voluta	voluta
	1.2	0.83333	0.3333	18.43	0.15	0.116	2.2483	1.2905	1.46779	voluta	voluta
	1.5	0.66667	0.3333	18.43	0.05	0.0382	3.5129	2.794	3.19616	oscilación	no rompe
	1.69	0.59172	0.3333	18.43	0.13	0.1119	4.4593	1.9522	2.10437	voluta	voluta
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.05	0.0393	4.5122	3.1665	3.57227	oscilación	no rompe
	1.7	0.58824	0.3333	18.43	0.08	0.064	4.5122	2.5034	2.79847	colapso	oscilación
	2	0.5	0.3333	18.43	0.05	0.0386	6.2452	3.7253	4.24164	no existe	no rompe
	2	0.5	0.3333	18.43	0.08	0.0627	6.2452	2.9451	3.32708	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.3333	18.43	0.1	0.0719	6.2452	2.6342	3.10694	oscilación	oscilación

Tabla III.14 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:2

Talud 1:2	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
h=0.60	1.1	0.90909	0.5	26.57	0.075	0.0599	1.8892	2.5094	2.80792	colapso	colapso
e=0	1.2	0.83333	0.5	26.57	0.14	0.1198	2.2483	2.0037	2.16592	voluta	colapso
h=0.70	1.14	0.87719	0.5	26.57	0.11	0.0948	2.0291	2.1475	2.31354	voluta	colapso
e=0	1.23	0.81301	0.5	26.57	0.12	0.0987	2.3621	2.2183	2.44638	voluta	colapso
	1.5	0.66667	0.5	26.57	0.05	0.0402	3.5129	4.191	4.67638	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.05	0.0544	4.5122	4.7498	4.55256	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.08	0.0878	4.5122	3.7551	3.58528	oscilación	oscilación
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.12	0.12	4.5122	3.066	3.06634	colapso	colapso
	2	0.5	0.5	26.57	0.05	0.0448	6.2452	5.588	5.9063	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.08	0.0712	6.2452	4.4177	4.682	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.1	0.0888	6.2452	3.9513	4.19319	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.12	0.1069	6.2452	3.6071	3.82099	oscilación	oscilación
	3	0.33333	0.5	26.57	0.1	0.0678	14.052	5.927	7.1981	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.5	26.57	0.12	0.0834	14.052	5.4106	6.49206	no existe	no rompe

	3	0.33333	0.5	26.57	0.14	0.1265	14.052	5.0092	5.26962	no existe	no rompe
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
e=2	1.5	0.66667	0.5	26.57	0.05	0.0379	3.5129	4.191	4.81244	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.05	0.0376	4.5122	4.7498	5.47766	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.08	0.0634	4.5122	3.7551	4.21936	no existe	oscilación
	2	0.5	0.5	26.57	0.05	0.0498	6.2452	5.588	5.59927	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.5	26.57	0.09	0.072	3.5129	3.1238	3.49249	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.5	26.57	0.08	0.0825	6.2452	4.4177	4.35106	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.1	0.1048	6.2452	3.9513	3.85942	oscilación	oscilación
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.12	0.0997	4.5122	3.066	3.36357	oscilación	oscilación
	1.2	0.83333	0.5	26.57	0.14	0.1116	2.2483	2.0037	2.24387	voluta	colapso
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.18	0.156	4.5122	2.5034	2.68892	colapso	colapso
	2	0.5	0.5	26.57	0.12	0.1236	6.2452	3.6071	3.55353	oscilación	oscilación
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
e=6	1.5	0.66667	0.5	26.57	0.05	0.0361	3.5129	4.191	4.93212	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.05	0.0392	4.5122	4.7498	5.36103	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.08	0.064	4.5122	3.7551	4.19992	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.05	0.0524	6.2452	5.588	5.46023	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.5	26.57	0.09	0.0678	3.5129	3.1238	3.59825	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.5	26.57	0.08	0.0853	6.2452	4.4177	4.27706	no existe	no rompe
	2	0.5	0.5	26.57	0.1	0.1078	6.2452	3.9513	3.80551	oscilación	oscilación
	1.7	0.58824	0.5	26.57	0.12	0.0983	4.5122	3.066	3.38711	oscilación	oscilación
	1.2	0.83333	0.5	26.57	0.14	0.1128	2.2483	2.0037	2.23193	voluta	colapso
	2	0.5	0.5	26.57	0.12	0.1291	6.2452	3.6071	3.47766	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.5	26.57	0.18	0.1903	6.2452	2.9452	2.86469	colapso	colapso
	3	0.33333	0.5	26.57	0.1	0.1101	14.052	5.927	5.64855	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.5	26.57	0.12	0.1305	14.052	5.4106	5.18821	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.5	26.57	0.14	0.1488	14.052	5.0092	4.85835	no existe	no rompe

Tabla III.15 Resultados del tipo de rotura para el talud 1:1.5

Talud 1:1.5	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr	lr (i)	rotura teórica	rotura real
h=0.60	2	0.5	0.6667	33.69	0.05	0.0772	6.2452	7.4508	5.99443	no existe	no rompe
e=0	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.06	0.0531	2.2483	4.0809	4.33718	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.06	0.0349	3.5129	5.1012	6.68385	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.6667	33.69	0.06	0.0462	4.5122	5.7813	6.58601	no existe	no rompe
	2	0.5	0.6667	33.69	0.07	0.1109	6.2452	6.297	5.00256	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.08	0.0609	2.2483	3.5342	4.05149	no existe	oscilación
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.1	0.0689	2.2483	3.1611	3.80939	oscilación	oscilación
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.1	0.0631	3.5129	3.9514	4.97328	no existe	no rompe
	2	0.5	0.6667	33.69	0.1	0.1534	6.2452	5.2685	4.25385	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.6667	33.69	0.1	0.1111	14.052	7.9027	7.49878	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.11	0.075	2.2483	3.014	3.65108	oscilación	colapso
	2	0.5	0.6667	33.69	0.125	0.1849	6.2452	4.7123	3.87467	oscilación	oscilación

	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.13	0.0915	2.2483	2.7725	3.30387	oscilación	colapso
	3	0.33333	0.6667	33.69	0.15	0.1635	14.052	6.4525	6.17972	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.16	0.1619	3.5129	3.1238	3.10553	oscilación	colapso
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=2	2	0.5	0.6667	33.69	0.05	0.0616	6.2452	7.4508	6.71429	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.06	0.0471	2.2483	4.0809	4.60721	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.06	0.042	3.5129	5.1012	6.09977	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.6667	33.69	0.06	0.0503	4.5122	5.7813	6.31456	no existe	no rompe
	2	0.5	0.6667	33.69	0.07	0.0869	6.2452	6.297	5.65258	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.08	0.0654	2.2483	3.5342	3.90986	oscilación	oscilación
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.1	0.0723	3.5129	3.9514	4.64855	no existe	oscilación
	2	0.5	0.6667	33.69	0.1	0.1266	6.2452	5.2685	4.68163	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.6667	33.69	0.1	0.1003	14.052	7.9027	7.8922	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.11	0.0894	2.2483	3.014	3.34383	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.6667	33.69	0.125	0.1587	6.2452	4.7123	4.18253	no existe	no rompe
h=0.60	T (s)	frec (hz)	tan β	β	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir	Ir (i)	rotura teórica	rotura real
e=6	2	0.5	0.6667	33.69	0.05	0.0552	6.2452	7.4508	7.08972	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.06	0.0442	2.2483	4.0809	4.75678	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.06	0.0451	3.5129	5.1012	5.88384	no existe	no rompe
	1.7	0.58824	0.6667	33.69	0.06	0.0554	4.5122	5.7813	6.01404	no existe	no rompe
	2	0.5	0.6667	33.69	0.07	0.0797	6.2452	6.297	5.90138	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.08	0.0608	2.2483	3.5342	4.05284	no existe	no rompe
	1.5	0.66667	0.6667	33.69	0.1	0.0762	3.5129	3.9514	4.52786	no existe	oscilación
	2	0.5	0.6667	33.69	0.1	0.1163	6.2452	5.2685	4.8862	no existe	no rompe
	3	0.33333	0.6667	33.69	0.1	0.0919	14.052	7.9027	8.24401	no existe	no rompe
	1.2	0.83333	0.6667	33.69	0.11	0.0894	2.2483	3.014	3.34371	oscilación	oscilación
	2	0.5	0.6667	33.69	0.125	0.1451	6.2452	4.7123	4.37446	no existe	no rompe

III.4.2 Coeficiente de reflexión

En este apartado se presentan ahora los coeficientes de reflexión arrojados por el programa REFMA, para los casos de talud impermeable y porosos, y se grafican los números de Iribarren recalculados con las alturas de ola incidentes ($I_r(i)$) contra el coeficiente de reflexión correspondiente. Cabe aclarar aquí que para algunos casos en los que la señal no tenía una forma adecuada, no se tomó en cuenta el valor del coeficiente de reflexión ya que obviamente al estar la señal mal, el coeficiente de reflexión de igual manera tomaba un valor erróneo. También se eliminaron valores aislados que se disparaban demasiados de los valores que se tenían.

Tabla III.16 Coeficientes de Reflexión talud impermeable

Talud impermeable		
No.	Ir (i)	Cr
1	0.58788	0.14217
2	0.63113	0.20845
3	0.76691	0.27482
4	0.87315	0.25765
5	0.61494	0.18023
6	0.84267	0.08308
7	1.81064	0.24653
8	1.54965	0.15672
9	1.31469	0.09509
10	1.84968	0.29861
11	1.55578	0.12247
12	1.34708	0.12455
13	1.56704	0.11449
14	1.58496	0.11496
15	3.67344	0.92664
16	2.93968	0.59283
17	1.9812	0.41146
18	2.77133	0.52701
19	2.80792	0.51904
20	2.16592	0.17052
21	2.31354	0.33096
22	2.44638	0.30034
23	4.67638	0.76872
24	3.58528	0.90705
25	3.06634	0.51336
26	4.682	0.94709
27	4.19319	0.84169
28	3.82099	0.85203
29	6.49206	0.75052
30	5.26962	0.93115
31	5.99443	0.89396
32	4.33718	0.82342
33	6.58601	0.92098
34	5.00256	0.94319
35	3.80939	0.82061
36	4.97328	0.73939
37	4.25385	0.78031
38	7.49878	0.92286
39	3.30387	0.56565
40	3.10553	0.57036

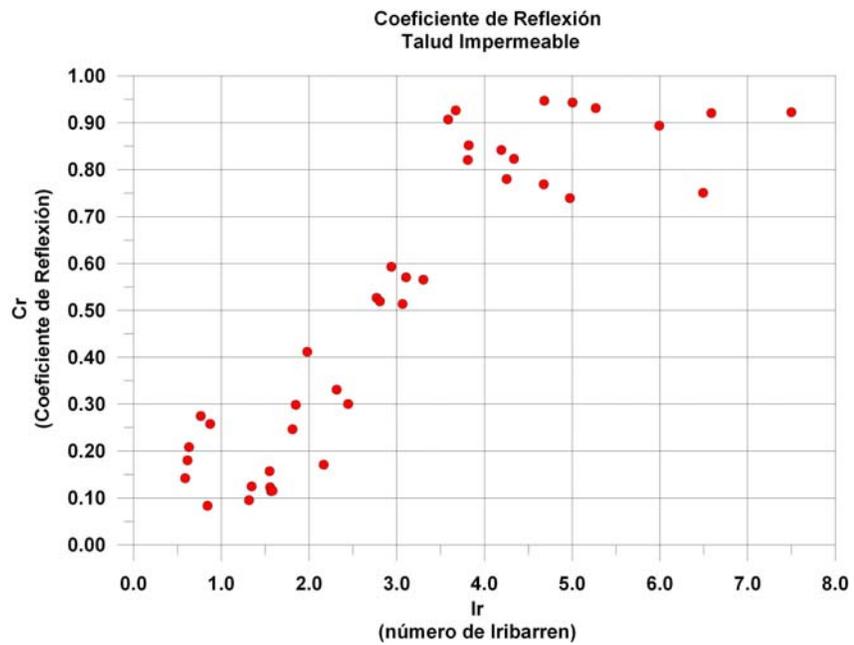


Figura III.9 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud impermeable)

Tabla III.17 Coeficientes de Reflexión talud poroso e=2''

Talud poroso e=2''		
No.	Ir (i)	Cr
1	0.57016	0.14109
2	0.77144	0.12598
3	0.7271	0.12021
4	0.72109	0.14752
5	0.98365	0.19471
6	1.83488	0.27658
7	1.28098	0.20249
8	2.01802	0.11495
9	1.83688	0.15888
10	1.73102	0.24315
11	1.50778	0.10764
12	1.46333	0.106
13	2.76173	0.24709
14	3.31513	0.33008
15	3.35392	0.32312
16	5.59927	0.55724
17	3.49249	0.33841
18	4.35106	0.37026
19	3.85942	0.56429
20	3.36357	0.45042
21	2.24387	0.11346
22	2.68892	0.28434
23	6.71429	0.53371
24	5.65258	0.46631
25	3.90986	0.30814
26	4.68163	0.40017
27	7.8922	0.44183
28	3.34383	0.38924
29	4.18253	0.44819

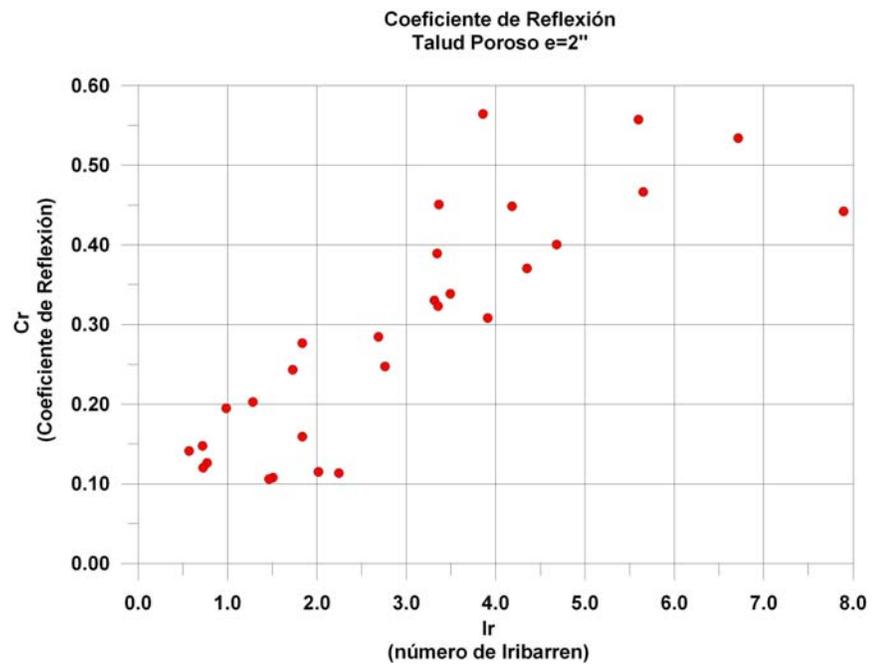


Figura III.10 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud poroso e=2'')

Tabla III.18 Coeficientes de Reflexión talud poroso e=6''

Talud poroso e=6''		
No.	Ir (i)	Cr
1	0.58879	0.1125
2	0.77395	0.13524
3	0.72702	0.13738
4	0.9879	0.13365
5	0.91404	0.26895
6	0.77587	0.1006
7	1.5462	0.22522
8	1.27656	0.20337
9	1.59586	0.25293
10	3.19616	0.33521
11	3.32708	0.29679
12	3.10694	0.31235
13	4.93212	0.30695
14	5.36103	0.31113
15	4.19992	0.30339
16	5.46023	0.37762
17	4.27706	0.41981
18	3.80551	0.36496
19	3.38711	0.28517
20	3.47766	0.26395
21	5.18821	0.39346
22	4.85835	0.39624
23	4.75678	0.33253
24	6.01404	0.25254
25	5.90138	0.28962
26	4.8862	0.38182
27	3.34371	0.36285
28	4.37446	0.37058

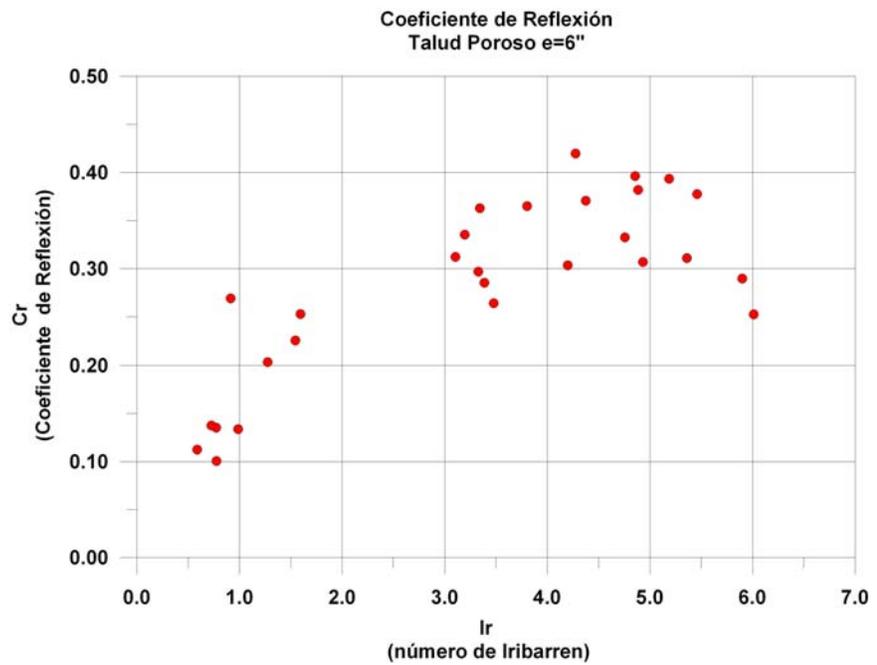


Figura III.11 Coeficiente de Reflexión v.s Ir (Talud poroso e=6'')

III.4.3 Altura de Ola Rompiente

Aquí se muestran los resultados que se obtuvieron al estimar la altura de ola rompiente con los datos y videos tomados en el laboratorio. Así mismo se muestran las profundidades de rompiente para cada caso, las cuales fueron estimadas para el caso de talud impermeable con los videos y con el proceso que se explicó en el capítulo III.3.4, y para los taludes porosos con la llamada profundidad de rompiente equivalente dada por Losada y Rojanakamthorn, también vista en el capítulo III.3.4.

Cabe mencionar aquí que, en algunos casos no fue posible estimar la altura rompiente de la ola, esto debido a varios motivos como pueden ser: la no existencia del video correspondiente, que no se generaba una buena onda, etc.

