

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE REFLEXIÓN DE OLEAJE Y  
EVOLUCIÓN DE PERFILES DE PLAYA EN  
CONDICIONES DE LABORATORIO**

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:

**RENÉ GERARDO GARCÍA VEGA**

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

**Dr. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



*A mis padres, por la vida, el apoyo y el amor*  
*A mi hermana, por acompañarme todo el camino*

## **AGRADECIMIENTOS**

*He pelado la buena batalla*

*He acabado la carrera*

*He mantenido la fe*

*2 Timoteo 4:7*

Al doctor Paulo Salles por su paciencia, sus enseñanzas y su amistad

A todos mis profesores, pero muy en especial a los Ingenieros *Luis Cesar Vázquez Segovia, Eduardo Morales, Álvaro Ortiz y Víctor Valdés*

A mis compañeros del grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, muy en especial, a Diana y Juan Carlos.

A mi abuelo *José Eduwiges García Santillán* por enseñarme que la vida es algo a lo que vale la pena aferrarse y por la que hay que ir hasta que suene la campana.

A mis dos abuelas y a todos mis tíos por cuidar de mi desde pequeño

A mi primo *Hiraam García* por la idea y por echarme porras cuando estaba en el anexo

A todos mis amigos de la *Facultad de Ingeniería* por acompañarme en todo momento dentro y fuera de la carrera: *Luis, Lorena, Marco Antonio, Gustavo, Toño Ríos, René, Cesar, Jackie, Marcia, Bárbara, Memo, Claudia, Rubén, Zamora, Ricardo, Bety, Armando, Jazmín, Gerardo, Eliu, Moguel, Celis, Felipe, Durán* y todos los que no aparecen en estas líneas, pero que siempre están presentes en mi pensamiento.

A *Diego, Luis Carlos, Mauricio y Jesus* por ser los mejores amigos que alguien puede encontrarse entre aulas, exámenes y profesores, por ser parte de lo que soy, por el apoyo y por su amistad.

A mis coaches *Cesar Velasco y Alejandro Evangelista* por mostrarme que el juego que sigue dura más y que se juega de la misma forma

A *Cesar Ortiz* por ser mi mejor amigo, por estar conmigo en todo momento que lo he necesitado, por apoyarme, por sufrir y reír conmigo y por darle la vida esa chispa de gracia. Y aunque ya no uso casco donde pueda poner tu número, lo pongo en la siguiente hoja.

A la *Universidad, a Dios y a México.*



# Índice

Índice .....	3
1. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Metodología.....	9
1.4 Alcances y limitaciones .....	9
1.5 Descripción de los capítulos.....	10
2. Procesos de Transformación del Oleaje .....	15
2.1 Principales parámetros para la caracterización de una ola .....	15
2.2 Oleaje.....	16
2.2.1 Fuerzas generadoras y restauradoras .....	16
2.2. Procesos de transformación del oleaje .....	17
2.2.1 Refracción.....	17
2.2.2 Difracción .....	18
2.2.3 Reflexión .....	19
2.2.4 Rotura .....	20
3. Playas.....	23
3.1 Introducción.....	23
3.2 Zonificación de la playa .....	25
3.2.1 Zona de transformación del oleaje .....	25
3.2.2 Zona de rotura.....	26
3.2.3 Zona de ascenso y descenso .....	26
3.3 Perfil de playa.....	27
4. Interacción Entre Oleaje y Fondo Móvil .....	31
4.1 Interacción Flujo - Sedimento .....	31
4.2 Morfología General de la Playa y sus Variaciones.....	32
4.2.1 Pendiente de la Playa.....	33
2.2.4 Formación de Bermas .....	34
5. Validación Experimental .....	39
5.1 Descripción del laboratorio .....	39
5.1.1 Características del canal de Oleaje .....	40
5.1.2. Especificaciones del generador de oleaje .....	41
5.1.3. Equipo de medición.....	41
5.2 Mediciones y análisis experimentales .....	42
5.2.1 Descripción del experimento .....	42
5.2.2 Mediciones .....	44
6. Resultados.....	49
6.1 Clasificación de los perfiles.....	49
6.1.1 Clasificación por el tipo de rotura .....	49
6.1.2 Clasificación según Short.....	50
6.2 Análisis de la Reflexión.....	54
6.2.1 Separación de las ondas incidente y reflejada .....	54
6.2.2 Interpretación de resultados.....	57
6.3 Evolución de los perfiles .....	63
7. Conclusiones.....	71
8. Bibliografía.....	75

## Índice de Figuras

Figura 2-1 - Características de una onda .....	15
Figura 2-2 - Refracción del oleaje en la línea costera .....	18
Figura 2-3 - Efecto de la difracción debido a la presencia de un rompeolas.....	19
Figura 2-4 - Reflexión del oleaje debido a la presencia de un rompeolas.....	19
2-6 - Tipo de rotura del oleaje (SPM, 1984) .....	20
Figura 3-1 - Zonas de una playa .....	25
Figura 3-2 - Tipos de rotura.....	28
Figura 4-1 - Flujos turbulentos con perfil logarítmico sobre fondo granular.....	32
Figura 5-1 - Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM.....	40
5-2 - Equipo de medición. Izquierda: micro propela, centro: ADV, Derecha: sensores de nivel .....	42
Figura 5-3 - Preparación del canal de oleaje usado en el estudio.....	43
6-1 - CR vs. Ir para exp. 18 a 22 .....	59
6-2 - CR vs. Ir para exp. 1 a 5 .....	59
6-3 - CR vs. Ir para exp. 6 a 11 .....	60
6-4 - CR vs. Ir para exp.126 a 17 .....	60
6-5 - CR vs. $H_{RMS}$ i para exp.18 a 22.....	61
6-6 - CR vs. $H_{RMS}$ i para exp.1 a 5.....	61
6-7 - CR vs. $H_{RMS}$ i para exp.4,5,10,11,21,22 .....	62
6-8 - CR vs. $H_{RMS}$ i para exp.3,8,9,14,15,19,20 .....	62
Figura 6-9 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 1 y 17.....	64
Figura 6-10 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 2 y 19 .....	64
Figura 6-11 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 14 y 18 .....	65
Figura 6-12 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 13 y 15 .....	65
Figura 6-13 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 16 y 22 .....	66

## Índice de Tablas

Tabla 5.1 - Características de los experimentos .....	44
Tabla 6.1 - Rango de valores del número de Iribarren para los diferentes tipos de rotura .....	49
Tabla 6.2 - Características de los experimentos y su respectivo número de Iribarren ...	50
Tabla 6.3 - Velocidad de sedimentación a partir del parámetro de Shields modificado	52
Tabla 6.4 - Valores del parámetro $\Omega$ para los diferentes experimentos .....	53
Tabla 6.5 - Clasificación de los perfiles en base al parámetro $\Omega$ .....	53
Tabla 6.6 - Resultados de la reflexión en el grupo de sensores pegados a la pala generadora .....	55
Tabla 6.7 - Resultados de la reflexión en el fondo plano (ZONA 2) .....	56
Tabla 6.8 - Resultados de la reflexión en el perfil de playa (ZONA 3).....	57
Tabla 6.9 - Resultados de la reflexión por zona para cada experimento).....	58
Tabla 6.10 - Características de los experimentos de evolución.....	63
Tabla 6.11 - Características de los experimentos con mayor deformación.....	66



# **Capítulo 1**

## ***Introducción***

---

---

## 1. Introducción

### *Antecedentes*

En la naturaleza, cuando el oleaje se propaga sobre la costa sufre una serie de modificaciones debidas a diversos fenómenos, a saber, reflexión, someramiento, refracción, difracción y rotura. Así mismo, el fondo también experimenta esfuerzos que pueden resultar en la movilización y transporte de sedimentos, lo cual a la larga determina el estado morfológico de una playa. Estas transformaciones de oleaje generan a su vez corrientes que son las que ultimadamente transportan los sedimentos puestos a disposición por la fuerza del oleaje. En este sentido, el fenómeno de la reflexión es uno de los más importantes en cuanto a su influencia en la hidrodinámica costera y su capacidad de expulsar sedimento de la zona playera hacia el mar. La reflexión se debe a dos situaciones básicas: cambio significativo en la profundidad en una playa y la existencia de obstáculos, sean estos naturales o artificiales.

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

De todas las transformaciones que sufren las olas el fenómeno de la reflexión ha sido el que en los últimos años ha recibido menos atención en lo que se refiere a su cuantificación. En estructuras costeras se ha analizado su comportamiento, pero este análisis no se ha extendido a playas. En términos generales, se aceptaba anteriormente que la mayor parte de la energía que incide sobre una playa se disipa totalmente en la zona de rompientes y el estudio de la reflexión no ha sido incluido en la descripción de la dinámica en la zona costera.

Iribarren y Nogales, (1949, citado en Baquerizo, 1995) introdujeron el número de Iribarren,  $I_r = \tan \beta / \sqrt{H/L_0}$ , como un indicador de cuándo ocurre la reflexión o rotura en una rampa, siendo  $H$  la altura de ola incidente,  $L_0$  la longitud de onda en aguas profundas y  $\tan \beta$  la pendiente de la rampa. Propusieron que el régimen de la reflexión tenía lugar para  $I_r > 2.3$ . Posteriormente, Battjes en (1974, citado en Baquerizo, 1995) demostró que  $I_r$  también indicaba la forma de romper de las olas, estableciendo tres tipos de rotura: en descrestamiento ( $I_r < 1.0$ ), en voluta ( $1.0 < I_r < 2.5$ ), y en colapso u oscilación ( $I_r > 2.5$ ). Es más, Battjes, 1974, y Guza y Bowen, (1975, citado en Baquerizo, 1995) apoyándose en ensayos de laboratorio de la propagación de un tren monocromático sobre un talud impermeable, confirmaron que el grado de reflexión de una playa varía con el régimen de rotura. Losada y Jiménez – Curto, (1981, citado en Baquerizo, 1995) demostraron que las características del oleaje (rotura, reflexión, ascenso y descenso del nivel medio) en una rampa dependen principalmente del número de Iribarren,  $I_r$ .

Desde el trabajo de Miche, (1951, citado en Baquerizo, 1995) la mayor parte de la investigación relacionada con el fenómeno de la reflexión se basa en la hipótesis de Miche que afirma que la capacidad de un talud (y consecuentemente de una playa) de reflejar energía es limitada, depende de su geometría (ángulo del talud) y está determinada por un peralte crítico:  $(H_0/L_0)_c$ . El exceso de energía se supone que es disipada por rotura. Por tanto la hipótesis de Miche da como resultado un coeficiente de reflexión teórico de la siguiente forma:

$$R_M = \begin{cases} \frac{(H_0/L_0)_c}{H_0/L_0} & \text{Para } (H_0/L_0)_c \leq H_0/L_0 \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1.1)$$

donde  $H_0/L_0$  es el peralte de la ola en aguas profundas (la razón entre la altura y la longitud de onda), el peralte crítico es una función de la pendiente de la playa,  $\tan \beta$ :

---

---

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)_c = \sqrt{\frac{2\beta}{\pi} \frac{\sin^2 \beta}{\pi}} \quad (1.2)$$

Según Miche el coeficiente de reflexión real es menor que el teórico, debido a los efectos de viscosidad, rugosidad y permeabilidad del fondo. Así, recomienda multiplicar  $R_M$  por un coeficiente menor que 1 según los efectos de viscosidad y disipación por fondo indicados.

La hipótesis de Miche permite considerar la onda sobre la playa como la superposición de una onda estacionaria que corresponde a la formada por la reflexión de una onda con peralte crítico y otra progresiva que rompe y se disipa desapareciendo al llegar a la línea de costa. A medida que el peralte de la onda incidente crece, el punto de rotura se desplaza mar adentro sin afectar al peralte de la onda reflejada.

Tatavarty y Huntley (1987, citado en Baquerizo, 1995), analizaron los datos de campo de dos playas de perfiles muy distintos: una con pendiente casi constante y otras con varias barras. Demostraron la dependencia funcional entre el coeficiente de reflexión y la frecuencia de la onda incidente para una pendiente de playa dada. Además, en los últimos años se han realizado varios estudios experimentales para evaluar la reflexión en playas tanto en laboratorio como en la naturaleza. Entre ellos cabe citar a Nelson y Gonsalves (1990, citado en Baquerizo, 1995), Darbyshire (1991, citado en Baquerizo, 1995) y Smith y Hughes (1993, citado en Baquerizo, 1995).

De este breve resumen puede concluirse que la energía total reflejada, bien desde una estructura costera, bien desde una playa, decrece al aumentar la altura de ola o la frecuencia y crece al aumentar la pendiente. El coeficiente de reflexión representa la fracción de energía incidente que es devuelta hacia el mar y dicha energía tiene una influencia apreciable sobre los procesos morfodinámicos de las playas

En efecto, un aspecto importante de una playa es su dinamismo. Su continua pérdida de sedimento granular responde a las siempre cambiantes olas y a las

corrientes cercanas a la costa y un relativo equilibrio se logra al tener un aporte de sedimento de zonas contiguas similar a dicha pérdida. La playa puede adquirir un equilibrio morfológico en el laboratorio donde las olas tienen altura y periodo constante, pero en playas naturales, las condiciones cambiantes de oleaje y mareas rara vez permiten que ocurra este equilibrio. De cualquier forma, la mejor forma de entender los perfiles de playa es en términos del semi – equilibrio y cómo es este determinado por las olas, mareas y el sedimento de la playa. Finalmente, un completo entendimiento depende del conocimiento del proceso del transporte de sedimentos en la sección transversal de la playa

Es importante considerar el perfil de una playa como una entidad morfológica natural que causa que las olas rompan y se disipe su energía. Las olas pueden llegar a la playa con una gran cantidad de poder, teniendo el potencial de llevar caos a las comunidades. Cuando la playa encara las olas acrecentadas, esta responde disminuyendo su pendiente, cambiando la zona de rompiente mas lejos de la playa, de esta forma se aumenta la disipación de las olas antes de que lleguen a la costa.

Este aplanamiento de la playa en condiciones de tormenta no debe ser confundido con erosión, lo que implica una permanente pérdida de material. En cambio, con esta alteración de la pendiente, la playa puede actuar mejor como un amortiguador protegiendo acantilados y los diversos elementos de la costa del intenso ataque de las olas, previniendo así la verdadera erosión. La habilidad de la playa de ajustarse a las fuerzas a que es sometida, la hace un efectivo método natural de defensa de la costa.

## **Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es:

- Analizar la reflexión en un perfil de playa sometido a trenes de olas con diferentes características.

---

Los objetivos particulares son:

- Diseñar un experimento de laboratorio para el estudio de la reflexión y la evolución playera
- Medir las variaciones de los perfiles que se presentan en los diferentes experimentos así como la reflexión del oleaje
- Analizar los datos

### ***Metodología***

Para estudiar la reflexión del oleaje y la evolución de los perfiles de playa, se estudiarán los datos obtenidos de una serie de experimentos llevados a cabo en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM con un perfil inicial de playa cercano al teórico de equilibrio. En los experimentos varía la profundidad del agua, la altura y el periodo del oleaje.

Con los datos obtenidos se estimó la incidencia y reflexión del oleaje sobre el perfil de playa para poder analizar su evolución en diferentes condiciones. Esto último usando series de tiempo de nivel de la superficie libre en diferentes zonas del canal para estimar la reflexión, haciendo uso de un programa de computadora, basado en la teoría de la reflexión (Baquerizo. 1995) y de las mediciones de las elevaciones del perfil de playa para comparar su evolución en cada experimento.

### ***Alcances y limitaciones***

El pequeño tamaño del modelo permite la fácil recolección de datos durante todos los experimentos a costos reducidos, mientras que la recolección de datos en campo es mucho más cara y difícil.

Los resultados que se obtengan en este estudio pueden ser usados como referencia para trabajos futuros de laboratorio, además que pueden ser aplicables a casos reales donde se necesita conocer la evolución de algún perfil de playa con

condiciones semejantes a las del laboratorio, o con condiciones equivalentes. Sobre esta misma línea, al conocer la reflexión que se genera en los experimentos, será posible, saber que tipo de obras de defensa serían útiles para ciertos lugares.

Las limitaciones más notables del estudio son debidas a las condiciones del laboratorio y a los prototipos a los que se quieren aproximar los experimentos tales como:

- **Efectos de escala:** Si el prototipo es mucho más grande que nuestro modelo y no es posible simular todas las variables en correcta relación unas con otras.
- **Efectos de laboratorio:** Surgen de la inhabilidad de crear condiciones realistas y de las condiciones de frontera del proceso que se está simulando.
- No todas las condiciones de frontera y fuerzas que actúan en la naturaleza son tomadas en cuenta en el modelo. Por ejemplo, los esfuerzos cortantes sobre la superficie del agua ocasionados por el viento pueden generar corrientes cerca de la costa, lo que está ausente en cualquier modelo que incluye solo generación mecánica de olas.

### ***Descripción de los capítulos***

#### **Capítulo 1. Introducción**

En este capítulo se dan referencias de las investigaciones que preceden a este trabajo, así como las teorías de estudio de la reflexión más importantes. También se habla de los procesos evolutivos de los perfiles de playa, los cuales serán tratados en los capítulos 3 y 4.

#### **Capítulo 2. Procesos de transformación del oleaje**

En este capítulo se da una descripción general de los procesos de transformación del oleaje, los cuales son: la refracción, la difracción, la reflexión y la rotura, así

---

---

como las características de las señales como son su altura de ola, periodo, etc. Se comenta igualmente sobre las fuerzas que generan el oleaje.

## **Capítulo 3. Playas**

En este capítulo se da un enfoque general de lo que es una playa, así como su definición y los principales parámetros que se consideran como las dimensiones de la playa. Además se define el perfil de playa y su evolución debida al oleaje.

## **Capítulo 4. Interacción entre oleaje y fondo móvil**

En este capítulo se estudia la relación entre los perfiles de la playa y el oleaje, la evolución de los perfiles y la formación de bermas, así como la interacción entre el flujo y los sedimentos.

## **Capítulo 5. Validación experimental**

En este capítulo se da una descripción general del laboratorio, el canal de oleaje donde se realizaron los experimentos, los instrumentos de medición y de generación, así como la descripción de los experimentos y las mediciones realizadas.

## **Capítulo 6. Resultados**

En este capítulo es donde en base a la información obtenida de los experimentos, se hace un análisis de las mediciones de la arena y alturas de ola para poder clasificar los perfiles y estimar la reflexión.



## **Capítulo 2**

### ***Procesos de Transformación del Oleaje***

## 2. Procesos de Transformación del Oleaje

### *Principales parámetros para la caracterización de una ola*

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

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

Los parámetros citados se muestran en la figura 2.1, donde se presenta una onda periódica que se propaga en la dirección  $x$ .

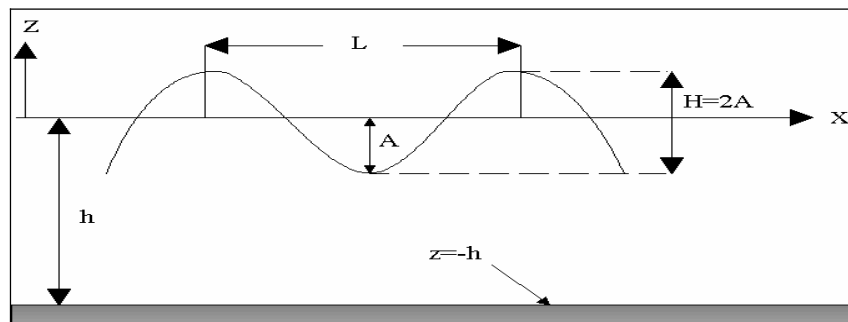


Figura 2-1 - Características de una onda

## **2.2 Oleaje**

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

Dicha perturbación, se denomina oleaje, el cual siempre está presente de una u otra forma y su comportamiento, al menos para el caso del oleaje generado por viento, es considerado totalmente aleatorio.

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

### **2.2.1 Fuerzas generadoras y restauradoras**

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

---

## **2.2. *Procesos de transformación del oleaje***

Durante su propagación hacia las costas, el oleaje experimenta una serie de transformaciones respecto a sus condiciones en aguas profundas. Estas modificaciones son debidas, entre otras causas, al cambio en el fondo y a la presencia de obstáculos naturales, como bajos o la misma línea de costa, o artificiales como escolleras, rompeolas, espaldones o instalaciones portuarias.

La predicción del oleaje, así 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 la disipación de energía y en ocasiones, cambios en la dirección de propagación.

### **2.2.1 Refracción**

Es el proceso de transformación del oleaje a través del cual el frente de ola tiende a hacerse paralelo a la línea de costa, cambiando de dirección debido a la variación de la batimetría. En otras palabras, la dirección de propagación del oleaje tiende a ser paralela, o tangente, a la pendiente del fondo marino, conforme la profundidad disminuye y la ola se acerca a la costa. En la práctica esta transformación es importante por las razones siguientes:

- En conjunto con el someramiento, la refracción tiene influencia en la altura y la distribución de la energía de la ola a lo largo de la costa.
- El cambio en la dirección de la onda y de las distintas partes de la onda (ver Figura 2.2), resulta en una convergencia o divergencia de la energía de la onda lo cual resulta en cambios de las fuerzas ejercidas por las ondas sobre las fronteras sólidas (costa, playa, estructuras, etc.)

- Influye en los cambios topográficos del fondo, por sus efectos en la erosión y depósito de sedimentos.



**Figura 2-2 - Refracción del oleaje en la línea costera**

### **2.2.2 Difracción**

La difracción de las ondas es un fenómeno que ocurre cuando la propagación del oleaje es interrumpido por un obstáculo, por ejemplo, un rompeolas, instalaciones portuarias, escolleras o pequeñas islas (ver Figura 2.3). El cálculo de los efectos de la difracción es importante, ya que influye sobre la distribución de la altura del oleaje, por ejemplo, en una bahía protegida o un puerto, se ve afectada su operabilidad, así mismo el apropiado diseño y localización de la entrada a un puerto para evitar el rebase y la resonancia requiere el conocimiento de los efectos de la difracción. Por esta razón el conocimiento de este proceso es de vital importancia en la planeación de instalaciones portuarias, instalaciones recreativas o marinas.

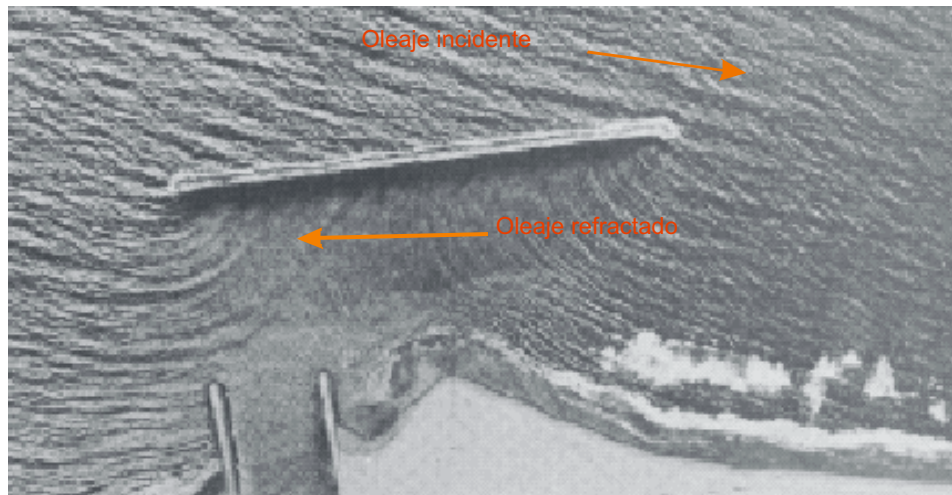


Figura 2-3 - Efecto de la difracción debido a la presencia de un rompeolas

### 2.2.3 Reflexión

El estudio de la reflexión es tan importante como los fenómenos antes descritos. Se refiere a la alteración de las características del oleaje al chocar con un obstáculo, el cual si es vertical y totalmente impermeable (como por ejemplo un muro) la reflexión es máxima pudiendo llegar a la resonancia, en cambio si el medio es permeable e inclinado (como por ejemplo una playa de arena) parte de la energía se disipa disminuyendo el efecto de la reflexión.



Figura 2-4 - Reflexión del oleaje debido a la presencia de un rompeolas

### 2.2.4 Rotura

Para el caso de la rompiente, los mecanismos que intervienen en este proceso del oleaje son complejos, esto ocurre cuando el peralte de la ola sobrepasa un cierto límite. La rotura de las ondas ha sido clasificada dentro de cuatro grupos, *Descrestamiento (Spilling)*, *Voluta (Plunging)*, *Colapso (Collapsing)* y *Oscilación (Surging)*. Los cuatro tipos de rotura pueden ocurrir en aguas someras, de acuerdo con la pendiente de la playa, pero solamente los tipos de rotura por descrestamiento y voluta se presentan también en aguas profundas.

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

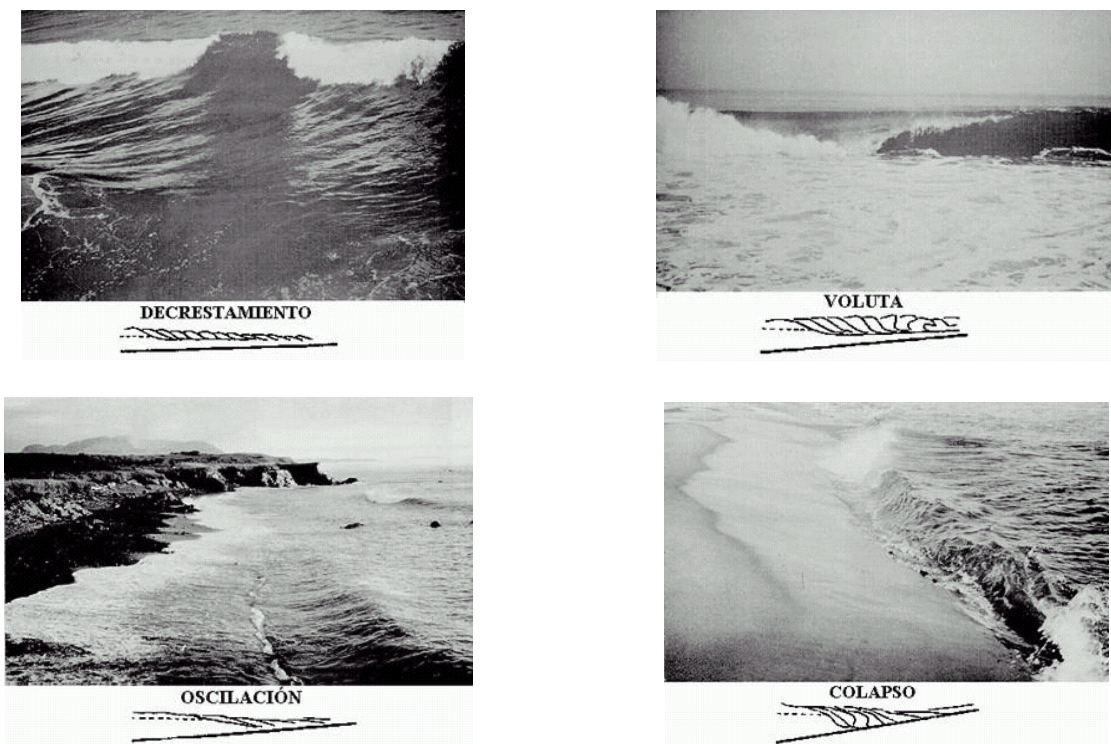


Figura 2-5 - Tipo de rotura del oleaje (SPM, 1984)

## **Capítulo 3**

### *Playas*



---

### 3. Playas

#### *Introducción*

Las playas se presentan en todas las líneas de costa de material sedimentario expuestas a oleaje. Están entre los sistemas físicos más dinámicos en la superficie de la tierra, y se presentan en líneas de costa donde existe suficiente sedimento para que las olas lo depositen sobre el nivel del mar

Mientras que la existencia de las playas depende en gran medida de las olas y el sedimento, su presencia es independiente de la mayoría de los demás procesos de la superficie, y en consecuencia se presentan en todas las latitudes, en todos los climas, en todos los rangos de marea y en costas de cualquier forma. Más allá de su existencia misma, las playas son sin embargo influenciadas y modificadas por otros procesos, particularmente mareas y vientos, y parámetros como el tamaño y tipo de sedimento, así como temperatura y composición química del agua.