Tabla III.19 Alturas de ola rompiente para el talud 1:8

Talud 1:8	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
h=0.25	0.7	0.03459	0.765	0.588	0.0575		0.4842		0.0609
e=0	0.7	0.03001	0.765	0.631					mal
	1	0.04148	1.5613	0.767	0.0575		0.722		0.0744
	1.2	0.04608	2.2483	0.873	0.0575		0.8771		0.0805
	1	0.06451	1.5613	0.615	0.0575		0.722		0.0807
	1.5	0.05826	3.5129	0.971	0.0575		1.1072		0.0806
	1.2	0.05424	2.2483	0.805	0.0575		0.8771		0.0808
h=0.25	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=2	0.7	0.03677	0.765	0.57	0.1112	0.1276		0.6467	0.0566
	0.7	0.04057	0.765	0.543					mal
	1	0.04099	1.5613	0.771	0.1112	0.1276		1.0226	0.0485
	1.2	0.06645	2.2483	0.727	0.1363	0.1527		1.3637	0.0732
	1	0.04692	1.5613	0.721	0.1112	0.1276		1.2624	0.0575
	1.5	0.05673	3.5129	0.984	0.1112	0.1276		1.6141	0.0665
	1.2	0.04612	2.2483	0.873	0.1112	0.1276		1.2624	0.0711
h=0.25	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=6	0.7	0.03448	0.765	0.589	0.0613	0.1105		0.6184	0.0549
	0.7	0.03392	0.765	0.594					mal
	1	0.04073	1.5613	0.774	0.0613	0.1105		0.9635	0.0477
	1.2	0.06646	2.2483	0.727	0.0613	0.1105		1.1846	0.074
	1	0.0468	1.5613	0.722	0.0613	0.1105		0.9635	0.0541
	1.5	0.05624	3.5129	0.988	0.0613	0.1105		1.5098	0.066
	1.2	0.04205	2.2483	0.914	0.0613	0.1105		1.1846	0.0667

Tabla III.20 Alturas de ola rompiente par el talud 1:5

Talud 1:5	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
h=0.40	1	0.08795	1.5613	0.843	0.076		0.819		0.1024

e=0	1.5	0.04286	3.5129	1.811	0.076		1.2658		0.0768
	1.5	0.05851	3.5129	1.55	0.076		1.2658		0.1006
	1.5	0.0813	3.5129	1.315	0.116		1.5446		0.1298
	1.7	0.04208	4.5122	2.071	0.076		1.4419		0.0735
	1.7	0.05275	4.5122	1.85	0.076		1.4419		0.0914
	1.7	0.07457	4.5122	1.556	0.116		1.7645		0.1114
h=0.40	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=2	1	0.08182	1.5613	0.874	0.122	0.1386		1.0571	0.0952
	1.5	0.04174	3.5129	1.835	0.082	0.0986		1.4316	0.0576
	1.5	0.05903	3.5129	1.543	0.082	0.0986		1.4316	0.0859
	1.5	0.08563	3.5129	1.281	0.212	0.2286		2.0915	0.1086
	1.7	0.04432	4.5122	2.018	0.082	0.0986		1.6334	0.0595
	1.7	0.05349	4.5122	1.837	0.082	0.0986		1.6334	0.0788
	1.7	0.06023	4.5122	1.731	0.082	0.0986		1.6334	0.0912
h=0.40	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=6	1	0.10375	1.5613	0.776	0.216	0.2657		1.3277	0.1016
	1.5	0.04165	3.5129	1.837	0.086	0.1357		1.6606	0.0536
	1.5	0.05878	3.5129	1.546	0.086	0.1357		2.0412	0.0816
	1.5	0.08623	3.5129	1.277	0.216	0.2657		2.2291	0.0991
	1.7	0.04329	4.5122	2.042	0.086	0.1357		1.8997	0.0522
	1.7	0.05248	4.5122	1.854	0.086	0.1357		1.8997	0.0666
	1.7	0.07087	4.5122	1.596	0.086	0.1357		1.8997	0.0899

Tabla III.21 Alturas de ola rompiente par el talud 1:3

Talud 1:3	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
h=0.60	0.6	0.02588	0.5621	1.553					mal
e=0	1.05	0.1054	1.7213	1.347	0.1434		1.314		0.142
	1.2	0.10173	2.2483	1.567	0.21		1.5532		0.1379
	1.2	0.09944	2.2483	1.585	0.1434		1.3278		0.1518
	1.5	0.02912	3.5129	3.661	0.1434		1.7028		0.0633
	1.69	0.09685	4.4593	2.262	0.21		2.3056		0.1807
	1.7	0.03715	4.5122	3.673	0.1434		1.949		0.0598
	1.7	0.05801	4.5122	2.94	0.1434		1.949		0.1068
	2	0.04331	6.2452	4.003	0.2934		3.2255		0.0918
	2	0.07188	6.2452	3.107					mal
	2	0.0843	6.2452	2.869	0.2934		3.2255		0.1785
	1	0.06537	1.5613	1.629					mal
	1	0.09035	1.5613	1.386					mal
	1.5	0.09944	3.5129	1.981	0.1434		1.703		0.1242
	2	0.07199	6.2452	3.105					mal
	2	0.09035	6.2452	2.771	0.2934		3.2255		0.1759

h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=2	0.6	0.02709	0.5621	1.518					mal
	1.05	0.10788	1.7213	1.331	0.13	0.1471		1.1481	0.1285
	1.2	0.10988	2.2483	1.508	0.13	0.1471		1.3425	0.1289
	1.2	0.11666	2.2483	1.463	0.13	0.1471		1.3425	0.1309
	1.5	0.03691	3.5129	3.252	0.1967	0.2138		2.0335	0.0534
	1.69	0.11115	4.4593	2.111					mal
	1.7	0.04034	4.5122	3.525	0.28	0.2971		2.7014	0.0631
	1.7	0.06573	4.5122	2.762	0.1967	0.2138		2.3396	0.0843
	2	0.03853	6.2452	4.244	0.3634	0.3805		3.6166	0.0615
	2	0.06314	6.2452	3.315	0.1967	0.2138		2.7925	0.0631
	2	0.06169	6.2452	3.354					mal

h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=6	0.6	0.02685	0.5621	1.525					mal
	1.05	0.1073	1.7213	1.335	0.13	0.1814		1.2455	0.1276
	1.2	0.10994	2.2483	1.507	0.1967	0.2481		1.655	0.1442
	1.2	0.11595	2.2483	1.468	0.1967	0.2481		1.655	0.1486
	1.5	0.03821	3.5129	3.196	0.13	0.1814		1.8923	0.0523
	1.69	0.11188	4.4593	2.104	0.1967	0.2481		2.4823	0.1647
	1.7	0.03929	4.5122	3.572	0.1967	0.2481		2.4988	0.0577
	1.7	0.06402	4.5122	2.798	0.13	0.1814		2.172	0.0776
	2	0.03857	6.2452	4.242	0.3634	0.4148		3.7526	0.0547
	2	0.06269	6.2452	3.327	0.3634	0.4148		3.7526	0.0901
	2	0.07188	6.2452	3.107	0.13	0.1814		2.5866	0.1216

Tabla III.22 Alturas de ola rompiente para el talud 1:2

Talud 1:2	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
h=0.60	1.1	0.0599	1.8892	2.808	0.2		1.3693		0.1152
e=0	1.2	0.11981	2.2483	2.166	0.2		1.5236		0.2121
h=0.70	1.14	0.09477	2.0291	2.314	0.17		1.3425		0.1718
e=0	1.23	0.09867	2.3621	2.446	0.17		1.4682		0.1699
	1.5	0.04016	3.5129	4.676	0.47		2.7688		0.0963
	1.7	0.05443	4.5122	4.553	0.47		3.2506		0.1174
	1.7	0.08776	4.5122	3.585	0.47		3.2506		0.1995
	1.7	0.11997	4.5122	3.066	0.37		2.9594		0.232
	2	0.04476	6.2452	5.906	0.63		4.4447		0.0774
	2	0.07122	6.2452	4.682	0.7		4.6236		0.1249
	2	0.0888	6.2452	4.193	0.7		4.6236		0.159
	2	0.10694	6.2452	3.821	0.7		4.6236		0.1916
	3	0.0678	14.052	7.198					mal
	3	0.08335	14.052	6.492					mal

	3	0.12651	14.052	5.27					mal
h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=2	1.5	0.03792	3.5129	4.812	0.4	0.4182		2.6582	0.0573
	1.7	0.0376	4.5122	5.478	0.6	0.6		3.549	0.0559
	1.7	0.06336	4.5122	4.219	0.5	0.5182		3.3704	0.0908
	2	0.0498	6.2452	5.599	0.6	0.6		4.362	0.0657
	1.5	0.072	3.5129	3.492	0.5	0.5182		2.8594	0.1046
	2	0.08247	6.2452	4.351	0.6	0.6		4.362	0.1029
	2	0.10482	6.2452	3.859	0.6	0.6		4.362	0.1391
	1.7	0.09971	4.5122	3.364	0.6	0.6		3.549	0.1405
	1.2	0.11163	2.2483	2.244	0.3	0.3182		1.8055	0.1421
	1.7	0.15602	4.5122	2.689	0.4	0.4182		3.1076	0.1954
	2	0.12364	6.2452	3.554	0.6	0.6		4.362	0.152
h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=6	1.5	0.0361	3.5129	4.932	0.585	0.6		2.9904	0.0567
	1.7	0.03925	4.5122	5.361	0.6	0.6		3.549	0.0572
	1.7	0.06395	4.5122	4.2	0.585	0.6		3.549	0.0917
	2	0.05237	6.2452	5.46	0.6	0.6		4.362	0.0652
	1.5	0.06783	3.5129	3.598	0.585	0.6		2.9904	0.1057
	2	0.08535	6.2452	4.277	0.6	0.6		4.362	0.1099
	2	0.10781	6.2452	3.806	0.6	0.6		4.362	0.1391
	1.7	0.09833	4.5122	3.387	0.6	0.6		3.549	0.1406
	1.2	0.11283	2.2483	2.232	0.385	0.4395		1.9859	0.153
	2	0.1291	6.2452	3.478	0.6	0.6		4.362	0.1736
	2	0.19025	6.2452	2.865	0.6	0.6		4.362	0.3079
	3	0.1101	14.052	5.649	0.385	0.4395		6.0248	0.1414
	3	0.13051	14.052	5.188	0.385	0.4395		6.0248	0.17
	3	0.14883	14.052	4.858	0.385	0.4395		6.0248	0.1892

Tabla III.23 Alturas de ola rompiente para el talud 1:1.5

Talud 1:1.5	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
h=0.60	2	0.07725	6.2452	5.994					blanco
e=0	1.2	0.05312	2.2483	4.337	0.36		1.8775		0.1326
	1.5	0.03495	3.5129	6.684	0.6		2.9904		0.088
	1.7	0.04623	4.5122	6.586	0.6		3.549		0.0888
	2	0.11091	6.2452	5.003	0.6		4.362		0.1228
	1.2	0.06088	2.2483	4.051	0.36		1.8775		0.1592
	1.2	0.06886	2.2483	3.809	0.36		1.8775		0.1791
	1.5	0.06313	3.5129	4.973	0.6		2.9904		0.1548
	2	0.15339	6.2452	4.254	0.6		4.362		0.1726
	3	0.11106	14.052	7.499					blanco
	1.2	0.07496	2.2483	3.651	0.36		1.8775		0.1879

	2	0.18488	6.2452	3.875	0.6		4.362		0.2872
	1.2	0.09154	2.2483	3.304	0.36		1.8775		0.1965
	3	0.16354	14.052	6.18	0.6		6.9518		0.1607
	1.5	0.16189	3.5129	3.106	0.56		2.9297		0.3094
h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=2	2	0.06157	6.2452	6.714	0.6	0.6		4.362	0.0636
	1.2	0.04708	2.2483	4.607	0.5266	0.5461		2.0866	0.0794
	1.5	0.04196	3.5129	6.1	0.6	0.6		2.9904	0.0708
	1.7	0.05029	4.5122	6.315	0.6	0.6		3.549	0.0735
	2	0.08687	6.2452	5.653	0.6	0.6		4.362	0.0905
	1.2	0.06537	2.2483	3.91	0.5266	0.5461		2.0866	0.1047
	1.5	0.07225	3.5129	4.649	0.6	0.6		2.9904	0.1173
	2	0.12664	6.2452	4.682	0.6	0.6		4.362	0.1406
	3	0.10027	14.052	7.892					blanco
	1.2	0.08937	2.2483	3.344	0.5266	0.5461		2.0866	0.1391
	2	0.15867	6.2452	4.183	0.6	0.6		4.362	0.183
h=0.60	T(s)	Hi(m)	Lo(m)	lr (i)	hb(m)	h*b (m)	Lb(m)	L*b (m)	Hb (m)
e=6	2	0.05522	6.2452	7.09	0.6	0.6		4.362	0.056
	1.2	0.04416	2.2483	4.757	0.5266	0.5852		2.1139	0.0688
	1.5	0.0451	3.5129	5.884	0.6	0.6		2.9904	0.0688
	1.7	0.05545	4.5122	6.014	0.6	0.6		3.549	0.0778
	2	0.0797	6.2452	5.901					blanco
	1.2	0.06084	2.2483	4.053	0.5266	0.5852		2.1139	0.0934
	1.5	0.07616	3.5129	4.528	0.6	0.6		2.9904	0.1146
	2	0.11626	6.2452	4.886					blanco
	3	0.09189	14.052	8.244					blanco
	1.2	0.08938	2.2483	3.344	0.5266	0.5852		2.1139	0.1363
	2	0.14505	6.2452	4.374	0.6	0.6		4.362	0.1647

Capítulo IV

Caracterización de la Rotura

*“Los seres humanos no nacen para siempre el día que sus madres los alumbran,
sino que la vida los obliga a parirse a sí mismos una y otra vez.”*
Gabriel García Márquez

IV. Caracterización de la Rotura

IV.1 Resumen de los resultados

Para el caso del tipo de rotura que se presentó se puede decir que en el caso del talud impermeable, la rotura teórica que se calculaba con el número de Iribarren, y que se asignaba por medio de los rangos propuestos por Silva (Tabla II.2) se ajustaba de una manera adecuada a los valores del número de Iribarren calculados con los datos del laboratorio.

Por otro lado para los taludes porosos, se observó que estos rangos propuestos, por el contrario, no se ajustaban del todo bien a los tipos de rotura observados en los ensayos. Esto quiere decir que el efecto de disipación de energía del medio poroso que se tiene se debe tomar en cuenta al hacer el cálculo y en la designación del tipo de rompiente que se va a presentar, cosa que en las expresiones utilizadas no se hace.

Ahora, en el caso del coeficiente de reflexión podemos ver en la Figura IV.1 que es evidente el efecto de disipación de energía que se tiene en los medios porosos, y que entre más espesor tenga dicho medio, más será el efecto disipativo. También podemos observar que en un rango de número de Iribarren de 0.5 a 1.5, el coeficiente de reflexión se comporta prácticamente de la misma manera en cualquiera de los tres taludes, no así, para el rango de 2.0 en adelante en el que si se ve como en los taludes porosos es mucho menor el valor del coeficiente de reflexión. Otra observación interesante que podemos hacer de estos datos es, que para valores del número de Iribarren de 3.5 en adelante, el coeficiente de reflexión tiene una tendencia a seguir una línea horizontal, es decir, a permanecer constante en un rango de valores dado.

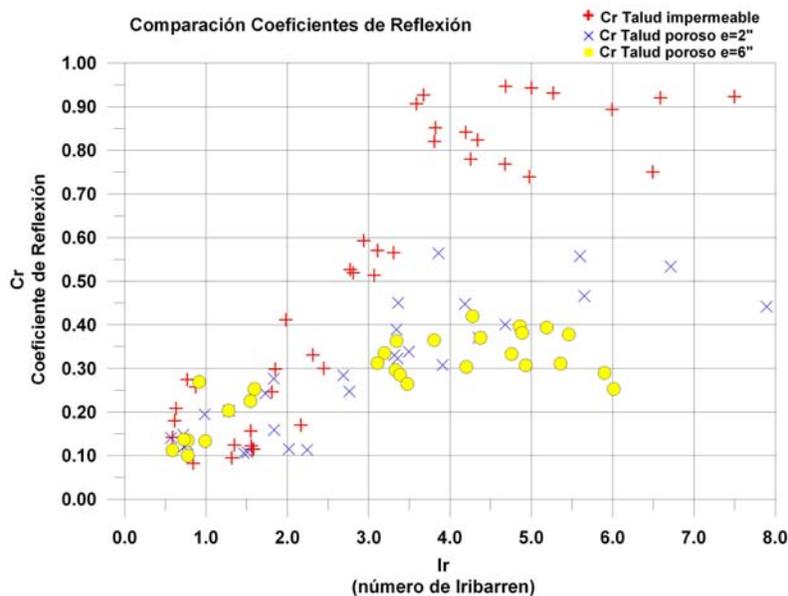


Figura IV.1 Comparación del Coeficiente de Reflexión para los tres tipos de talud utilizados

En el caso de las alturas de ola rompiente estimadas con los datos recabados del laboratorio, se hará un análisis más a detalle en los subcapítulos posteriores, aun así, se puede decir en relación a esto que se observa una gran diferencia entre los valores de la altura de ola rompiente calculada con los diferentes criterios y los obtenidos en laboratorio. A simple vista se puede ver que los valores estimados de la altura de ola rompiente son mayores a los valores de altura de ola incidente, lo cual nos indica que en efecto la altura de ola esta sufriendo el aperaltamiento que se esperaba tener al momento de la rotura.

Cabe mencionar aquí el motivo por el cual se utilizó la altura de ola incidente como la altura de ola en aguas profundas, y la explicación es la siguiente. Cuando se genera una ola de una determinada altura, digamos 5 cm, al momento de que se presenta la reflexión y la onda se refleja hasta la pala, esto ocasiona que el sensor de la pala detecta una variación en el nivel de agua, por lo que para generar la ola de 5 cm la pala disminuye o aumenta la energía entregada al agua, así, cuando el flujo se estabiliza la altura de ola que realmente esta llegando a la estructura es la altura de ola incidente, la cual generalmente tomará un valor menor al que se quiso generar, en este caso digamos de unos 3.5 o 4 cm.

IV.2 Comparación para fondo impermeable

En esta parte se presenta una comparación entre los diferentes criterios para calcular la altura de ola rompiente, ya mencionados anteriormente, y la altura de ola estimada con los datos de laboratorio para el caso de los taludes impermeables. Esto con el fin de observar como es el ajuste de los criterios establecidos con los datos medidos en el laboratorio. Asimismo, se agrega el cálculo del error cuadrático medio (ECM) dada por la siguiente ecuación:

$$ECM = \frac{\sum (H_{estimada} - H_{calculada})^2}{N} \quad (4.1)$$

Para los casos de los criterios de Munk, Komar, Horikawa y Le Méhuté se tomó el valor de la altura de ola incidente como H_0 y para calcular la L_o se usó la ecuación:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4.2)$$

Cabe aclarar también que para el caso de los criterios antes mencionados, no se tomaron en cuenta algunas alturas de ola estimadas ya que la señal dada por los sensores de nivel se encontraba en mal estado, lo cual hacía que no fuera posible determinar la altura de ola rompiente con claridad. Ahora, en los casos de los criterios de McCowan, Miche, Goda y Weggel el valor de h_b se tomó de los calculados con el proceso descrito en el apartado III.3.4 y el valor de L_b se calculó con la formula siguiente:

$$L_b = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h_b}{L_b}\right) \tag{4.3}$$

Debido a que en estos casos la altura de ola rompiente dependía de parámetros locales (h_b , L_b) se decidió no tomar en consideración todas aquellas olas que aparecían como estacionadas y que por lo tanto el definir la rompiente era bastante difícil.

IV.2.1 Criterio de Munk

Tabla IV.1 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud impermeable)

Talud	Hb (m)	Hb Munk (m)	error
0.125	0.0609	0.029127355	0.00101
0.125	0.0744	0.041702518	0.00107
0.125	0.0805	0.050513122	0.0009
0.125	0.0807	0.05598123	0.00061
0.125	0.0806	0.068537937	0.00015
0.125	0.0808	0.056315448	0.0006
0.2	0.1024	0.068829492	0.00113
0.2	0.0768	0.055854348	0.00044
0.2	0.1006	0.068736752	0.00102
0.2	0.1298	0.085585901	0.00195
0.2	0.0735	0.059971166	0.00018
0.2	0.0914	0.069729748	0.00047
0.2	0.1114	0.087824488	0.00056
0.3333	0.142	0.080222668	0.00382
0.3333	0.1379	0.085644311	0.00273
0.3333	0.1518	0.084355751	0.00455
0.3333	0.0633	0.043166689	0.00041
0.3333	0.1807	0.104137844	0.00586
0.3333	0.0598	0.055196408	2.1E-05
0.3333	0.1068	0.07429169	0.00106
0.3333	0.0918	0.068138584	0.00056
0.3333	0.1785	0.106219089	0.00522
0.3333	0.1242	0.097886178	0.00069
0.3333	0.1759	0.111237785	0.00418
0.5	0.1152	0.056777353	0.00341
0.5	0.2121	0.095515892	0.01359
0.5	0.1718	0.078948552	0.00862
0.5	0.1699	0.085312837	0.00715
0.5	0.0963	0.053481872	0.00183
0.5	0.1174	0.071196854	0.00213
0.5	0.1995	0.097897171	0.01032
0.5	0.232	0.120588845	0.01241
0.5	0.0774	0.06964288	6E-05
0.5	0.1249	0.094926796	0.0009
0.5	0.159	0.109960611	0.0024
0.5	0.1916	0.124469379	0.00451
0.6667	0.1326	0.0555364	0.00594
0.6667	0.088	0.048749673	0.00154
0.6667	0.0888	0.063859673	0.00062
0.6667			
0.6667	0.1592	0.060818357	0.00968
0.6667	0.1791	0.066025817	0.01279
0.6667	0.1548	0.072302019	0.00681
0.6667			
0.6667	0.1879	0.069870218	0.01393
0.6667			
0.6667	0.1965	0.079828409	0.01361
0.6667			
0.6667			

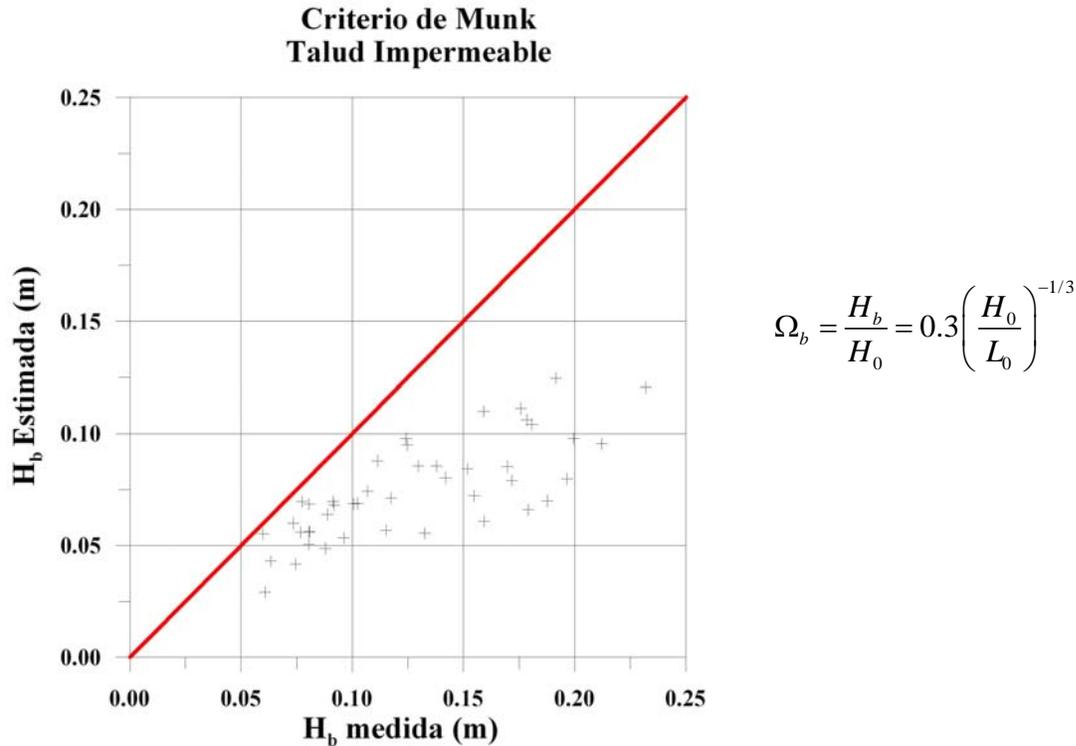


Figura IV.2 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Munk (Talud Impermeable)