En efecto, las playas pueden ser definidas de muchas formas; en todas ellas, dos ingredientes son necesarios: olas y sedimentos. La definición mas simple de una playa es “una acumulación de sedimentos transportados por las olas descansando entre la base modal de las olas, o profundidad de cierre, y el límite superior de la zona de swash.” La profundidad de cierre es la máxima profundidad en la cual las olas tienen una influencia apreciable en el fondo, y el límite de la zona de swash es el límite de la zona de terreno de acción subaérea del oleaje y transporte de sedimento. Mientras que esta definición incluye todas las playas, no toma en cuenta procesos adicionales y parámetros que tienen influencia sobre la playa, (transporte eólico, marea, variación del nivel del mar, sedimentología a escalas geológicas) ni define adecuadamente los subsistemas que existen dentro de los sistemas de playa.

La preservación de las playas y la preservación de las propiedades de la costa requiere de un entendimiento de los procesos que se llevan a cabo cerca de ellas: el movimiento de las olas, la generación de corrientes cerca de la costa, el movimiento del sedimento de la playa, y la resultante variación de la morfología de la playa. Investigadores en diferentes disciplinas han participado en el estudio de las playas,

lo cual nos ha llevado al presente entendimiento de ellas. Sin embargo existen diversos procesos y complejidades que todavía no se entienden adecuadamente para poder explotar sustentablemente los ambientes costeros, y en particular las playas.

El ingeniero de costas tiene la tarea de proteger nuestras costas de la erosión, mantener nuestras playas y al mismo tiempo, construir estructuras e infraestructura costera como embarcaderos, rompeolas y otras formas de puertos. Estas tareas a menudo son contradictorias; la construcción de embarcaderos u otras estructuras a menudo resultan en la destrucción de playas adyacentes e inclusive pueden afectar la línea de costa a muchos kilómetros de distancia. El ingeniero de costas debe anticipar esto y tratar de prevenir la destrucción a través de un entendimiento de los procesos básicos que se desarrollan cerca de la costa.

El estudio de las playas requiere de una variedad de conocimientos y herramientas para poder progresar. En efecto se han desarrollado modelos matemáticos para describir la hidrodinámica costera y la interacción de los flujos de agua con sus fronteras, sean estas sólidas (fondo marino o estructuras) o atmosféricas (superficie libre, donde se dan intercambios energéticos muy importantes para la hidrodinámica). A parte de dichos modelos, el ingeniero costero se apoya igualmente en mediciones directas de los procesos físicos, sea en ambientes naturales (playas reales), sea por medio de modelos físicos de laboratorio. En efecto, el investigador se enfoca por motivos de factibilidad y de “repetibilidad” en experimentos de laboratorio en los que se tiene mayor control sobre las olas y las condiciones de playa que las que pueden ser encontradas en playas con entorno en constante cambio. Los experimentos se llevan a cabo en canales o tanques donde una pala oscilante reemplaza al viento en la generación de las olas, y las mediciones de los parámetros físicos de interés han requerido del diseño de sensores de nivel, medidores de corriente, sensores ópticos de sedimentos suspendidos y toda una variedad de equipo que debe soportar el embate del oleaje y el contacto continuo con el agua.

## Zonificación de la playa

Las zonas de una playa pueden ser definidas en un espacio plano usando la Figura 3.1, y en tres dimensiones con la inclusión de la extensión de su costa.

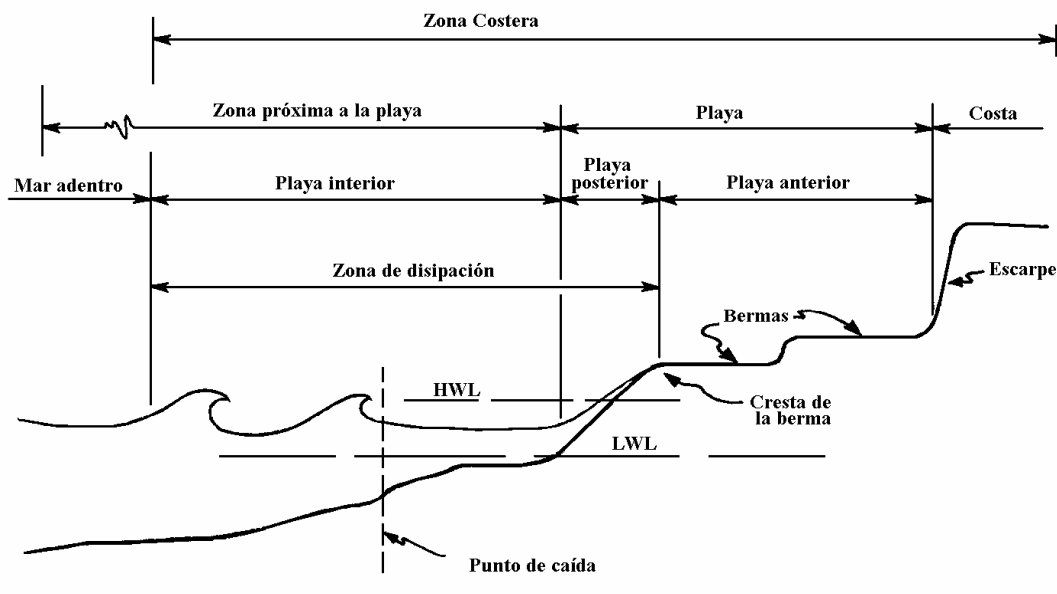


Figura 3-1 - Zonas de una playa

## Zona de transformación del oleaje

La zona de transformación del oleaje se encuentra entre la base modal del oleaje y el punto de ruptura y es también conocida como la zona cercana a la costa. Cuando las olas se acercan a la costa, comienzan a interactuar con el fondo lo suficiente para moverlo hacia la zona de costa. Este límite también es conocido como *profundidad de cierre*, y es definido como la profundidad debajo de la cual los cambios en el fondo no son detectables. La profundidad de cierre se incrementa conforme se incrementa la altura de ola y su periodo. Conforme las olas se mueven en esta zona, el decremento de profundidad resulta en un incremento en la interacción del oleaje con el fondo, propiciando una mayor velocidad y mayores movimientos orbitales que transportan más sedimento, de este modo se produce una pendiente mas pronunciada. Esta interacción también produce un rango predecible

de formas de fondo que van desde *ripples* y dunas hasta un fondo plano en la zona de ruptura.

### **Zona de rotura**

La zona de rotura se extiende desde el punto o área de ruptura hasta el punto donde la ola colapsa en la cara inferior de la playa. Es aquella parte cercana a la costa donde los procesos inducidos por el oleaje dominan el movimiento del sedimento. Es la zona más dinámica de la costa. En playas de laboratorio con oleaje regular la posición del punto de rotura es constante. En playas naturales con oleaje irregular el punto de rotura se mueve en función de la altura de ola incidente. Durante una tormenta la zona de rotura es más amplia que en condiciones de calma. La frontera en dirección a la playa de la zona de rotura es el punto más cercano a la costa que está sumergido durante el ciclo completo de la ola, este punto se encuentra aproximadamente en el nivel medio de la superficie libre del agua y depende de las mareas, y el viento. El límite hacia el mar de la zona de rotura se encuentra donde está la profundidad de cierre.

La zona de rotura es la más variable de las tres zonas y consiste en un amplio rango de procesos dinámicos relacionados con movimientos de las corrientes y el oleaje.

La transformación del oleaje en esta zona, el nivel del agua, y las corrientes que se generan cercanas a la costa deben ser calculadas para estimar un daño potencial debido a una tormenta, calcular la evolución de la línea de costa así como la evolución del perfil de playa para poder diseñar estructuras costeras e infraestructura.

### **Zona de ascenso y descenso**

La zona de ascenso y descenso es relativamente la zona más estrecha que se extiende desde el punto de colapso de la ola hasta la cara seca de la playa y el límite superior de acción del swash.

---

Los sistemas de playa por lo tanto, representan interacciones dinámicas a través del fondo inclinado que causan que las olas se peralten, rompan y finalmente disipen su energía. Todos estos procesos representan mecanismos a través de los cuales la energía de las olas es transformada de potencial a cinética y esa energía es transferida en parte al sedimento, en parte a una onda reflejada, y el resto se disipa en la rotura.

### ***Perfil de playa***

El perfil de una playa relaciona la altura, el ancho, la pendiente y el volumen de la playa, mientras que los perfiles secuenciales relacionan cualquier cambio en el tiempo. Estudios recientes identifican la relación entre la pendiente de la playa y el tamaño del grano. King (1972, citado en Short, 1999) expresó estos resultados en una grafica que mostraba como la pendiente de la playa decrece con tamaños de grano que decrecen e incrementa la energía de la ola.

El número de Iribarren relaciona la pendiente del talud,  $\tan \alpha$ , con el peralte del oleaje:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H / L_0}} \quad (3.1)$$

donde:

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

El número de Iribarren, que fue inicialmente propuesto como indicador de la rotura sobre un talud plano, Battjes (1974b), sirve asimismo como indicador del tipo de rotura.

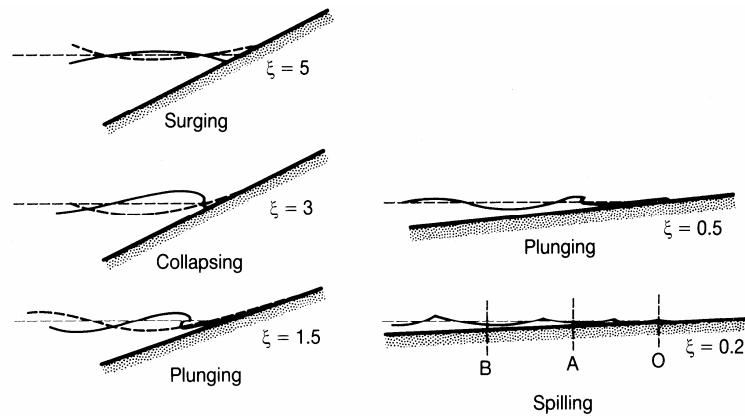


Figura 3-2 - Tipos de rotura

Los perfiles de playa pueden ser complejos debido a series de barras y depresiones. En general los perfiles son peraltados hacia la playa y presentan un progresivo decremento de pendiente conforme aumenta la profundidad mar adentro. Esta regularidad ha inspirado intentos por desarrollar expresiones matemáticas que describan la forma del perfil “tipo”, o perfil “de equilibrio”, con el cual comparar playas que se desean estudiar, o predecir perfiles de playas artificiales. Estas formulaciones pueden ser usadas entonces en análisis de la dinámica de las olas durante la transformación del oleaje, en reconocimientos de la generación de las corrientes y transporte de sedimentos, y en modelos de computadora de la evolución de la morfología, evolución y cambios de la línea de costa. La expresión del perfil de playa más común usada en aplicaciones ingenieriles es la derivada por Bruun (1954, citado en Komar, 1998) y Dean (1976, 1977, 1991, citado en Komar, 1998),

$$h = Ax^{2/3} \quad (3.2)$$

Donde  $h$  es la profundidad del agua quieta a una distancia horizontal  $x$  de la línea de costa, y  $A$  es un parámetro dimensional de forma, el cual ha sido empíricamente relacionado con el tamaño medio del grano del sedimento de la playa y a su correspondiente velocidad de sedimentación. Estos resultados debidos al valor de  $A$  gobiernan la pendiente del perfil. La pendiente de la playa también depende de las condiciones del oleaje, el peralte de la ola y la altura absoluta de la ola o energía del oleaje.

## **Capítulo 4**

### ***Interacción Entre Oleaje y Fondo Móvil***

## 4. Interacción Entre Oleaje y Fondo Móvil

### *Interacción Flujo - Sedimento*

La interacción flujo – sedimento puede ser representada por los esfuerzos cortantes en el fondo, que para el caso general, de flujos de corrientes y oleaje combinados, están dados por la siguiente ecuación:

$$\tau_b(t) = \{ \tau_{wm} \cos(\omega t + \varphi) + \tau_e \cos \varphi_{we}, \tau_e \sin \varphi_{we} \} \quad (4.1)$$

donde:

- $\tau_b$       Esfuerzos cortantes en el fondo
- $\tau_{wm}$     Esfuerzos cortantes máximos en el fondo
- $\omega$         Frecuencia angular de la ola
- $t$          Tiempo
- $\varphi$         Ángulo de los esfuerzos cortantes en el fondo
- $\varphi_{we}$     Ángulo de los esfuerzos cortantes debidos al oleaje
- $\tau_c$        Esfuerzos cortantes debidos a las corrientes

Debido a que la componente del oleaje  $\tau_{wm} \cos(\omega t + \varphi)$  y la componente de la corriente  $\tau_c$  están asociadas a perfiles de velocidad logarítmicos sobre el fondo, la velocidad combinada inmediatamente sobre el fondo es también logarítmica.

Para un fondo formado por material granular móvil, la condición de flujo físico en las inmediaciones de los granos individuales se explica en la *Figura 4.1*, donde el eje vertical es la distancia vertical desde el fondo,  $z$ , dividido entre el diámetro del sedimento,  $d$ . Recalcando que el perfil de velocidad logarítmica en esta región es meramente una extrapolación de las condiciones de flujo obtenidas mas allá de la frontera, es evidente que la actual resistencia experimentada por el flujo no es una fuerza uniformemente distribuida por unidad horizontal de área, es mas bien una suma de fuerzas de arrastre en los granos individuales, en donde la turbulencia y su carácter relativamente aleatorio juega un papel importante



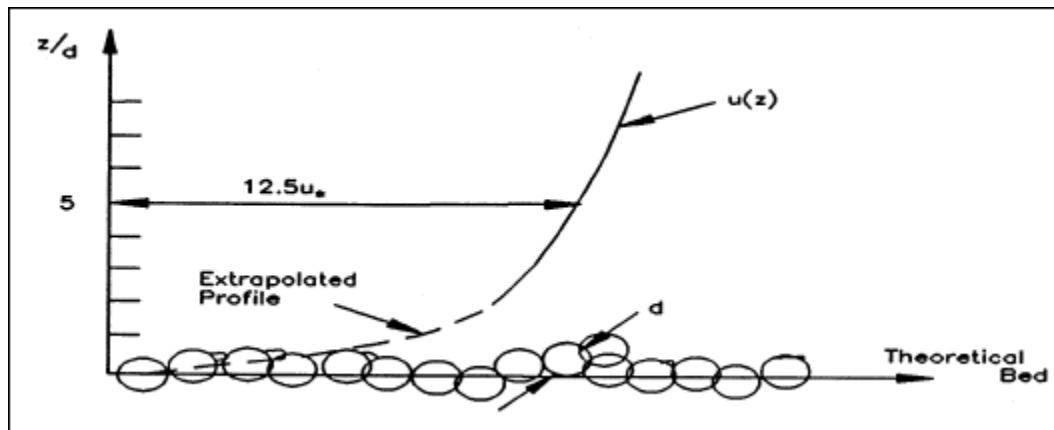


Figura 4-1 - Flujos turbulentos con perfil logarítmico sobre fondo granular

### ***Morfología General de la Playa y sus Variaciones***

Existen varios estudios sobre el perfil de playas, algunos llevados a cabo en playas naturales, y otros en laboratorios de oleaje artificial. Existen algunos factores indirectos que controlan la morfología del perfil, tales como el tamaño del grano del sedimento que determinan la pendiente de la playa.

La colección de repetidas investigaciones en el sitio, separadas meses o años entre una y otra, generalmente revela variaciones en el perfil. Las variaciones verticales son mayores en el área cercana a la costa, particularmente cuando se desarrollan sistemas de barras y depresiones. Hallermeier (1981, citado en Komar, 1998) examinó esta zona e intentó relacionarla con el clima de oleaje. La profundidad de cierre,  $h_c$ , la cual representa la profundidad en la cual ya no hay una variación importante del perfil de playa, está aproximadamente dada por:

$$h_c = 2.28H_e - 68.5 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right) \quad (4.2)$$

donde  $H_e$  es la altura de ola cerca de la costa debida a una tormenta que es solo excedida 12 horas al año, y  $T_e$  es el periodo asociado a esta altura de ola. Esto depende de la altura de ola, con un ajuste por el peralte de la ola. Birkemeier (1985,

---

citado en Short, 1998) encontró que si se remplazan los coeficientes de la ecuación (4.2) por 1.75 y 57.9, se obtiene un mejor ajuste de los datos. Birkemeier también notó que la simple proporcionalidad  $h_c = 1.57H_e$  es una predicción satisfactoria de la profundidad de cierre.

#### 4.2.1 Pendiente de la Playa

La pendiente de la playa está gobernada en gran medida por la asimetría del ascenso y descenso del oleaje y el resultado es un transporte de sedimento paralelo a la línea de costa. Debido a la socavación producida por el agua en la playa y el arrastre por fricción, el descenso del agua tiende a ser más débil que el ascenso en la playa. Esta asimetría mueve sedimento a la playa hasta que la pendiente es formada y esta es capaz de retener el sedimento arrastrado por el descenso del agua. Cuando la misma cantidad de sedimento es transportada hacia la playa y hacia el mar, la pendiente de la playa se vuelve constante y está en un estado de equilibrio dinámico.

Esta pendiente de equilibrio depende en parte de la cantidad de arena perdida por el socavamiento en la playa. La socavación es a su vez gobernada principalmente por el tamaño de grano del sedimento de la playa. El agua socava más rápidamente en arena que en grava. El resultado es tal que en playas de grava el descenso de la ola es debilitado, y por lo tanto la pendiente es mayor que en las playas compuestas por arena. En efecto, numerosos estudios de campo han demostrado cuantitativamente que las playas compuestas de partículas gruesas tienen pendientes más peraltadas, esto también ha sido mostrado en experimentos de laboratorio.

El índice de socavación es afectado por qué tan graduado es el sedimento, así como por el tamaño medio del grano. Por lo tanto, el graduado del sedimento tiene efecto en la pendiente de la playa. Krumbein y Graybill (1965, citado en Komar, 1998) demostraron que playas de materiales gruesos bien graduados tienen pendientes más peraltadas que playas de materiales gruesos mal graduados.

Muchos estudios han intentado desarrollar relaciones empíricas para la pendiente de la playa en términos del peralte de la ola, sugiriendo una dependencia con el periodo así como con la altura de ola. En experimentos en un canal de oleaje con arena de 0.22 mm. de diámetro, Rector (1954, citado en Komar, 1998) encontró que la pendiente de la playa sobre el nivel de agua quieta depende de la altura de ola en aguas profundas de acuerdo a la relación:

$$S_0 = 0.30 \left( \frac{H_\infty}{L_\infty} \right)^{-0.30} \quad (4.3)$$

donde:

$S_0$  es la pendiente de la playa sobre el nivel de agua quieta

$H_\infty$  es la altura de ola en aguas profundas

$L_\infty$  es la longitud de ola en aguas profundas

Esto indica que mientras mas grande es la altura de la ola, es menor la pendiente de la playa.

La dependencia inversa de la altura de ola en aguas profundas similar a la encontrada por Rector (1954) en la ecuación (4.3), la cual también depende del tamaño del grano del sedimento está dada por: (Paul D. Komar Beach Processes and Sedimentation. Second Edition)

$$S_0 = 0.25 \left( \frac{D}{H_\infty} \right)^{0.25} \left( \frac{H_\infty}{L_\infty} \right)^{-0.15} \quad (4.4)$$

#### 2.2.4 Formación de Bermas

La berma es una porción casi horizontal de la playa seca expuesta, es la porción más familiar al bañista. Está formada por sedimento atraído hacia la playa durante condiciones de oleaje bajo. La presencia de una berma no es siempre aparente en una playa de arena fina, donde es horizontal. Una berma distinta con una marcada

diferencia con respecto a la cara con pendiente de la playa se desarrolla mejor en playas de arena mediana a gruesa, y se desarrolla aun mejor en playas de grava.

Bagnold (1940, citado en Komar, 1998) demostró con estudios de laboratorio que la elevación de la berma coincide con el ascenso de la ola en la pendiente de la playa. La distancia de ascenso depende de la altura de ola  $H$  y como corresponde, Bagnold encontró una simple proporcionalidad:

$$\text{Elevación de la berma} = b H \quad (4.5)$$

donde:

$$b = \begin{cases} 1.68 & \text{para } D = 0.7\text{cm} \\ 1.78 & \text{para } D = 0.3\text{cm} \\ 1.8 & \text{para } D = 0.05\text{cm} \end{cases}$$

Se ha observado que el factor  $b$  tiene una pequeña dependencia del tamaño de grano del sedimento de la playa, siendo este mas pequeño para los tamaños mas gruesos desde que la percolación es mayor.

Takeda y Sunamura (1982, citado en Komar, 1998) exploraron de forma más profunda la participación del ascenso de la ola en la formación de bermas. Usando los resultados de Hunt (1959, citado en Komar, 1998) para la altura de ascenso de la ola como una función de las condiciones del oleaje, Takeda y Sunamura obtuvieron la relación para la elevación de la berma  $B_h$  :

$$B_h = 0.125 H_b^{5/8} (gT^2)^{3/8} \quad (4.6)$$

donde:

$H_b$  Es la altura de rompiente

$$H_b = 0.8 h \quad (4.7)$$

Bascom (1953, citado en Komar, 1998) notó que el crecimiento vertical de la berma depende principalmente de las olas más grandes que alcanzan la playa debido a que el ascenso de estas olas rebasa completamente la cresta de la berma y deposita la masa de arena sobre ella por lo que el crecimiento vertical es el más grande cuando se presentan mareas altas.

Se ha observado que las playas se erosionan de distintas formas dependiendo de las condiciones morfodinámicas de la zona de rotura y la playa. Wright (1980) diferenció tres diferentes modos de cortes de bermas e identificó niveles relativos de energía asociados con cada uno de estos mecanismos.

En pendiente, *playas reflejantes*, la erosión de bermas ocurre bajo condiciones de oleaje moderado.

En plano: *playas disipativas*, el corte de bermas es asociado con energía incidente de tormenta más alta produciendo oscilaciones del nivel del agua en la zona de rotura.

En *playas intermedias* la erosión de bermas puede ser resultado de ambos mecanismos descritos anteriormente.

## **Capítulo 5**

### ***Validación Experimental***

---

## 5. Validación Experimental

La observación visual de los modelos físicos de la ingeniería de costas es un aspecto importante de todo modelo en estudio, debido a que las observaciones aportan un entendimiento físico. De cualquier forma, la mayoría de los estudios de laboratorio pueden ser vagos y sin objetivo si no contamos con medios confiables para medir las características de los procesos hidrodinámicos y obtener respuestas del modelo. Solo con mediciones atinadas podemos usar los modelos físicos en el laboratorio para así respaldar teorías o resolver problemas de ingeniería que van más allá de nuestro entendimiento teórico.

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

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

### 5.1 Descripción del laboratorio

El laboratorio de ingeniería marítima, del Instituto de Ingeniería, UNAM, recientemente construido, pertenece al grupo de generadores de oleaje bidimensional, ocupa una superficie de 290 m<sup>2</sup>, de la cual 28.8 m<sup>2</sup> son ocupados por el canal de oleaje, 25.30 m<sup>2</sup> es ocupado por un depósito o cárcamo de agua utilizada

para llenar dicho canal, con una capacidad de 25.30 m<sup>3</sup> (25300 l.) aproximadamente. Además de una cabina de donde se controla la generación de oleaje y recolección de datos.



**Figura 5-1 - Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM**

### **5.1.1 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, además de una playa artificial de geometría parabólica.
  - Soporte: el canal es soportado por una estructura de acero, a una altura de 0.80m sobre el nivel del piso.

### **5.1.2. Especificaciones del generador de oleaje**

- Tipo: Pistón horizontal.
- Actuador: motor eléctrico de A.C.
- Desplazamiento total de la pala: 0.85m.
- Velocidad máxima de la pala: 0.81m/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.

### **5.1.3. Equipo de medición**

- Sensores de nivel: 9.
- Micro molinetes: 4 con sus respectivas interfaces.
- Velocímetro Acústico Doppler (ADV):1.
- Equipo de cómputo: se cuenta con dos equipos de cómputo, para la generación de la señal (oleaje) y adquisición de datos.
- Video cámaras 3



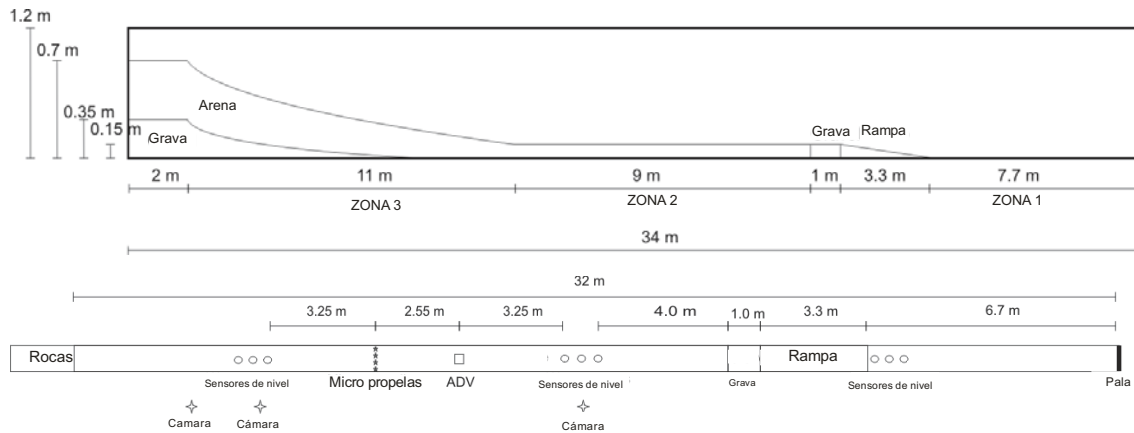
Figura 5-2 - Equipo de medición. Izquierda: micro propela, centro: ADV, Derecha: sensores de nivel

## ***Mediciones y análisis experimentales***

### **Descripción del experimento**

Los experimentos fueron realizados como ya se mencionó anteriormente, en el canal de oleaje descrito en el punto 5.2.1.

La sección de prueba consiste en una playa y una capa uniforme de arena de 15 cm de profundidad a todo lo ancho del canal y de 21 m. de largo. Para mantener la arena lejos de la pala generadora de oleaje en movimiento, se colocó una rampa con pendiente suave de 3.3 m de longitud y 15 cm de altura (pendiente es de 1/22). Para evitar que la rampa se moviera por la influencia de las olas, fue cargada con plomos. Dicha rampa se colocó a 6.7 m. de la pala generadora y para prevenir el transporte de sedimento hacia la rampa y el fondo del canal, se colocó una capa de grava entre la rampa y la playa de arena. Dicha rampa divide la ZONA 1 (cerca de la rampa, sin fondo móvil) de la ZONA 2 (playa con fondo móvil horizontal de 15 cm. de espesor)



**Figura 5-3 - Preparación del canal de oleaje usado en el estudio**

La playa con pendiente consiste en una capa de gaviones y grava, y sobre esta, una capa de 35 cm. de espesor de la misma arena artificial que en la zona de fondo horizontal. Ambas capas son separadas por una membrana plástica impermeable para minimizar la pérdida de arena hacia la capa inferior. La separación entre cada sensor de nivel es de 35 cm entre el sensor cercano a la pala y el del centro y 45 cm entre el del centro y el más alejado a la pala, esto para cada uno de los tres grupos de sensores.

Debido al pequeño tamaño de grano de la arena lo más conveniente para el experimento fue construir una playa disipativa de acuerdo con el perfil de Dean (EC. 3.1).

Con la finalidad de que el oleaje reflejado en la playa no fuera a ser transmitido nuevamente al llegara a la pala generadora y reflejarse a su vez sobre esta, lo cual no es acorde al fenómeno natural, el canal cuenta con un sistema dinámico de absorción del oleaje reflejado. Dicho sistema absorbe más del 90% de las olas reflejadas.