IV.2.2 Criterio de Komar

Tabla IV.2 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud impermeable)

Talud	Hb (m)	Hb Komar (m)	error
0.125	0.0609	0.036173215	0.00061
0.125	0.0744	0.048245832	0.00068
0.125	0.0805	0.056451777	0.00058
0.125	0.0807	0.068693554	0.00014
0.125	0.0806	0.074463902	3.8E-05
0.125	0.0808	0.064319937	0.00027
0.2	0.1024	0.088022671	0.00021
0.2	0.0768	0.058250136	0.00034
0.2	0.1006	0.074723183	0.00067
0.2	0.1298	0.097210064	0.00106
0.2	0.0735	0.060341553	0.00017
0.2	0.0914	0.072308143	0.00036
0.2	0.1114	0.095372737	0.00026
0.3333	0.142	0.103739908	0.00146
0.3333	0.1379	0.106372847	0.00099
0.3333	0.1249	0.09455232	0.00074
0.3333	0.0633	0.042756982	0.00042
0.3333	0.1807	0.117284515	0.00402
0.3333	0.0598	0.054623367	2.7E-05
0.3333	0.1068	0.078021407	0.00083
0.3333	0.0918	0.065905974	0.00067
0.3333	0.1785	0.112278383	0.00439
0.3333	0.1242	0.114207389	1E-04
0.3333	0.1759	0.118674077	0.00327
0.5	0.1152	0.067254005	0.0023
0.5	0.2121	0.121250441	0.00825
0.5	0.1718	0.098472763	0.00538
0.5	0.1699	0.104838374	0.00423
0.5	0.0963	0.055293805	0.00168
0.5	0.1174	0.074137589	0.00187
0.5	0.1995	0.108644979	0.00825
0.5	0.232	0.13952565	0.00855
0.5	0.0774	0.067655815	9.5E-05

0.5	0.159	0.117040896	0.00176
0.5	0.1916	0.135808856	0.00311
0.6667	0.1326	0.063253685	0.00481
0.6667	0.088	0.049476003	0.00148
0.6667	0.0888	0.065066511	0.00056
0.6667		0.139832341	
0.6667	0.1592	0.070539793	0.00786
0.6667	0.1791	0.077848295	0.01025
0.6667	0.1548	0.07939791	0.00569
0.6667		0.181244062	
0.6667	0.1879	0.083318814	0.01094
0.6667		0.210445188	
0.6667	0.1965	0.097764578	0.00975
0.6667		0.224360983	
0.6667		0.168663499	

ECM= 0.002758641

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{0.563}{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{1/5}}$$

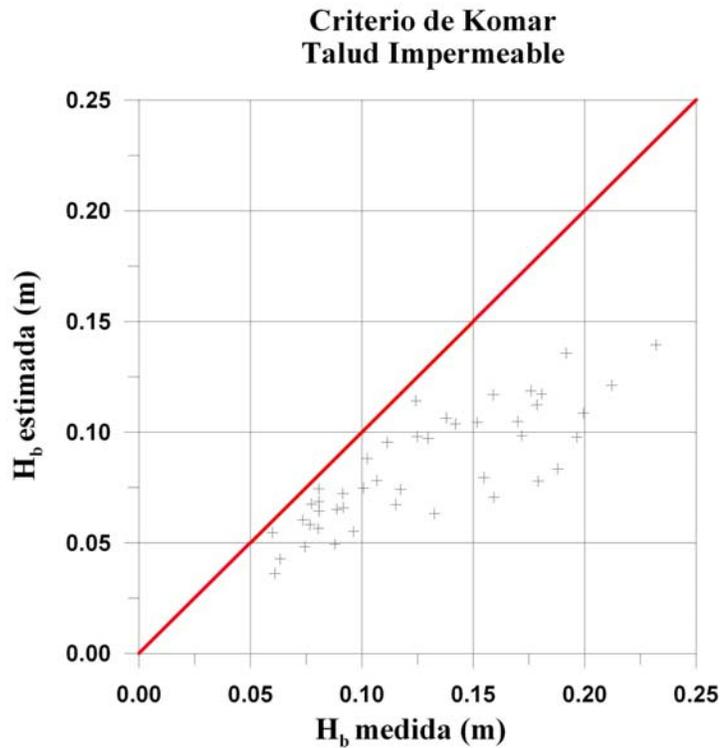


Figura IV.3 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Komar (Talud Impermeable)

IV.2.3 Criterio de Horikawa

Tabla IV.3 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud impermeable)

T	H _b (m)	H _b Horikawa (m)	error
0.7	0.0609	0.049487854	0.00013
1	0.0744	0.067782411	4.4E-05
1.2	0.0805	0.080346853	2.3E-08
1	0.0807	0.094402217	0.00019
1.5	0.0806	0.107110991	0.0007
1.2	0.0808	0.090801938	0.0001
1	0.1024	0.130844308	0.00081
1.5	0.0768	0.093470538	0.00028
1.5	0.1006	0.118051977	0.0003
1.5	0.1298	0.151073446	0.00045
1.7	0.0735	0.098136716	0.00061
1.7	0.0914	0.116276399	0.00062
1.7	0.1114	0.150734893	0.00155
1.05	0.142	0.170084304	0.00079
1.2	0.1379	0.177058935	0.00153
1.2	0.1518	0.174064837	0.0005
1.5	0.0633	0.077472369	0.0002
1.69	0.1807	0.202518781	0.00048
1.7	0.0598	0.09900674	0.00154
1.7	0.1068	0.138300217	0.00099
2	0.0918	0.120486133	0.00082
2	0.1785	0.198539864	0.0004
1.5	0.1242	0.194610405	0.00496
2	0.1759	0.209123916	0.0011
1.1	0.1152	0.123579179	7E-05
1.2	0.2121	0.217088204	2.5E-05
1.14	0.1718	0.177473054	3.2E-05
1.23	0.1699	0.190003391	0.0004
1.5	0.0963	0.106919288	0.00011
1.7	0.1174	0.142972536	0.00065
1.7	0.1995	0.204574089	2.6E-05
1.7	0.232	0.25864539	0.00071
2	0.0774	0.133913778	0.00319
2	0.1249	0.189736714	0.0042
2	0.159	0.223862184	0.00421
2	0.1916	0.257355993	0.00432
1.2	0.1326	0.124936476	5.9E-05
1.5	0.088	0.10204224	0.0002
1.7	0.0888	0.133999268	0.00204
2		0.280162197	

1.2	0.1592	0.138381596	0.00043
1.2	0.1791	0.151780971	0.00075
1.5	0.1548	0.15898496	1.8E-05
2		0.357293144	
1.2	0.1879	0.161758803	0.00068
2		0.411003192	
1.2	0.1965	0.187917174	7.4E-05
3		0.459120744	
1.5		0.32219391	

ECM	0.000938809
-----	-------------

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25}$$

**Criterio de Horikawa
Talud Impermeable**

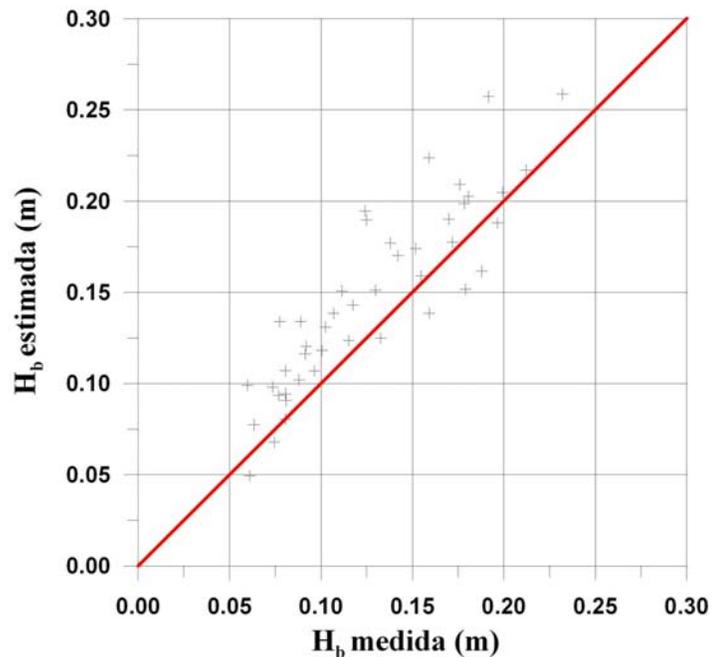


Figura IV.4 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Horikawa (Talud Impermeable)

IV.2.4 Criterio de Le Méhauté

Tabla IV.4 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud impermeable)

Talud	Hb(m)	Hb Le Mehaute(m)	error
0.125	0.0609	0.042356235	0.00034
0.125	0.0744	0.058014393	0.00027
0.125	0.0805	0.068768192	0.00014
0.125	0.0807	0.080798059	9.6E-09
0.125	0.0806	0.091675391	0.00012
0.125	0.0808	0.077716611	9.5E-06
0.2	0.1024	0.109020851	4.4E-05
0.2	0.0768	0.077880634	1.2E-06
0.2	0.1006	0.098362147	5E-06
0.2	0.1298	0.125875982	1.5E-05
0.2	0.0735	0.081768542	6.8E-05
0.2	0.0914	0.096882717	3E-05
0.2	0.1114	0.125593896	0.0002
0.3333	0.142	0.137639203	1.9E-05
0.3333	0.1379	0.143283361	2.9E-05
0.3333	0.1518	0.140860414	0.00012
0.3333	0.0633	0.062693822	3.7E-07
0.3333	0.1807	0.163886513	0.00028
0.3333	0.0598	0.08012032	0.00041
0.3333	0.1068	0.111918215	2.6E-05
0.3333	0.0918	0.097502327	3.3E-05
0.3333	0.1785	0.16066661	0.00032
0.3333	0.1242	0.157486731	0.00111
0.3333	0.1759	0.16923166	4.4E-05
0.5	0.1152	0.09771486	0.00031
0.5	0.2121	0.171653053	0.00164
0.5	0.1718	0.140329097	0.00099
0.5	0.1699	0.150236915	0.00039
0.5	0.0963	0.084541775	0.00014
0.5	0.1174	0.113049313	1.9E-05
0.5	0.1995	0.161758061	0.00142
0.5	0.232	0.20451259	0.00076
0.5	0.0774	0.105886494	0.00081
0.5	0.1249	0.150026052	0.00063
0.5	0.159	0.177009283	0.00032
0.5	0.1916	0.203493055	0.00014
0.6667	0.1326	0.097177356	0.00125
0.6667	0.088	0.079369896	7.4E-05
0.6667	0.0888	0.104226523	0.00024
0.6667		0.217914114	

0.6667	0.1592	0.10763516	0.00266
0.6667	0.1791	0.118057383	0.00373
0.6667	0.1548	0.123660748	0.00097
0.6667		0.277907654	
0.6667	0.1879	0.125818282	0.00385
0.6667		0.319684088	
0.6667	0.1965	0.146164632	0.00253
0.6667		0.3571106	
0.6667		0.250606974	

ECM= 0.000602606

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76(\tan \beta)^{1/7} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/4}$$

Criterio de Le Méhauté
Talud Impermeable

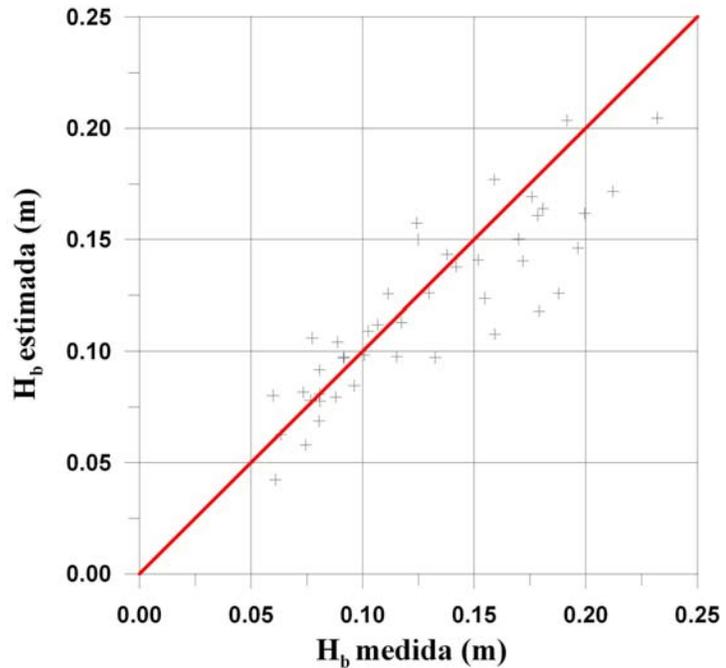


Figura IV.5 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Le Méhauté (Talud Impermeable)

IV.2.5 Criterio de McCowan

Tabla IV.5 Altura de Ola Rompiente (Criterio de McCowan Talud impermeable)

Talud	Hb (m)	Hb Mc Cowan (m)	error
0.125	0.0609	0.04485	0.00026
0.125	0.0744	0.04485	0.00087
0.125	0.0805	0.04485	0.00127
0.125	0.0807	0.04485	0.00129
0.125	0.0806	0.04485	0.00128
0.125	0.0808	0.04485	0.00129
0.2	0.1024	0.05928	0.00186
0.2	0.0768	0.05928	0.00031
0.2	0.1006	0.05928	0.00171
0.2	0.1298	0.09048	0.00155
0.2	0.0735	0.05928	0.0002
0.2	0.0914	0.05928	0.00103
0.2	0.1114	0.09048	0.00044
0.3333	0.142	0.111852	0.00091
0.3333	0.1379	0.1638	0.00067
0.3333	0.1518	0.111852	0.0016
0.3333	0.0633	0.111852	0.00236
0.3333	0.1807	0.1638	0.00029
0.3333	0.0598	0.111852	0.00271
0.3333	0.1068	0.111852	2.6E-05
0.3333	0.0918	0.228852	0.01878
0.3333	0.1785	0.228852	0.00254
0.3333	0.1242	0.111852	0.00015
0.3333	0.1759	0.228852	0.0028
0.5	0.1152	0.156	0.00166
0.5	0.2121	0.156	0.00315
0.5	0.1718	0.1326	0.00154
0.5	0.1699	0.1326	0.00139
0.5		0.3666	
0.5		0.3666	
0.5	0.1995	0.3666	0.02792
0.5	0.232	0.2886	0.0032
0.5		0.4914	
0.5		0.546	
0.5		0.546	
0.5	0.1916	0.546	0.1256
0.6667		0.2808	
0.6667		0.468	
0.6667		0.468	
0.6667		0.468	

0.6667	0.1592	0.2808	0.01479
0.6667	0.1791	0.2808	0.01034
0.6667		0.468	
0.6667		0.468	
0.6667	0.1879	0.2808	
0.6667	0.2872	0.468	0.03269
0.6667	0.1965	0.2808	0.00711
0.6667		0.468	
0.6667	0.3094	0.4368	0.01623

ECM= 0.007886418

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78$$

Criterio de Mc Cowan
Talud Impermeable

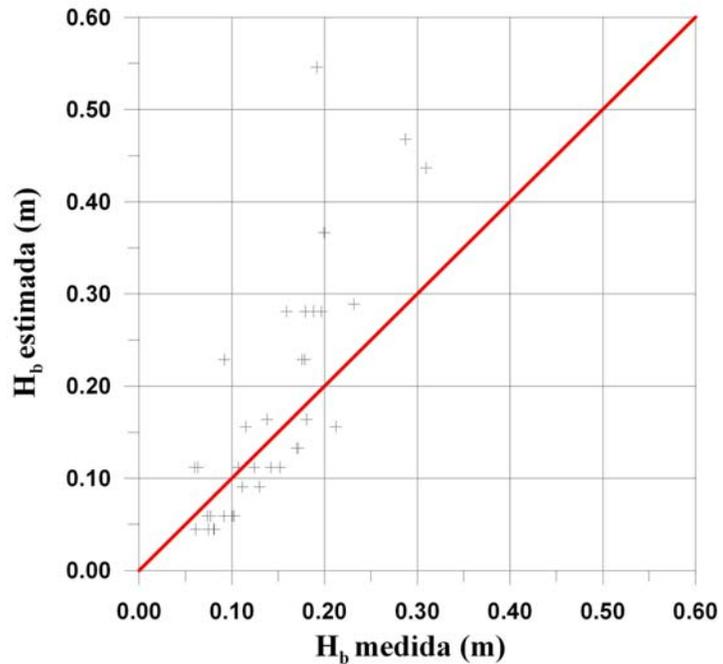


Figura IV.6 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de McCowan (Talud Impermeable)

IV.2.6 Criterio de Miche

Tabla IV.6 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud impermeable)

Talud	H _b (m)	H _b Miche (m)	error
0.125	0.0609	0.043512018	0.0003
0.125	0.0744	0.047409715	0.00073
0.125	0.0805	0.048585036	0.00102
0.125	0.0807	0.047409715	0.00111
0.125	0.0806	0.049555768	0.00096
0.125	0.0808	0.048585036	0.00104
0.2	0.1024	0.061042768	0.00171
0.2	0.0768	0.064764532	0.00014
0.2	0.1006	0.064764532	0.00128
0.2	0.1298	0.096442678	0.00111
0.2	0.0735	0.065433266	6.5E-05
0.2	0.0914	0.065433266	0.00067
0.2	0.1114	0.097986173	0.00018
0.3333	0.142	0.111059416	0.00096
0.3333	0.1379	0.152362675	0.00021
0.3333	0.1518	0.111354457	0.00164
0.3333	0.0633	0.117203786	0.00291
0.3333	0.1807	0.16927581	0.00013
0.3333	0.0598	0.119545924	0.00357
0.3333	0.1068	0.119545924	0.00016
0.3333	0.0918	0.23656134	0.02096
0.3333	0.1785	0.23656134	0.00337
0.3333	0.1242	0.117206055	4.9E-05
0.3333	0.1759	0.23656134	0.00368
0.5	0.1152	0.140934063	0.00066
0.5	0.2121	0.146613408	0.00429
0.5	0.1718	0.126122219	0.00209
0.5	0.1699	0.129582303	0.00163
0.5		0.30988152	
0.5		0.33252631	
0.5	0.1995	0.33252631	0.0177
0.5	0.232	0.275625679	0.0019
0.5		0.449178247	
0.5		0.486078589	
0.5		0.486078589	
0.5	0.1916	0.486078589	0.08672
0.6667		0.222642458	
0.6667		0.361471672	
0.6667		0.396374041	
0.6667		0.432620923	
0.6667	0.1592	0.222642458	0.00402

0.6667	0.1791	0.222642458	0.0019
0.6667		0.361471672	
0.6667		0.432620923	
0.6667	0.1879	0.222642458	0.00121
0.6667	0.2872	0.432620923	0.02115
0.6667	0.1965	0.222642458	0.00068
0.6667		0.488367177	
0.6667	0.3094	0.346942218	0.00141

ECM= 0.005224442

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh\left(2 \pi \frac{h_b}{L_b}\right)$$

Criterio de Miche
Talud Impermeable

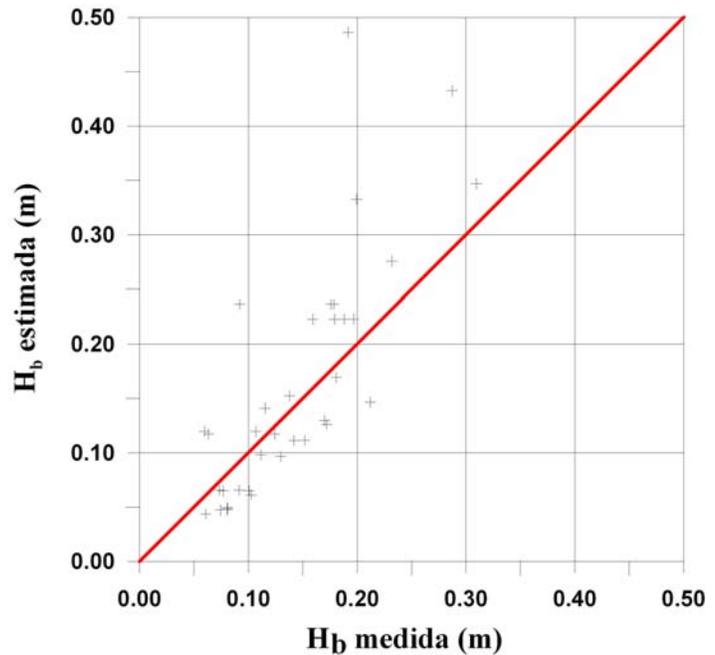


Figura IV.7 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Miche (Talud Impermeable)

IV.2.7 Criterio de Goda

Tabla IV.7 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud impermeable)