En total se realizaron veinticuatro experimentos, variando la profundidad, el periodo y la altura de ola, para analizar la evolución de los perfiles y la reflexión del oleaje que producen. Como se puede ver en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 - Características de los experimentos

<i>exp</i> #	<i>h</i> [cm]	<i>T</i> [s]	<i>H teórica</i> [cm]	<i>L</i> [m]
1	55	0.91	13	1.2
2	55	1.18	18	1.9
3	55	1.25	9	2.1
4	55	2.00	7	3.7
5	55	2.00	18	3.7
6	50	0.91	11	1.2
7	50	1.00	15.8	1.4
8	50	1.25	8	2.0
9	50	1.25	15.8	2.0
10	50	2.00	7	3.5
11	50	2.00	15.8	3.5
12	45	0.91	9	1.2
13	45	0.91	13.5	1.2
14	45	1.25	7	1.9
15	45	1.25	13.5	1.9
16	45	2.00	6	3.3
17	45	2.00	13.5	3.3
18	60	1.05	17	1.6
19	60	1.25	11	2.1
20	60	1.25	20	2.1
21	60	2.00	9	3.9
22	60	2.00	20	3.9

El material para la pendiente y el fondo plano fue arena artificial con diámetro  $D_{50} = 0.024\text{cm}$  y una densidad de  $\rho_s = 2.62\text{g/cm}^3$ . Las corridas experimentales fueron efectuadas a 4 diferentes profundidades sobre el fondo plano (ZONA 2),  $h = 0.30, 0.35, 0.40, \text{ y } 0.45$  m, tres diferentes periodos de ola,  $T = 0.91, 1.25, \text{ y } 2$  s; y diferentes alturas de ola. La evolución de los perfiles fue registrada usando video cámaras y fotografías durante los experimentos que cubrían dos horas de acción del oleaje.

## Mediciones

Para medir la reflexión de la playa se usaron los 9 sensores de nivel colocados a lo largo del canal de oleaje agrupados de tres en tres (un grupo en cada zona, ver Figura 5.3), siendo el sensor número 1 el más cercano a la pala generadora y el número 9 el más cercano al otro extremo del canal, sobre la zona de playa con pendiente. Estos sensores toman un dato del nivel del agua sobre ellos en cada paso

---

de tiempo (cada paso de tiempo dura 0.38 segundos) con lo que es posible conocer las alturas de ola a cada instante de las dos horas que duró cada experimento. Haciendo uso de la totalidad de estos datos (179,712) posteriormente se calculó la energía reflejada por la playa.

Para el caso de la evolución de los perfiles se registró su evolución con las cámaras de video. Haciendo uso de los videos, a partir de los cuales se pueden obtener fotografías de cada instante, se analizó posteriormente la evolución comparando el perfil inicial con el final.

## **Capítulo 6**

### ***Resultados***

## 6. Resultados

### 6.1 Clasificación de los perfiles

#### 6.1.1 Clasificación por el tipo de rotura

En la realización de cualquier experimento, se tienen dos tipos de variables las de control y las dependientes relacionadas entre sí mediante una función de transferencia, lo que permite determinar los parámetros de interés de forma directa o indirectamente. Para este caso el número de Iribarren (ec. 3.1) se empleará para determinar el tipo de rotura que se presenta en cada uno de los perfiles, (ver tabla 6.1).

Tabla 6.1 - Rango de valores del número de Iribarren para los diferentes 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	$I_r > 4.0$

Tabla 6.2 - Características de los experimentos y su respectivo número de Iribarren

<i>exp</i> #	<i>h</i> [cm]	<i>h f. móvil</i> [cm]	<i>T</i> [s]	<i>H teórica</i> [cm]	<i>H medida</i> [cm]	<i>L</i> [m]	<i>Ir</i> [1]
1	55	40	0.91	13	12.9	1.2	0.005
2	55	40	1.18	18	14.3	1.9	0.004
3	55	40	1.25	9	7.1	2.1	0.011
4	55	40	2.00	7	8.7	3.7	0.015
5	55	40	2.00	18	13.7	3.7	0.013
6	50	35	0.91	11	9.9	1.2	0.007
7	50	35	1.00	15.8	12.6	1.4	0.009
8	50	35	1.25	8	6.9	2.0	0.012
9	50	35	1.25	15.8	13.3	2.0	0.010
10	50	35	2.00	7	8.1	3.5	0.017
11	50	35	2.00	15.8	17.0	3.5	0.013
12	45	30	0.91	9	7.0	1.2	0.008
13	45	30	0.91	13.5	9.7	1.2	0.010
14	45	30	1.25	7	8.2	1.9	0.008
15	45	30	1.25	13.5	9.8	1.9	0.009
16	45	30	2.00	6	6.6	3.3	0.017
17	45	30	2.00	13.5	13.4	3.3	0.021
18	60	45	1.05	17	17.1	1.6	0.009
19	60	45	1.25	11	14.2	2.1	0.013
20	60	45	1.25	20	21.2	2.1	0.008
21	60	45	2.00	9	10.9	3.9	0.014
22	60	45	2.00	20	20.8	3.9	0.011

Debido a que el perfil de la playa se construyó con el perfil de Dean, el número de Iribarren fue menor a uno en todos los casos, por lo que la rotura fue de decrecimiento en todos los experimentos.

### 6.1.2 Clasificación según Short

Las playas pueden ser clasificadas usando tres parámetros: altura de rompiente ( $H_b$ ), periodo de la ola ( $T$ ) y tamaño de grano (el cual es definido por la velocidad de sedimentación  $W$ ). Estos parámetros son combinados en la ecuación adimensional de la velocidad de caída de Gourlay (1968, citado en Short, 1999).

$$\Omega = H_b / WT \quad (6.2)$$



Gourlay encontró que cuando  $\Omega < 1$  las playas de laboratorio tienden a ser peraltadas y estables; cuando  $1 < \Omega < 2$  la playa se erosiona, depositándose el sedimento en la cara frontal de esta.

Wright y Short (1984, citado en Short, 1999) adaptaron  $\Omega$  para usarse en playas naturales, encontraron que cuando  $\Omega < 1$ , las playas tienden a ser *reflejantes* (peraltadas y sin barras), cuando  $\Omega > 6$  tienden a ser *disipativas* (planas y con muchas barras), y cuando  $\Omega$  se encuentra entre los valores de 2 y 5 las playas son *intermedias*

Para encontrar la velocidad de sedimentación se hace uso del parámetro de sedimentación  $S_x$  :

$$S_x = \frac{D}{4\nu} \sqrt{(s-1)gD} \quad (6.3)$$

donde:

D es el diámetro del sedimento (0.024 cm.)

$\nu$  es la viscosidad cinemática del agua ( $0.000001 \text{ cm}^2 / \text{s}$ )

(s-1) es la densidad relativa de la arena (2.62)

g es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m} / \text{s}^2 = 981 \text{ cm} / \text{s}^2$ )

La velocidad de sedimentación está dada por el parámetro  $S_x$  que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 6.3 - Velocidad de sedimentación a partir del parámetro de Shields modificado

$S_x$	$W_f$
[1]	[cm./s]
0.4	0.086
0.8	0.172
1	0.2
1.5	0.26
2	0.32
2.5	0.38
3	0.415
3.5	0.455
4	0.5
4.5	0.53
5	0.56
6	0.615
7	0.68
8	0.715
9	7.6
10	0.8
15	0.94
20	1.04
25	1.12
30	1.185
35	1.25
40	1.31
45	1.35
50	1.385
60	1.445
70	1.5
80	1.54
90	1.58
100	1.61
150	1.73
200	1.77
250	1.795
300	1.815
10000	1.82

Con las propiedades de la arena, el agua y el lugar del experimento se obtiene el valor de  $S_x = 47124$ , pero como la gráfica asociada a la gráfica se vuelve asintótica se elige el valor superior de 10,000 con el que se tiene una velocidad de sedimentación (W) de 1.82 cm./s.

Obtenida la velocidad de sedimentación se clasifican los perfiles calculando  $\Omega$ , los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.4 - Valores del parámetro  $\Omega$  para los diferentes experimentos

<i>exp</i> #	<i>h</i> [cm]	<i>T</i> [s]	$H_B=0.8 h$ [cm]	$\Omega$ [1]
1	55	0.91	32.0	19.34
2	55	1.18	32.0	14.95
3	55	1.25	32.0	14.07
4	55	2.00	32.0	8.79
5	55	2.00	32.0	8.79
6	50	0.91	28.0	16.92
7	50	1.00	28.0	15.38
8	50	1.25	28.0	12.31
9	50	1.25	28.0	12.31
10	50	2.00	28.0	7.69
11	50	2.00	28.0	7.69
12	45	0.91	24.0	14.51
13	45	0.91	24.0	14.51
14	45	1.25	24.0	10.55
15	45	1.25	24.0	10.55
16	45	2.00	24.0	6.59
17	45	2.00	24.0	6.59
18	60	1.05	36.0	18.79
19	60	1.25	36.0	15.82
20	60	1.25	36.0	15.82
21	60	2.00	36.0	9.89
22	60	2.00	36.0	9.89

Tabla 6.5 - Clasificación de los perfiles en base al parámetro  $\Omega$

$\Omega$ [1]	Clasificación
< 1	Reflejante
2 a 5	Intermedia
> 6	Disipativa

Dado que el parámetro  $\Omega$  para todos los experimentos fue mayor a 6, se puede decir que el perfil de playa fue reflejante para todos los casos.

## 6.2 *Análisis de la Reflexión*

### **Separación de las ondas incidente y reflejada**

En la naturaleza, el oleaje es un movimiento caótico que se propaga en todas direcciones. El desarrollo de nuevos sistemas de simulación del oleaje en laboratorios tal y como se produce en la naturaleza lo pone de manifiesto. Su aparición por la década de los 70 plantea el problema de poder evaluar la energía reflejada por las paredes de un tanque o por la estructura ensayada.

Mansard y Funke, (1980, citado en Baquerizo, 1995), basándose en un trabajo de Marcou, (1969, citado en Baquerizo, 1995), utilizan una técnica de mínimos cuadrados para obtener las amplitudes complejas de las ondas incidente y reflejada que componen un tren que viaja en un fondo horizontal e incide de forma normal en la estructura. El método utiliza las series de superficie libre medidas en tres posiciones relativamente próximas unas a otras en la línea de propagación del oleaje. En la siguiente tabla se muestran los resultados de la separación del oleaje en incidente y reflejado en el perfil, así como el coeficiente de reflexión total que se calcula como el cociente de la altura cuadrática media reflejada entre la incidente, y además se muestra el número de Iribarren calculado con la altura cuadrática media incidente así como el tipo de rotura.

Tabla 6.6 - Resultados de la reflexión en el grupo de sensores pegados a la pala generadora (ZONA 1)

exp #	h [cm]	T [s]	H <sub>teórica</sub> [cm]	H <sub>medida</sub> [cm]	L [m]	Pala (ZONA 1)		Coef. Ref. Total
						H <sub>RMS i</sub> [cm]	H <sub>RMS r</sub> [cm]	
1	55	0.91	13.0	12.9	1.25	12	3	0.25
2	55	1.18	18.0	14.3	1.88	15	3	0.23
3	55	1.25	9.0	7.1	2.05	8	1	0.15
4	55	2.00	7.0	8.7	3.70	8	2	0.30
5	55	2.00	18.0	13.7	3.70	22	7	0.32
6	50	0.91	11.0	9.9	1.22	10	2	0.19
7	50	1.00	15.8	12.6	1.43	13	3	0.23
8	50	1.25	8.0	6.9	1.97	7	1	0.12
9	50	1.25	15.8	13.3	1.97	14	4	0.29
10	50	2.00	7.0	8.1	3.49	7	2	0.23
11	50	2.00	15.8	17.0	3.49	17	4	0.26
12	45	0.91	9.0	7.0	1.19	8	2	0.23
13	45	0.91	13.5	9.7	1.19	11	3	0.25
14	45	1.25	7.0	8.2	1.87	6	1	0.14
15	45	1.25	13.5	9.8	1.87	12	3	0.25
16	45	2.00	6.0	6.6	3.26	6	2	0.30
17	45	2.00	13.5	13.4	3.26	14	5	0.32
18	60	1.05	17.0	17.1	1.63	14	2	0.16
19	60	1.25	11.0	14.2	2.12	10	1	0.13
20	60	1.25	20.0	21.2	2.12	17	5	0.27
21	60	2.00	9.0	10.9	3.88	11	3	0.31
22	60	2.00	20.0	20.8	3.88	20	5	0.25

Tabla 6.7 - Resultados de la reflexión en el fondo plano (ZONA 2)

<i>exp</i> #	<i>h</i> [cm]	<i>T</i> [s]	<i>H</i> <sub>teórica</sub> [cm]	<i>H</i> <sub>medida</sub> [cm]	<i>L</i> [m]	Fondo Plano (ZONA 2)		<i>Coef.</i> <i>Ref. Total</i>
						<i>H</i> <sub>RMS i</sub> [cm]	<i>H</i> <sub>RMS r</sub> [cm]	
1	55	0.91	13.0	12.9	1.25	11	3	0.31
2	55	1.18	18.0	14.3	1.88	13	5	0.36
3	55	1.25	9.0	7.1	2.05	7	2	0.28
4	55	2.00	7.0	8.7	3.70	8	4	0.44
5	55	2.00	18.0	13.7	3.70	19	7	0.37
6	50	0.91	11.0	9.9	1.22	9	2	0.26
7	50	1.00	15.8	12.6	1.43	11	3	0.28
8	50	1.25	8.0	6.9	1.97	6	1	0.26
9	50	1.25	15.8	13.3	1.97	11	3	0.30
10	50	2.00	7.0	8.1	3.49	7	3	0.43
11	50	2.00	15.8	17.0	3.49	15	5	0.36
12	45	0.91	9.0	7.0	1.19	7	2	0.35
13	45	0.91	13.5	9.7	1.19	9	4	0.42
14	45	1.25	7.0	8.2	1.87	6	1	0.24
15	45	1.25	13.5	9.8	1.87	9	3	0.30
16	45	2.00	6.0	6.6	3.26	6	3	0.43
17	45	2.00	13.5	13.4	3.26	13	4	0.35
18	60	1.05	17.0	17.1	1.63	12	3	0.22
19	60	1.25	11.0	14.2	2.12	13	1	0.10
20	60	1.25	20.0	21.2	2.12	15	4	0.25
21	60	2.00	9.0	10.9	3.88	11	2	0.23
22	60	2.00	20.0	20.8	3.88	19	5	0.27

Tabla 6.8 - Resultados de la reflexión en el perfil de playa (ZONA 3)

Exp.	h	T	H <sub>teórica</sub>	H <sub>medida</sub>	L	Playa (ZONA 3)		Coef. Ref. Total	I <sub>r</sub>
						H <sub>RMS i</sub>	H <sub>RMS r</sub>		
#	[cm]	[s]	[cm]	[cm]	[m]	[cm.]	[cm]		
1	55	0.91	13.0	12.9	1.25	8.9	4.1	0.46	0.005
2	55	1.18	18.0	14.3	1.88	9.5	4.3	0.45	0.004
3	55	1.25	9.0	7.1	2.05	6.4	2.5	0.39	0.011
4	55	2.00	7.0	8.7	3.70	8.7	4.4	0.51	0.015
5	55	2.00	18.0	13.7	3.70	12.8	6.2	0.48	0.013
6	50	0.91	11.0	9.9	1.22	7.9	3.7	0.47	0.007
7	50	1.00	15.8	12.6	1.43	6.8	3.3	0.48	0.009
8	50	1.25	8.0	6.9	1.97	5.1	2.0	0.40	0.012
9	50	1.25	15.8	13.3	1.97	7.6	3.6	0.48	0.010
10	50	2.00	7.0	8.1	3.49	7.1	3.2	0.46	0.017
11	50	2.00	15.8	17.0	3.49	12.1	5.4	0.45	0.013
12	45	0.91	9.0	7.0	1.19	7.3	4.9	0.67	0.008
13	45	0.91	13.5	9.7	1.19	6.8	3.7	0.55	0.010
14	45	1.25	7.0	8.2	1.87	5.4	1.9	0.36	0.008
15	45	1.25	13.5	9.8	1.87	8.2	2.8	0.35	0.009
16	45	2.00	6.0	6.6	3.26	6.6	3.0	0.46	0.017
17	45	2.00	13.5	13.4	3.26	9.0	3.8	0.43	0.021
18	60	1.05	17.0	17.1	1.63	8.6	2.9	0.34	0.009
19	60	1.25	11.0	14.2	2.12	7.9	2.3	0.29	0.013
20	60	1.25	20.0	21.2	2.12	12.6	5.6	0.45	0.008
21	60	2.00	9.0	10.9	3.88	10.6	5.0	0.48	0.014
22	60	2.00	20.0	20.8	3.88	15.7	7.3	0.47	0.011

La rotura en todos los experimentos fue por descretamiento, lo cual se confirma por el bajo Número de Iribarren.

### Interpretación de resultados

Dado que la energía total reflejada, por una playa, decrece al aumentar la altura de ola o la frecuencia y crece al aumentar la pendiente. El coeficiente de reflexión representa la fracción de energía incidente que es devuelta hacia el mar y dicha energía tiene una influencia apreciable sobre los procesos morfodinámicos de las playas. La siguiente tabla muestra los resultados de la reflexión en cada una de las tres zonas para cada experimento.

Tabla 6.9 - Resultados de la reflexión por zona para cada experimento)

exp #	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
	$H_{RMS i}$ [cm]	$H_{RMS i}$ [cm]	$H_{RMS i}$ [cm]	$H_{RMS r}$ [cm]	$H_{RMS r}$ [cm]	$H_{RMS r}$ [cm]
1	11.7	11.1	8.9	2.9	3.5	4.1
2	15.0	12.6	9.5	3.4	4.5	4.3
3	8.4	7.1	6.5	1.3	2.0	2.5
4	7.8	8.2	8.7	2.4	3.6	4.5
5	22.0	19.2	12.8	7.1	7.2	6.2
6	10.3	9.2	7.9	2.0	2.4	3.7
7	13.0	10.7	6.8	3.0	3.0	3.3
8	6.8	5.7	5.1	0.8	1.5	2.0
9	13.6	11.1	7.7	3.9	3.3	3.7
10	7.1	7.3	7.2	1.6	3.1	3.3
11	16.6	15.2	12.1	4.3	5.5	5.4
12	8.0	6.8	7.3	1.8	2.4	4.9
13	10.9	9.5	6.8	2.8	3.9	3.8
14	6.3	6.0	5.5	0.9	1.4	1.9
15	11.8	9.3	8.3	3.0	2.8	2.9
16	6.3	6.4	6.6	1.9	2.7	3.1
17	14.1	12.6	9.1	4.5	4.4	3.9
18	13.6	11.8	8.6	2.1	2.6	2.9
19	9.6	12.6	8.0	1.3	1.3	2.4
20	17.3	15.4	12.6	4.6	3.9	5.6
21	10.9	10.6	10.6	3.4	2.4	5.0
22	19.9	19.4	15.7	5.0	5.3	7.4

Al hacer comparaciones entre los coeficientes de reflexión en la Zona 3 y los números de Iribarren para cada experimento se tiene lo siguiente:



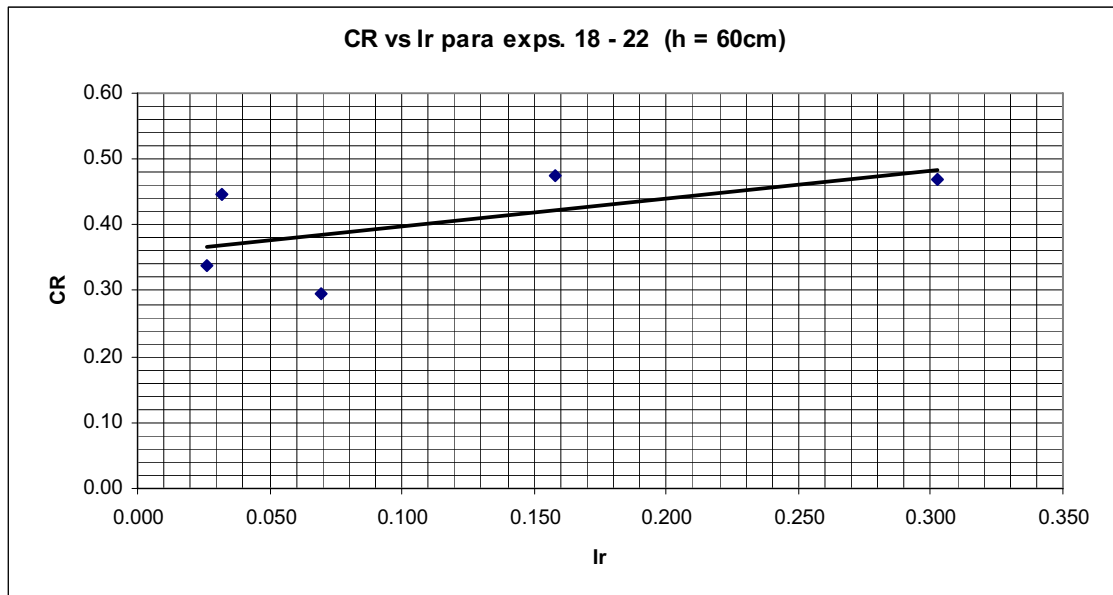


Figura 6-1 - CR vs. Ir para exp. 18 a 22

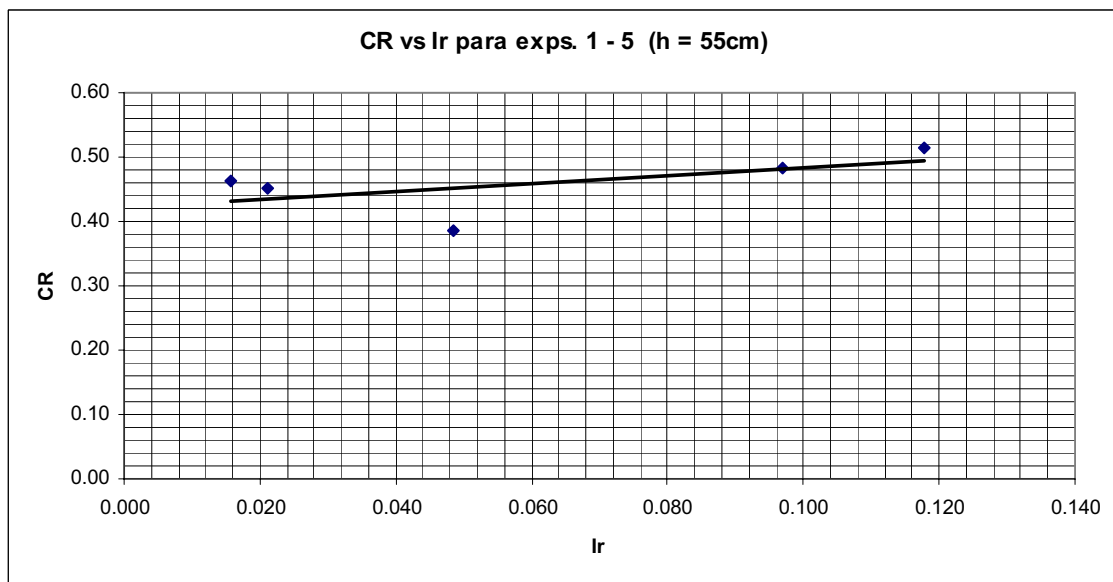
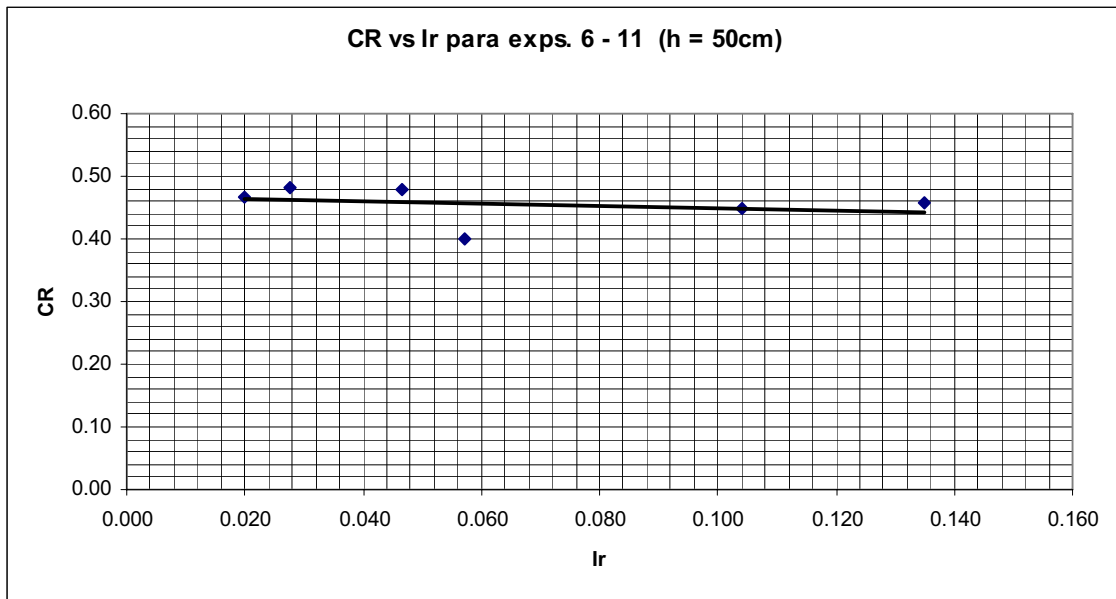
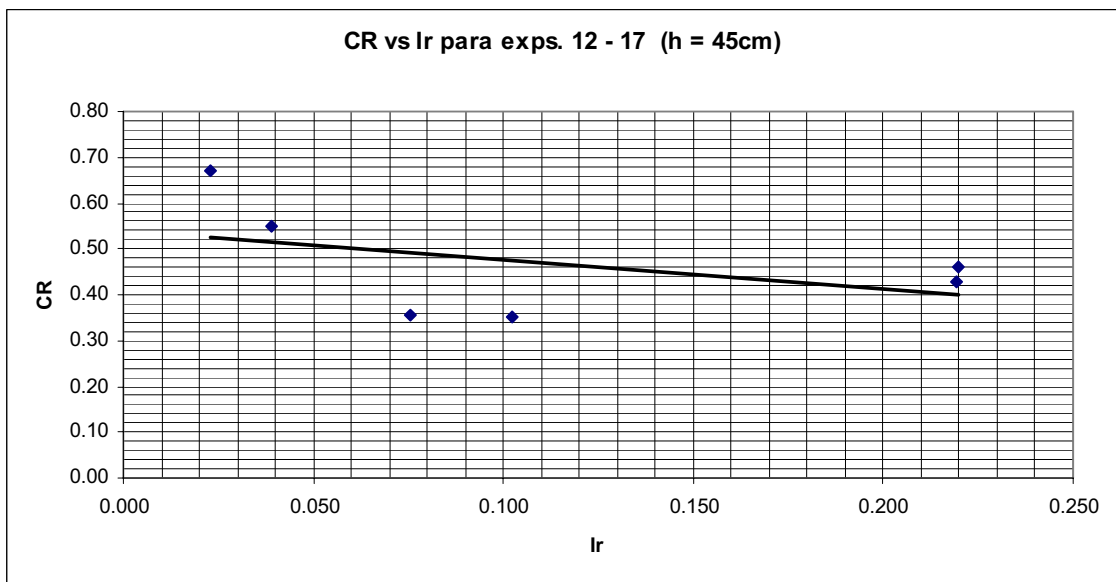


Figura 6-2 - CR vs. Ir para exp. 1 a 5

Para este par de gráficas la tendencia es la esperada, se cumple que el número de Iribarren es directamente proporcional al periodo e inversamente proporcional a la altura de ola.



**Figura 6-3 - CR vs. Ir para exp. 6 a 11**



**Figura 6-4 - CR vs. Ir para exp.126 a 17**

Para este par de gráficas pasa lo contrario que con las dos anteriores, el número de Iribarren es inversamente proporcional al periodo y directamente proporcional a la altura de ola.

La diferencia entre estos pares de gráficas es la profundidad de cada experimento, lo somero de los experimentos parece hacer que las relaciones entre la reflexión y el número de Iribarren no se cumplan. Para pendientes pequeñas, el número de Iribarren no es un parámetro muy adecuado para evaluar la reflexión.

Dicho con otras palabras, para valores bajos del número de Iribarren, la reflexión no parece ser siempre proporcional al periodo e inversamente proporcional a la altura de ola.