Talud	Hb (m)	Hb Goda (m)	error
0.125	0.0609	0.06457675	1.4E-05
0.125	0.0744	0.075792809	1.9E-06
0.125	0.0805	0.079594036	8.2E-07
0.125	0.0807	0.075792809	2.4E-05
0.125	0.0806	0.08289957	5.3E-06
0.125	0.0808	0.079594036	1.5E-06
0.2	0.1024	0.124317976	0.00048
0.2	0.0768	0.146211423	0.00482
0.2	0.1006	0.146211423	0.00208
0.2	0.1298	0.208173614	0.00614
0.2	0.0735	0.150634151	0.00595
0.2	0.0914	0.150634151	0.00351
0.2	0.1114	0.217635783	0.01129
0.3333	0.142	0.241956905	0.00999
0.3333	0.1379	0.328697771	0.0364
0.3333	0.1518	0.282384127	0.01705
0.3333	0.0633	0.344294473	0.07896
0.3333	0.1807	0.476747804	0.08764
0.3333	0.0598	0.3741435	0.09881
0.3333	0.1068	0.3741435	0.07147
0.3333	0.0918	0.666750189	0.33057
0.3333	0.1785	0.666750189	0.23839
0.3333	0.1242	0.344294473	0.04844
0.3333	0.1759	0.666750189	0.24093
0.5	0.1152	0.311153814	0.0384
0.5	0.2121	0.361482784	0.02232
0.5	0.1718	0.322782117	0.0228
0.5	0.1699	0.363567672	0.03751
0.5		0.589747288	
0.5		0.741797108	
0.5	0.1995	0.741797108	0.29409
0.5	0.232	0.714827863	0.23312
0.5		1.0227329	
0.5		1.034706796	
0.5		1.034706796	
0.5		1.034706796	
0.6667		0.381962162	
0.6667		0.596965033	
0.6667		0.765352367	
0.6667		1.048756782	
0.6667	0.1592	0.381962162	0.04962

0.6667	0.1791	0.381962162	0.04115
0.6667		0.596965033	
0.6667		1.048756782	
0.6667	0.1879	0.381962162	0.03766
0.6667		1.048756782	
0.6667	0.1965	0.381962162	0.0344
0.6667		2.05198557	
0.6667	0.3094	0.596803094	0.0826

ECM= 0.062475308

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - e^{\left\{ -1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right) \right\}} \right]$$

Criterio de Goda Talud Impermeable

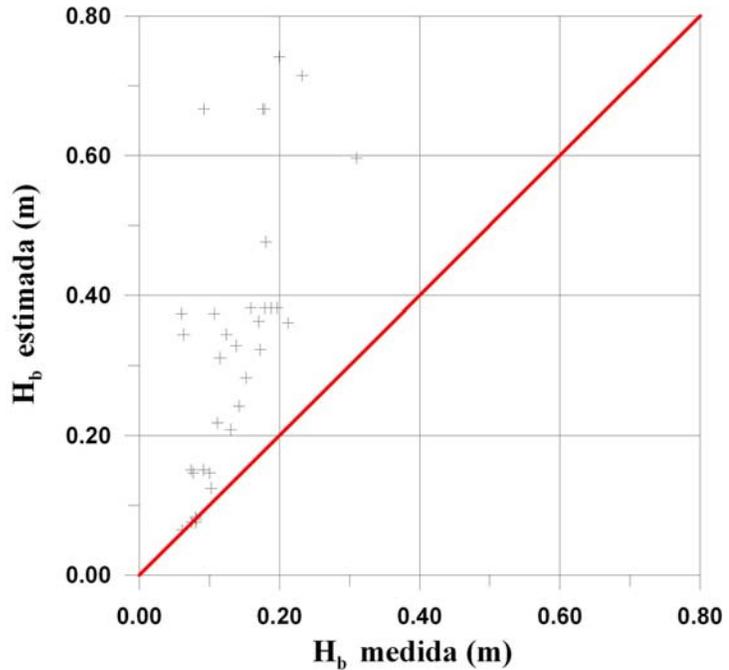


Figura IV.8 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Goda (Talud Impermeable)

IV.2.8 Criterio de Weggel

Tabla IV.8 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud impermeable)

Talud	Hb (m)	Hb Weggel (m)	error
0.125	0.0609		
0.125	0.0744		
0.125	0.0805	0.07101	9E-05
0.125	0.0807		
0.125	0.0806	0.07475	3.4E-05
0.125	0.0808	0.07101	9.6E-05
0.2	0.1024	0.157	0.00298
0.2	0.0768	0.1013	0.0006
0.2	0.1006	0.1013	4.9E-07
0.2	0.1298	0.145	0.00023
0.2	0.0735	0.1042	0.00094
0.2	0.0914	0.1042	0.00016
0.2	0.1114	0.1509	0.00156
0.3333	0.142	0.1769	0.00122
0.3333	0.1379	0.1983	0.00365
0.3333	0.1518	0.1983	0.00216
0.3333	0.0633	0.174	0.01225
0.3333	0.1807	0.2464	0.00432
0.3333	0.0598	0.1829	0.01515
0.3333	0.1068	0.1829	0.00579
0.3333	0.0918	0.4849	0.15453
0.3333	0.1785	0.3444	0.02752
0.3333	0.1242	0.174	0.00248
0.3333	0.1759	0.2651	0.00796
0.5	0.1152	0.1795	0.00413
0.5	0.2121	0.1926	0.00038
0.5	0.1718	0.2185	0.00218
0.5	0.1699	0.2344	0.00416
0.5		0.1983	
0.5		0.2972	
0.5	0.1995	0.4248	0.05076
0.5	0.232	0.4728	0.05798
0.5		0.4809	
0.5		0.3762	
0.5		0.577	
0.5	0.1916	0.613	0.17758
0.6667		0.2654	
0.6667		0.4273	
0.6667		0.4857	
0.6667		0.5606	

0.6667	0.1592	0.2654	0.01128
0.6667	0.1791	0.2654	0.00745
0.6667		0.4273	
0.6667		0.5606	
0.6667	0.1879	0.2654	0.00601
0.6667	0.2872	0.5606	0.07475
0.6667	0.1965	0.2654	0.00475
0.6667		0.7213	
0.6667	0.3094	0.4138	0.0109

ECM= 0.018743887

$$\frac{H_b}{h_B} = b - a \frac{H_b}{gT^2}$$

Criterio de Weggel
Talud Impermeable

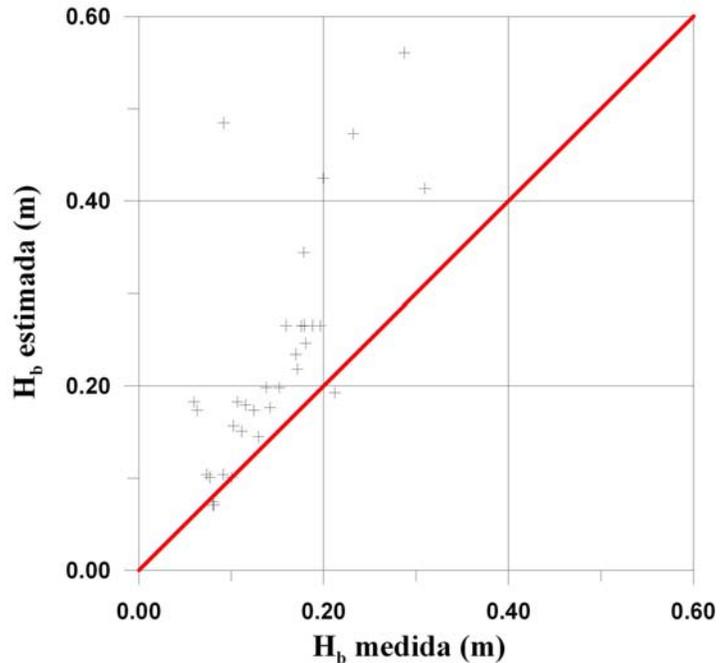


Figura IV.9 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Weggel (Talud Impermeable)

IV.3 Comparación para fondo permeable

En esta parte se presenta una comparación entre los diferentes criterios para calcular la altura de ola rompiente, ya mencionados anteriormente, y la altura de ola estimada con los datos de laboratorio para el caso de los taludes con medio poroso. Esto con el fin de observar como es el ajuste de los criterios establecidos con los datos medidos en el laboratorio. Al igual que en fondo impermeable se utiliza el error cuadrático medio (ECM).

Como en el caso de los taludes impermeables, para los casos de los criterios de Munk, Komar, Horikawa y Le Méhuté se tomó el valor de la altura de ola incidente como H_0 y para calcular la L_o se usó la ecuación ya mencionada.

Para los casos de taludes porosos, en los casos de los criterios de McCowan, Miche, Goda y Weggel el valor de h_b se tomó como el propuesto por Rojanakamthorn, es decir la profundidad de rompiente efectiva, h^* , cuya obtención se realiza con la ecuación (2.14 b), la cuál se dedujo en el apartado II.2.3. El valor de L_b se calculó con la misma fórmula que para el talud impermeable.

Al igual que en el caso del talud impermeable, debido a que en estos criterios la altura de ola rompiente dependía de parámetros locales (h_b , L_b) se decidió no tomar en consideración todas aquellas olas que aparecían como estacionadas y que por lo tanto el definir la rompiente era bastante difícil.

IV.3.1 Fondo permeable de 2 pulgadas de espesor

IV.3.1.1 Criterio de Munk

Tabla IV.9 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Munk (m)	error
0.125	0.0566	0.0303403	0.00069
0.125	0.0485	0.0413767	5.1E-05
0.125	0.0732	0.0644756	7.6E-05
0.125	0.0575	0.0452729	0.00015
0.125	0.0665	0.0673315	6.9E-07
0.125	0.0711	0.0505461	0.00042
0.2	0.0952	0.0655933	0.00088
0.2	0.0576	0.0548727	7.4E-06
0.2	0.0859	0.069136	0.00028
0.2	0.1086	0.088602	0.0004
0.2	0.0595	0.0620843	6.7E-06
0.2	0.0788	0.0703788	7.1E-05
0.2	0.0912	0.076175	0.00023
0.33333	0.1285	0.0814791	0.00221
0.33333	0.1289	0.090162	0.0015
0.33333	0.1309	0.0938318	0.00137
0.33333	0.0534	0.0505545	8.1E-06
0.33333	0.0631	0.0583086	2.3E-05
0.33333	0.0843	0.0807418	1.3E-05
0.33333	0.0615	0.0630227	2.3E-06
0.33333	0.0631	0.0875998	0.0006
0.5	0.0573	0.0514753	3.4E-05
0.5	0.0559	0.0556342	7.1E-08
0.5	0.0908	0.0787904	0.00014
0.5	0.0657	0.0747806	8.2E-05
0.5	0.1046	0.0789294	0.00066
0.5	0.1029	0.1046735	3.1E-06
0.5	0.1391	0.1228197	0.00027
0.5	0.1405	0.1065942	0.00115

0.5	0.1421	0.0911176	0.0026
0.5	0.1954	0.1436698	0.00268
0.5	0.152	0.1371147	0.00022
0.66667	0.0636	0.0861427	0.00051
0.66667	0.0794	0.0512393	0.00079
0.66667	0.0708	0.055071	0.00025
0.66667	0.0735	0.0675458	3.5E-05
0.66667	0.0905	0.108365	0.00032
0.66667	0.1047	0.0637734	0.00167
0.66667	0.1173	0.0791135	0.00146
0.66667	0.1406	0.1393226	1.6E-06
0.66667	0.1391	0.0785588	0.00367
0.66667	0.183	0.1619197	0.00044

ECM=	0.000618
------	----------

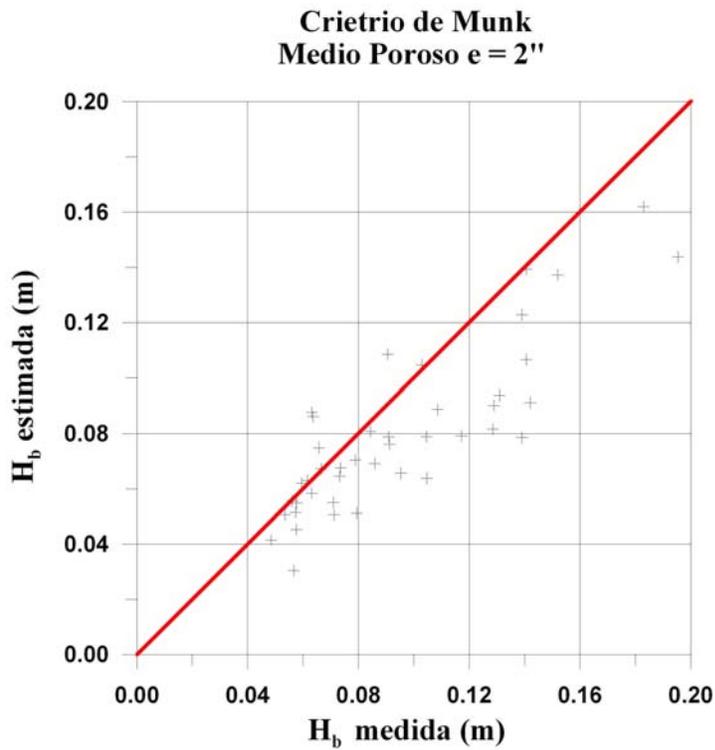


Figura IV.10 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Munk (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.2 Criterio de Komar

Tabla IV.10 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Komar (m)	error
0.125	0.0566	0.0379883	0.000346
0.125	0.0485	0.0477939	4.99E-07
0.125	0.0732	0.0756601	6.05E-06
0.125	0.0575	0.053244	1.81E-05
0.125	0.0665	0.0728938	4.09E-05
0.125	0.0711	0.0564959	0.000213
0.2	0.0952	0.08308	0.000147
0.2	0.0576	0.0570238	3.32E-07
0.2	0.0859	0.0752443	0.000114
0.2	0.1086	0.1013353	5.28E-05
0.2	0.0595	0.0629019	1.16E-05
0.2	0.0788	0.0731165	3.23E-05
0.2	0.0912	0.0804009	0.000117
0.33333	0.1285	0.1056926	0.00052
0.33333	0.1289	0.1131412	0.000248
0.33333	0.1309	0.1186895	0.000149
0.33333	0.0534	0.0516822	2.95E-06
0.33333	0.0631	0.0583397	2.27E-05
0.33333	0.0843	0.0862191	3.68E-06
0.33333	0.0615	0.0600136	2.21E-06
0.33333	0.0631	0.0890957	0.000676
0.5	0.0573	0.0528138	2.01E-05
0.5	0.0559	0.0551437	5.72E-07
0.5	0.0908	0.0837247	5.01E-05
0.5	0.0657	0.0736885	6.38E-05
0.5	0.1046	0.0882094	0.000269
0.5	0.1029	0.1103207	5.51E-05
0.5	0.1391	0.1336518	2.97E-05
0.5	0.1405	0.1203278	0.000407
0.5	0.1421	0.1145817	0.000757
0.5	0.1954	0.1721567	0.00054
0.5	0.152	0.1525295	2.8E-07
0.66667	0.0636	0.0873202	0.000563
0.66667	0.0794	0.057427	0.000483
0.66667	0.0708	0.0572712	0.000183
0.66667	0.0735	0.0695991	1.52E-05
0.66667	0.0905	0.1150059	0.000601
0.66667	0.1047	0.0746723	0.000902
0.66667	0.1173	0.0884565	0.000832
0.66667	0.1406	0.1554816	0.000221

0.66667	0.1391	0.0959017	0.001866
0.66667	0.183	0.1862141	1.03E-05

ECM=	0.000252
------	----------

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{0.563}{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{1/5}}$$

Criterio de Komar Medio Poroso e = 2''

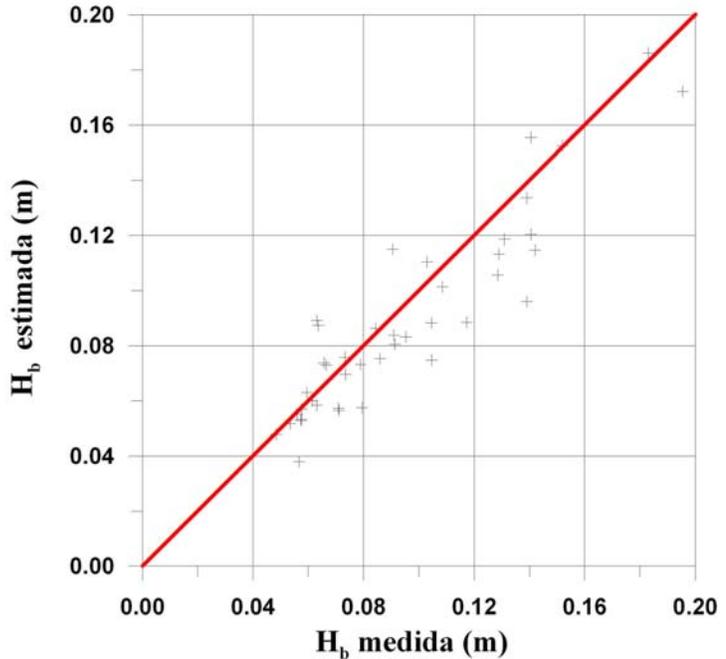


Figura IV.11 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Komar (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.3 Criterio de Horikawa

Tabla IV.11 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Horikawa Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Horikawa (m)	error
0.125	0.0566	0.0518123	2.29E-05
0.125	0.0485	0.067187	0.000349
0.125	0.0732	0.1057325	0.001058
0.125	0.0575	0.074345	0.000284
0.125	0.0665	0.1049922	0.001482
0.125	0.0711	0.0804058	8.66E-05
0.2	0.0952	0.1239439	0.000826
0.2	0.0576	0.0916245	0.001158
0.2	0.0859	0.1188236	0.001084
0.2	0.1086	0.1570759	0.00235
0.2	0.0595	0.1020354	0.001809
0.2	0.0788	0.1174947	0.001497
0.2	0.0912	0.1284356	0.001386
0.33333	0.1285	0.173084	0.001988
0.33333	0.1289	0.1876002	0.003446
0.33333	0.1309	0.196212	0.004266
0.33333	0.0534	0.0925411	0.001532
0.33333	0.0631	0.1053087	0.001782
0.33333	0.0843	0.1518801	0.004567
0.33333	0.0615	0.1103581	0.002387
0.33333	0.0631	0.1598401	0.009359
0.5	0.0573	0.1024171	0.002036
0.5	0.0559	0.1083288	0.002749
0.5	0.0908	0.1602384	0.004822
0.5	0.0657	0.1450779	0.006301
0.5	0.1046	0.1656598	0.003728
0.5	0.1029	0.2117899	0.011857
0.5	0.1391	0.253522	0.013092
0.5	0.1405	0.2251306	0.007162
0.5	0.1421	0.205875	0.004067
0.5	0.1954	0.3149708	0.014297
0.5	0.152	0.2869515	0.018212
0.66667	0.0636	0.1801763	0.01359
0.66667	0.0794	0.1141149	0.001205
0.66667	0.0708	0.1170442	0.002139
0.66667	0.0735	0.1427318	0.004793
0.66667	0.0905	0.2332531	0.020378
0.66667	0.1047	0.1459683	0.001703
0.66667	0.1173	0.1759317	0.003438

0.66667	0.1406	0.3094578	0.028513
0.66667	0.1391	0.1845583	0.002066
0.66667	0.183	0.3664706	0.033661

ECM=	0.005774
------	----------

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25}$$

Criterio de Horikawa
Medio poroso e = 2''

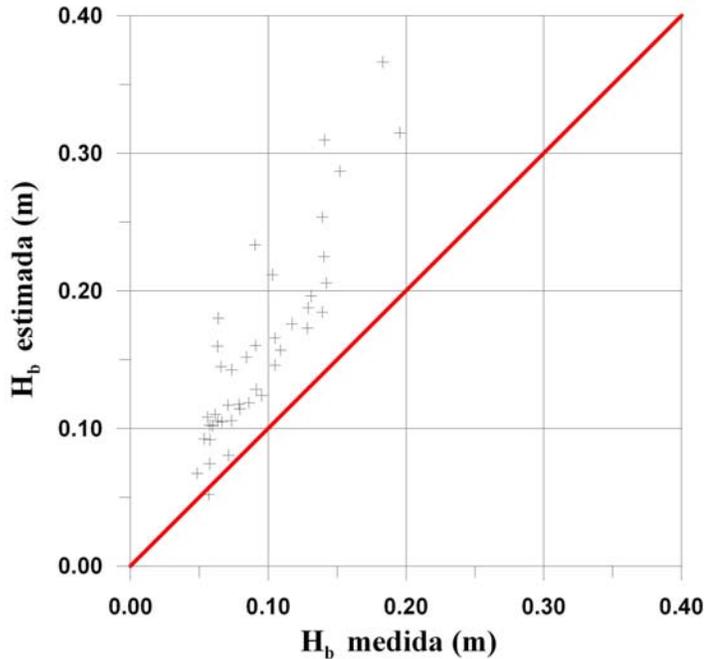


Figura IV.12 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Horikawa (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.4 Criterio de Le Méhauté

Tabla IV.12 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Le Mehaute (m)	error
0.125	0.0566	0.0443457	0.00015
0.125	0.0485	0.0575048	8.11E-05
0.125	0.0732	0.0904956	0.000299
0.125	0.0575	0.0636313	3.76E-05
0.125	0.0665	0.089862	0.000546
0.125	0.0711	0.0688186	5.2E-06
0.2	0.0952	0.1032714	6.51E-05
0.2	0.0576	0.0763425	0.000351
0.2	0.0859	0.0990051	0.000172
0.2	0.1086	0.1308773	0.000496
0.2	0.0595	0.0850169	0.000651
0.2	0.0788	0.0978978	0.000365
0.2	0.0912	0.1070139	0.00025
0.33333	0.1285	0.1400667	0.000134
0.33333	0.1289	0.1518138	0.000525
0.33333	0.1309	0.1587828	0.000777
0.33333	0.0534	0.0748881	0.000462
0.33333	0.0631	0.0852201	0.000489
0.33333	0.0843	0.1229076	0.001491
0.33333	0.0615	0.0893063	0.000773
0.33333	0.0631	0.1293492	0.004389
0.5	0.0573	0.0809819	0.000561
0.5	0.0559	0.0856563	0.000885
0.5	0.0908	0.1267016	0.001289
0.5	0.0657	0.114714	0.002402
0.5	0.1046	0.1309882	0.000696
0.5	0.1029	0.1674636	0.004168
0.5	0.1391	0.2004615	0.003765
0.5	0.1405	0.1780122	0.001407
0.5	0.1421	0.1627867	0.000428
0.5	0.1954	0.2490495	0.002878
0.5	0.152	0.2268944	0.005609
0.66667	0.0636	0.1401437	0.005859
0.66667	0.0794	0.0887602	8.76E-05
0.66667	0.0708	0.0910387	0.00041
0.66667	0.0735	0.1110188	0.001408
0.66667	0.0905	0.1814276	0.008268
0.66667	0.1047	0.1135362	7.81E-05
0.66667	0.1173	0.1368421	0.000382

0.66667	0.1406	0.2407007	0.01002
0.66667	0.1391	0.1435521	1.98E-05
0.66667	0.183	0.285046	0.010413

ECM=	0.001751
------	----------

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76(\tan \beta)^{1/7} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/4}$$

Criterio de Le Méhauté
Medio poroso e = 2''

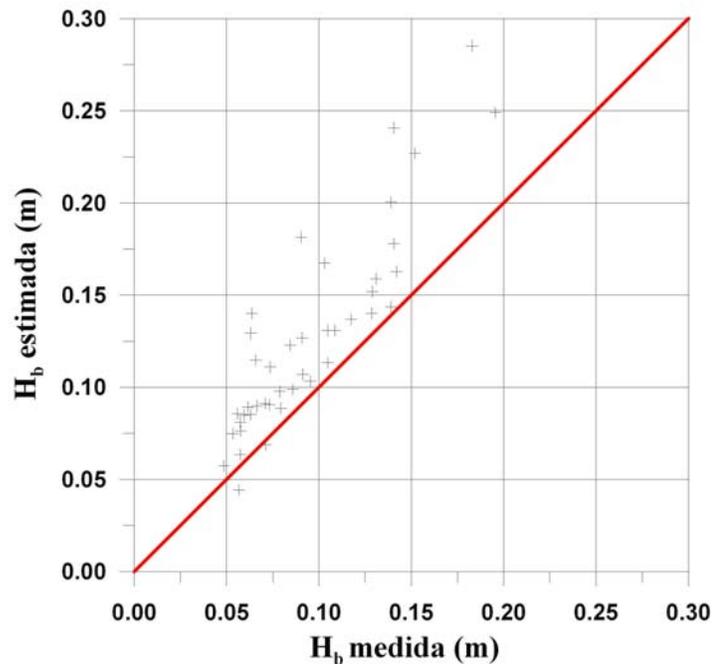


Figura IV.13 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Le Méhauté (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.5 Criterio de McCowan

Tabla IV.13 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le McCowan Talud poroso e=2’’)

Talud	Hb (m)	Hb Mc Cowan (m)	error
0.125	0.0566	0.0995155	0.001842
0.125	0.0485	0.0995155	0.002603
0.125	0.0732	0.1190935	0.002106
0.125	0.0575	0.0995155	0.001765
0.125	0.0665	0.0995155	0.00109
0.125	0.0711	0.0995155	0.000807
0.2	0.0952	0.1080918	0.000166
0.2	0.0576	0.0768918	0.000372
0.2	0.0859	0.0768918	8.11E-05
0.2	0.1086	0.1782918	0.004857
0.2	0.0595	0.0768918	0.000302
0.2	0.0788	0.0768918	3.64E-06
0.2	0.0912	0.0768918	0.000205
0.3333	0.1285	0.1147661	0.000189
0.3333	0.1289	0.1147661	0.0002
0.3333	0.1309	0.1147661	0.00026
0.3333		0.1667921	
0.3333		0.2317661	
0.3333	0.0843	0.1667921	0.006805
0.3333		0.2968181	
0.3333	0.0631	0.1667921	0.010752
0.5		0.3261773	
0.5		0.468	
0.5	0.0908	0.4041773	0.098205
0.5		0.468	
0.5	0.1046	0.4041773	0.089747
0.5		0.468	
0.5	0.1391	0.468	0.108175
0.5	0.1405	0.468	0.107256
0.5	0.1421	0.2481773	0.011252
0.5	0.1954	0.3261773	0.017103
0.5	0.152	0.468	0.099856
0.66667		0.468	
0.66667		0.4259861	
0.66667		0.468	
0.66667		0.468	
0.66667		0.468	
0.66667	0.1047	0.4259861	0.103225
0.66667	0.1173	0.468	0.12299

0.66667		0.468	
0.66667	0.1391	0.4259861	0.082304
0.66667		0.468	

ECM= 0.031233

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78$$

Criterio de Mc Cowan
Medio poroso e = 2’’

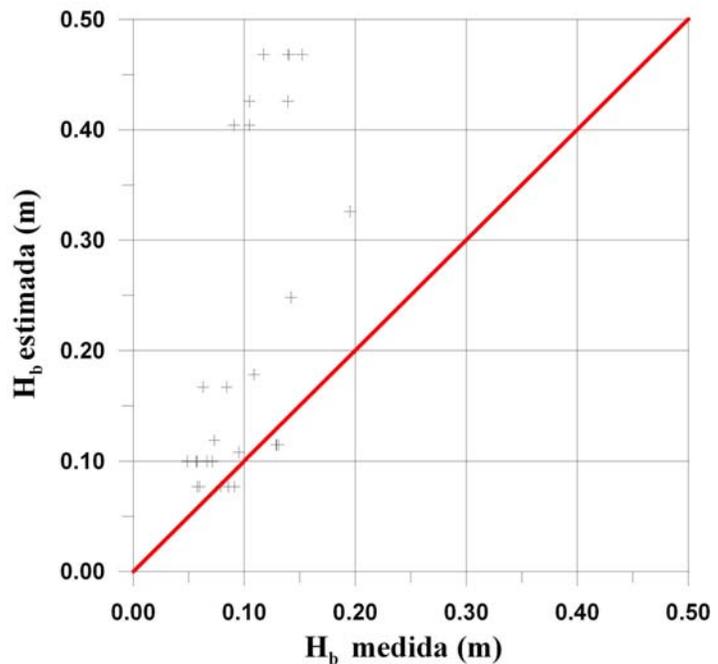


Figura IV.14 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de McCowan (Talud Poroso e=2’’)

IV.3.1.6 Criterio de Miche

Tabla IV.14 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Miche (m)	error
0.125	0.0566	0.0776283	0.000442
0.125	0.0485	0.0951047	0.002172
0.125	0.0732	0.1174604	0.001959
0.125	0.0575	0.1006533	0.001862
0.125	0.0665	0.1053125	0.001506
0.125	0.0711	0.1006533	0.000873
0.2	0.0952	0.1016339	4.14E-05
0.2	0.0576	0.0828475	0.000637
0.2	0.0859	0.0828475	9.32E-06
0.2	0.1086	0.1769631	0.004674
0.2	0.0595	0.0839669	0.000599
0.2	0.0788	0.0839669	2.67E-05
0.2	0.0912	0.0839669	5.23E-05
0.33333	0.1285	0.1087329	0.000391
0.33333	0.1289	0.1138281	0.000227
0.33333	0.1309	0.1138281	0.000291
0.33333		0.1671445	
0.33333		0.2296582	
0.33333	0.0843	0.1722548	0.007736
0.33333		0.2974026	
0.33333	0.0631	0.1773117	0.013044
0.5		0.2856263	
0.5		0.396374	
0.5	0.0908	0.357483	0.07112
0.5		0.4326209	
0.5	0.1046	0.3304928	0.051028
0.5		0.4326209	
0.5	0.1391	0.4326209	0.086155
0.5	0.1405	0.396374	0.065472
0.5	0.1421	0.2058975	0.00407
0.5	0.1954	0.3039141	0.011775
0.5	0.152	0.4326209	0.078748
0.66667		0.4326209	
0.66667		0.2749943	
0.66667		0.3614717	
0.66667		0.396374	
0.66667		0.4326209	
0.66667	0.1047	0.2749943	0.029
0.66667	0.1173	0.3614717	0.05962
0.66667		0.4326209	
0.66667	0.1391	0.2749943	0.018467

0.66667	0.4326209
ECM=	0.018286

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh\left(2 \pi \frac{h_b}{L_b}\right)$$

**Criterio de Miche
Medio poroso e = 2''**

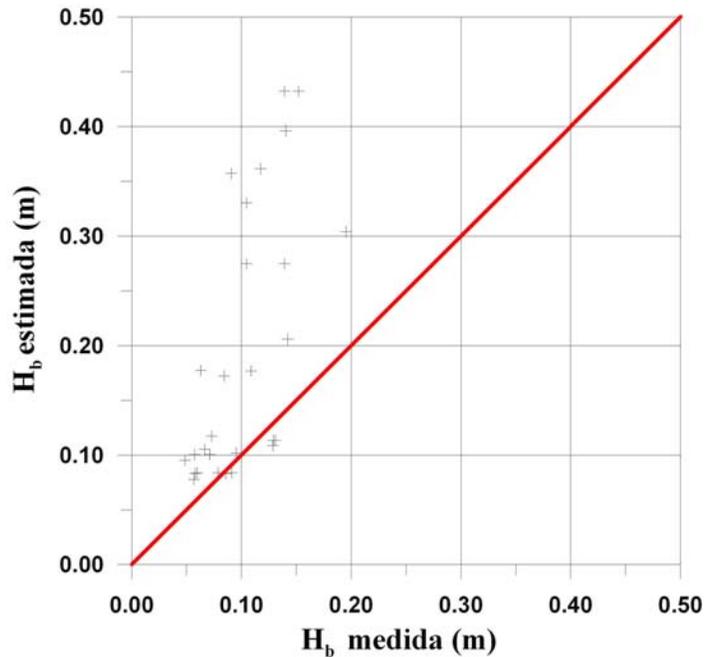


Figura IV.15 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Miche (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.7 Criterio de Goda

Tabla IV.15 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Goda (m)	error
0.125	0.0566	0.1016867	0.002033
0.125	0.0485	0.1395544	0.008291
0.125	0.0732	0.1766114	0.010694
0.125	0.0575	0.1395544	0.006733
0.125	0.0665	0.1685431	0.010413
0.125	0.0711	0.1545494	0.006964
0.2	0.0952	0.1815539	0.007457
0.2	0.0576	0.1823094	0.015552
0.2	0.0859	0.1823094	0.009295
0.2	0.1086	0.3405582	0.053805
0.2	0.0595	0.1894003	0.016874
0.2	0.0788	0.1894003	0.012232
0.2	0.0912	0.1894003	0.009643
0.33333	0.1285	0.2442198	0.013391
0.33333	0.1289	0.2858154	0.024622
0.33333	0.1309	0.2858154	0.023999
0.33333		0.4313688	
0.33333		0.575271	
0.33333	0.0843	0.4841849	0.159908
0.33333		0.7672582	
0.33333	0.0631	0.5452814	0.232499
0.5		0.5851148	
0.5		0.7572377	
0.5	0.0908	0.7492577	0.433567
0.5		1.0160926	
0.5	0.1046	0.5924451	0.237993
0.5		1.0160926	
0.5		1.0160926	
0.5	0.1405	0.7572377	0.380365
0.5	0.1421	0.3785054	0.055888
0.5	0.1954	0.7302493	0.286064
0.5		1.0160926	
0.66667		1.0487568	
0.66667		0.3822032	
0.66667		0.596965	
0.66667		0.7653524	
0.66667		1.0487568	
0.66667	0.1047	0.3822032	0.077008
0.66667	0.1173	0.596965	0.230079
0.66667		1.0487568	

0.66667	0.1391	0.3822032	0.059099
0.66667		1.0487568	

ECM= 0.09171

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - e^{\left\{ -1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right) \right\}} \right]$$

Criterio de Goda
Medio poroso e = 2''

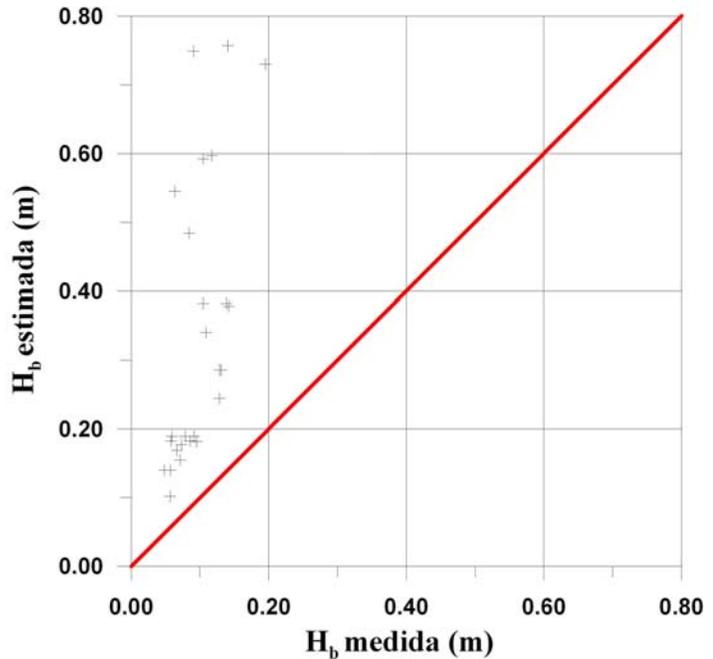


Figura IV.16 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Goda (Talud Poroso e=2'')

IV.3.1.8 Criterio de Weggel

Tabla IV.16 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud poroso e=2'')

Talud	Hb (m)	Hb Weggel (m)	error
0.125	0.0566		
0.125	0.0485	0.1206	0.005198
0.125	0.0732	0.1532	0.0064
0.125	0.0575	0.1207	0.003994
0.125	0.0665	0.1718	0.011088
0.125	0.0711	0.1347	0.004045
0.2	0.0952	0.1749	0.006352
0.2	0.0576	0.167	0.011968
0.2	0.0859	0.1265	0.001648
0.2	0.1086	0.2421	0.017822
0.2	0.0595	0.1752	0.013386
0.2	0.0788	0.1752	0.009293
0.2	0.0912	0.2151	0.015351
0.33333	0.1285	0.1437	0.000231
0.33333	0.1289	0.2004	0.005112
0.33333	0.1309	0.2004	0.00483
0.33333		0.234	
0.33333		0.3174	
0.33333	0.0843	0.2505	0.027622
0.33333		0.41625	
0.33333	0.0631	0.1151	0.002704
0.5		0.3985	
0.5		0.4857	
0.5	0.0908	0.3985	0.094679
0.5		0.5606	
0.5	0.1046	0.3985	0.086377
0.5		0.5606	
0.5	0.1391	0.5606	0.177662
0.5	0.1405	0.4857	0.119163
0.5	0.1421	0.2499	0.011621
0.5	0.1954	0.3963	0.040361
0.5	0.152	0.5606	0.166954
0.66667		0.5606	
0.66667		0.3163	
0.66667		0.4273	
0.66667		0.4857	
0.66667		0.5606	
0.66667	0.1047	0.3163	0.044775
0.66667	0.1173	0.4273	0.0961

0.66667		0.5606	
0.66667	0.1391	0.3163	0.0314
0.66667		0.5606	

ECM= 0.029886

$$\frac{H_b}{h_B} = b - a \frac{H_b}{g T^2}$$

Criterio de Weggel
Medio poroso e = 2''

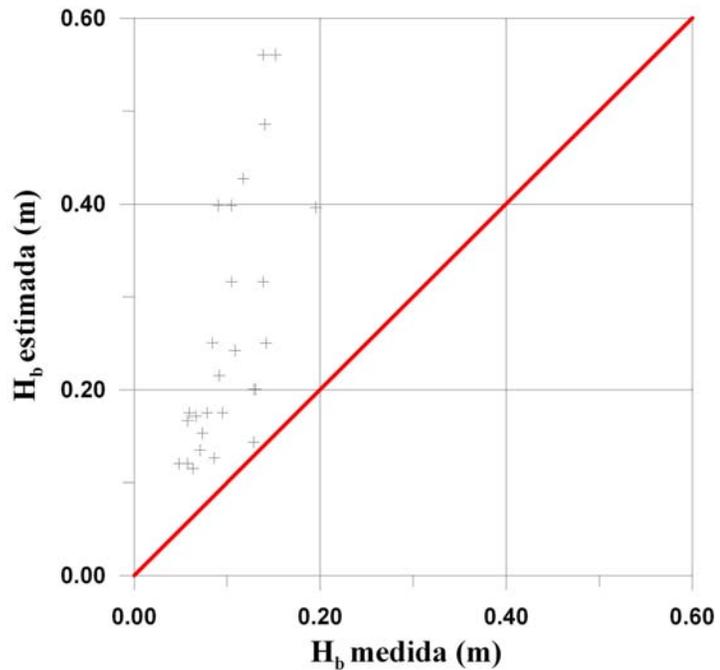


Figura IV.17 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Weggel (Talud Poroso e=2'')

IV.3.2 Fondo permeable de 6 pulgadas de espesor

IV.3.2.1 Criterio de Munk

Tabla IV.17 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Munk Talud poroso e=6'')

Talud	Hb (m)	Hb Munk (m)	error
0.125	0.0549	0.029067236	0.000667
0.125	0.0477	0.04119798	4.23E-05
0.125	0.074	0.064485327	9.05E-05
0.125	0.0541	0.045197696	7.93E-05
0.125	0.066	0.066946065	8.95E-07
0.125	0.0667	0.047522808	0.000368
0.2	0.1016	0.076841535	0.000613
0.2	0.0536	0.054794048	1.43E-06
0.2	0.0816	0.068941419	0.00016
0.2	0.0991	0.089010938	0.000102
0.2	0.0522	0.061118116	7.95E-05
0.2	0.0666	0.069488813	8.35E-06
0.2	0.0899	0.084896261	2.5E-05
0.33333	0.1276	0.081183053	0.002155
0.33333	0.1442	0.090194016	0.002917
0.33333	0.1486	0.093451899	0.003041
0.33333	0.0523	0.051735397	3.19E-07
0.33333	0.1647	0.114653597	0.002505
0.33333	0.0577	0.057290382	1.68E-07
0.33333	0.0776	0.079331701	3E-06
0.33333	0.0547	0.063065312	7E-05
0.33333	0.0901	0.087180229	8.53E-06
0.33333	0.1216	0.095512304	0.000681
0.5	0.0567	0.049816627	4.74E-05
0.5	0.0572	0.057253706	2.88E-09
0.5	0.0917	0.079276901	0.000154
0.5	0.0652	0.077330148	0.000147
0.5	0.1057	0.075851432	0.000891
0.5	0.1099	0.107095313	7.87E-06
0.5	0.1391	0.125144705	0.000195
0.5	0.1406	0.105607781	0.001224
0.5	0.153	0.091768434	0.003749
0.5	0.1736	0.141117706	0.001055
0.5		0.182751168	
0.5	0.1414	0.166301663	0.00062
0.5	0.17	0.186261556	0.000264
0.5	0.1892	0.20331139	0.000199
0.666667	0.056	0.0801148	0.000582

0.666667	0.0688	0.049102496	0.000388
0.666667	0.0688	0.057782035	0.000121
0.666667	0.0778	0.072083259	3.27E-05
0.666667	0.0934	0.060791379	0.001063
0.666667	0.1146	0.081937578	0.001067
0.666667	0.1363	0.078562615	0.003334
0.666667	0.1647	0.152517162	0.000148

ECM = 0.000657

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} = 0.3 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/3}$$

Criterio de Munk
Medio poroso e = 6''

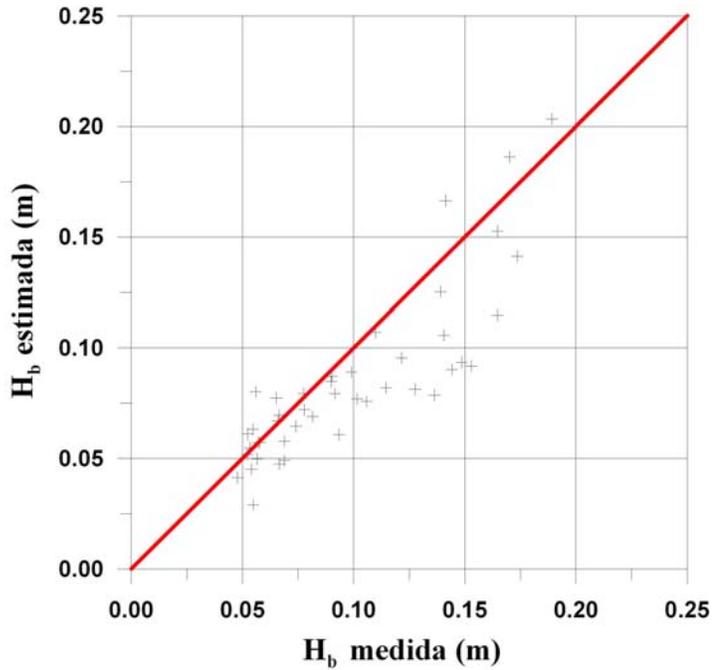


Figura IV.18 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Munk (Talud Poroso e=6'')

IV.3.2.2 Criterio de Komar

Tabla IV.18 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Komar Talud poroso e=6'')

Talud	Hb (m)	Hb Komar (m)	error
0.125	0.0549	0.036083639	0.000354
0.125	0.0477	0.047546239	2.36E-08
0.125	0.074	0.075673819	2.8E-06
0.125	0.0541	0.053137928	9.26E-07
0.125	0.066	0.072393341	4.09E-05
0.125	0.0667	0.052465653	0.000203
0.2	0.1016	0.100457022	1.31E-06
0.2	0.0536	0.056925732	1.11E-05
0.2	0.0816	0.074990253	4.37E-05
0.2	0.0991	0.101896815	7.82E-06
0.2	0.0522	0.061729028	9.08E-05
0.2	0.0666	0.072008434	2.93E-05
0.2	0.0899	0.091566965	2.79E-06
0.33333	0.1276	0.105231993	0.0005
0.33333	0.1442	0.11318942	0.000962
0.33333	0.1486	0.118113168	0.000929
0.33333	0.0523	0.05313417	6.96E-07
0.33333	0.1647	0.131636281	0.001093
0.33333	0.0577	0.05711939	3.37E-07
0.33333	0.0776	0.084415386	4.64E-05
0.33333	0.0547	0.060062267	2.88E-05
0.33333	0.0901	0.088583874	2.3E-06
0.33333	0.1216	0.098838069	0.000518
0.5	0.0567	0.050778252	3.51E-05
0.5	0.0572	0.057075512	1.55E-08
0.5	0.0917	0.084345417	5.41E-05
0.5	0.0652	0.076713478	0.000133
0.5	0.1057	0.08409789	0.000467
0.5	0.1099	0.113390748	1.22E-05
0.5	0.1391	0.136693554	5.79E-06
0.5	0.1406	0.118992776	0.000467
0.5	0.153	0.115564528	0.001401
0.5	0.1736	0.157888636	0.000247
0.5		0.21532044	
0.5	0.1414	0.16349048	0.000488
0.5	0.17	0.187311496	0.0003
0.5	0.1892	0.208070548	0.000356
0.666667	0.056	0.080040237	0.000578
0.666667	0.0688	0.054565337	0.000203
0.666667	0.0688	0.060670832	6.61E-05

0.666667	0.0778	0.075246585	6.52E-06
0.666667	0.0934	0.070502247	0.000524
0.666667	0.1146	0.092258907	0.000499
0.666667	0.1363	0.095907304	0.001632
0.666667	0.1647	0.173314749	7.42E-05

ECM= 0.000282203

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{0.563}{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{1/5}}$$

Criterio de Komar Medio poroso e = 6''

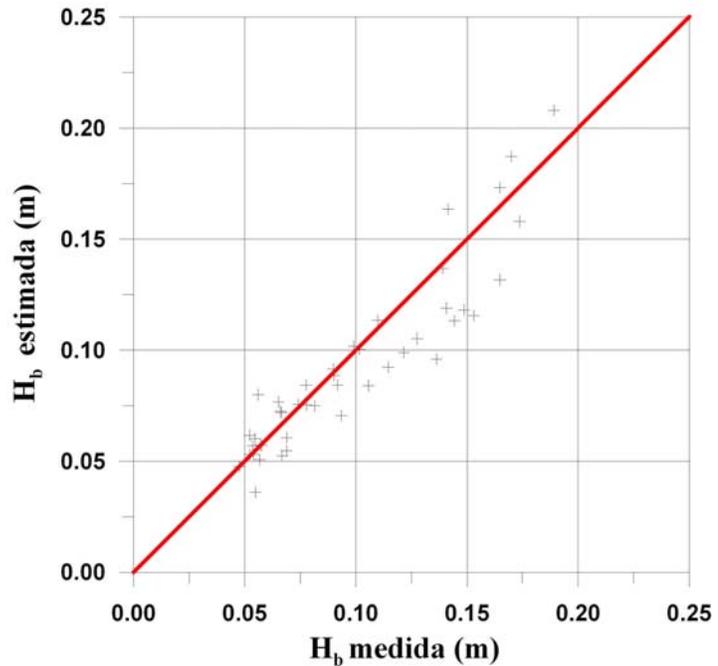


Figura IV.19 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Komar (Talud Poroso e=6'')

IV.3.2.3 Criterio de Horikawa

Tabla IV.19 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Horikawa Talud poroso e=6’’)

Talud	Hb (m)	Hb Horikawa (m)	ERROR
0.125	0.0549	0.049372957	3.05E-05
0.125	0.0477	0.066860537	0.000367
0.125	0.074	0.105750556	0.001008
0.125	0.0541	0.074206215	0.000404
0.125	0.066	0.104316334	0.001468
0.125	0.0667	0.075016016	6.92E-05
0.2	0.1016	0.148099632	0.002162
0.2	0.0536	0.091476742	0.001435
0.2	0.0816	0.118447493	0.001358
0.2	0.0991	0.157891747	0.003456
0.2	0.0522	0.1002507	0.002309
0.2	0.0666	0.11582451	0.002423
0.2	0.0899	0.145092795	0.003046
0.33333	0.1276	0.172376696	0.002005
0.33333	0.1442	0.18767523	0.00189
0.33333	0.1486	0.195318627	0.002183
0.33333	0.0523	0.094976414	0.001821
0.33333	0.1647	0.225666346	0.003717
0.33333	0.0577	0.103242148	0.002074
0.33333	0.0776	0.148899318	0.005084
0.33333	0.0547	0.110441982	0.003107
0.33333	0.0901	0.158979117	0.004744
0.33333	0.1216	0.176171871	0.002978
0.5	0.0567	0.098711953	0.001765
0.5	0.0572	0.111882786	0.00299
0.5	0.0917	0.161351948	0.004851
0.5	0.0652	0.150654253	0.007302
0.5	0.1057	0.158410107	0.002778
0.5	0.1099	0.217310505	0.011537
0.5	0.1391	0.258927385	0.014359
0.5	0.1406	0.222788169	0.006755
0.5	0.153	0.207530113	0.002974
0.5	0.1736	0.296393137	0.015078
0.5		0.3964438	
0.5	0.1414	0.32216236	0.032675
0.5	0.17	0.365977818	0.038407
0.5	0.1892	0.40387601	0.046086
0.666667	0.056	0.166055772	0.012112
0.666667	0.0688	0.108775435	0.001598

0.666667	0.0688	0.123546017	0.002997
0.666667	0.0778	0.153562833	0.00574
0.666667	0.0934	0.138312542	0.002017
0.666667	0.1146	0.183012321	0.00468
0.666667	0.1363	0.184568355	0.00233
0.666667	0.1647	0.342618401	0.031655

ECM= 0.006814

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25}$$

Criterio de Horikawa
Medio poroso e = 6’’

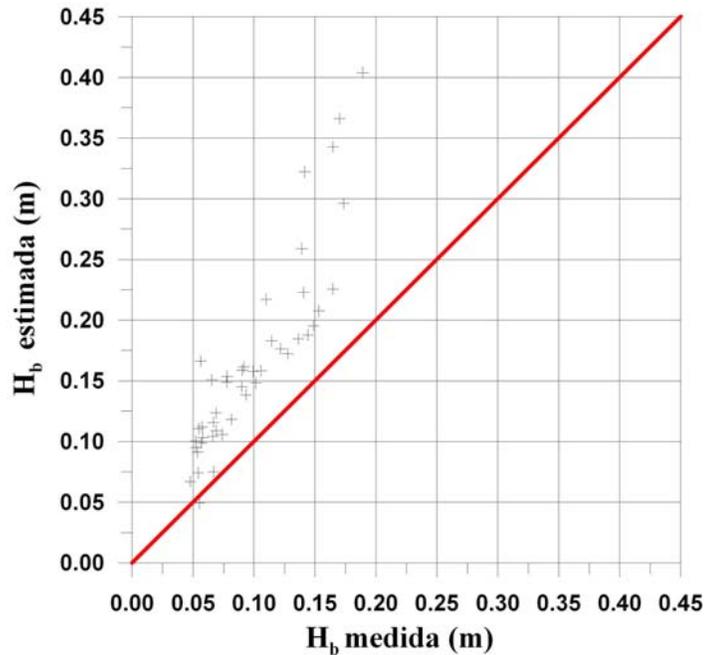


Figura IV.20 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Horikawa (Talud Poroso e=6’’)

IV.3.2.4 Criterio de Le Méhauté

Tabla IV.20 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Le Méhauté Talud poroso e=6'')

Talud	Hb (m)	Hb Le Mehaute (m)	ERROR
0.125	0.0549	0.042257897	0.00016
0.125	0.0477	0.057225368	9.07E-05
0.125	0.074	0.090511006	0.000273
0.125	0.0541	0.063512471	8.86E-05
0.125	0.066	0.089283468	0.000542
0.125	0.0667	0.064205574	6.22E-06
0.2	0.1016	0.123398169	0.000475
0.2	0.0536	0.076219382	0.000512
0.2	0.0816	0.098691695	0.000292
0.2	0.0991	0.131557062	0.001053
0.2	0.0522	0.083529936	0.000982
0.2	0.0666	0.096506198	0.000894
0.2	0.0899	0.12089284	0.000961
0.33333	0.1276	0.139494301	0.000141
0.33333	0.1442	0.151874503	5.89E-05
0.33333	0.1486	0.158059853	8.95E-05
0.33333	0.0523	0.076858815	0.000603
0.33333	0.1647	0.182618474	0.000321
0.33333	0.0577	0.083547786	0.000668
0.33333	0.0776	0.120495442	0.00184
0.33333	0.0547	0.089374187	0.001202
0.33333	0.0901	0.12865243	0.001486
0.33333	0.1216	0.142565512	0.00044
0.5	0.0567	0.078052182	0.000456
0.5	0.0572	0.088466446	0.000978
0.5	0.0917	0.127582034	0.001288
0.5	0.0652	0.119123296	0.002908
0.5	0.1057	0.125255901	0.000382
0.5	0.1099	0.171828828	0.003835
0.5	0.1391	0.204735565	0.004308
0.5	0.1406	0.176160052	0.001265
0.5	0.153	0.164095409	0.000123
0.5	0.1736	0.234359979	0.003692
0.5		0.313470688	
0.5	0.1414	0.254735871	0.012845
0.5	0.17	0.289381038	0.014252
0.5	0.1892	0.319347384	0.016938
0.666667	0.056	0.129160525	0.005352
0.666667	0.0688	0.08460707	0.00025

0.666667	0.0688	0.096095837	0.000745
0.666667	0.0778	0.119443341	0.001734
0.666667	0.0934	0.107581449	0.000201
0.666667	0.1146	0.142349569	0.00077
0.666667	0.1363	0.143559873	5.27E-05
0.666667	0.1647	0.266493432	0.010362

ECM= 0.00218

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76(\tan \beta)^{1/7} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/4}$$

Criterio de Le Méhauté
Medio poroso e = 6''

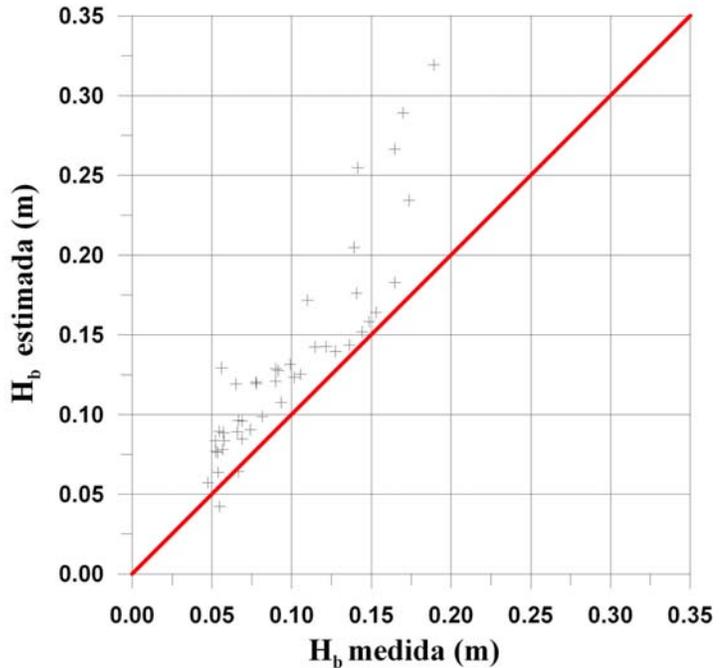


Figura IV.21 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Le Méhauté (Talud Poroso e=6'')

IV.3.2.5 Criterio de MCowan

Tabla IV.21 Altura de Ola Rompiente (Criterio de McCowan Talud poroso e=6’’)

Talud	Hb (m)	Hb Mc Cowan (m)	ERROR
0.125	0.0549	0.08615256	0.000977
0.125	0.0477	0.08615256	0.001479
0.125	0.074	0.08615256	0.000148
0.125	0.0541	0.08615256	0.001027
0.125	0.066	0.08615256	0.000406
0.125	0.0667	0.08615256	0.000378
0.2	0.1016	0.20726784	0.011166
0.2	0.0536	0.10586784	0.002732
0.2	0.0816	0.10586784	0.000589
0.2	0.0991	0.20726784	0.0117
0.2	0.0522	0.10586784	0.00288
0.2	0.0666	0.10586784	0.001542
0.2	0.0899	0.10586784	0.000255
0.3333		0.14148576	
0.3333	0.1442	0.19351176	0.002432
0.3333	0.1486	0.19351176	0.002017
0.3333	0.0523	0.14148576	0.007954
0.3333		0.19351176	
0.3333	0.0577	0.19351176	0.018445
0.3333		0.14148576	
0.3333	0.0547	0.32353776	0.072274
0.3333		0.32353776	
0.3333	0.1216	0.14148576	0.000395
0.5		0.468	
0.5		0.468	
0.5		0.468	
0.5		0.468	
0.5	0.1057	0.468	0.131261
0.5		0.468	
0.5	0.1391	0.468	0.108175
0.5	0.1406	0.468	0.107191
0.5	0.153	0.34283184	0.036036
0.5	0.1736	0.468	0.086671
0.5	0.3079	0.468	0.025632
0.5		0.34283184	
0.5		0.34283184	
0.5		0.34283184	
0.666667		0.468	
0.666667		0.45647472	

0.666667		0.468	
0.666667		0.468	
0.666667		0.45647472	
0.666667	0.1146	0.468	0.124892
0.666667	0.1363	0.45647472	0.102512
0.666667		0.468	

ECM= 0.031895

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78$$

Criterio de Mc Cowan
Medio poroso e = 6''

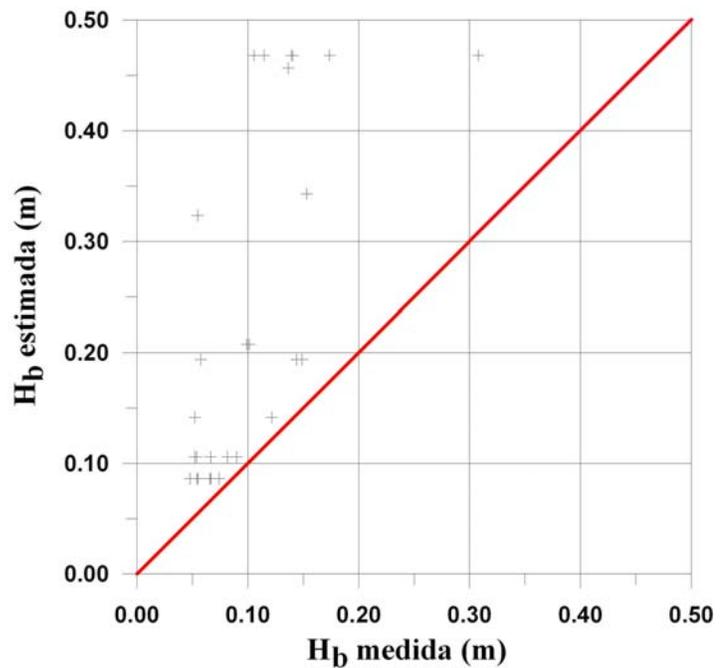


Figura IV.22 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de McCowan (Talud Poroso e=6’’)

IV.3.2.6 Criterio de Miche

Tabla IV.22 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Miche Talud poroso e=6'')

Talud	Hb (m)	Miche (m)	ERROR
0.125	0.0549	0.070983044	0.000259
0.125	0.0477	0.084427458	0.001349
0.125	0.074	0.08863149	0.000214
0.125	0.0541	0.084427458	0.00092
0.125	0.066	0.092146528	0.000684
0.125	0.0667	0.08863149	0.000481
0.2	0.1016	0.160325188	0.003449
0.2	0.0536	0.111467003	0.003349
0.2	0.0816	0.114511672	0.001083
0.2	0.0991	0.200858034	0.010355
0.2	0.0522	0.113569721	0.003766
0.2	0.0666	0.113569721	0.002206
0.2	0.0899	0.113569721	0.00056
0.33333		0.127968971	
0.33333	0.1442	0.172987073	0.000829
0.33333	0.1486	0.172987073	0.000595
0.33333	0.0523	0.144746709	0.008546
0.33333		0.196212471	
0.33333	0.0577	0.196498942	0.019265
0.33333		0.148458196	
0.33333	0.0547	0.320185618	0.070483
0.33333		0.320185618	
0.33333	0.1216	0.152120552	0.000932
0.5		0.361471672	
0.5		0.396374041	
0.5		0.396374041	
0.5		0.432620923	
0.5	0.1057	0.361471672	0.065419
0.5		0.432620923	
0.5	0.1391	0.432620923	0.086155
0.5	0.1406	0.396374041	0.06542
0.5	0.153	0.249090806	0.009233
0.5	0.1736	0.432620923	0.067092
0.5	0.3079	0.432620923	0.015555
0.5		0.366814577	
0.5		0.366814577	
0.5		0.366814577	
0.666667		0.432620923	
0.666667		0.28221303	
0.666667		0.361471672	
0.666667		0.396374041	

0.666667		0.28221303	
0.666667	0.1146	0.361471672	0.060946
0.666667	0.1363	0.28221303	0.021291
0.666667		0.432620923	

ECM= 0.019275

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh\left(2 \pi \frac{h_b}{L_b}\right)$$

Criterio de Miche
Medio poroso e = 6''

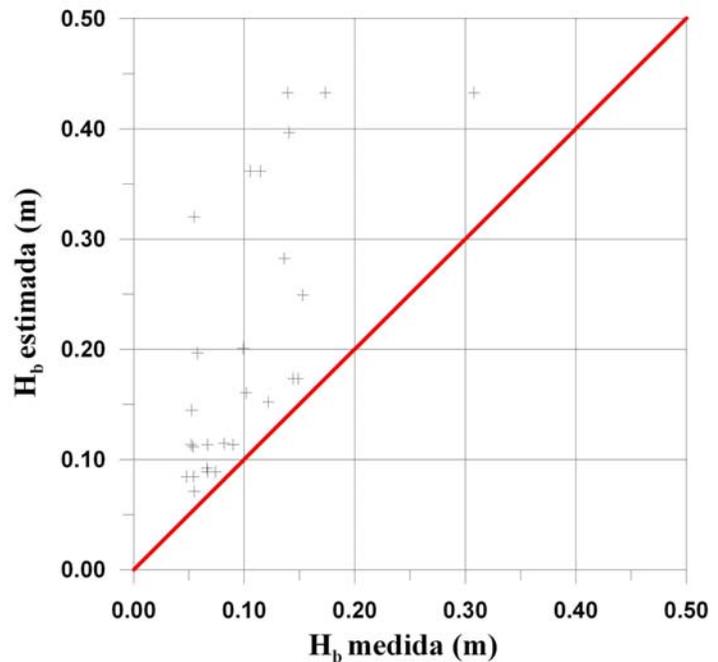


Figura IV.23 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Miche (Talud Poroso e=6'')

IV.3.2.7 Criterio de Goda

Tabla IV.23 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Goda Talud poroso e=6'')

Talud	Hb (m)	Hb Goda (m)	ERROR
0.125	0.0549	0.095250613	0.001628
0.125	0.0477	0.126291041	0.006177
0.125	0.074	0.138146508	0.004115
0.125	0.0541	0.126291041	0.005212
0.125	0.066	0.149025136	0.006893
0.125	0.0667	0.138146508	0.005105
0.2	0.1016	0.236279828	0.018139
0.2	0.0536	0.235521847	0.033096
0.2	0.0816	0.235521847	0.023692
0.2	0.0991	0.373474262	0.075281
0.2	0.0522	0.247948023	0.038317
0.2	0.0666	0.247948023	0.032887
0.2	0.0899	0.247948023	0.024979
0.33333		0.260786452	
0.33333	0.1442	0.344749301	0.04022
0.33333	0.1486	0.344749301	0.038475
0.33333	0.0523	0.395784096	0.117981
0.33333		0.523045059	
0.33333	0.0577	0.525963848	0.219271
0.33333		0.437960314	
0.33333	0.0547	0.79936354	0.554524
0.33333		0.79936354	
0.33333	0.1216	0.485608847	0.132502
0.5		0.594983849	
0.5		0.757237715	
0.5		0.757237715	
0.5		1.016092565	
0.5	0.1057	0.594983849	0.239399
0.5		1.016092565	
0.5	0.1391	1.016092565	0.769116
0.5	0.1406	0.757237715	0.380242
0.5	0.153	0.38157692	0.052247
0.5	0.1736	1.016092565	0.709794
0.5	0.3079	1.016092565	0.501537
0.5		1.531566179	
0.5		1.531566179	
0.5		1.531566179	
0.666667		1.048756782	
0.666667		0.382206198	
0.666667		0.596965033	

0.666667		0.765352367	
0.666667		0.382206198	
0.666667	0.1146	0.596965033	0.232676
0.666667	0.1363	0.382206198	0.06047
0.666667		1.048756782	

ECM= 0.160147

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - e^{\left\{ -1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\}} \right]$$

Criterio de Goda
Medio poroso e = 6''

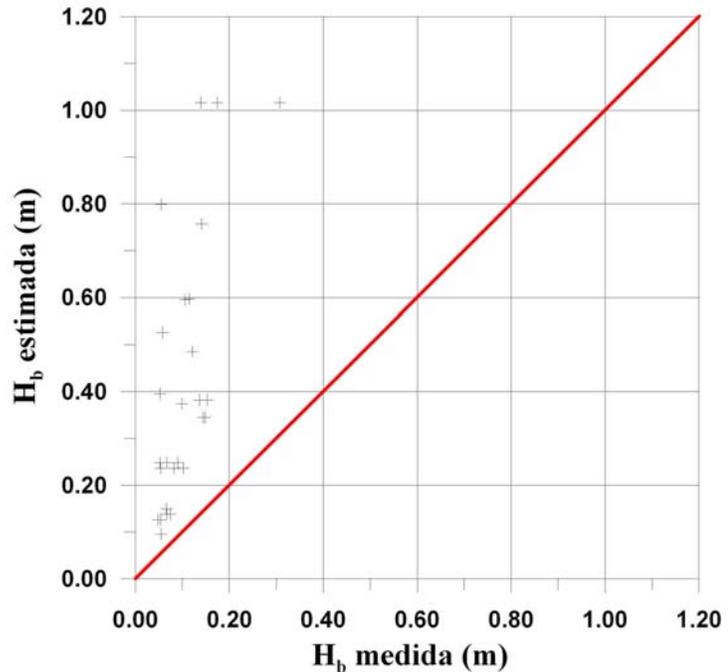


Figura IV.24 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Goda (Talud Poroso e=6'')

IV.3.2.8 Criterio de Weggel

Tabla IV.24 Altura de Ola Rompiente (Criterio de Weggel Talud poroso e=6’’)

Talud	Hb (m)	Hb Weggel (m)	ERROR
0.125	0.0549		
0.125	0.0477	0.1255	0.006053
0.125	0.074	0.1407	0.004449
0.125	0.0541	0.1095	0.003069
0.125	0.066	0.1323	0.004396
0.125	0.0667	0.1209	0.002938
0.2	0.1016	0.1881	0.007482
0.2	0.0536	0.1643	0.012254
0.2	0.0816	0.2325	0.022771
0.2	0.0991	0.2325	0.017796
0.2	0.0522	0.2488	0.038652
0.2	0.0666	0.2488	0.033197
0.2	0.0899	0.2488	0.025249
0.33333		0.1929	
0.33333	0.1442	0.2186	0.005535
0.33333	0.1486	0.2186	0.0049
0.33333	0.0523	0.2079	0.024211
0.33333		0.2786	
0.33333	0.0577	0.2795	0.049195
0.33333		0.2208	
0.33333	0.0547	0.4419	0.149924
0.33333		0.1585	
0.33333	0.1216	0.235	0.01286
0.5		0.4273	
0.5		0.4857	
0.5		0.4857	
0.5		0.5606	
0.5	0.1057	0.4273	0.103427
0.5		0.5606	
0.5	0.1391	0.5606	0.177662
0.5	0.1406	0.4857	0.119094
0.5	0.153	0.2902	0.018824
0.5	0.1736	0.5606	0.149769
0.5	0.3079	0.5606	0.063857
0.5		0.5629	
0.5		0.5629	
0.5		0.5629	
0.666667		0.5606	
0.666667		0.3244	

0.666667		0.4273	
0.666667		0.4857	
0.666667		0.3244	
0.666667	0.1146	0.4273	0.097781
0.666667	0.1363	0.3244	0.035382
0.666667		0.5606	

ECM= 0.045797

$$\frac{H_b}{h_b} = b - a \frac{H_b}{g T^2}$$

Criterio de Weggel
Medio poroso e = 6’’

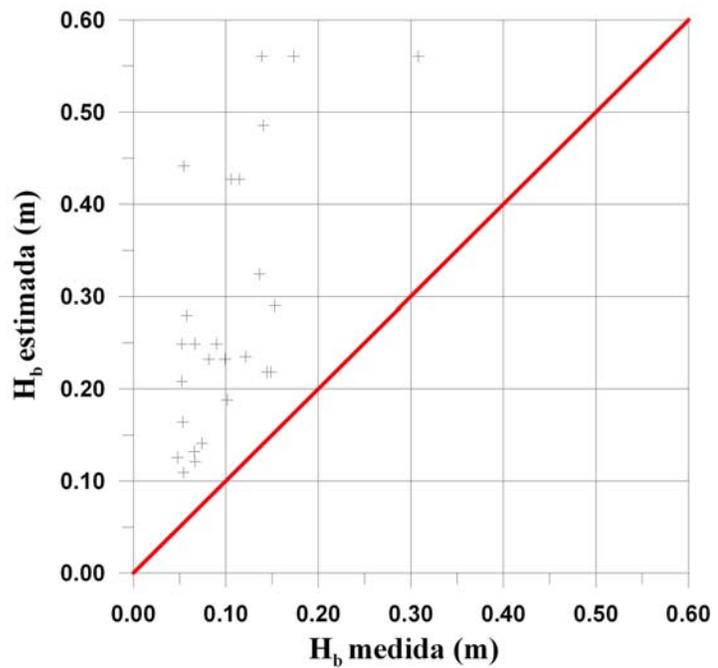


Figura IV.25 Comparación de la Altura de Ola Rompiente con el criterio de Weggel (Talud Poroso e=6’’)

VI.4 Propuesta

El motivo principal que originó la idea de tratar de establecer una propuesta sobre la caracterización de la rompiente en un medio disipativo, ya que se observó en la investigación del estado del arte de la rompiente, un vacío en la caracterización de la rompiente del oleaje sobre medios disipativos, es decir, no existen formulaciones en donde intervenga directa o indirectamente el tipo de material en donde se presenta la rompiente. Es una práctica muy usual en ingeniería el utilizar para el cálculo de la altura de ola rompiente el índice de profundidad de rompiente o criterio de McCowan como una primera aproximación.

La propuesta que se presenta toca dos puntos fundamentales en la caracterización de la rompiente: uno en cuanto a como definir el tipo de rompiente que se presenta, atendiendo al número de Iribarren; y el otro en cuanto la ecuación que mejor define la altura de ola rompiente. Cabe mencionar que sólo se centra la atención en las pendientes menores a 1:2, ya que como se puede observar en la Tabla III.14 y en la Tabla III.15 para los taludes mayores, el comportamiento del tipo de rotura del oleaje se predice de buena forma con la fórmula y rangos usuales del número de Iribarren.

Primeramente, en cuanto a la definición del tipo de rotura, se propone realizar el cálculo del número de Iribarren con la siguiente ecuación:

$$Ir^* = (1 + Cr) + \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \left(\frac{e}{H_0} \right) \quad (4.4)$$

donde:

Cr es el coeficiente de reflexión
 $\tan \beta$ es la pendiente de la playa
 H_0 es la altura de ola en aguas profundas
 L_0 es la longitud de onda en aguas profundas
 e es el espesor del medio poroso

Esta ecuación se formuló empíricamente y esta basada en los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, y toma en cuenta de manera indirecta el tipo de material en el que se esta presentando la rotura del oleaje, ya que se introducen en ella factores como el coeficiente de reflexión y el espesor del medio poroso, factores que indudablemente juegan un factor determinante en el tipo de rompiente.

En la Tabla IV.25 se presenta los resultados obtenidos al aplicar la ecuación (4.4) a los datos obtenidos en laboratorio en talud poroso de 2 pulgadas de espesor, y usando el rango del número de Iribarren propuesto en la Tabla II.2.

Tabla IV.25 Tipo de rotura calculada con la fórmula propuesta (Talud e=2'')

tan β		0.125							
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir (i)	Cr	Ir*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
0.7	1.428571	0.05	0.036771	0.765042	0.5702	0.14109	1.9288	voluta	descretamiento
0.7	1.428571	0.08	0.040573	0.765042	0.5428	0.06451	1.7441	voluta	descretamiento
1	1	0.05	0.040993	1.56131	0.7714	0.12598	2.082	voluta	descretamiento
1.2	0.833333	0.05	0.066448	2.248286	0.7271	0.12021	1.6761	voluta	voluta
1	1	0.08	0.046917	1.56131	0.7211	0.14752	1.9283	voluta	voluta
1.5	0.666667	0.05	0.05673	3.512947	0.9837	0.19471	2.0755	voluta	voluta
1.2	0.833333	0.06	0.046124	2.248286	0.8727	0.28813	2.2493	voluta	voluta

tan β		0.2							
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir (i)	Cr	Ir*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
1	1	0.15	0.081821	1.56131	0.8737	0.02918	1.5716	voluta	voluta
1.5	0.666667	0.05	0.041737	3.512947	1.8349	0.27658	3.5099	oscilación	oscilación
1.5	0.666667	0.07	0.059025	3.512947	1.5429	0.34537	2.6733	colapso	voluta
1.5	0.666667	0.1	0.085634	3.512947	1.281	0.20249	1.9624	voluta	voluta
1.7	0.588235	0.05	0.04432	4.512186	2.018	0.11495	3.428	oscilación	oscilación
1.7	0.588235	0.06	0.053492	4.512186	1.8369	0.15888	2.9033	colapso	oscilación
1.7	0.588235	0.08	0.060234	4.512186	1.731	0.24315	2.703	colapso	voluta

tan β		0.33333							
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	Ir (i)	Cr	Ir*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
0.6	1.666667	0.07	0.027093	0.562072	1.5182	0.42323	4.27	no existe	no rompe
1.05	0.952381	0.14	0.107883	1.721344	1.3315	0.06909	1.6961	voluta	voluta
1.2	0.833333	0.14	0.109882	2.248286	1.5078	0.10764	1.8047	voluta	voluta
1.2	0.833333	0.15	0.116659	2.248286	1.4633	0.106	1.7432	voluta	voluta
1.5	0.666667	0.05	0.036908	3.512947	3.252	0.18537	5.6614	no existe	no rompe
1.69	0.591716	0.13	0.111153	4.459257	2.1113	0.6196	2.5845	voluta	voluta
1.7	0.588235	0.05	0.040339	4.512186	3.5254	0.94043	6.3801	no existe	no rompe
1.7	0.588235	0.08	0.065731	4.512186	2.7617	0.24709	3.3815	oscilación	oscilación
2	0.5	0.05	0.038529	6.24524	4.2438	0.7378	7.3332	no existe	no rompe
2	0.5	0.08	0.063139	6.24524	3.3151	0.33008	3.9973	oscilación	oscilación
2	0.5	0.1	0.061687	6.24524	3.3539	0.32312	4.0851	no existe	oscilación

Para el caso del talud con espesor de 6 pulgadas se aplicó a los datos la misma ecuación que para el talud de 2 pulgadas, sólo que en este caso se realizó una nueva propuesta de los valores del número de Iribarren para asignar el tipo de rompiente ya que se observó que los valores ya determinados no se ajustaban nada bien, y por otro lado, se observó que el tipo de rompiente colapso no se presentó en este caso. En la Tabla IV.26 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la ecuación mencionada junto con los rangos de valores propuestos del número de Iribarren dados en la Tabla IV.27.

Tabla IV.26 Tipo de rotura calculada con la fórmula propuesta (Talud e=6'')

tan β									
0.125									
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr (i)	Cr	lr*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
0.7	1.4285714	0.05	0.034481	0.7650419	0.588792	0.1125	3.7149	voluta	oscilación
0.7	1.4285714	0.08	0.033918	0.7650419	0.593663	0.07044	3.7379	voluta	oscilación
1	1	0.05	0.040727	1.56131	0.773946	0.13524	4.0313	oscilación	oscilación
1.2	0.8333333	0.05	0.066464	2.2482864	0.727016	0.13738	2.8044	descretamiento	descretamiento
1	1	0.08	0.0468	1.56131	0.721989	0.0334	3.3845	voluta	oscilación
1.5	0.6666667	0.05	0.056243	3.5129475	0.987895	0.13365	3.8105	voluta	voluta
1.2	0.8333333	0.06	0.042048	2.2482864	0.914036	0.26895	4.5818	oscilación	voluta

tan β									
0.2									
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr (i)	Cr	lr*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
1	1	0.15	0.103745	1.56131	0.775873	0.1006	2.2403	descretamiento	descretamiento
1.5	0.6666667	0.05	0.041647	3.5129475	1.836854	0.5	8.2217	oscilación	oscilación
1.5	0.6666667	0.07	0.058776	3.5129475	1.546196	0.22522	5.2343	oscilación	oscilación
1.5	0.6666667	0.1	0.086228	3.5129475	1.276563	0.20337	3.4596	voluta	voluta
1.7	0.5882353	0.05	0.043289	4.5121859	2.041896	0.48878	8.6773	oscilación	oscilación
1.7	0.5882353	0.06	0.05248	4.5121859	1.854492	0.50956	6.8949	oscilación	oscilación
1.7	0.5882353	0.08	0.070869	4.5121859	1.59586	0.25293	4.6847	oscilación	voluta

tan β									
0.33333									
T (s)	frec (Hz)	H (m)	Hi (m)	Lo (m)	lr (i)	Cr	lr*	tipo de rotura teórica	tipo de rotura presentada
0.6	1.6666667	0.07	0.026845	0.5620716	1.525232	0.95014	10.609	no existe	no rompe
1.05	0.952381	0.14	0.107296	1.7213443	1.33511	0.04936	2.9457	voluta	voluta
1.2	0.8333333	0.14	0.109941	2.2482864	1.507373	0.03644	3.126	voluta	voluta
1.2	0.8333333	0.15	0.115951	2.2482864	1.467787	0.02752	2.9567	voluta	voluta
1.5	0.6666667	0.05	0.038209	3.5129475	3.196158	0.33521	14.083	no existe	no rompe
1.69	0.591716	0.13	0.111884	4.4592575	2.104367	0.15012	4.0165	oscilación	voluta
1.7	0.5882353	0.05	0.039287	4.5121859	3.57227	0.52159	15.379	no existe	no rompe
1.7	0.5882353	0.08	0.064017	4.5121859	2.798469	0.59876	8.2609	oscilación	oscilación
2	0.5	0.05	0.038568	6.24524	4.241645	0.16943	17.93	no existe	no rompe
2	0.5	0.08	0.062686	6.24524	3.327083	0.29679	9.3855	oscilación	oscilación
2	0.5	0.1	0.071884	6.24524	3.106939	0.31235	7.8993	oscilación	oscilación

Tabla IV.27 Valores propuestos del número de Iribarren para taludes porosos

TIPO DE ROTURA	NÚMERO DE IRIBARREN
DESCRESTAMIENTO (SPILLING)	$I_r^* < 2.9$
VOLUTA (PLUNGING)	$2.9 < I_r^* < 4.0$
OSCILACIÓN (SURGING)	$4.0 < I_r^* < 9.5$
NO EXISTE ROTURA	$I_r^* > 9.5$

Ahora, en cuanto al cálculo de la altura de ola rompiente se propone realizar este cálculo con el criterio de Komar

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{0.563}{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{1/5}} \quad (4.5)$$

ya que se como se vio en el capítulo anterior el error cuadrático medio (ECM) para el caso de ambos taludes fue el mas pequeño de todos (ECM=0.0002522 para e=2" y ECM=0.0002822 para e=6"). Lo cual se confirma en la Figura IV.26 donde las alturas de ola rompiente medidas en laboratorio y las alturas de ola rompiente calculadas con este criterio tienen mejor correspondencia que con cualquier otro de los criterios mencionados aquí.

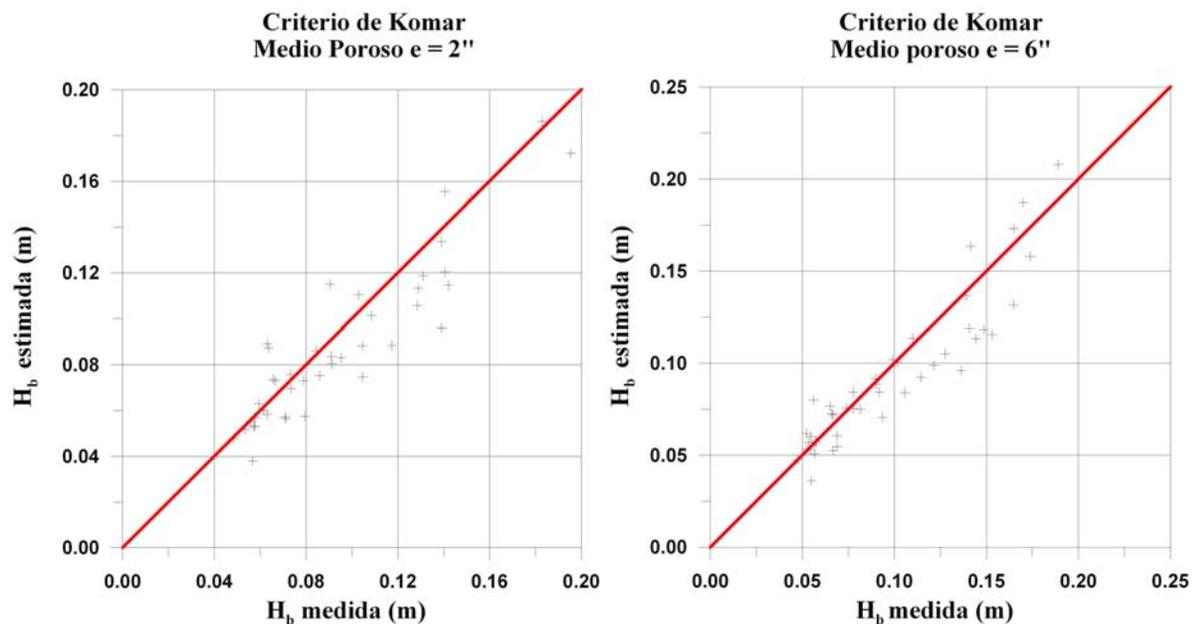


Figura IV.26 Ajuste del criterio de Komar con los datos de laboratorio en los dos espesores de medio poroso

Conclusiones y Futuras líneas de trabajo

*“El que no ama la vida no la merece”
Leonardo Da Vinci*

Conclusiones y Futuras líneas de trabajo

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el canal de oleaje del instituto de ingeniería en relación con la rompiente del oleaje sobre talud impermeable y permeable. Se ensayaron un talud impermeable y dos taludes permeables con diferente espesor (2 y 6 pulgadas), y se realizó el cálculo del tipo de rompiente que se presentaría con base al número de Iribarren. Así mismo se efectuó el cálculo de la altura de ola rompiente con diversos criterios tomados del estado del arte, y se compararon con la altura de ola rompiente calculada en laboratorio.

Sobre el trabajo se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Para el talud impermeable el tipo de rompiente que se presentaba fue correctamente definido y calculado con el número de Iribarren que usualmente se utiliza. Sin embargo, para el caso de los taludes porosos no se tuvo la misma fortuna, sólo para los casos de los dos taludes con mayor pendiente (1:2, 1:1.5), el tipo de rompiente teórico y real tienen un buen ajuste, pero esto se debió a que en estos dos taludes las ondas que se presentaban eran en su mayoría estacionarias, es decir presentaban rotura oscilación o simplemente la rotura no existía.
- ✓ En cuanto a las alturas de ola rompiente calculadas se puede concluir al comparar los diferentes criterios utilizados en este trabajo y las alturas de ola rompiente estimadas en laboratorio que, para el caso de talud impermeable el criterio que mejor se ajusta es el criterio de Le Méhauté, y para los casos de los taludes porosos el criterio que mejor estima la altura de ola rompiente es el de Komar.
- ✓ Respecto a los coeficientes de reflexión que se presentan en los diferentes tipos de taludes, se puede decir que para los tres casos se observa una variación lineal con respecto al número de Iribarren, y llegan a un punto en el cual la tendencia es a hacerse un valor constante. También se pudo observar la gran influencia que tiene el coeficiente de reflexión en el tipo de rotura que se presenta debido al papel tan importante que juega el material del talud en la atenuación de energía.
- ✓ Para olas altas no es conveniente realizar el cálculo de la altura de ola rompiente con criterios que tomen en cuenta propiedades locales, tales como h_b o L_b , ya que para una profundidad de rompiente se presentan un rango amplio de alturas de ola rompientes.

Así mismo se realizó en este trabajo una propuesta para definir y calcular el tipo de rompiente y la altura de ola rompiente sobre un talud permeable. Sobre esto se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Aunque la fórmula propuesta para calcular el número de Iribarren propuesto (Ir^*) fue desarrollada empíricamente, presenta un buen ajuste a los tipos de rompiente presentados en los taludes porosos, y ya toma en cuenta de manera indirecta mediante el coeficiente de reflexión y el espesor del medio poroso el tipo de material en el que se presenta la rompiente.
- ✓ También podemos decir que para el caso del talud de espesor de 6 pulgadas hubo que realizar un reajuste de los rangos del número de Iribarren, el cual se concuerda bastante bien a los datos de laboratorio, y en el que ya no se toma en cuenta el tipo de rotura colapso, esto debido a que no se presentó en ningún caso para este talud.
- ✓ Para ambos taludes porosos se definió que el criterio de Komar era el más adecuado para calcular la altura de ola rompiente, ya que en la comparación con los demás criterios fue el que menos error arrojó y por lo tanto mejor se ajustó a los datos experimentales.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Este trabajo presenta una propuesta para realizar una caracterización de la rompiente del oleaje en medios disipativos, para lo cual se utilizó grava como material de ensayo. Se propone un número de Iribarren propuesto para la definición de la rompiente y también se presentó un nuevo rango del número de Iribarren para espesores mayores a 6 pulgadas. Así mismo se plantea al criterio de Komar como la mejor opción para el cálculo de la altura de ola rompiente sobre taludes permeables. De aquí que se propongan las siguientes líneas de investigación:

- ✓ Ampliar la aplicabilidad de la propuesta aquí presentada realizando ensayos con diferentes tipos y espesores de material de playa o estructuras.
- ✓ Realizar ensayos con una mejor instrumentación con el fin de poder obtener de mejor manera las alturas de ola rompiente en laboratorio, así como algunos parámetros locales de interés como la profundidad a la que se presenta la rompiente.
- ✓ Analizar y comparar los resultados obtenidos en laboratorio con mediciones realizadas en playas instrumentadas con el fin de corroborar la aplicabilidad en la realidad de la propuesta aquí planteada.

Anexos

*“Lo que mas se necesita para aprender
es un espíritu humilde”
Confucio*

ANEXO 1

Resumen Teoría Lineal

La teoría lineal o teoría de la onda de pequeña amplitud fue desarrollada por Airy en 1845. Con diversas suposiciones, durante su deducción pueden eliminarse los términos no lineales de las ecuaciones fundamentales por considerarse que al ser valores muy pequeños, elevados a una potencia serán mucho menores, con lo que se hace fácilmente aplicable y se ajusta bastante bien al comportamiento del oleaje en aguas profundas. Está pensada fundamentalmente para olas de poco peralte.

Las demás suposiciones que hace esta teoría son:

- ✓ El fluido es homogéneo e incompresible (densidad constante).
- ✓ Tensión superficial despreciable.
- ✓ Efecto de Coriolis despreciable.
- ✓ Presión en la superficie de agua uniforme y constante (igual a cero).
- ✓ El fluido es ideal (no viscoso).
- ✓ No existe interacción entre ondas.
- ✓ Fondo horizontal, continuo y en algunas ocasiones impermeable.
- ✓ La amplitud de la onda es pequeña respecto a la profundidad, e invariable en el tiempo y espacio.
- ✓ Las ondas tienen una gran longitud respecto a la amplitud.
- ✓ EL flujo es irrotacional.
- ✓ Las ondas son bidimensionales.
- ✓ El período es constante.

Muchas de las teorías que tratan de explicar y modelar el comportamiento del oleaje tienen su fundamento en la teoría lineal. Por esto en las tablas siguientes se presenta el resumen de las expresiones que propone la teoría lineal para aguas someras, intermedias y profundas.

Propiedad	Expresión
Longitud de Onda	$L = T\sqrt{gh}$
Celeridad	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$
Celeridad de grupo	$C_g = C = \sqrt{gh}$
Velocidad de la partícula: Horizontal Vertical	$u = a\sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \sigma t)$ $w = a\sigma \left(1 + \frac{z}{h}\right) \text{sen}(kx - \sigma t)$
Aceleración de la partícula: Horizontal Vertical	$a_x = a\sigma \sqrt{\frac{g}{h}} \text{sen}(kx - \sigma t)$ $a_z = -a\sigma^2 \left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de la partícula: Horizontal Vertical	$\zeta = -a\sigma \sqrt{\frac{g}{h}} \text{sen}(kx - \sigma t)$ $\xi = a \left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos(kx - \sigma t)$
Presión Total (hidropática + dinámica)	$p = -\rho gz + \rho g\eta$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \sqrt{gh}$

Tabla A1 Resumen de las características del oleaje para aguas someras

Propiedad	Expresión
Longitud de Onda	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$
Celeridad	$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$
Celeridad de grupo	$C_g = nC = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$
Velocidad de la partícula: Horizontal Vertical	$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{agk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$ $w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{agk}{\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Aceleración de la partícula: Horizontal Vertical	$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = agk \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$ $a_z = \frac{\partial w}{\partial t} = -agk \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de la partícula: Horizontal Vertical	$\zeta = \int u dt = -a \frac{gk}{\sigma^2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$ $\xi = \int w dt = a \frac{gk}{\sigma^2} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Presión Total (hidropática + dinámica)	$p = -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]$

Tabla A2 Resumen de las características del oleaje para aguas intermedias

Propiedad	Expresión
Longitud de Onda	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
Celeridad	$C = \frac{gT}{2\pi}$
Celeridad de grupo	$C_g = \frac{C}{2}$
Velocidad de la partícula: Horizontal Vertical	$u = a\sigma e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ $w = a\sigma e^{kz} \text{sen}(kx - \sigma t)$
Aceleración de la partícula: Horizontal Vertical	$a_x = a\sigma^2 e^{kz} \text{sen}(kx - \sigma t)$ $a_z = -a\sigma^2 e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de la partícula: Horizontal Vertical	$\zeta = -ae^{kz} \text{sen}(kx - \sigma t)$ $\xi = ae^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Presión Total (hidropática + dinámica)	$p = -\rho g z + \rho g \eta e^{kz}$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \frac{1}{2} C$

Tabla A3 Resumen de las características del oleaje para aguas profundas

ANEXO 2

Método de Asunción Baquerizo (Separación de Onda incidente y Reflejada)

El método de Baquerizo para la separación de la onda incidente y la onda reflejada toma como base el método de Mansard y Funke, sólo agrega al método una manera de minimizar el error cuadrático medio.

Método de Mansard y Funke

Marcou, en 1969, propuso un método basado en mínimos cuadrados que permitía la descomposición del espectro medido en un espectro incidente y uno reflejado. Mansard y Funke, en 1980, siguiendo el trabajo de Marcou, aplicaron aquel método al caso de oleaje irregular partiendo de los registros tomados por tres sensores.

Admitiendo que la serie puede escribirse de la forma:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N B_j^m e^{-i\omega_j t} \quad (\text{A2.1})$$

siendo B_j^m los coeficientes complejos de Fourier de la función $\eta_m(t)$ y que el oleaje puede escribirse como:

$$\eta(x_m, t) = \sum_{j=1}^N \left(z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m} \right) e^{-i\omega_j t} \quad (\text{A2.2})$$

se tiene que verificar para cada frecuencia angular ω_j :

$$\varepsilon_j^m = z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m} - B_j^m = 0 \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A2.4})$$

Puesto que las funciones ε_j^m no serán, en general nulas, a causa de los errores cometidos en las mediciones debidos a ruidos y aspectos no lineales en sensores y sistema de adquisición de datos, efectos no lineales de la propagación del oleaje, efectos viscosos, etc. Mansard y Funke proponen minimizar la función:

$$E_j^* = \sum_{m=1}^3 \left[\varepsilon_j^m (z_I^j, z_R^j) \right]^2 \quad (\text{A2.5})$$

definida como la suma de los cuadrados de los errores en cada uno de los tres sensores. Para ello derivan E_j^* con respecto a las variables complejas z_I^j y z_R^j . Es importante resaltar que la función E_j^* toma valores complejos.

El problema con este criterio de minimización es que en el campo complejo no se puede definir la relación de orden total “ser menor que”, es decir, es imposible ordenar los números complejos. Por esto, desde un punto de vista estrictamente matemático la operación de minimización realizada por Mansard y Funke no es correcta y desde un punto de vista físico no puede ser interpretada.

Método de minimización del error medio cuadrático

En un sistema de coordenadas (x,y,z) , se considera un tren de ondas irregular que incide sobre una estructura formando un ángulo θ con la dirección negativa del eje x . Sean $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_M(t)$ los registros temporales de la superficie libre del agua medidos simultáneamente en M puntos distintos $x_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$. Se supone, sin perder con ello generalidad, que el nivel medio del agua coincide con el plano $z = 0$, de esta forma la media de las series es nula.

Sea $x_{m1} = (x_{m1}, y_{m1})$ la posición relativa del m -ésimo al primer sensor:

$$x_{m1} = (x_1 - x_m, y_1 - y_m) \quad (\text{A2.6})$$

e $I_1 = (t_0, t_0 + D_T)$ siendo t_0 el instante en el que se comienza a medir el oleaje y D_T la duración de los registros.

Fijado $x = x_m$, la superficie libre, $z = \eta(x, t)$, es una función real dependiente del tiempo:

$$z = \eta(x_m, t) = \eta_m(t) \quad (\text{A2.7})$$

Si se supone que $\eta_m(t)$ es una función continua en I_1 y periódica de período D_T , puede aplicarse el Teorema de Weierstrass para polinomios trigonométricos, que afirma que para cualquier $\varepsilon > 0$ existe un único polinomio trigonométrico de grado N , es decir, de la forma:

$$T_N^m = \sum_{j=1}^N \left(a_j \cos \frac{2\pi jt}{D_T} + b_j \text{sen} \frac{2\pi jt}{D_T} \right) \quad (\text{A2.8})$$

que verifica:

$$\left| \eta_m(t) - T_N^m(t) \right| < \varepsilon \quad \forall t \in I_n \quad (\text{A2.9})$$

siendo $I_n = (t_0 + (n-1)D_T, t_0 + nD_T)$ $n = 1, 2, 3, \dots$. Esto es, $T_N^m(t)$ converge a $\eta_m(t)$ cuando $N \rightarrow \infty$. Además, el Teorema de Fejer y De la Vallé Poussin asegura que la convergencia no es sólo puntual, sino que es uniforme. Más aún, este polinomio trigonométrico de grado N , T_N^m , lo que quiere decir que cualquier polinomio $p \in T^N$ distinto de T_N^m es tal que:

$$\left\| \eta_m - T_N^m \right\|_{\infty} < \left\| \eta_m - p \right\|_{\infty} \quad (\text{A2.10})$$

donde $\left\| \cdot \right\|_{\infty}$ es la norma del máximo, definida como:

$$\left\| f \right\|_{\infty} = \max_{t \in I_n} |f(t)| \quad (\text{A2.11})$$

Si definimos $B_j^m = a_j^m - ib_j^m$ se puede expresar el desarrollo en serie de Fourier de $\eta_m(t)$ de la siguiente manera:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N B_j^m e^{-i\omega_j t} \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A2.12})$$

siendo $\omega_j = \frac{2\pi j}{D_T}$ $j = 1, 2, \dots, N$.

Por otro lado se supone que el oleaje irregular se puede expresar como la superposición de un número finito de ondas lineales que inciden y son reflejadas por la estructura. Cada una de ellas tiene su propia amplitud, fase y frecuencia diferente,

$$\eta_m^{(T)}(t) = \eta^{(t)}(x_m, t) = \sum_{j=1}^N \left[z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{-i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} \right] e^{-i\omega_j t} \quad (\text{A2.13})$$

donde:

$$k_{jx}^m = k_j^m \cos \theta; \quad k_{jy}^m = k_j^m \sin \theta \quad (\text{A2.14})$$

siendo k_j^m el número de onda correspondiente a la frecuencia angular ω_j y a la profundidad h_m . z_I^j y z_R^j representan las amplitudes complejas del oleaje incidente y reflejado respectivamente. Nótese que la incidencia del oleaje y la orientación de la estructura son con respecto al sistema considerado que es totalmente arbitrario.

Ya que el desarrollo en serie de Fourier de $\eta_m(t)$ es único, para cada frecuencia angular ω_j , debe verificarse:

$$z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{-i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} = B_j^m \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A2.15})$$

Siguiendo a Mansard y Funke se define la función error:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j^m(z_I^j, z_R^j) &= z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} - B_j^m \\ m &= 1, 2, \dots, M \quad j = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (\text{A2.16})$$

El objetivo del método es encontrar z_I^j y z_R^j , $j = 1, \dots, N$, sean lo más pequeño posible. Estas funciones nunca serán idénticamente nulas, ya que en ellas se engloban los errores debidos a ruido y aspectos no lineales de sensores y sistema de adquisición de datos, efectos no lineales de la propagación del oleaje, efectos viscosos, etc. Por ello este método trata de determinar los valores z_I^j, z_R^j que “minimicen” las funciones ε_j^m . Queda. Por lo tanto, por definir el concepto “minimizar” ε_j^m .

Es conveniente resaltar que ε_j^m se ha definido como una función dependiente de las variables complejas z_I^j, z_R^j , por lo que esta función toma valores complejos.

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

$$E_j = E_j(z_I^j, z_R^j) = \sum_{m=1}^M |\varepsilon_j^m|^2 \quad (\text{A2.17})$$

Puesto que E_j toma valores reales no negativos, tiene sentido matemático y físico buscar un punto $z_0^j = (z_I^j, z_R^j)$ que minimice la función E_j aunque z_I^j y z_R^j sean valores complejos.

La función E_j puede considerarse como una aplicación $E_j: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}$ que a cada punto

$$Z^j = \left(\Re\{Z_I^j\}, \Im\{Z_I^j\}, \Re\{Z_R^j\}, \Im\{Z_R^j\} \right) \quad (\text{A2.18})$$

hace corresponder $E_j(z_I^j, z_R^j)$. $\Re\{ \}$, $\Im\{ \}$ denotan, respectivamente, la parte real e imaginaria de un número complejo.

Si E_j tiene un mínimo, z_0^j , éste debe verificar:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_j}{\partial \Re\{Z_I^j\}} = 0; & \quad \frac{\partial E_j}{\partial \Im\{Z_I^j\}} = 0 \\ \frac{\partial E_j}{\partial \Re\{Z_R^j\}} = 0; & \quad \frac{\partial E_j}{\partial \Im\{Z_R^j\}} = 0 \end{aligned} \tag{A2.19}$$

Se ha demostrado que resolver (A2.19) equivale a resolver:

$$\frac{\partial E_j}{\partial z_I^j} = 0; \quad \frac{\partial E_j}{\partial z_R^j} = 0 \tag{A2.20}$$

Operando el sistema (A2.20) queda:

$$\begin{aligned} M \overline{z_I^j} + S_+ \overline{z_R^j} - B_I &= 0 \\ M \overline{z_R^j} + S_- \overline{z_I^j} - B_R &= 0 \end{aligned} \tag{A2.21}$$

siendo

$$\begin{aligned} S_+ &= \sum_{m=1}^M e^{2ik_x^j x_{m1}} & S_- &= \sum_{m=1}^M e^{-2ik_x^j x_{m1}} \\ B_I &= \sum_{m=1}^M \overline{B_j^m} e^{i(-k_x^j x_{m1} + k_y^j y_{m1})} & B_R &= \sum_{m=1}^M \overline{B_j^m} e^{i(k_x^j x_{m1} + k_y^j y_{m1})} \end{aligned} \tag{A2.22}$$

La solución de (A2.21) es:

$$\overline{z}_I^j = \frac{B_R M - B_I S_-}{M^2 - S_+ S_-}; \quad \overline{z}_R^j = \frac{B_I M - B_R S_+}{M^2 - S_+ S_-} \quad (\text{A2.23})$$

siempre que $M^2 - S_+ S_-$ no sea nulo, lo que ocurre cuando:

$$M + 2 \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^M \cos(2k_{jx}^m (x_{m1} - x_{n1})) \neq M^2$$

$$\sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^M \text{sen}(2k_{jx}^m (x_{m1} - x_{n1})) \neq 0 \quad (\text{A2.24})$$

Se ha demostrado que par aquellas frecuencias para las que el sistema (A2.21) tiene solución, el punto crítico es, en efecto, un mínimo estricto de E_j .

Existen dos limitaciones en la aplicación del método que se deben a la pérdida de coherencia entre las señales, y a que el sistema de ecuaciones (A2.21) no tiene solución para ciertas frecuencias.

Con respecto a la pérdida de coherencia se puede decir que este método que utiliza al menos, tres series temporales, precisa que existe entre ellas una buena correlación. Físicamente esto significa que las series registradas deben ser manifestaciones del mismo fenómeno. Una forma de verificar esta correlación es mediante la función de coherencia, $\gamma_{ij}(f)$, que se define como:

$$\gamma_{ij}(f) = \left(\frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A2.25})$$

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

Con respecto a la no existencia de solución se puede decir que los coeficientes de Fourier de los trenes incidente y reflejado, \overline{z}_I^j y \overline{z}_R^j , dados por la ecuación A2.23 resultan del cálculo del

cociente de dos determinantes. Cuando el denominador de A2.23 se anula. El sistema no tiene solución.

Estos aspectos pueden solucionarse colocando apropiadamente los sensores, teniendo en cuenta que para que exista coherencia entre señales es aconsejable que los sensores no estén muy alejados unos de los otros, y también, debe procurarse que las distancias entre los sensores verifiquen A2.24 y debe evitarse que estén uniformemente espaciados.

Referencias Bibliográficas

*“Los grandes espíritus siempre encontraron
la violenta oposición de las mentes mediocres”
Albert Einstein*

Referencias Bibliográficas

1. *Apuntes de la materia de Ríos y Costas*, 2005, Facultad de Ingeniería, UNAM.
2. Ávila A. (2002). “*Sobre la estabilidad hidrodinámica de pilas cilíndricas*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. Ávila A. (2004). “*Modelo no lineal de propagación de Tsunamis*”. Tesis de maestría, DEPI, UNAM.
4. Banner M.L. y Peregrine D.H. (1993). “*Wave Breaking in deep water*”. Annual Review of Fluid Mechanics. 25:373-97.
5. Baquerizo A. (1995). “*Reflexión del oleaje en playas*”. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del agua y del medio Ambiente, Universidad de Cantabria.
6. Boekelheide Z. (2003). “*Modeling Breaking Waves and Studying Amplitude Dependent Behaviour*”.
7. Dean R.G. y Dalrymple R.A. (2002). “*Coastal Processes with Engineering Applications*”. University of Cambridge Press, Cambridge, United Kingdom.
8. Dean R.G. y Dalrymple R.A. (1984). “*Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist*”. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol 2, World Scientific.
9. Demirbilek Z., Vincent L. (2002). “*Water Wave Mechanics*”. In: Demirbilek Z, Coastal Engineering Manual, Part II, Hydrodynamics, Chapter II-1, Engineering Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
10. Dingemans M. (1997). “*Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms*”. Part 1-Linear Wave Propagation. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 13. World Scientific.
11. Horikawa K. (1988). “*Nearshore dynamics and Coastal Processes*”. Part 1. Chapter 4. University of Tokio Press, Tokio, Japón.
12. Le Méhauté B. (1976). “*An introduction to hydrodynamics and water waves*”. Spriger-Verlag.

13. Longuet-Higgins M.S. y Dommermuth D.G. (1997). "*Crest instabilities of gravity waves. Part 3. Nonlinear development and breaking*". J. Fluid Mechanics, vol 336, pp 33-50.
14. Longuet-Higgins M.S. y Mitsuhiro T. (1997). "*On crest instabilities of steep surfaces*". J. Fluid Mechanics, vol 336, pp 33-50.
15. Losada I.J., Silva R., Losada M.A. (1996). "*3D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters*". Coastal Engineering, vol 28 p.p. 229-248.
16. Losada I.J., Silva R., Losada M.A. (1996). "*Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters*". Coastal Engineering, vol 28 p.p. 249-266.
17. Mendoza E.G. (2000). "*Criterios de diseño de espaldones en rompeolas de piezas sueltas*". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
18. Pedrozo A. (1999). "*Análisis Frecuencial y Temporal del Oleaje*". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
19. Peregrine D.H. (1983). "*Breaking Waves on Beaches*". Annual Review of Fluid Mechanics, 15:149-78.
20. Quiñones J.L. (2004). "*Análisis de ondas y reflexión en laboratorio*". Tesis de Licenciatura, UNAM.
21. Silva R. (2001). "*Apuntes del curso: Hidráulica Marítima*". DEPMI, UNAM.
22. Silva R., Salles P., Palacio A. (2002). "*Linear waves propagating over a rapidly varying porous bed*". Coastal Engineering, Vol. 44. p.p. 239-260.
23. Silva R. (2005). "*Análisis y descripción estadística del oleaje*". Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, UNAM.
24. Smith J.M. (2002). "*Surf Zone Hydrodynamics*". In: Dmirbilek Z, Coastal Engineering Manual, Part II, Hydrodynamics, Chapter II-4, Engineering Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
25. Tovar L.E. (2002). "*Diseño de Revestimientos para Obras de Protección Marítima*". Tesis de Licenciatura, UNAM.