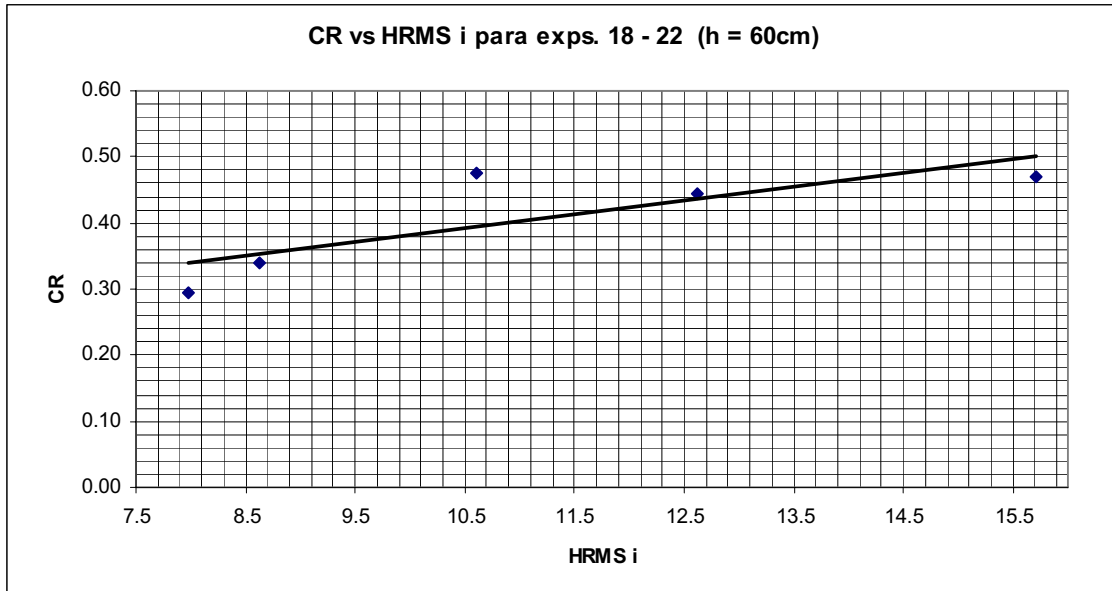


Figura 6-5 - CR vs.  $H_{RMS\ i}$  para exp.18 a 22

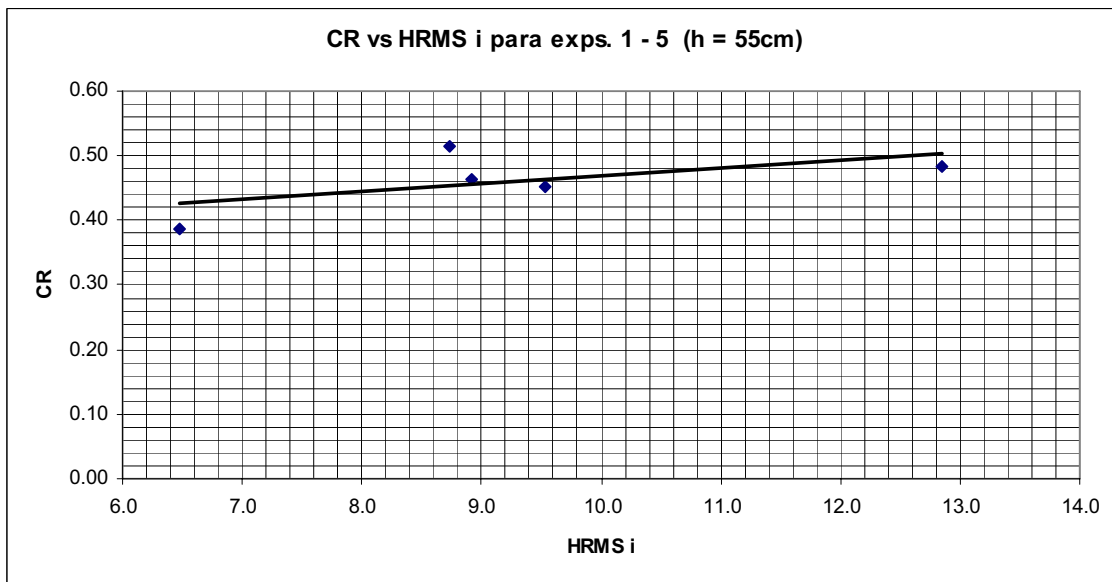
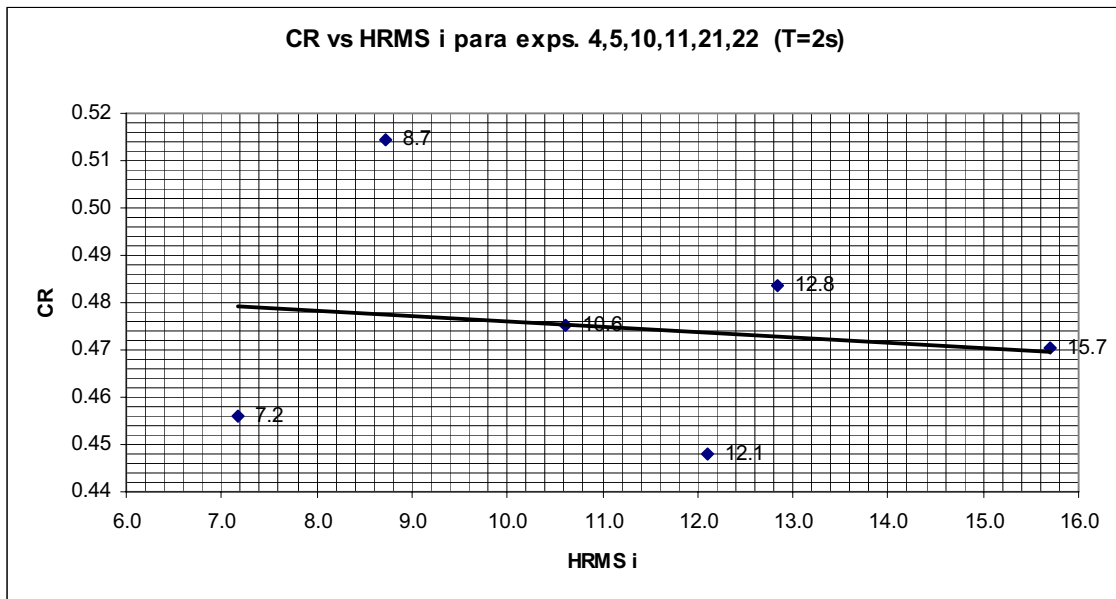
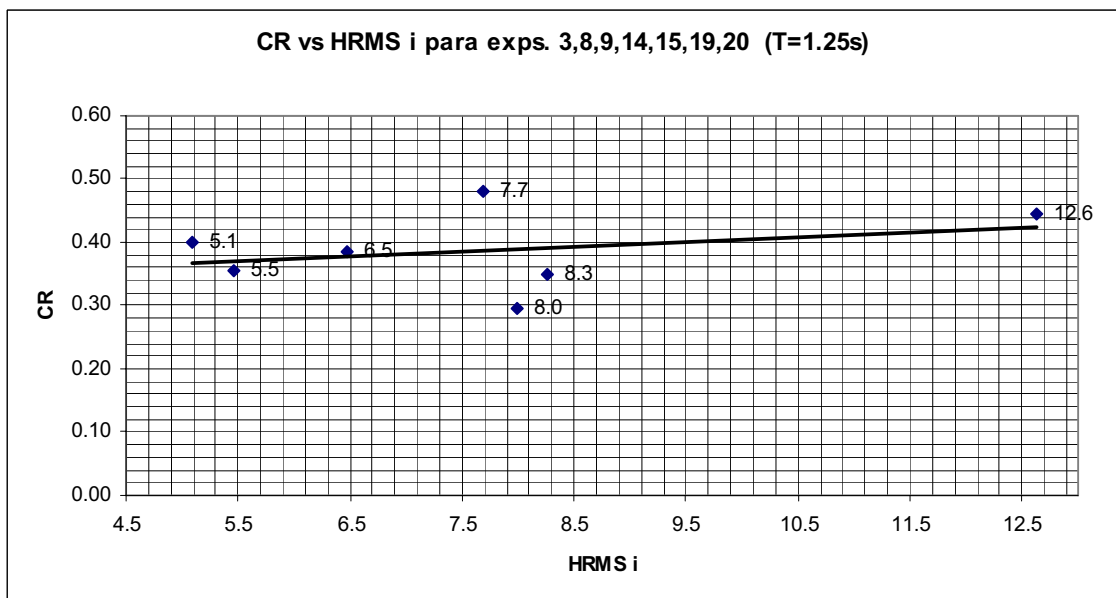


Figura 6-6 - CR vs.  $H_{RMS\ i}$  para exp.1 a 5

Las gráficas anteriores son de experimentos con profundidad relativamente grande, para que coincidieran con las graficas 6.1 y 6.2 debería disminuir H para que aumentara Ir (y a su vez CR), pero no es el caso.



**Figura 6-7 - CR vs.  $H_{RMS}$  i para exp.4,5,10,11,21,22**



**Figura 6-8 - CR vs.  $H_{RMS}$  i para exp.3,8,9,14,15,19,20**

La figura 6.7 muestra experimentos con periodos relativamente grandes (2 s.) y parece que CR decrece conforme H aumenta, pero la tendencia es muy débil y no concluyente. Para periodos relativamente pequeños (figura 6.8), la tendencia es inversa.

Por lo tanto, para números de Iribarren pequeños (es el caso para todos los experimentos) parece que la intensidad de la reflexión no es inversamente proporcional a la altura de ola, como lo sugiere la fórmula.

### ***Evolución de los perfiles***

Para el estudio de la evolución de los perfiles de playa se registraron las variaciones en la altura de la arena en la sección del canal con fondo plano, esto comparando el perfil inicial que se registró antes de someterlo a la acción del oleaje y otro al finalizar el experimento.

A manera de comparación, se agruparon 10 experimentos en parejas tomando como criterio la altura de ola medida en tres casos (parejas 1-17, 2-19 y 13-15) y el periodo en los dos casos restantes (parejas 14-18 y 16-22). Las características se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6.10 - Características de los experimentos de evolución**

<i>Exp</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>T</i>	<i>H<sub>teórica</sub></i>	<i>H<sub>medida</sub></i>	<i>L</i>	<i>H<sub>RMS i</sub></i>	<i>H<sub>RMS r</sub></i>	<i>Coef. Ref.</i>	<i>Ir</i>
#	[cm]	[s <sup>-1</sup> ]	[s]	[cm]	[cm]	[m]	[cm.]	[cm]	Total	
1	55	1.1	0.91	13	12.9	1.25	8.9	4.1	0.46	0.005
17	45	0.5	2	13.5	13.4	3.26	9	3.8	0.43	0.021
2	55	0.85	1.18	18	14.3	1.88	9.5	4.3	0.45	0.004
19	60	0.8	1.25	11	14.2	2.12	7.9	2.3	0.29	0.013
14	45	0.8	1.25	7	8.2	1.87	5.4	1.9	0.36	0.008
18	60	0.95	1.05	17	17.1	1.63	8.6	2.9	0.34	0.009
13	45	1.1	0.91	13.5	9.7	1.19	6.8	3.7	0.55	0.01
15	45	0.8	1.25	13.5	9.8	1.87	8.2	2.8	0.35	0.009
16	45	0.5	2	6	6.6	3.26	6.6	3	0.46	0.017
22	60	0.5	2	20	20.8	3.88	15.7	7.3	0.47	0.011

Las variaciones de los perfiles se muestran en las siguientes gráficas que muestran el perfil inicial y la diferencia de alturas de arena (perfil final – perfil inicial) de cada experimento.

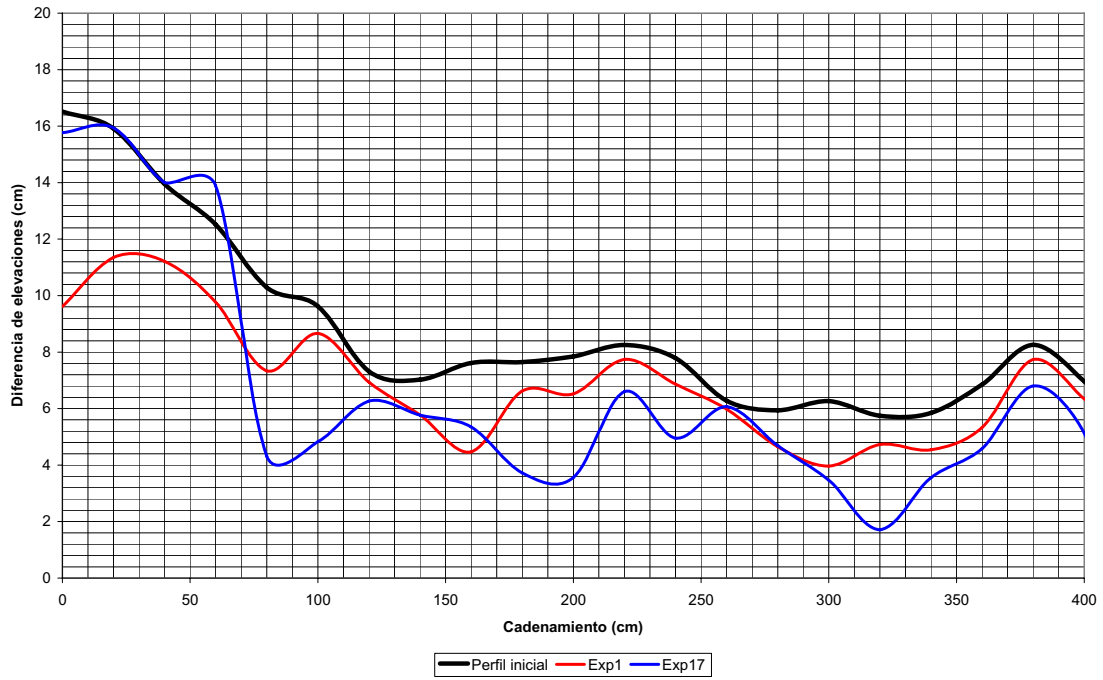


Figura 6-9 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 1 y 17

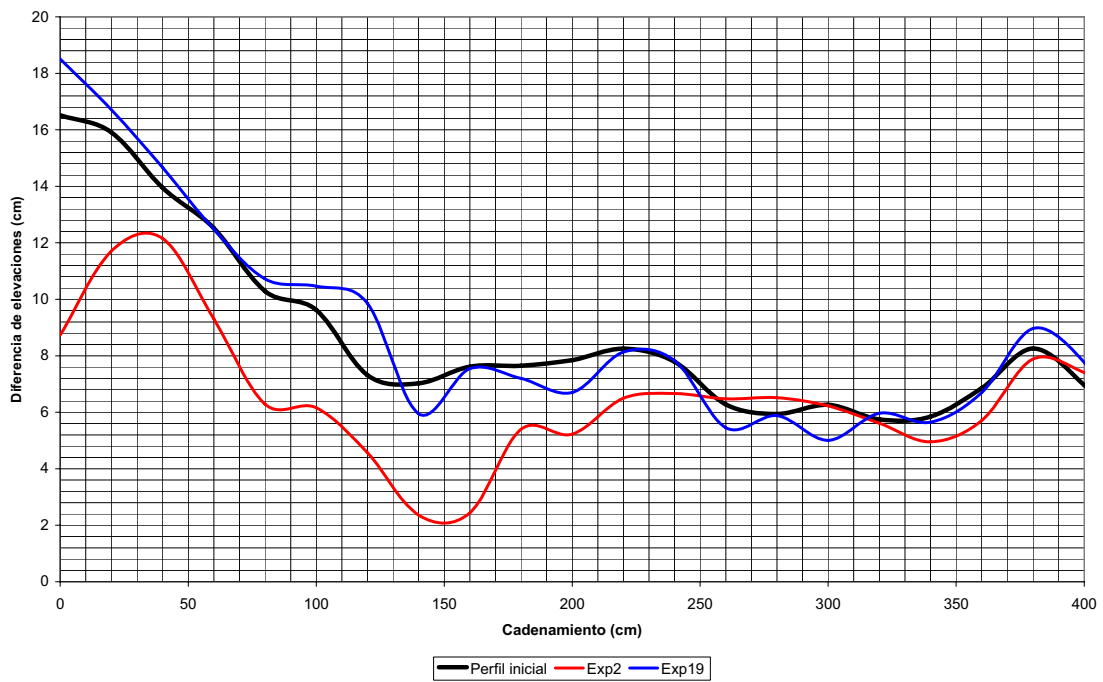


Figura 6-10 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 2 y 19

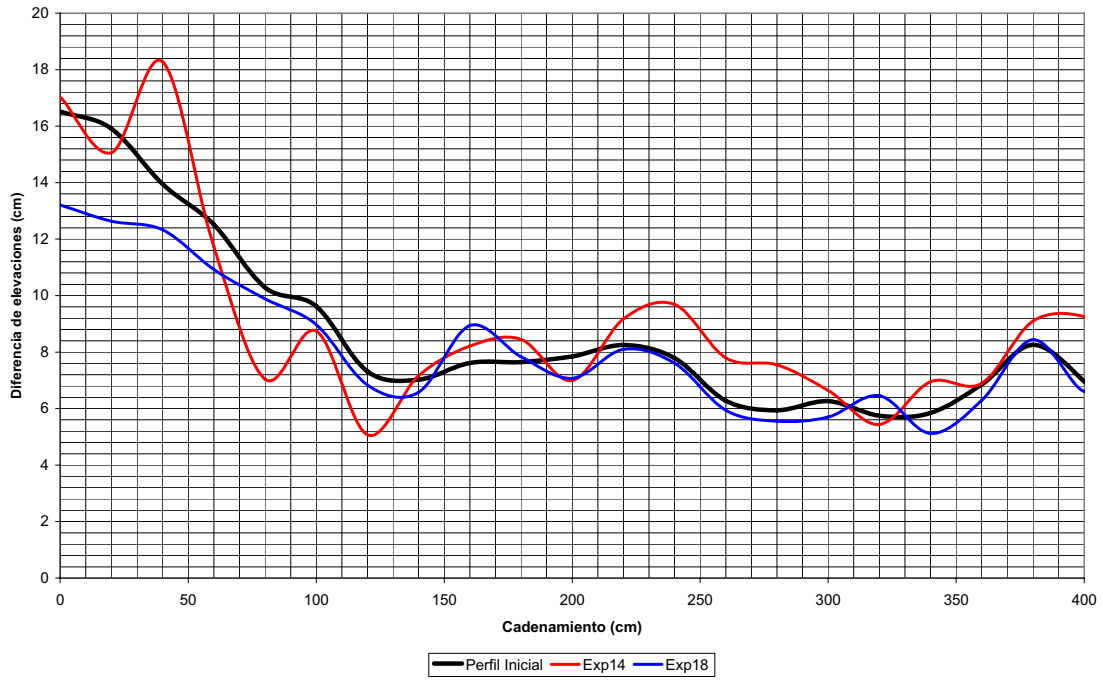


Figura 6-11 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 14 y 18

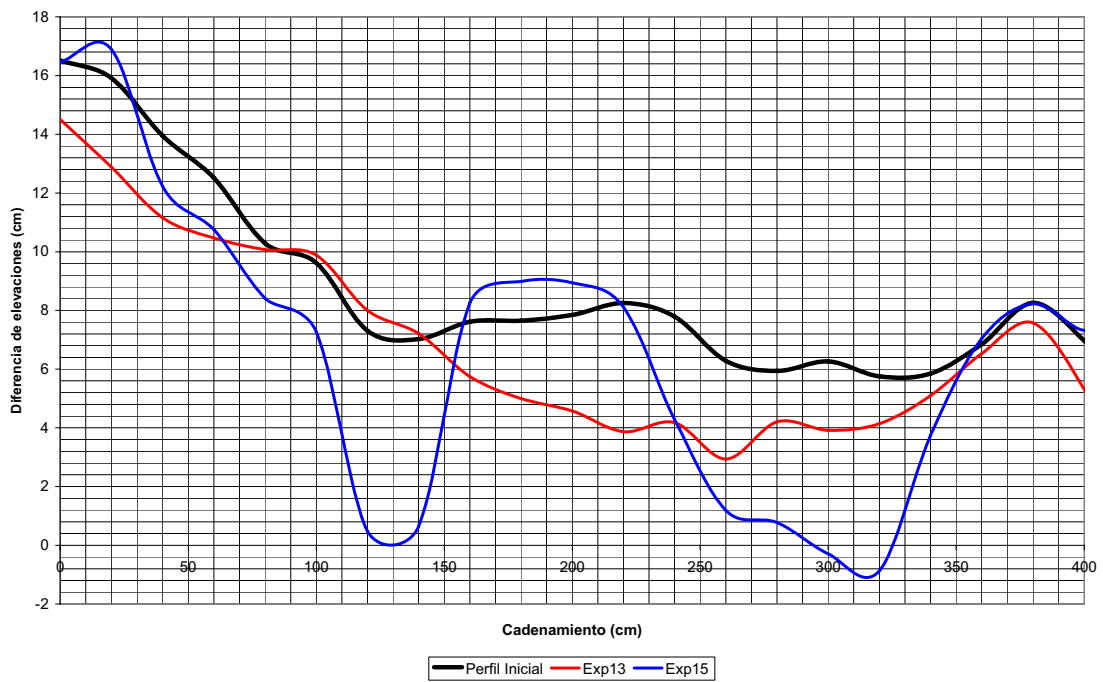
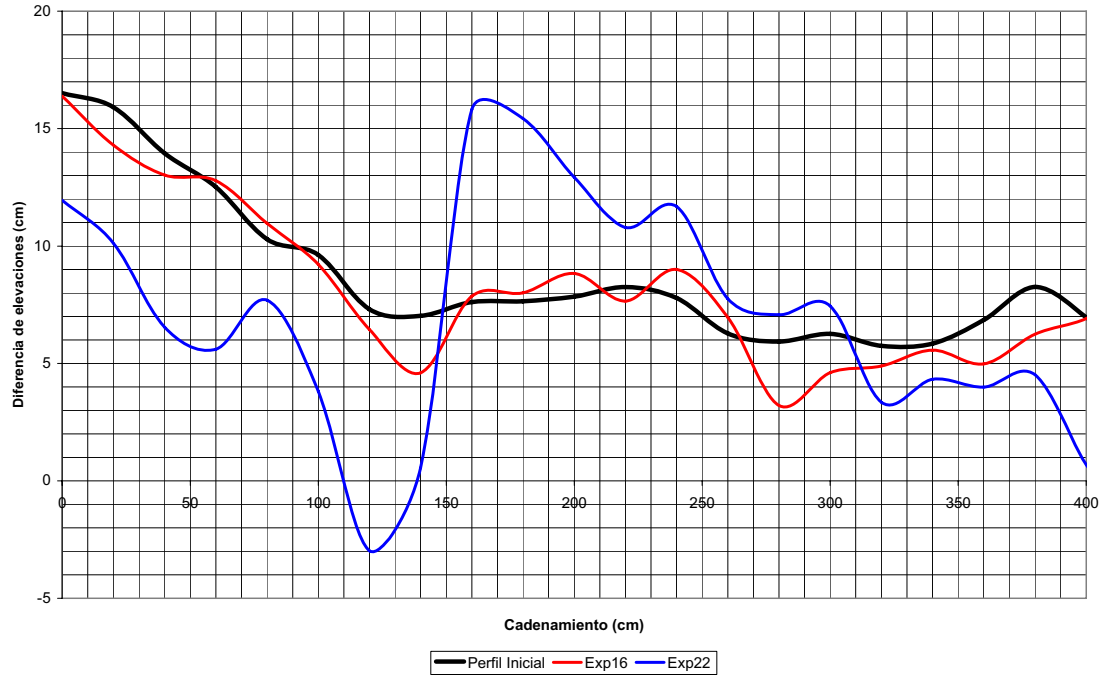


Figura 6-12 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 13 y 15



**Figura 6-13 - Variaciones en los perfiles de los experimentos 16 y 22**

En las gráficas anteriores mientras más se alejan las curvas de los experimentos de la curva del perfil inicial, hay una mayor variación entre el perfil inicial y final.

Los experimentos en los que se presentó la mayor variación en los perfiles fueron los experimentos 2, 15 y 22 con las siguientes características:

**Tabla 6.11 - Características de los experimentos con mayor deformación**

Exp #	$h$ [cm]	$f$ [ $s^{-1}$ ]	$T$ [s]	$H_{teórica}$ [cm]	$H_{medida}$ [cm]	$L$ [m]	$H_{RMS i}$ [cm.]	$H_{RMS r}$ [cm]	Coef. Ref. Total	$Ir$
2	55	0.85	1.18	18	14.3	1.88	9.5	4.3	0.45	0.004
15	45	0.8	1.25	13.5	9.8	1.87	8.2	2.8	0.35	0.009
22	60	0.5	2	20	20.8	3.88	15.7	7.3	0.47	0.011

Al comparar estos experimentos con su respectiva pareja (Exp. 19, 13 y 16, respectivamente) puede observarse que el parámetro que es considerablemente mayor en los tres casos es la altura de ola incidente ( $H_{RMS i}$ ). Por lo mismo estos experimentos tienen un número de Iribarren menor



---

Por lo tanto, para experimentos con características similares podemos decir que los resultados sugieren que a un menor número de Iribarren, hay mayor afectación morfológica del perfil.

## **Capítulo 7**

### ***Conclusiones***

---

## 7. Conclusiones

En la naturaleza existen sistemas de fenómenos físicos que constan de muchas y muy variadas características. El objetivo de este trabajo fue el de aislar características específicas de uno de esos fenómenos para analizarlas, en otras palabras, analizar la reflexión del oleaje y la evolución de los perfiles de playa para oleaje regular, unidireccional y con pendientes de los perfiles de playa suaves.

A manera de lograr el objetivo se montaron experimentos en un canal de oleaje artificial el cual se dividió en dos secciones las cuales se asemejaban a las de un sistema físico natural: aguas someras con fondo plano formado por arena (ZONA 2) y la playa con pendiente suave (ZONA 3). La ZONA 1, sin fondo móvil, se formó entre la pala generadora de oleaje y el principio de la ZONA 2. Entre cada experimento se variaron las características del oleaje (altura de ola, periodo, profundidad, etc.) poder analizar algunos de los diversos casos que se pueden presentar. Este análisis fue realizado al medir la altura de los trenes de oleaje de los experimentos, así como la variación de los perfiles iniciales y finales.

Los datos que se obtuvieron de los experimentos arrojaron resultados que en principio no parecían concluyentes, pero en realidad, lo que se estaba encontrando es que el principal parámetro para evaluar el tipo de rotura no nos permite evaluar la reflexión adecuadamente cuando la pendiente de la playa es pequeña.

Por otro lado los datos adquiridos en los experimentos de evolución de perfiles nos confirman algo que se puede observar fácilmente en la naturaleza. Cuando en una playa llega a presentarse oleaje extraordinario (de altura de ola mayor a la habitual) la playa cambia de forma como un mecanismo natural de defensa de la costa, es por eso que mientras más crece la altura de ola, son mayores las deformaciones en la playa.

De acuerdo al análisis de resultados, las conclusiones más relevantes de este estudio fueron:

- El número Iribarren no es un parámetro muy adecuado para evaluar la reflexión cuando la pendiente de la playa es pequeña. Dicho con otras palabras, para valores bajos del número de Iribarren, la reflexión no parece ser siempre proporcional al periodo e inversamente proporcional a la altura de ola.
- Los resultados sugieren que la deformación de los perfiles es proporcional a la altura de ola incidente, y en general inversamente proporcional al número de Iribarren

La importancia de los estudios de este tipo es la de mejorar el entendimiento de la física costera y el transporte de sedimentos en playas, el cual es importante para el equilibrio y desarrollo de las zonas costeras. Además mediante la comprensión de este tipo de fenómenos, seremos capaces de idear mejores formas para proteger nuestras costas como el diseño de estructuras más seguras, puertos más eficientes y lugares de esparcimiento más agradables para la gente.

## ***Bibliografía***

---

## 8. Bibliografía

1. Baquerizo, A. (1995). *“Reflexión del oleaje en playas”*. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.
2. Buyck, S. C. P. (2005) *“Wave – generated bedforms”*. Tesis de Licenciatura, Instituto de Ingeniería UNAM, México, University of Twente, The Netherlands.
3. Hughes, S. (1993). *“Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering”*. Coastal Engineering Research Center Waterways Experiment Station. USA.
4. Komar, P. (1998) *“Beach Processes and Sedimentation”* Second Edition. College of Oceanic & Atmospheric Sciences. Oregon State University.
5. Miche (1951) (citado en Baquerizo A. (1995))
6. Pedrozo, D. (2006). *“Caracterización de la rompiente en medios disipativos”*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.
7. Quiñones, J. L. (2004). *“Análisis de ondas y reflexión en laboratorio”*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.
8. Short, A. (1999). *“Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics”* Coastal Studies Unit, School of Geosciences, University of Sydney, Australia.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO